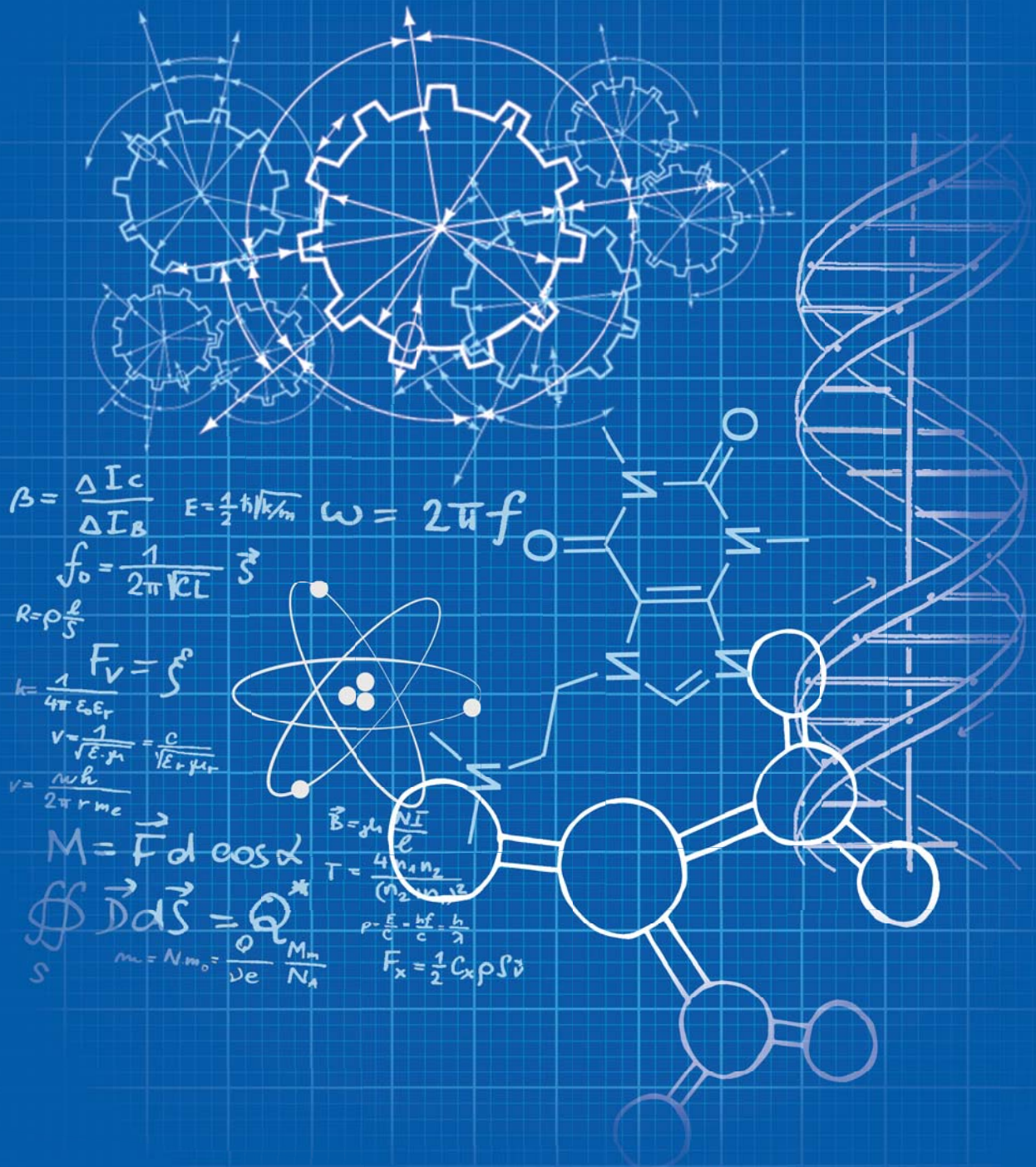




JIENS

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi



**JOURNAL OF INNOVATIVE ENGINEERING
AND NATURAL SCIENCE**

**YENİLİKÇİ MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ
DERGİSİ**

e-ISSN: 2791-7630

Yalova – Turkey

<i>Year / Yıl</i>	<i>Volume / Cilt</i>	<i>Issue / Sayı</i>
2025	5	1



JIENS

Journal of Innovative Engineering and Natural Science
Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi

Journal Cover Design / Dergi Kapak Tasarımı: İdris Karagöz

Journal Cover Artwork / Dergi Kapak Resmi: Fatma Aleyna Ceylan



Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>



Product Information / Ürün Bilgisi

Publisher
Yayıncı

İdris Karagöz

Owner
Sahibi

İdris Karagöz

Editor-in-Chief
Baş Editör

İdris Karagöz

Publishing Manager
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

İdris Karagöz

e-ISSN Number
e-ISSN Numarası

2791-7630

Web Page
Web Sayfası

<https://jiens.org>

Date of Online Publication
Online Basım Tarihi

31.01.2025

Language
Dili

English / Turkish
İngilizce / Türkçe

Frequency
Yayın Aralığı

Published two times in a year
Yılda iki kere yayınlanır

Type of Publication
Yayın Türü

Periodical
Sürekli yayın

Abstracted and indexed in
Tarandığı ve Özetlendiği Dizinler

Telephone
Telefon

+90 (226) 815 64 09

Fax
Faks

+90 (226) 815 54 00

E-mail
E-posta

jiens.info@gmail.com

Correspondence Adress
Yazışma Adresi

Yalova University Faculty of Engineering, Yalova University
Central Campus, On the Çınarcık Road 77200 Yalova, Turkey

*Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi
Merkez Yerleşkesi, Çınarcık Yolu Üzeri 77200 Yalova, Türkiye*



Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>



Editor-in-Chief / Baş Editör

Assoc. Prof. Dr. İdris Karagöz (Yalova University, Turkey)

Associate Editors / Yardımcı Editörler

Prof. Dr. Mohammad Jawaid (United Arab Emirates University, BAE)

Prof. Dr. Mohammad Nasef (University of Technology, Malaysia)

Prof. Dr. Zakaria Boumerzoug (University of Biskra, Algeria)

Prof. Dr. Gürel Çam (İskenderun Technical University, Turkey)

Prof. Dr. Yahya Bozkurt (Marmara University, Turkey)

Prof. Dr. Ayşe Bedeloğlu (Bursa Technical University, Turkey)

Prof. Dr. Aslıhan Sezgin (Amasya University, Turkey)

Assoc. Prof. Dr. Ilda Kazani (Polytechnic University of Tirana, Albania)

Assoc. Prof. Dr. Yasemin Balçık Tamer (Yalova University, Turkey)

Assoc. Prof. Dr. Gökhan Açık (Trakya University, Turkey)

Language Editors / Dil Editörleri

Prof. Dr. Sinan Şen (Yalova University, Turkey)

Prof. Dr. Sunay Türkdoğan (Yalova University, Turkey)

Assoc. Prof. Dr. Gökhan Açık (Trakya University, Turkey)

Asst. Prof. Dr. Seda Bekin Açar (Yalova University, Turkey)

Editorial Board / Alan Editörleri ve Yayın Kurulu

Prof. Dr. Mohammad Nasef (University of Technology, Malaysia)

Prof. Dr. Ramzi Khiari (Université Grenoble Alpes, France)

Prof. Dr. Islam Shyha (Edinburgh Napier University, United Kingdom)

Prof. Dr. Sabit Adanur (Auburn University, USA)

Prof. Dr. Edin Dolićanin (State University of Novi Pazar, Serbia)



Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>



- Prof. Dr. Emel Taban (Kocaeli University, Turkey)
- Prof. Dr. Salih Yazıcıoğlu (Gazi University, Turkey)
- Prof. Dr. Sinan Şen (Yalova University, Turkey)
- Prof. Dr. Naci Genç (Hoca Ahmet Yesevi International Turkish-Kazakh University, Kazakhstan)
- Prof. Dr. Eyüp Debik (Yıldız Technical University, Turkey)
- Prof. Dr. Figen Beyhan (Gazi University, Turkey)
- Prof. Dr. Melda Altıkatoğlu Yapaöz (Yıldız Technical University, Turkey)
- Prof. Dr. Halil İbrahim Kurt (Samsun University, Turkey)
- Prof. Dr. Sunay Türkddoğan (Yalova University, Turkey)
- Prof. Dr. Mehmet Büyükyıldız (Bursa Technical University, Turkey)
- Prof. Dr. Mustafa Çakır (Marmara University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Ürkiye Akar Tarım (Bursa Uludağ University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Yeşim Müge Şahin (Arel University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Seyedmansour Bidoki (Yazd University, Iran)
- Assoc. Prof. Dr. İlyas Kartal (Marmara University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. İsrail Küçük (Gebze Technical University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Gökhan Açık (Trakya University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Mehmet Arif Kaya (Yalova University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Yasemin Balçık Tamer (Yalova University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Mithat Çelebi (Yalova University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Uğur Gürol (Istanbul Gedik University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Ömer Yunus Gümüş (Bursa Technical University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Fuat Kosanoğlu (Istanbul Technical University, Turkey)
- Assoc. Prof. Dr. Mahmut Yıldız (Gebze Teknik University, Turkey)
- Asst. Prof. Dr. Hayri Sezer (Georgia Southern University, USA)
- Asst. Prof. Dr. Raheem Al-Sabur (University of Basrah, Iraq)



Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>



Asst. Prof. Dr. Hasan Sesli (Yalova University, Turkey)

Asst. Prof. Dr. Seda Bekin Açar (Yalova University, Turkey)

Asst. Prof. Dr. Muhammet Çelik (Yalova University, Turkey)

Dr. Mohammadreza Naeimirad (Senbis Polymer, Netherlands)

Advisory Board / Danışma Kurulu

Prof. Dr. Seeram Ramakrishna (National University of Singapore, Singapore)

Prof. Dr. Serdar Salman (National Defence University, Turkey)

Prof. Dr. Fehim Fındık (Sakarya University of Applied Sciences, Turkey)

Prof. Dr. Nizamettin Kahraman (Karabük University, Turkey)

Secretary / Sekreter

Aysu Çavuşoğlu (Institute of Graduate Studies, Yalova University, Turkey)

Tuana Orhun (Yalova University, Turkey)



Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>



From the Editors

Dear Readers,

We are delighted to share with you the **January 2025 issue (Vol. 5, Issue 1)** of the **Journal of Innovative Engineering and Natural Science**. This special issue features a selection of outstanding studies representing innovative approaches in the fields of engineering and natural sciences.

This issue includes works that address contemporary scientific challenges, explore the application of new technologies, and promote interdisciplinary collaboration. Each article not only provides valuable insights in its respective field but also aims to inspire future research endeavors.

On this occasion, I would like to extend my heartfelt gratitude to all our authors, reviewers, and editorial board members who have greatly contributed to the success of our journal. Thanks to your dedicated efforts, our journal continues to uphold its commitment to scientific excellence.

I hope that our January 2025 issue opens new horizons for you, our esteemed readers, and further enhances your scientific contributions. Thank you for your interest and support, and we look forward to connecting with you in our future issues.

Best regards,

İdris Karagöz



Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>



Editörden

Değerli Okuyucular,

Sizlerle **Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi'nin Ocak 2025 sayısını (Cilt 5, Sayı 1)** paylaşmaktan büyük bir mutluluk duyuyoruz. Bu özel sayımızda, mühendislik ve doğa bilimleri alanındaki yenilikçi yaklaşımları temsil eden seçkin çalışmalara yer verdik.

Dergimizin bu sayısı, araştırmacıların güncel bilimsel sorunlara çözüm arayışlarını, yeni teknolojilerin uygulanmasını ve disiplinler arası iş birliğini teşvik eden çalışmaları içermektedir. Her bir makale, alanında değerli bilgiler sunmakla kalmayıp, gelecekteki araştırmalara ilham olmayı hedeflemektedir.

Bu vesileyle, dergimizin başarısında büyük emeği olan tüm yazarlarımıza, hakemlerimize ve editör kurulumuza teşekkür etmek isterim. Sizlerin özverili çalışmaları sayesinde dergimiz, bilimsel mükemmeliyet ilkesine sadık kalarak yoluna devam etmektedir.

Ocak 2025 sayımızın, siz değerli okuyucularımıza yeni ufuklar açmasını ve bilimsel katkılarınızı artırmalarını dilerim. Bizlere gösterdiğiniz ilgi ve desteğiniz için teşekkür eder, ilerleyen sayılarımızda da sizlerle buluşmayı umut ederiz.

Saygılarımla,

Saygılarımızla,

İdris Karagöz

CONTENTS / İÇİNDEKİLER

Original Paper Araştırma Makalesi	Muhammet Yurdakul Mehmet Burak Yıldız	1-18	The effect of positioning of seismic isolators in a reinforced concrete building
Original Paper Araştırma Makalesi	Şeyda Korkmaz Özlem Tuna	19-28	Adsorption potential of spherical ZnO particles for sufficient antibiotic removal: isotherm, kinetic and thermodynamics
Original Paper Araştırma Makalesi	H. Songül Kaçoğlu Özgür Ceylan Mithat Çelebi	29-42	Swelling and re-swelling performance of glutaraldehyde crosslinked wet chitosan hydrogels
Original Paper Araştırma Makalesi	Kutbay Sezen	43-54	Investigation of the effects of latitude, altitude, and snow on solar energy gain with periodic optimum tilt angle using four province examples <i>Dönemsel optimum eğim açısıyla güneş enerji kazancında enlem, rakım ve karın etkisinin dört il örneğiyle incelenmesi</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	Ahmad Rateb Alhraki Bahar Sultan Quorraie	55-69	CFD evaluation of wind catcher geometry and internal partitions for enhanced ventilation in Nizwa, Oman
Original Paper Araştırma Makalesi	İlyas Kartal Mehmet Mudu Kenan Büyükkaya Halil Demirer	70-79	Investigation of wear properties of elastomer modified wollastonite and hazelnut shell flour reinforced polypropylene composites
Original Paper Araştırma Makalesi	Tacettin Geçkil Talha Sarıcı Bahadır Karabaş	80-98	Investigation of layer thickness and cost of flexible pavement designed on subgrade improved with glass powder <i>Cam tozu kullanılarak iyileştirilen zemininin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve maliyetinin araştırılması</i>

Original Paper Araştırma Makalesi	Sinan Şen Hatice Hande Mert	99-116	Synthesis and characterization of polyHIPE composites from CTAB-modified halloysite nanotube stabilized Pickering emulsions: Effect of CTAB immobilized nanotube on reducing surfactant usage <i>CTAB-modifiye halloysit nanotüp stabilize Pickering emülsiyonlardan poliHIPE kompozitlerinin sentezi ve karakterizasyonu: CTAB immobilize edilmiş nanotüp'ün surfaktan kullanımını azaltmadaki etkisi</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	Mehmet Tevfik Seferoğlu Ayşegül Güneş Seferoğlu Muhammet Vefa Akpınar Divine Iribagiza	117-126	Assessing the reliability of the lightweight deflectometer test for compaction control in highway subbase layers through SPSS analysis
Original Paper Araştırma Makalesi	Mehmet Akif Dünder Kazım Ercan Osman Özenç	127-146	Comparative assessment of element types for evaluating local elastic buckling behavior of rectangular hollow sections using finite element analysis
Original Paper Araştırma Makalesi	Tanya A. Başer	147-157	The effect of shielding gas mixtures in furnace brazing process on fatigue performance of X3CrNiMo13-4 martensitic stainless steels <i>X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çeliklerde fırında sert lehimleme prosesinde kullanılan koruyucu gaz karışımlarının yorulma performansına etkisi</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	Çiğdem Dinçkal	158-175	New approaches to numerical differentiation for second and third order
Original Paper Araştırma Makalesi	Erol Erçağ Berrin Saygı Yalçın Murat Şahin Jülide Hızal	176-186	Determination of insecticides in honey samples collected from Gümüşhane-Turkiye; Box-Behnken design evaluation of experimental parameters
Original Paper Araştırma Makalesi	Hatice Seçinti Klopff	187-195	Removal of non-cellulosic materials from hemp fiber under ultrasonication conditions and cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC) catalyst

Original Paper Araştırma Makalesi	Şeyma Yalçın Turan Ali Kara Gizem Bayaçalı Uygun İrem Özyurt	196-205	Experiments on decolorization and reuse of wastewater using magnetic and photocatalytic polymer particles <i>Manyetik ve fotokatalitik polimer tanecikleri ile atık suların renksizleştirilmesi ve yeniden kullanım denemeleri</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	Abdil Karakan Selami Kesler Yüksel Oğuz	206-224	Classroom lighting and increasing efficiency with an energy system consisting of different types of solar panels, batteries and the grid
Original Paper Araştırma Makalesi	Melih Savran Mücahit Osman Türkan Mustafa Öncül Levent Aydın	225-242	Optimization of drilling parameters for minimizing delamination factor in biocomposites using multiple nonlinear neuro-regression and stochastic methods
Original Paper Araştırma Makalesi	Hacer Tülen Hilal Meydanlı Atalay	243-261	Comparison on the design of dapped-end precast beams according to design codes and new approaches <i>İnceltirilmiş uçlu prefabrik kirişlerin yönetmelikler ve yeni yaklaşımlara göre tasarımının karşılaştırılması</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	Ahmetcan Gün Azra Albayrak Fatma Nur Parın Recep İlhan Uğur Parın	262-272	Influence of essential oil on the properties of UV-crosslinked polyacrylamide/sodium caseinate (PAAM/SC) hydrogels
Original Paper Araştırma Makalesi	Berivan Özer Betül Nur Kuş Pelin Yetman Müslüm Demircioğlu Oğuz Eryılmaz Erhan Sancak Zehra Yıldız	273-283	Synthesis and application of soybean oil based photocurable polyurethane acrylates for aluminum coating
Original Paper Araştırma Makalesi	Necati Mert M. Mustafa Tokay Enes Özdemir Hasan Sesli	284-312	Evaluation of the performance of buildings designed specifically according to TBEC-2018 and TEC-2007 regulations provisions <i>TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmelik hükümlerine göre tasarımı yapılan binaların performansının incelenmesi</i>

Original Paper Araştırma Makalesi	M. Yavuz Karabulut Salih Yazıcıoğlu	313-326	Production of cement-based composites with three-dimensional polymer lattice structures and investigation of their mechanical properties <i>Üç boyutlu polimer kafes yapıları ile çimento esaslı kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	Şahnur Irmak Semih Ötleş	327-346	Changes in fruit color during storage of low-salt natural Gemlik black olives produced by different methods <i>Farklı yöntemlerle üretilen az tuzlu doğal Gemlik siyah zeytinlerin muhafazası sırasında meyve renginde meydana gelen değişimler</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	M. Gökhan Altun A. Hakan Altun	347-361	Prediction of high performance concrete compressive strength with different machine learning algorithms <i>Yüksek performanslı betonun basınç dayanımının farklı makine öğrenimi algoritmaları ile tahmin edilmesi</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	Turdimuhammad Abdullah Levent Babayiğit Aleyna Turanlı Recep Furkan Turan Cemil Dızman	362-370	Design of flameproof and waterproof natural textile fabrics
Original Paper Araştırma Makalesi	Mehmet Emre Öz Bülent Ekici Oğuz Eryılmaz	371-385	Aeroelastic analysis of single-ply aramid and glass woven composite wing structures: Numerical and experimental approaches
Original Paper Araştırma Makalesi	Duygu Anaklı	386-398	Properties of poly(2-ethyl aniline)/graphene oxide (PEAn/GO) nanocomposites: influence of a synthesis method and polymerization time
Original Paper Araştırma Makalesi	Aslı Şenel Solmaz	399-435	From blueprint to reality: how digital twins are shaping the architecture, engineering, and construction landscape
Erratum Article Düzeltilme Makalesi	Orhan Karpuz Muhammet Vefa Akpınar Hakan Aslan Muhammet Çelik Elif Çiçek	436	Erratum: Investigation friction loss of concrete pavement surface with a new method



The effect of positioning of seismic isolators in a reinforced concrete building

Muhammet Yurdakul^{a,*} and Mehmet Burak Yıldız^b

^aKaradeniz Technical University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Trabzon and 61830, Türkiye.

^bBETAŞ Prefabricated, Isparta and 32000, Türkiye.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 July 2024

Received in revised form 6 September 2024

Accepted 8 October 2024

Available online

Keywords:

HDRB design

UBC97

Isolator device positioning

Reinforced concrete building

Finite elements model

ABSTRACT

Construction costs are increasing day by day. The importance of building the safest structures at the lowest cost is also increasing. For this purpose, it is necessary to design the structure in the best possible way without sacrificing safety. One way to ensure buildings are safe even during severe earthquakes is to include seismic isolation at the design stage. Judging by studies, seismic isolators are generally located at the lowest story of the building. However, there is no sufficient study to determine the location of the seismic isolator in the lowest column. In this study, the seismic isolator was located at the lower end and the top of the lowest story of the RC building to compare the effectiveness of its positioning. A high-damping rubber bearing (HDRB) was used as the seismic isolation device. Also, the effect of the absence of the diaphragm placed above the isolation level was investigated. As a result of the study, the necessary rebar of the RC building isolated at the top end of the column was less than 15% compared to the building isolated at the lower end of the columns for the beams. The base shear force of the building with seismic isolator located at the upper end of the column was 2.7% greater than that the building with the seismic isolator located at the lower end of the column.

I. INTRODUCTION

Humankind, learning lessons from earthquakes for centuries, has developed various methods to make structures safer. They have developed the idea of separating the ground and the structure. There are several applications in this regard. As an example, a seismic isolation system based on separating the building and ground is applied to the building through various methods. In this application, the aim is to extend the building period, reduce the earthquake load, and decrease the relative floor displacement. Seismic isolation leads to slight damage in the case of strong ground motion excitations.

Ryan and Earl [1] examined the effectiveness of seismic isolation systems placed between floors as a function of their location and studied alternative approaches to select their properties. The study showed that single-story isolation systems reduced the forces on the isolation system. However, it was not effective in reducing the forces under the isolation system. Huang et al. [2] carried out experimental research on mid-story seismic isolated structures. Laminated rubber bearings were used as the isolation system. The responses of the mid-story and fixed structures were compared. Shadzađ et al. [3] propose a new configuration for the Mega-Subcontrolled Structural System used in high-rise buildings, incorporating an inverted V-bracing and a mid-story isolation system. Based on the analysis of structural responses to seven different seismic waves, this new configuration shows a 49.7% improvement in structural acceleration response. Shu et al. [4] evaluate the seismic performance of a new staggered story isolated structure using numerical simulations and damage index calculations, analyzing the effects of different upper isolated layer positions and chassis areas. Results show that lowering the upper isolated layer

*Corresponding author. Tel.: +90-536-640-3184; e-mail: m.yurdakul@ktu.edu.tr

reduces inter-layer shear force, acceleration, and displacement, improving energy dissipation and reducing core tube damage. While increasing the chassis area improves isolation effects above the upper layer, it increases shear force and acceleration below it, but the structure's displacement, tensile, and compressive stresses remain within standard limits under seismic conditions. Di Egidio et al. [5] focused on the seismic performance of frame structures incorporating inter-storey isolation, a technique where stiffness-altering devices are placed at higher storey levels rather than the base. An elasto-plastic discontinuity, modelled using the Bouc-Wen approach, is introduced in the structure and analyzed through a 3-DOF reduced model under harmonic and seismic excitations. Results are presented as gain maps to identify parameters that optimize the seismic behaviour of the structure. Skandalos et al. [6] presented a multi-objective optimization analysis of inter-story isolation. Authors placed the seismic isolation devices between stories to control the building's response while reducing the load on the isolation layers. Random vibration analysis was employed to minimize the maximum inter-story drift ratio and isolation drift, optimizing the placement and properties of the isolation layers.

Charmpis et al. [7] and Zhou et al. [8] studied the optimization of earthquake response with seismic isolation at different story levels. The optimization aimed to minimize the response of the building. Wang et al. [9] investigated the dynamic characteristics and seismic responses of mid-story isolated buildings. They found out that the stiffness and mass of the superstructure were significantly lower than those of the substructure, affecting the dynamic characteristics of the isolated building. Wang et al. [10] experimentally investigated the dynamic behaviour of a building with base and mid-story isolation systems. The analysis results showed that a mid-story isolated building had smaller fundamental modal quantities than a base-isolated building. Kim and Kang [11] pointed out that both the peak story and isolator drifts conflict with each other in a mid-story isolation building. To solve this problem, they suggested a smart mid-story isolation system. Faiella and Mele [12] investigated two different mid-story isolated buildings to interpret the latest design practice. Non-linear time history and modal analyses were carried out on simplified models for seismic assessment.

The inter-story isolation system, or in other words, the mid-story isolation system, was used in real buildings in Japan, but there were some design problems [12]. Although the above studies and studies including the mid-story isolation system [13-17] were experimental, numerical base isolation systems are used in real buildings. By considering this, this study was performed about the base isolation system.

The studies in which the seismic isolation system was placed on mid-story were mentioned above. A base isolation system is generally located on the lowest column of the building. Also, in most seismic base isolation applications, a relatively rigid diaphragm is constructed above the isolators. There is insufficient research on the effectiveness of seismic isolation systems at different levels of the building's lowest columns, and on the use of rigid diaphragms at isolation levels. To eliminate this insufficient in the literature, this study's aim to determine the effects which column level the isolation system is more effective, and the absence of the diaphragm placed above the isolation level. For this purpose, the seismic isolators were located at the lower end of the columns (LEC) and the top end of the columns (TEC), and rigid diaphragm was not used in the dynamic analyses. In the study, the periods of a reinforced concrete building, story displacements, column shear forces, base shear forces, and the required reinforcement amounts for beams were compared. Additionally, evaluations were made from an architectural usability perspective. A 3D finite element model of a seven-story reinforced concrete (RC) isolated building was modelled in SAP2000. Response spectrum analyses were performed for assessment of the dynamic behaviour of

the RC building. The isolation system was designed according to UBC-97 [19]. This code is still frequently referred to in the design of seismically isolated buildings around the world [20].

II. MATERIAL AND METHOD

2.1 Seismic Isolator Design Principles

In UBC-97, regions are divided into five according to their seismic activity. While the 1st earthquake zone represents the lowest, the 4th earthquake zone represents the highest seismic activity. The acceleration value obtained from the map created by EMPED for the region where the building will be built is 0.308 g. Therefore, the seismic zone factor, Z , was selected as 4 according to UBC-97 Table 16-I. Since the area where the building is located has firm soil, the soil profile type was selected as SD according to UBC-97 Table 16-J. In UBC-97, the seismic source type is classified as A, B, or C according to the seismic risk carried by the fault. Since the building is close to the 1st earthquake zone and faults that may cause large earthquakes, the seismic source type was selected as "A" according to Table 16-U in UBC-97. Since the closest distance of the building to the seismic source was more than 15 km, the near-source factors N_v and N_a were selected as 1 according to Table 16-S and 16-T in UBC-97, respectively. There are two types of seismic coefficients, which are C_a and C_v . Seismic zone factor, soil profile type, and near-source factor were previously selected as 0.4, SD, and 1, respectively. With these selected values, the seismic coefficient C_a was selected as $0.44 N_a$ according to Table 16-Q in UBC-97.

Similarly, the seismic coefficient C_v was selected as $0.64 N_v$ according to Table 16-R in UBC-97. When N_v is equal to 1, C_v was found to be 0.64. Maximum capable earthquake response coefficient (MCERC), M , was found to be 1.25 according to Table A-16-D in UBC-97 depending on the design basis earthquake shaking intensity. $Z N_v$ was equal to 0.4 ($0.4 * 1 = 0.4$). C_{AM} and C_{VM} seismic coefficients used to define the minimum spectral ordinates of the MCERC spectrum with constant acceleration and rapid parts were obtained from Table A-16-F and Table A-16-G in UBC-97 based on the vibration intensity and the soil profile type as 0.55 and 0.80, respectively. The damping coefficient of the isolation system with a damping ratio of 10% was obtained as 1.2 from Table A-16-C in UBC-97. Since the structural system of the isolated building will have moment-resisting frames, the earthquake reduction coefficient, R_1 , was selected as 2 from UBC-97 Table 16-N and Table A-16-R.

In case of research driven by experimental study, test procedure / method should be explained in a clear way. If a theoretical study has been carried out, the theoretical method should be given in detail. If the method has been previously mentioned in published studies, the difference of the current study should be stated by referring to the previous studies.

2.2 Selected Building Design

UBC-97 was used to design the isolation system. The building was designed according to TBEC2018 [21]. Since the location of the building was assumed to be in Turkey, the spectrum curve for that location was used. The spectrum curve as seen Table 1 for that location was obtained according to TBEC 2018 [21]. There are studies about the time history of the seismic evaluation or in pushover analysis where the isolator was designed according to UBC97 [22-23]. There are four stories on the 1–7 axes of the building and seven stories on the 7–11 axes. The

axis distances in both directions of the building were 7 m (Fig. 1). A 3D finite element model of the building is given in Fig. 2.

The model consists of 13672 nodal points, 987 frames, and 71 link elements. An RC frame system was used as the structural system. The RC-framed building was modelled with a slab plate. The floor was defined as a rigid diaphragm. C30 and S420 were used as a concrete class and steel rebar class, respectively. Column, beam dimensions, and floor slab thickness were 80x80 cm, 40x70 cm, and 15 cm, respectively.

The peak ground acceleration of the region where the analysed building will be located is 0.308 g, the short- period map spectral acceleration coefficient (SS) is 0.728. The map spectral acceleration coefficient (S1) for the 1 second period was selected from the earthquake hazard map as 0.168 according to the new earthquake hazard map of Turkey [21].

The story height of the building was chosen as 4 m. Two different analyses were carried out in the seismically isolated building by locating high-damping rubber bearing (HDRB) at the LEC and TEC at the foundation level (Fig. 3). In the design of the HDRB, the vertical load transmitted to the ground was taken into consideration, and the difference in weight between the bottom of the column and the top of the column was neglected. The live and dead loads were 5 kN/m² and 1 kN/m², respectively [24]. In earthquake calculations, the active load participation ratio was considered to be 30%.

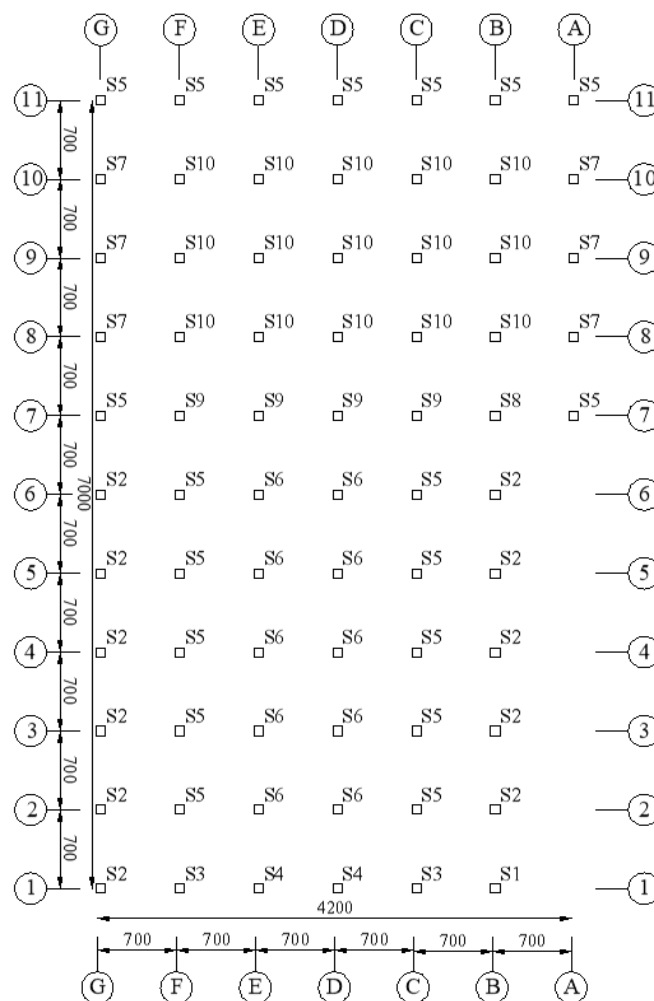


Figure 1. Plan of the location of seismic isolators (S_i represents the name of the isolator, i=1,2,3,.....10)

Table 1. Parameters and graphs of design acceleration spectrum

Parameters	Value	Function Graphs
0.2 sec spectral acceleration, S_s	0.728	
1 sec spectral acceleration, S_1	0.168	
Long-period transition period	6.0	
Response modification, R	2.0	
Site class	ZD	
Site coefficient, F_s	1.2176	
Site coefficient, F_1	2.264	
Design spectral acceleration, S_{DS}	0.8864	
Design spectral acceleration, S_{D1}	0.3804	

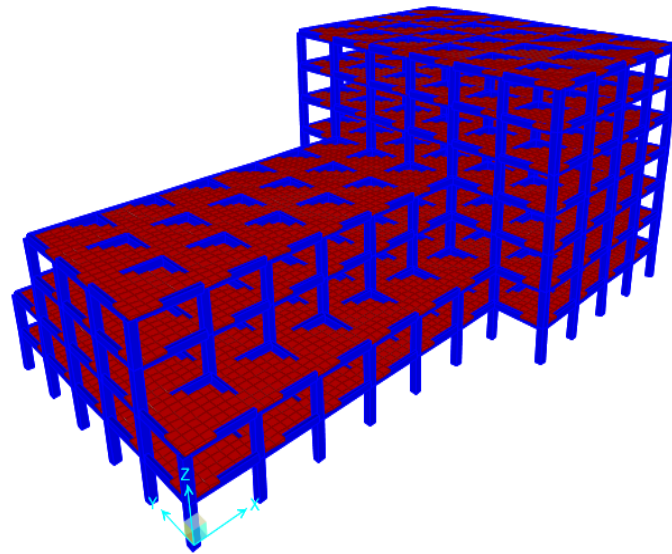


Figure 2. 3D finite element model of the building

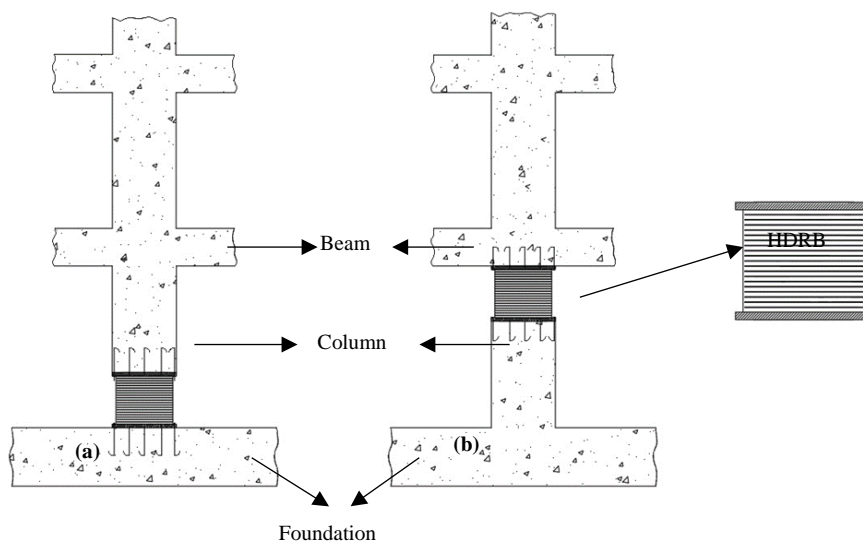


Figure 3. Detail of the placement of HDRB at LEC (a) and TEC (b)

The building importance coefficient was taken as 1 by the regulation of the isolated building. When calculating the building weight, the unit volume weight of reinforced concrete and wall weight were 25 kN/m³ and 4 kN/m, respectively.

2.3 Design of HDRB system

In this study, HDRB was chosen because it provides the necessary flexibility and damping without any additional elements. In addition, it has a straightforward design and easy production. The first vibration period of the fixed building was determined to be 0.93 s. The targeted period (TD) was 2.8 s which was three times more than the fixed period of the building, and the maximum period of the building was 3.5 s. Seventy-one isolators were used, and shear modulus (G) of the isolators was set to 1 MPa. Nine different isolators were designed to seismically analyze the isolated building. The total weight of the building (g+0.3q) was 156600 kN. Axial forces supported by columns are given in Table 2.

The torsional effects of the building were reduced by placing high rigidity HDRB between the 7-11 axis. The isolator devices were placed so that the center of mass and the center of rigidity were as close as possible. The torsional irregularity control was made according to TBEC 2018 [21] for the seismically isolated building. For a single selected type of isolator, the following design steps used the equations in UBC97. Design displacement, D_D , was calculated by Eq. 1.

Table 2. Axial forces supported by columns

Column Type	Axial force (kN)	Number of Column
S1	500	2
S2	700	10
S3	1100	2
S4	1400	2
S5	1800	14
S6	2150	10
S7	2400	11
S8	2600	1
S9	3100	4
S10	3700	15

$$D_D = \frac{g \times C_{VD} \times T_D}{B \times 4\pi^2} \quad (1)$$

Maximum displacement, D_M , was calculated by Eq. (2).

$$D_M = \frac{g \times C_{VM} \times T_M}{B \times 4\pi^2} \quad (2)$$

C_{VD} and C_{VM} are seismic coefficients, B is the damping coefficient, and g is the gravitational acceleration. Design and maximum displacements were calculated as 0.371 m and 0.579 m according to Eqs. (1-2), respectively. Minimum horizontal stiffness, k_D , was calculated by Eq. (3).

$$k_D = \frac{4\pi^2 \times W}{T_D^2 \times g} \quad (3)$$

where W is the axial force supported by the bearing.

The HDRB used as an isolation system can change shape up to 150% of its thickness. Accordingly, the total rubber thickness of the isolator was calculated by Eq. (4).

$$t_r = \frac{D_D}{\gamma} \quad (4)$$

where t_r is thickness and γ is the strain coefficient of the isolator. The thickness of the isolator was calculated as 0.3 m. The minimum isolator diameter was calculated by Eq. (5).

$$A = \frac{k_D \times t_r}{G} \quad (5)$$

Horizontal stiffness and total horizontal stiffness were calculated by Eqs. (6) and (7), respectively.

$$K_H = \frac{A_1 \times G}{t_r} \quad (6)$$

$$\Sigma K_H = N_A \times K_H^A + N_B \times K_H^B + \dots \quad (7)$$

Where K_H is the horizontal stiffness and N is the number of the isolator. Total horizontal stiffness was calculated to be 87560 kN/m. The effective vibration period of the system was calculated by Eq. (8).

$$T_E = 2\pi \sqrt{\frac{W_T}{\Sigma K_H \times g}} \quad (8)$$

where T_E is the effective vibration period and calculated as 2.68 s. Since this value was close to the target period, calculations continued. The total damping and the damping coefficient were calculated by Eq. (9) and Eq. (10), respectively.

$$B = \frac{\Sigma(N \times K_H^1 \times B + N \times K_H^2 \times B + \dots + N \times K_H^9)}{\Sigma K_H} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{4}{1 - \ln B} \quad (10)$$

where B is total damping and β is the damping coefficient. Total damping was calculated as 10%, and the damping coefficient was calculated as 1.21. Real horizontal displacement of the building according to changing damping ratios was calculated by Eq. (11).

$$D_D = \frac{g \times C_v \times T_E}{B \times 4\pi^2} \quad (11)$$

Real horizontal displacement was calculated as 0.37 m. Since the thickness of the isolator was 30 cm, horizontal displacement was within the desired limits. The maximum displacement of the isolator occurred due to torsion. Eqs. (12-14) were used to calculate it.

$$E = 0,05 \times e \quad (12)$$

$$D_{\text{total}} = D_D \left(1 - \frac{12 \times E}{b^2 + d^2} \right) \quad (13)$$

$$D_{\text{total}} \geq D_D \times 1,1 \quad (14)$$

where e is the long side of the building plan, and b and d are the dimensions of the building in the X and Y direction. Maximum displacement was calculated as 0.39 m. The base shear force of the isolated building was calculated with Eqs. (15-17).

$$V_b = K_H \times D_D \quad (15)$$

$$V_s = \frac{K_H \times D_D}{R} \quad (16)$$

$$C_s = \frac{V_s}{W_T} \quad (17)$$

where V_b is the unreduced earthquake force, W_T is the total weight, V_s is the base shear force, R is the earthquake reduction coefficient, and C_s is the ratio of base shear force to building weight. Base shear force was calculated as 16970 kN. The ratio of base shear force to building weight was calculated as 10.84%.

The thickness of the steel plate to be placed between the elastomer layers was 2 mm according to the standards. The thickness of one of the layers in the isolator was calculated by Eq. (18), and the shape factor of the isolator was calculated by Eq. (19).

$$\frac{D}{80} \leq t_0 \leq \frac{D}{40} \quad (18)$$

$$S = \frac{\text{Disc Area}}{\text{Cross section area}} = \frac{\frac{\pi \times D^2}{4}}{\pi \times D \times t_0} = \frac{D}{4 \times t_0} \quad (19)$$

where t_0 is the thickness of the rubber between the steel plates and S is the shape factor of the isolator. The thickness of the elastomer layer of the isolator was calculated as 15 mm.

The total elastomer thickness was calculated as 300 mm, one-layer elastomer thickness was calculated as 15 mm, and 20 elastomer layers of elastomer were used. There were 19 steel plates with a thickness of 2 mm. There were 25 mm steel plates on the top and bottom of the isolators. The total isolator height was calculated as 388 mm. A cross-section of isolators with 450 mm diameter is given in Fig. 4. The compression module, E_c , was calculated by Eq. (20), and vertical stiffness, K_v , was calculated by Eq. (21). The stiffness of the steel plate, K , was considered to be 2000 MPa.

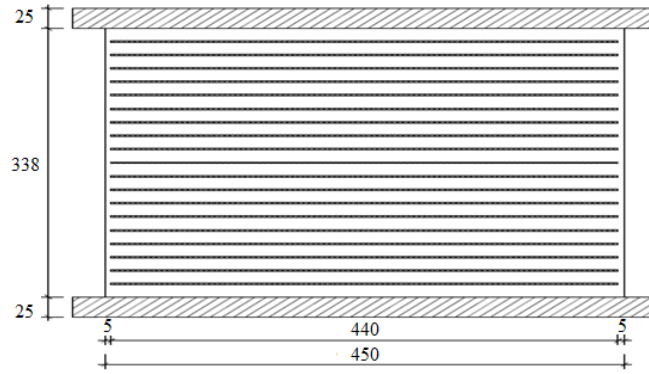


Figure 4. Detail of a selected isolator

$$E_c = \frac{6 \times G \times S^2 \times K}{6 \times G \times S^2 + K} \quad (20)$$

$$K_v = \frac{E_c \times A}{t_r} \quad (21)$$

The total vertical stiffness of all isolators was calculated by Eq. (22).

$$\sum K_v = N \times K_v \quad (22)$$

Total vertical stiffness was calculated as $53 \times 10^6 \text{ kN/m}$. The design displacement of the building, Δt , in the vertical was calculated by Eq. (23), and the vertical vibration period, T_v , was calculated by Eq. (24).

$$\Delta t = \frac{W_t}{K_v} \quad (23)$$

$$T_v = \frac{T_{DV}}{\sqrt{6S}} \quad (24)$$

The horizontal displacement was calculated as $24 \times 10^{-4} \text{ m}$, and the vertical vibration period was calculated as 0.33 s. Eqs. (25-26) were used to calculate the common area of isolators.

$$A' = A \left(1 - \frac{2}{\pi} (\theta + \sin\theta\cos\theta) \right) \quad (25)$$

$$\sin\theta = \frac{D_D}{D} \quad (26)$$

where D_D is shear displacement and A' represents the common area when the isolator moves.

The moment of inertia of the rubber bearing section was calculated by Eq. (27), and the control of stability loss was calculated by Eq. (28).

$$I = \frac{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^4}{4} \quad (27)$$

$$P_{\text{critic}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{E_C \times I \times G \times A_S}{3}} \quad (28)$$

where P_{critic} is the load supported by the isolator. Since the values obtained from this calculation were higher than the load supported by the isolator, there was no collapse risk. Post-yield stiffness was calculated by Eq. (29), and elastic stiffness was calculated by Eq. (30).

$$K_2 = \frac{A \times G}{t_r} \quad (29)$$

$$K_1 = 6 \times K_2 \quad (30)$$

where K_2 is plastic stiffness, and K_1 is elastic stiffness. The shear force of the isolator was calculated by Eq. (31).

$$Q = C_S \times W \quad (31)$$

Yielding displacement was calculated by Eq. (32).

$$D_Y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (32)$$

where D_y is yielding displacement.

Effective stiffness corresponding to the maximum displacement, K_{eff} , was calculated by Eq. (33).

$$K_{\text{eff}} = K_1 + \frac{Q}{D} \quad (33)$$

Yielding strength, F_Y , was calculated by Eq. (34).

$$F_Y = K_1 \times D_Y \quad (34)$$

Mechanical properties of all HDRBs are given in Table 3.

Table 3. Mechanical properties of the HDRB

Column	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
k_D (kN/m)	256	359	564	718	923	1102	1231	1333	1590	1897
An Isolator Diameter (cm)	45	45	50	55	60	65	70	75	80	90
K_H (kN/m)	530	530	654	792	942	1106	1282	1472	1675	2120
S	7.5	7.5	8.33	9.16	10	10.83	11.66	12.5	13.33	15
$E_C 10^2$ (kN/m ²)	2888	2888	3448	4027	4615	5208	5799	6383	6957	8060
$K_V 10^2$ (kN/m)	1501	1501	2213	3127	4265	5648	7294	9216	1143	1676
$\sin\theta$	0.825	0.825	0.742	0.674	0.618	0.57	0.53	0.494	0.463	0.412
θ	55.63	55.63	47.98	42.48	38.25	34.85	32.05	29.69	27.67	24.38
Radian	0.97	0.97	0.84	0.74	0.666	0.61	0.558	0.516	0.481	0.424
A'	0.013	0.013	0.029	0.049	0.074	0.104	0.137	0.174	0.216	0.311
I (cm ⁴)	0.0018	0.001	0.002	0.004	0.005	0.008	0.011	0.014	0.019	0.03
P_{critic} (kN)	1717	1717	2590	3747	5232	7094	9381	12141	15422	23735
K_2 (kN/m)	520	520	642	777	924	1085	1258	1444	1643	2079
K_1 (kN/m)	3120	3120	3852	4662	5545	6510	7548	8664	9858	12474
Q (kN)	53	74	117	149	191	229	255	276	330	393
D_y (m)	0.02	0.028	0.036	0.038	0.041	0.042	0.04	0.038	0.04	0.037
K_{eff} (kN/m)	656.9	711.8	943.4	1160.4	1417.7	1674.1	1916.0	2146.9	2493.0	3093.9
F_Y (kN)	63.8	89.31	140.35	179.63	229.66	274.32	306.22	331.74	395.53	472.09

III. RESULTS

The first six periods of the fixed and seismic isolated building obtained from analysis results are given in Table 4. Mode shapes of fixed buildings and seismic isolated buildings with LEC and TEC are shown in Figs. 5-6, respectively. Since the structure was antisymmetric, its first mode was under the torsional effect [25]. The mass participation ratio for each direction is given in Table 5.

Predominant periods of the seismically isolated buildings with LEC and TEC were 2.389 s. and 2.279 s., respectively. The isolator periods for the LEC and TEC buildings were 2.455 s. and 2.334 s., respectively. Analysis results showed that the predominant periods of the seismically isolated building with LEC and TEC were two and a half times longer than the fixed building. The period of the seismically isolated building with TEC was shorter than the building seismically isolated with LEC. This difference is likely because the additional masses of the columns were included in the superstructure when the isolators were located at the bottom.

For the first mode of the fixed building, the mass participation ratio in the X direction was not large compared to the isolated building. The most important reason for this was the torsional effect in the building due to the fact that the stiffness center and the center of mass were not close [26]. The seismic isolation system increased the mass participation ratio in the first mode of the building to approximately 98% and 76% in the X and Y directions. Thus, the torsional effect in the building was reduced with the isolation system [27].

Columns located on the 11-D axis of the building were selected by considering the most favorable load combination to compare the internal column forces of the fixed, seismically isolated buildings with LEC and TEC.

The shear forces and maximum bending moments for the selected columns are shown in Tables 6-7, respectively. V_2 and V_3 represent the horizontal and vertical shear forces of the column section.

Table 4. Periods of fixed and isolated buildings

Mode Number	Fixed (s)	LEC (s)	TEC (s)
Isolator Mode	N/A	2.455	2.334
1. Mode	0.930	2.389	2.279
2. Mode	0.807	2.254	2.156
3. Mode	0.580	0.494	0.488
4. Mode	0.337	0.484	0.477
5. Mode	0.325	0.425	0.421

Table 5. Mass participation ratios of buildings

	X direction			Y direction		
	Fixed Building	Isolated Buildings		Fixed Building	Isolated Buildings	
		LEC	TEC		LEC	TEC
Isolator mode		0.5%	0.4%		75.9%	75.5%
Mode 1	0.5%	99.5%	98.3%	52.7%	76.5%	76.1%
Mode 2	70.3%	99.5%	98.3%	53.4%	99.6%	98.3%
Mode 3	70.5%	99.9%	98.6%	72.3%	99.6%	98.3%
Mode 4	70.6%	99.9%	98.6%	83.2%	99.6%	98.3%
Mode 5	86.2%	99.9%	98.6%	83.2%	99.9%	98.6%

Table 6. Shear forces of the selected columns

FIXED		ISOLATED			
		LEC		TEC	
V_2	V_3	V_2	V_3	V_2	V_3
kN	kN	kN	kN	kN	kN
170	547	107	376	61	314
-8	-548	77	-375	-89	-314
181	547	96	270	60	270
-23	-547	29	-269	-71	-269
142	480	91	238	41	225
29	-481	56	-237	-50	-225
197	422	103	181	52	183
-32	-420	41	-179	-62	-182
164	309	88	126	39	127
-11	-309	47	-125	-42	-126
166	181	120	78	18	76
92	-180	110	-76	-26	-75

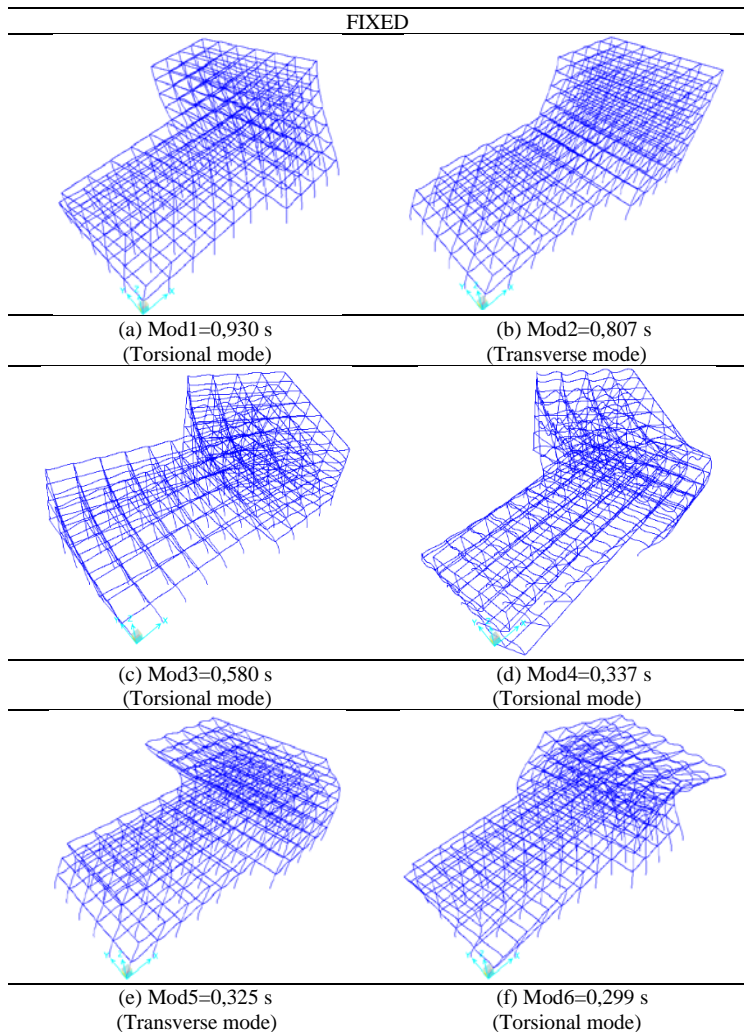
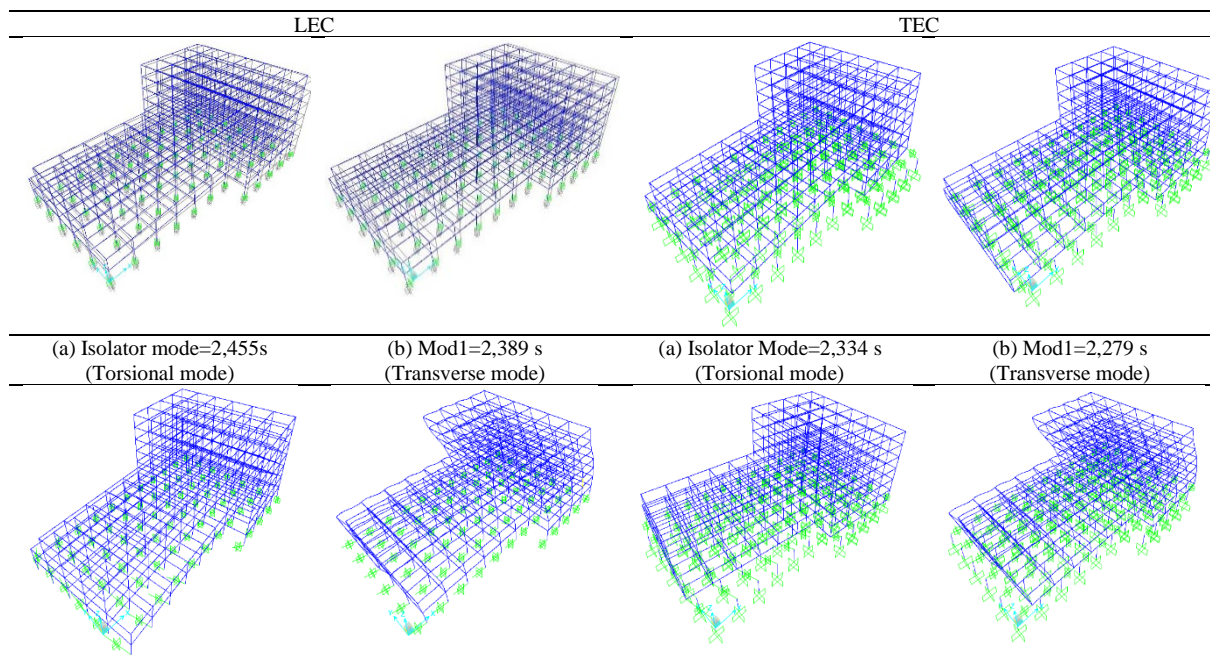


Figure 5. Fixed Building Mode Shapes



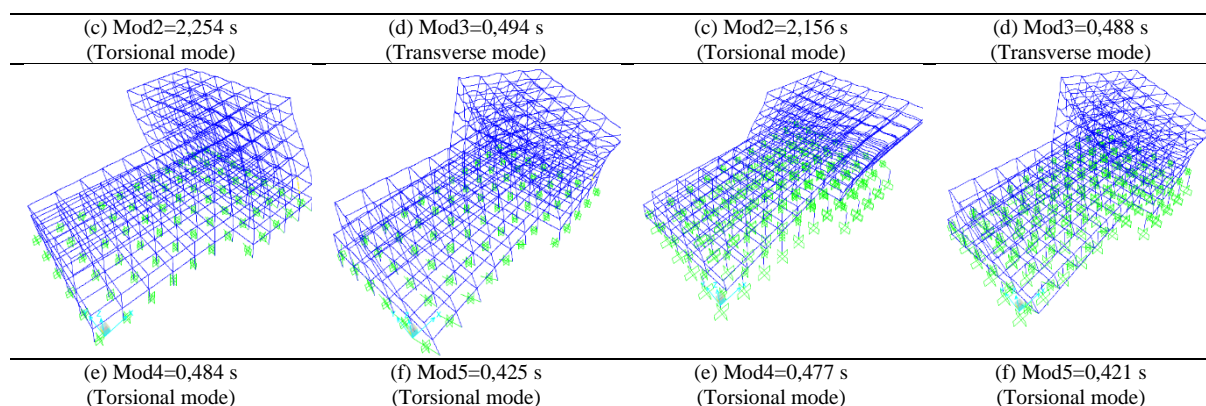


Figure 6. Mode shapes of buildings seismically isolated with LEC and TEC

Table 7. Maximum bending moments of the selected columns

FIXED		ISOLATED			
		LEC		TEC	
M2 (kNm)	M3 (kNm)	M2 (kNm)	M3 (kNm)	M2 (kNm)	M3 (kNm)
2390	-1654	1068	-1009	1228	-1163
2384	-1794	1068	-1025	1228	-1182
1677	-741	899	-508	773	-338
1158	-922	653	-480	595	-393
1505	-949	655	-439	596	-404
1420	-856	561	-360	556	-334
1427	-816	559	-314	406	-311
1305	-992	448	-368	455	-376
1308	-1075	419	-378	432	-387
1060	-1073	334	-338	339	-346
799	-1045	275	-412	285	-408
718	-860	245	-413	247	-408

The seismic reduction coefficient of seismic isolation buildings was selected as 2 according to UBC-97. The seismic reduction coefficient of fixed buildings with 0.93 s was selected as 2 [28]. Choosing the same value for the seismic reduction coefficient gave more accurate results for comparison. However, when the more significant value was selected, the earthquake effect was much less. As a result of the analysis, the shear force on the isolated building with TEC decreased by 40% compared to the fixed building. The shear forces for the building isolated with TEC were approximately 21% less than the building isolated with LEC. The maximum bending moment of the building isolated with TEC decreased by 56% compared to the fixed building. The bending moment of the buildings isolated with TEC and LEC were almost equal to each other.

The base shear forces of the design earthquake in the X and Y directions for the fixed building and buildings isolated with TEC and LEC are given in Table 8.

As a result of the analysis, the base shear forces on the isolated building decreased by approximately 56% and 57% in the X and Y direction, respectively. The base shear force of the building isolated with LEC was approximately 2% and 3.4% less than for the building with TEC in X and Y directions, respectively.

The story drifts in the X and Y directions of the fixed building, and buildings isolated with LEC and TEC are shown in Figs. 7-8 from SAP2000 software.

The relative floor displacement of the buildings isolated with TEC and LEC was approximately 50% less than the fixed building. The total floor displacements of the building isolated with TEC were 5% less than the building isolated with LEC. To better understand the effect of the location of the isolators on the building, a comparison was made by calculating the rebar necessary for LEC and TEC buildings. The necessary rebar of columns in the selected 11 axis of the buildings isolated with TEC and LEC are shown in Table 9.

Since the base shear force of buildings with TEC was higher and its period was shorter, the necessary rebar of column of the isolated 1st floor increased by about 5% compared to the building with LEC. However, this difference only occurred on the first floor of the building. Due to the fewer internal forces in isolated columns and close cross-sectional area on the upper floors of the building, minimum rebar was enough.

The necessary rebar of beams in the selected 10 axis of the buildings isolated with TEC and LEC are shown in Table 10. The rebar of beam decreased by approximately 16% throughout the building isolated with TEC. This ratio was around 15% in the overall building. This shows that the design of the building isolated with TEC was more economical.

Table 8. Base shear forces of the three different analyses

Direction	Fixed (kN)	LEC (kN)	TEC (kN)
X	36707	16221	16581
Y	34768	14755	15273

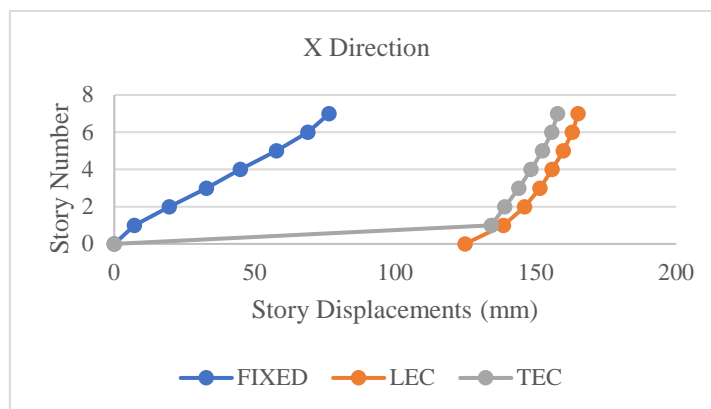


Figure 7. Story drifts in the X direction

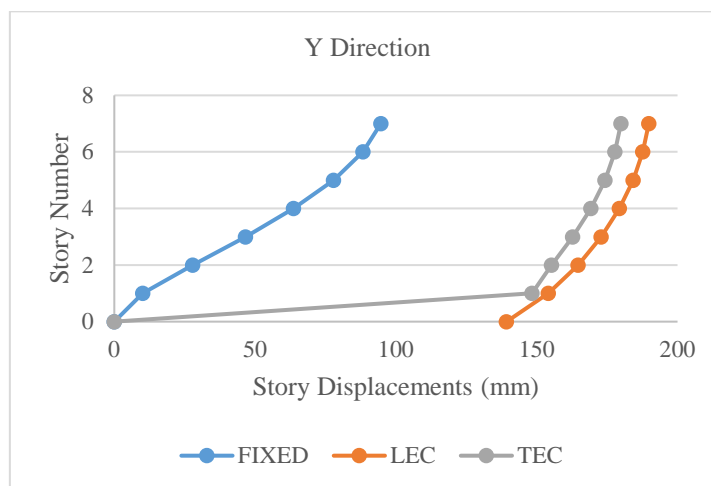


Figure 8. Story drifts in the Y direction

Table 9. Necessary rebar of column in buildings isolated with TEC and LEC

Floor	11 – 11 Axis (mm ²)													
	A		B		C		D		E		F		G	
	TEC	LEC	TEC	LEC	TEC	LEC	TEC	LEC	TEC	LEC	TEC	LEC	TEC	LEC
1	8731	7353	10002	8192	9352	7358	8601	6502	9030	6891	9708	7779	8585	7220
2	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400
3	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400
4	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400
5	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400
6	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400
7	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400

Table 10. Necessary rebar of beam in buildings isolated with TEC and LEC

Floor	10 – 10 Axis (mm ²)							
	A-B axis		B-C axis		C-D axis			
	TEC	LEC	TEC	LEC	TEC	LEC	TEC	LEC
7	1351	1352	1355	1355	1347	1347		
	1177	1177	1082	1082	1085	1085		
6	1619	1567	1732	1721	1730	1722		
	1136	1137	1083	1083	1082	1082		
5	2042	1973	2171	2120	2171	2150		
	1148	1149	1083	1082	1084	1083		
4	2464	2396	2598	2579	2598	2582		
	1165	1150	1224	1215	1224	1217		
3	2876	2910	2960	3046	2963	3051		
	1357	1384	1381	1444	1382	1446		
2	3120	3593	3140	3640	3136	3641		
	2637	1951	2485	1945	2468	1945		
1	2637	5413	2485	5340	2468	5321		
	1241	3553	1174	3405	1166	3409		

IV. CONCLUSIONS

In this study, a 7-story reinforced concrete building was selected. HDRB was used as the isolation system. The dynamic behaviour of the building isolated at the top end of the columns was compared to the building isolated at the lower end of the columns at foundation level. In addition, buildings with seismic isolation were compared with a fixed building. As a result of the analysis, the following results were obtained.

- The period of the lower end of columns building was approximately 5% longer than for the top end of the columns building.
- Total floor displacements of the building isolated at the top end of the columns were approximately 5% less than the total displacement of the building isolated at the lower end of the columns.
- The shear forces for columns in the building isolated at the top end of the columns were approximately 21% less than the building isolated at the lower end of the columns.
- Although rebar of column of the building isolated at the top end of the columns were higher by approximately 5% than for the building isolated at the lower end of the columns on the 1st floor, rebar of beam in the whole building isolated at the top end of the columns were less than the building isolated at the lower end of the columns, considering the whole building.
- The base shear force of the building seismically isolated at the top end of the columns was approximately 2.7% more than the building isolated at the lower end of the columns. This result showed that the different locations of the high damping rubber bearing did not lead to a significant difference in the base shear forces.

- The necessary rebar of the beam in the building isolated at the top end of the columns was lower by 15% than for the building isolated at the lower end of the columns.
- Placing the isolator on top of the column may reduce the shear wall required for seismic space and excavation costs in new buildings. However, isolators placed at the lower end of the column may cause various architectural and usage difficulties in the building.
- The mass participation ratio increased in the first mode of the seismic isolation system for an asymmetrical building. This situation revealed that the seismic isolation system dramatically reduced the torsional effect in this building.

Based on all these results, it is more economical to place the seismic isolator at the top of the column in such a building considering the total rebar areas. In addition, from an architectural point of view, it is more appropriate to place seismic isolators at the top end of the column.

REFERENCES

1. Ryan KL and Earl CL (2010) Analysis and Design of Inter-Story Isolation Systems with Nonlinear Devices. *Journal of Earthquake Engineering* 14(7):1044–1062. <https://doi.org/10.1080/13632461003668020>
2. Huang XY, Zhou FL, Wang L, Heisha LHW and Luo XH (2011) Experimental Investigation on Mid-Story Isolated Structures. *Advanced Materials Research* 163–167: 4014–4021. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.163-167.4014>
3. Shahzad MM, Zhang XA, Wang X, Abdulhadi M, Wang T and Xiao Y (2022) Response control analysis of a new mega-subcontrolled structural system (MSCSS) under seismic excitation. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 31(10), e1935. <https://doi.org/10.1002/tal.1935>
4. Shu T, Li H, Wang T, Liu D, Yao S and Lei M (2023) Study on the seismic response of new staggered story isolated structure under different parameters. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1115235. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1115235>
5. Di Egidio A, Pagliaro S, and Contento A (2023) Seismic Performance of Frame Structure with Hysteretic Intermediate Discontinuity. *Applied Sciences*, 13(9), 5373. <https://doi.org/10.3390/app13095373>.
6. Skandalos K, Afshari H, Hare W, and Tesfamariam S (2020) Multi-objective optimization of inter-story isolated buildings using metaheuristic and derivative-free algorithms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132, 106058. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106058>.
7. Charmpis DC, Komodromos P and Phocas MC (2012) Optimized earthquake response of multi-storey buildings with seismic isolation at various elevations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 41(15): 2289–2310. <https://doi.org/10.1002/eqe.2187>
8. Zhou FL, Zhang Y and Tan P (2009) Theoretical study on story isolation system. *China Civil Engineering Journal* 42(8): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111296>
9. Wang SJ, Chang KC, Hwang JS and Lee BH (2011) Simplified analysis of mid-story seismically isolated buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics* 40(2): 119-133. <https://doi.org/10.1002/eqe.1004>
10. Wang SJ, Chang KC, Hwang JS, Hsiao JY, Lee BH and Hung YC (2012) Dynamic behavior of a building structure tested with base and mid-story isolation systems. *Engineering Structures* 42: 420–433. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.035>
11. Kim HS and Kang JW (2019) Optimal design of smart mid-story isolated control system for a high-rise building. *International Journal of Steel Structures*. <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00258-8>
12. Faiella D and Mele E (2020) Insights into inter-story isolation design through the analysis of two case studies. *Engineering Structures* 215. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110660>
13. Becker Tracy C and Ezazi Ashkan (2015) Enhanced performance through a dual isolation seismic protection system. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 25(1): 72-89. <https://doi.org/10.1002/tal.1229>
14. Xiao S, Li C, Liu D, Sun W and Lei M (2023) Research on Irregular Plane Mid story Isolation Structures in Castor Earthquake prone Areas Considering SSI Effect. *Frontiers in Earth Science* 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1207110>
15. Zhou Q, Singh MK and Huang X (2016) Model reduction and optimal parameters of mid-story isolation systems. *Engineering Structures* 124: 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.011>
16. Kim HS and Kim U (2023) Development of a Control Algorithm for a Semi-Active Mid-Story Isolation System Using Reinforcement Learning. *Applied Sciences* 13(4) 2053. <https://doi.org/10.3390/app13042053>

17. Zhang R, Phillips BM, Taniguchi S, Ikenaga M and Ikago K (2017) Shake table real-time hybrid simulation techniques for the performance evaluation of buildings with inter-story isolation. *Structural Control and Health Monitoring* 24(10). <https://doi.org/10.1002/stc.1971>
18. Wu Y, Lu J and Qi A (2019) Shaking table test and numerical analysis of mid-story isolation eccentric structure with tower-podium. *Advances in Mechanical Engineering* 11(1). <https://doi.org/10.1177/1687814018819562>
19. Uniform Building Code 1997 American Structural Engineering Design Provisions.
20. Saifullah MK and Alhan C (2017) Necessity and adequacy of near-source factors for seismically isolated buildings. *Earthquakes and Structures* 12(1): 91-108. <https://doi.org/10.12989/eas.2017.12.1.091>
21. General Directorate for Foundations 2018 Turkey Building Earthquake Code (TBEC2018).
22. Soyuluk A and Tuna ME (2011) Effect of seismic base isolation usage on the architectural design of irregular buildings. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 26(3):635-642
23. Farmanbordar B, Adnan AB, Tahir MM and Faridmehr I (2017) Seismic assessment of base-isolated nuclear power plants. *Advances in computational design* 2(3): 211-223. <https://doi.org/10.12989/acd.2017.2.3.211>
24. Design loads for buildings 1997 Turkish Standard Code 498
25. Taha AE, Elias S, Matsagar V and Jain KJ (2019) Seismic response control of asymmetric buildings using tuned mass dampers. *Structural Design of Tall and Special Building*. 28(18). <https://doi.org/10.1002/tal.1673>
26. Orak MS and Celep Z (2017) Seismic Performance of Gedikbulak School Building Revisited. *Teknik Dergi*. 28(2): 7889–7889. <https://doi.org/10.18400/tekderg.304103>
27. Kilar V and Koren D (2009) Seismic behaviour of asymmetric base isolated structures with various distributions of isolators. *Engineering Structures* 31(4): 910–921. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.12.006>
28. Tsiavos A, Schlatter D, Markic T and Stojadinovic B (2017) Experimental and analytical investigation of the inelastic behavior of structures isolated using friction pendulum bearings. *Procedia Engineering* 199: 465–470. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.047>



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Adsorption potential of spherical ZnO particles for sufficient antibiotic removal: isotherm, kinetic and thermodynamics

 Şeyda Karadirek^{a*}, Özlem Tuna^a
^aDepartment of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Yalova University, 77200 Yalova, Türkiye

ARTICLE INFO

Article history:

Received 07 September 2024

Received in revised form 24 October 2024

Accepted 11 November 2024

Available online

Keywords:

ZnO

Tetracycline

Adsorption

Wastewater treatment

Adsorbent

ABSTRACT

Due to the improvements of pharmaceutical industry, tetracycline (TC) is commonly detected in natural water environments, resulting in significant adverse impacts on living species. In this study, the TC adsorption over commercial spherical zinc oxide (ZnO) samples was systematically examined by considering adsorption isotherm models, kinetic model and thermodynamic behavior. The Langmuir kinetic model displayed the highest correlation coefficient ($R^2 = 0.97$) with a maximum adsorption capacity of 86.35 mg/g. According to the results of the kinetic studies, the adsorption could be driven by both the bulk transfer of adsorbate molecules towards the adsorbent surface within the solution and chemisorption on the surface and inside the pores. In addition, the TC adsorption on the ZnO particles promoted by increasing temperature. The commercial spherical zinc oxide can be considered as a sustainable strategy to eliminate the emerging toxic contaminant of tetracycline.

I. INTRODUCTION

Water pollution has been considered as the most threatening environmental issue, demanding immediate attention. The main sources of wastewater are industrial activities [1, 2]. The pollution in the industrial drain waters originates mainly from heavy metals, pesticides, and drugs. The discharge of drugs, particularly antibiotics, results in detrimental effects on the environment and living organisms [3]. Tetracycline (TC) is one of the most widely utilized broad-spectrum antibiotics against bactericidal infections for its low side effects, strong antimicrobial performance, and affordability [4, 5]. TC enters the ecosystem through unmetabolized waste from human and animal excretion and the disposal of expired medications [6]. Moreover, TC can be spread through bioaccumulation in the food chain, posing a severe threat to the entire ecosystem. It is therefore imperative to eliminate the antibiotic molecules from the aquatic ecosystem to decrease its potential health and environmental hazards [7].

To date, TC elimination from wastewater has been provided via various processes, namely enzymatic conversion, biodegradation, electrocoagulation, flocculation, membrane separation, coagulation-flocculation, advanced oxidation, and adsorption. Among the wastewater treatment processes, adsorption has gained significant attention owing to its significant properties, namely environmental friendliness, ease of operation, low energy consumption and cost-effectiveness [6, 9, 10]. For this removal process, adsorbent selection is the crux step and until now, a wide range of materials such as carbon-based materials, biomass-based materials, metal-based materials, mineral-based materials, and polymer-based materials, have been explored as adsorbent for the adsorption of TC-

*Corresponding author. Tel.: +90-226 8155405; e-mail: seyda.karadirek@yalova.edu.tr

contaminated water [11]. At this point, metal-based materials have been well reported in literature due to their excellent high capacity, ease of availability, simple regeneration step and sufficient thermal and chemical stability [12].

As a promising metal oxide-based adsorbent, zinc oxide (ZnO) particle has drawn considerable interest for their prospective application in adsorptive dye removal techniques since it shows high affinity towards colorful molecules, especially anionic dyes [13-15]. Lei et al. [13] stated that hierarchical porous ZnO microspheres showed excellent the adsorption capacity of Congo red (CR) in aqueous solution (334 mg/g) owing to their high surface area (57 m²/g) and the related adsorption mechanism was assessed with pseudo-second-order kinetics and intraparticle diffusion models. Ranjbari et al. [14] also showed that the highest methylene blue adsorption removal was obtained at acidic pH conditions in the presence of ZnO particles since in the acidic environment the superior electrostatic attraction occurred between the negatively charged adsorbent surface and the dye molecules. Sharma depicted that heavy metal adsorption process over ZnO could be explained by Freundlich model, as well as the adsorption spontaneously occurred, and it had an endothermic nature. However, the traditional bulk ZnO material has limited specific surface area, limiting adsorption capacity and the sample struggles with difficulty in regeneration step, decreasing their utilization in potential in long term removal processes. The fixed structure might improve its resistance and durability [16]. Therefore, recent studies have been focused on utilizing metal oxide with hierarchical structures to obtain sufficient efficiency in the large-scale antibiotic removal systems.

In this study, we have aimed to examine the efficiency of micro spherical ZnO on tetracycline adsorption and based on literature search no such study has been reported. Kinetic experimental studies were carried out, and the as-observed data were fitted to isotherm and kinetic models. Thermodynamic study was also conducted to examine the temperature effect on the adsorption of the antibiotic molecules on the ZnO particles. Herein, ZnO particles with 2-5 μm of diameter were proposed to be long-lasting adsorption in continuous antibiotic removal processes.

II. EXPERIMENTAL METHOD / TEORETICAL METHOD

2.1 Materials

ZnO particles with 2-5 μm of diameter were purchased from Alfa Aesar. Tetracycline (TC, ≥98%), used as model pharmaceutical pollutant, was purchased from Sigma-Aldrich. All chemicals were used without further purification and all antibiotic solutions were prepared by using distilled water during experimental studies.

2.2. Adsorptive removal studies

Batch adsorption experiments were conducted in 50 mL Erlenmeyer flasks containing 20 mL of tetracycline solution (10 mg/L) and 0.03 g of the spherical ZnO samples. The adsorption isotherms of TC on the spherical adsorbent were investigated by applying different initial antibiotic concentration (10-60 mg/L) at constant atmosphere and temperature. After the flasks were shaken at 110 rpm for 24 h, the adsorption suspensions were filtered with a blue band filter paper and supernatants were analyzed with UV-vis spectrophotometer at the wavelength of 360 nm using the Lambert-Beer law. To establish the contact time effect on TC adsorption, 20 mL of 45 mg/L TC solution was added to 30 mg ZnO, and the samples were collected at certain time intervals to

predict equilibrium concentrations. The suspensions were also shaken in thermostatic water bath shaker at different temperatures (298, 313, 328 K) to determine thermodynamic behavior for the adsorption process.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Adsorption Isotherm

Adsorption isotherms are primary models to characterize the interaction between the adsorption surface and adsorbate at various concentrations under constant temperature conditions. In order to determine the correlation between equilibrium concentration (C_e) and adsorption capacity (Q_e), adsorption isotherm models including Langmuir, Freundlich, and Temkin were established. The nonlinear isotherm curves of TC adsorption were presented in Figure 1. The isotherm model equations of the adsorption process were figured out using equations (1-3).

$$\text{Non-linear Langmuir: } q_e = \frac{(q_{\max} K_L C_e)}{(1 + K_L C_e)} \quad (1)$$

$$\text{Non-linear Freundlich: } q_e = K_F C_e^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad (2)$$

$$\text{Temkin: } q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T C_e \quad (3)$$

where, q_e is TC adsorption capacity, C_e is the TC concentration at equilibrium point, q_{\max} is the maximum TC adsorption capacity of ZnO, K_L is the Langmuir isotherm constant, K_F and n are the Freundlich isotherm constants, K_T is the Temkin isotherm constant, b_T is Temkin equilibrium constant related to the adsorption heat, R is the gas constant (8.314 J/mol. K), T is the absolute temperature (K).

Adsorption parameters obtained from three distinct nonlinear adsorption isotherm models are presented in Table 1. Improved accuracy and precision are acquired by applying nonlinear variants of the isotherm models [7]. The best fitted isotherm model is evaluated using statistical error functions. To define the adsorption mechanism the isotherm model was selected based on the highest R^2 value. Table 1 represents that the Langmuir isotherm was the most appropriate model due to its superior determination coefficient of 0.97, whereas the Freundlich and Temkin models exhibited lower correlations with experimental data (0.95, 0.96). The Langmuir isotherm model characterized the uniform and monolayered dispersion of the adsorbate molecules over the ZnO surface. Thus, the adsorption model of TC on ZnO could be described as monolayered and accurately explained via the Langmuir equation [8]. The Langmuir isotherm model prediction yielded a theoretical maximum TC adsorption capacity of 86.35 mg/g. The separation factor (R_L), given in Eq (4), was calculated to indicate the favorability of the adsorption process.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \times C_0} \tag{4}$$

Where C_0 is the initial TC concentration, K_L is the Langmuir isotherm constant. R_L values in the range of $0 < R_L \leq 1$ indicates a convenient adsorption. When the value of $R_L = 0$, it states the irreversibility of adsorption process. The values of $R_L < 0$ or $R_L > 1$ displays the unfavorable adsorption. The R_L value of TC adsorption on ZnO was calculated as 0.41, providing the favorable adsorption process [9]. Moreover, the Freundlich isotherm model parameter ($1/n$), which signifies the surface heterogeneity of adsorbent, was calculated. The $1/n$ value of 0.59 showed that the TC adsorption on ZnO was an appropriate process [10]. In addition, the interaction between TC and ZnO molecules was investigated by Temkin isotherm model. The heat of TC adsorption on ZnO (b_T) was found as 11.36 kJ/mol, stating that the adsorption process exhibits an endothermic reaction profile. It could be concluded that the TC molecules might uniformly adsorbed over ZnO particles in a monolayer, confirming that the adsorption could be explained via Langmuir model and the thermodynamic behavior of the adsorption was endothermic.

Table 1. Adsorption isotherm parameters of ZnO on TC adsorption

Isotherm Models	Parameters	Values
Langmuir	q_{max} (mg/g)	86.35
	K_L (L/mg)	0.014
	R^2	0.97
Freundlich	K_F (L/g)	1.51
	n	1.69
	R^2	0.95
Temkin	K_T (L/mol)	0.31
	B_T (kJ/mol)	11.36
	R^2	0.96

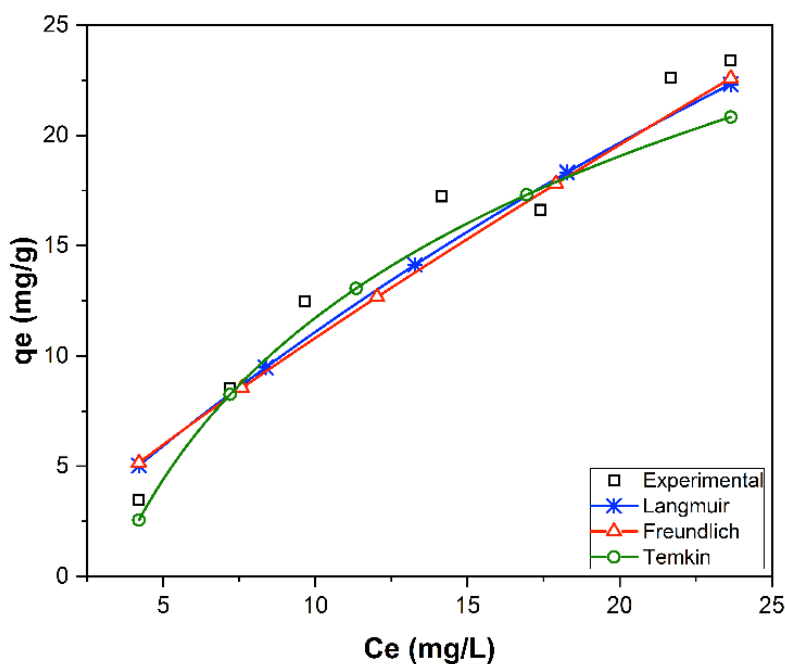


Figure 1. Isotherm models of ZnO on TC adsorption

3.2 Adsorption kinetics

The kinetic studies were performed to determine the required contact time until the TC adsorption process reached equilibrium and the accomplishment of adsorption process. Figure 2 shows the effect of the contact time on the maximum TC adsorption of ZnO and the equilibrium adsorption capacity. The TC adsorption capacity initially enhanced rapidly and achieved equilibrium point after 120 minutes. Three prevalent models were performed to clarify the adsorption mechanism and kinetic model and they were Pseudo first order (PSO), Pseudo second order, and intraparticle diffusion (IPD) kinetic models. Furthermore, nonlinear variants of the kinetic models were applied to obtain more accurate and reliable results. The nonlinear adsorption kinetic models derived from Eq. (5-7) were illustrated in Figure. 3.

$$\text{Nonlinear pseudo-first order: } q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (5)$$

$$\text{Nonlinear pseudo-second order: } q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e^2 t} \quad (6)$$

$$\text{Intraparticle diffusion: } q_t = k_i t^{1/2} + c \quad (7)$$

where k_1 is the pseudo-first order rate constant (min^{-1}), k_2 is the pseudo-second order rate constant ($\text{g/mg}\cdot\text{min}$), k_i is the intra-particle diffusion rate constant ($\text{mg}\cdot\text{min}^{0.5}/\text{g}$). c denotes the boundary layer thickness. q_e and q_t (mg/g) are the amount of TC adsorbed at equilibrium and time t (min), respectively.

In general approach, the pseudo first-order kinetic model explains the bulk transfer of adsorbate molecules towards the adsorbent surface within the solution whereas the pseudo second-order kinetic model was attributed to strong chemisorption. In terms of the intraparticle diffusion kinetic model, after the adsorbent surface becomes saturated, the adsorbate molecules move towards the pores of the adsorbent, occurring further adsorption [11]. Table 2 presents the kinetic model parameters of TC adsorption and the R^2 values of the three different nonlinear models were compared. Considering the maximum R^2 value, it was stated that the most compatible model for this adsorption was observed as the Pseudo second order kinetic model and thus, the step of chemisorption was recommended as a more effective mechanism for this adsorption mechanism. On the other hand, for the PSO kinetic model the adsorption capacity of TC was calculated as 23.42 mg/g that was quite close to the value of 25.13 mg/g , calculated for a contact time of 120 minutes. Notably, the PFO rate constant (k_1) was found higher than the PSO rate constant (k_2), approximately 15 times, which indicates that the bulk transfer of adsorbate molecules to the adsorbent surface was faster than the chemisorption step. To summarize, the antibiotic adsorption over ZnO could be driven by two mechanisms such as physical and chemical adsorption processes due to the occurrence of active sites on both the surface and inside the pores, indicating that the porosity of the metal oxide was appropriate for adsorbing TC molecules.

Table 2. Adsorption kinetic parameters of ZnO on TC adsorption

Isotherm Models	Parameters	Values
Pseudo-first order	q_e (mg/g)	22.20
	k_1 (L/min)	0.065
	R^2	0.87
Pseudo-second order	q_e (mg/g)	23.42
	k_1 (L/min)	0.0046
	R^2	0.96
Intraparticle diffusion	k_{int} (g/mg.min ^{1/2})	0.39
	C	10.85
	R^2	0.76

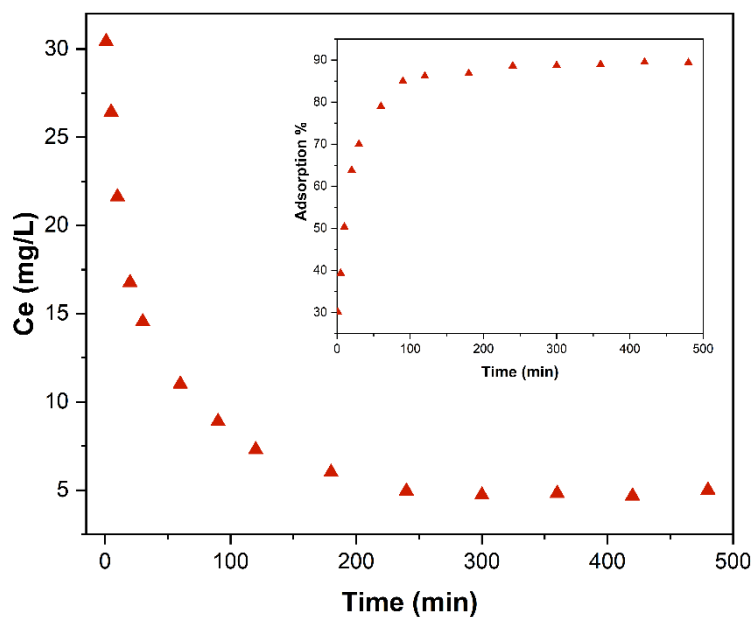


Figure 2. Time dependent TC adsorption capacity of ZnO

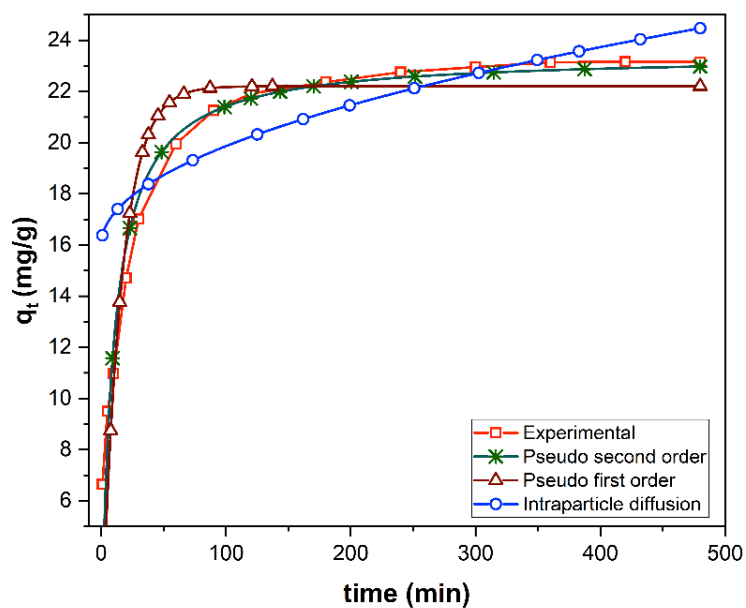


Figure 3. Kinetic models of ZnO on TC adsorption

3.3 Adsorption thermodynamics

Temperature is one of the most effective parameters to examine the thermodynamic behavior of the adsorption process and thus the adsorption process was performed under different temperatures. According to the results of the experimental studies, standard Gibbs free energy (ΔG°), standard enthalpy change (ΔH°) and standard entropy change (ΔS°) parameters were predicted to estimate the thermodynamic nature of TC adsorption on ZnO surface. The thermodynamic parameters, calculated via Eq. (8-10), are utilized to estimate either the reaction endothermic or exothermic.

$$K_d = \frac{q_e}{C_e} \quad (8)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (9)$$

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (10)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$$

where, ΔG° (kJ/mol), ΔH° (kJ/mol) and ΔS° (J/molK) represent the changes in Gibbs free energy, enthalpy and entropy, respectively. K_d is the distribution coefficient of kinetic energy change, R is the ideal gas constant (J/molK), T is adsorption process temperature (K), q_e is the adsorbed amount of TC (mg/g), C_e is the amount of TC in equilibrium solution (mg/L).

The as-estimated thermodynamic data are given in Table 3. The negative Gibbs free energy value indicated that the adsorption was a spontaneous and thermodynamically favorable process. Furthermore, the ΔG° value lower than 15 kJ/mol was assigned to physical adsorption [17]. The positive enthalpy changes remarked that the TC adsorption over ZnO was an endothermic reaction. In addition, the positive entropy change is supported by the increasing randomness of the system. In terms of TC adsorption on ZnO, the positive change of entropy defined an increase in system disorder. The thermodynamic results demonstrated that the adsorption of TC by ZnO was a temperature-promoted reaction system [18].

Table 3. Thermodynamic parameters of ZnO on TC adsorption

T (K)	ΔH° (kJ/mol)	ΔG° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol K)
298		-1533.60	
318	2.49	-1636.69	5.15
338		-1739.79	

3.4 Effect of initial solution pH on adsorption

In order to the effect of pH, the adsorptive removal of TC was evaluated at five pH conditions (2.55, 4.01, 6.05, 8.53 and 12.00). As depicted in Figure 4, the adsorption efficiencies were greatly affected by pH and the removal performances were calculated as 30.8%, 61.5%, 89.7%, 41.5% and 58.0% for 2.55, 4.01, 6.05, 8.53 and 12.00 of pH values, respectively. That is, the highest removal was calculated as 89.2 % at pH 6.05 after 24 h, while the minimum value was found to be 30.8 % at pH 2.55. The difference in the activity could be related with the charge properties of the ZnO surface and pKa values of TC molecule. Based on its different pKa values (3.3, 7.7, 9.7 and 12), TC molecules could be found in different forms under various pH value: (a) H_4TC^+ at pH lower than 3.3, (b) H_3TC in the pH from 3.3–7.7, (c) H_2TC^- in the pH from 7.7–9.7 and (d) HTC^{2-} at pH higher than 12. On the other hand, in acidic conditions, spherical ZnO surface could be positively charged, while it could be negatively charged in a basic atmosphere. It was therefore stated that the adsorption could be limited by the increased electrostatic repulsion between H_4TC^+ and positively charged ZnO surface at pH 2.55. The similar phenome was observed at basic pH (pH 8.53 and pH 12.00), which the repulsion forces were between H_2TC^- / H_2TC^{2-} and negatively charged catalyst surface. When the solution pH was 6.05, the electrostatic attraction forces were observed between neutral molecule antibiotic molecule (H_3TC) and negative surface functional groups, improving adsorption efficiency. Considering this, sufficient TC removal was obtained in the natural environment.

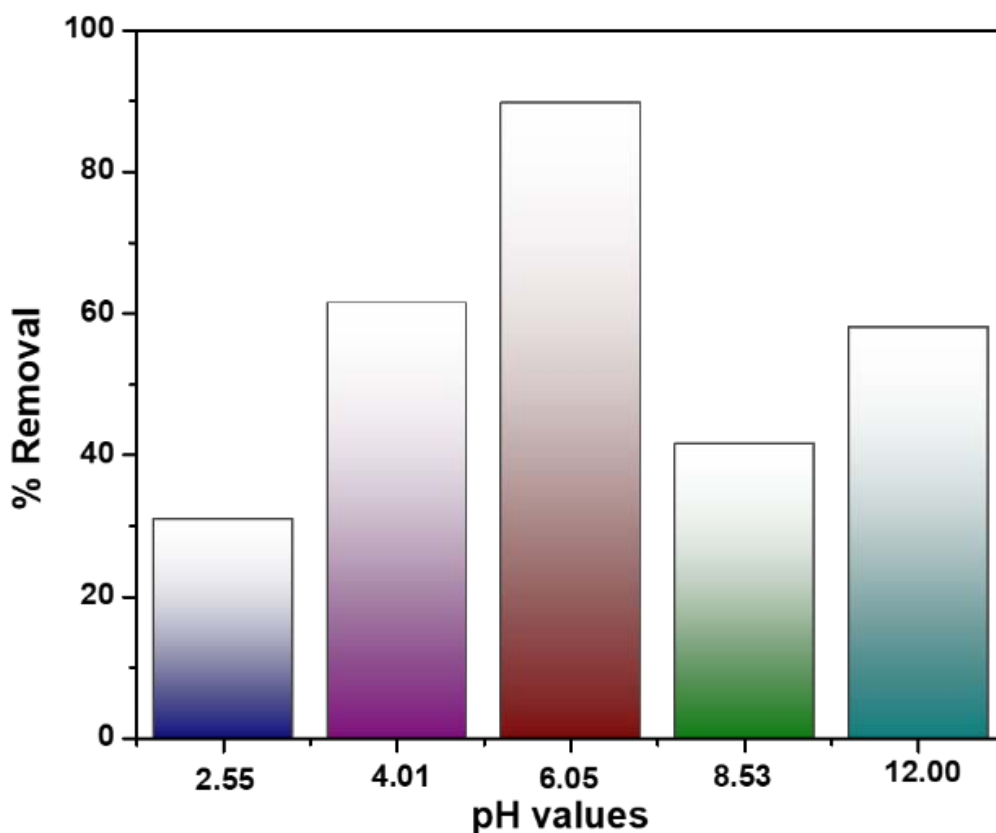


Figure 4. Effect of pH value on TC adsorption over ZnO

IV. CONCLUSIONS

Overall, the adsorptive removal of tetracycline from the aqueous media was investigated by using spherical zinc oxide with the diameter of 2-5 mm. The pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models fitted best to the experimental data while thermodynamic data verified that the tetracycline adsorption process was exothermic and spontaneous in nature. The best fitting of the non-linear form of Langmuir model indicated that the antibiotic adsorption on ZnO samples consisted of both physical and chemical forces. To conclude, this study introduces commercial ZnO samples with hierarchical structure samples as a promising adsorbent for antibiotic removal and it can be utilized in future studies.

REFERENCES

1. da Silva Medeiros DCC, Nzediegwu C, Benally C, Messele SA, Kwak JH, Naeth MA et al (2022) Pristine and engineered biochar for the removal of contaminants co-existing in several types of industrial wastewaters: a critical review. *Sci Total Environ.* 809,151120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151120>
2. Teodosiu C, Gilca AF, Barjoveanu G, Fiore S (2018) Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: A review on processes and environmental performances assessment. *J. Clean. Prod.* 197, 1210-1221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.247>
3. Ni T, Feng H, Tang J, Wang J, Yu J, Yi Y, Tang L (2022) A novel electrocatalytic system with high reactive chlorine species utilization capacity to degrade tetracycline in marine aquaculture wastewater. *Chemosphere* 300, 134449. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134449>
4. Charuaud L, Jarde E, Jaffrezic A, Thomas MF, Le Bot B (2019) Veterinary pharmaceutical residues from natural water to tap water: sales, occurrence and fate. *J. Hazard. Mater.* 361, 169-186. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.075>
5. Başlayıcı S, Gulen B, Bugdayci, M, Demircivi, P (2023) Facile synthesis of silicon carbide/hydroxyapatite composites through ball-mill for enhancing adsorption of tetracycline. *International J. Environ. Anal. Chem.* 1-19. <https://doi.org/10.1080/03067319.2023.2229737>
6. Dai Y, Li J, Shan D (2020) Adsorption of tetracycline in aqueous solution by biochar derived from waste *Auricularia auricula* dregs. *Chemosphere* 238, 124432. doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.124432.
7. Kanmaz N, Buğdaycı M, & Demirçivi P (2023) Solvent-free mechanochemical synthesis of TiO₂-ethyl cellulose biocomposite for adsorption of tetracycline and organic dyes. *J. Mol. Liq.* 378, 121643. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121643>
8. Gopal G, Alex S A, Chandrasekaran N, & Mukherjee A (2020) A review on tetracycline removal from aqueous systems by advanced treatment techniques. *RSC advances* 10(45), 27081-27095. <https://doi.org/10.1039/D0RA04264A>
9. Yang B, Wei Y, Liu Q, Luo Y, Qiu S, Shi Z (2019) Polyvinylpyrrolidone functionalized magnetic graphene-based composites for highly efficient removal of lead from wastewater. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng.* 582, 123927. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123927>
10. Kanmaz N, Buğdaycı M, Demirçivi, P (2023) Investigation on structural and adsorptive features of BaO modified zeolite powders prepared by ball milling technique: Removal of tetracycline and various organic contaminants. *MICROPOR MESOPOR MAT.* 354, 112566. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2023.112566>
11. Priya SS, Radha K V (2017) A review on the adsorption studies of tetracycline onto various types of adsorbents. *CHEM ENG COMMUN.* 204(8), 821-839. <https://doi.org/10.1080/00986445.2015.1065820>
12. Nebaghe K C, El Boundati Y, Ziat K, Naji A, Rghioui, L, Saidi M (2016). Comparison of linear and non-linear method for determination of optimum equilibrium isotherm for adsorption of copper (II) onto treated Martil sand. *Fluid Ph. Equilib.* 430, 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2016.10.003>
13. Yang W, Han Y, Li C, Zhu L, Shi L, Tang W, Li Z (2019). Shapeable three-dimensional CMC aerogels decorated with Ni/Co-MOF for rapid and highly efficient tetracycline hydrochloride removal. *J. Chem. Eng.* 375, 122076. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122076>
14. Karthikeyan G, Anbalagan K, Andal NM (2004). Adsorption dynamics and equilibrium studies of Zn (II) onto chitosan. *J. Chem. Sci.* 116, 119-127. <https://doi.org/10.1007/BF02708205>

15. Duan YT, Yao Y, Ameta RK (2023). Removal and recovering of anionic and cationic dyes using Neem Leaf ash prepared at 250, 500 and 750° C: Analyzed by adsorption isotherm and physicochemical parameters. *J. Mol. Liq.* 370, 121012. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.121012>
16. Adsorption Technology in Water Treatment in Fundamentals, Processes, and Modeling (2012), De Gruyter, 123–168. <https://doi.org/10.1515/9783110240238.123>
17. Fan B, Tan Y, Wang J, Zhang B, Peng Y, Yuan C, Cui S (2021) Application of magnetic composites in removal of tetracycline through adsorption and advanced oxidation processes (AOPs): a review. *Processes* 9(9), 1644. <https://doi.org/10.3390/pr9091644>
18. Lei C, Pi M, Jiang C, Cheng B, Yu J (2017) Synthesis of hierarchical porous zinc oxide (ZnO) microspheres with highly efficient adsorption of Congo red. *J. Colloid Interface Sci.* 490, 242-251. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.049>
19. Ranjbari A, Kim J, Kim JH, Yu J, Demeestere K, Heynderickx, PM (2023) Enhancement of commercial ZnO adsorption and photocatalytic degradation capacity of methylene blue by oxygen vacancy modification: Kinetic study. *Catal. Today*, 413, 113976. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.12.007>
20. Sharma M, Singh J, Hazra S, Basu S (2019) Adsorption of heavy metal ions by mesoporous ZnO and TiO₂@ ZnO monoliths: adsorption and kinetic studies. *Microchem. J.* 145, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.10.026>
21. Morales-Serrato D, Torres-Pérez J, de Jesús Ruíz-Baltazar Á, Reyes-López SY (2021) Adsorbent materials for emerging contaminant (tetracycline) removal. *Int. J. Res.* 9, 446-491. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v9.i4.2021.3847>
22. Ben SK, Gupta S, Raj KK, Chandra V (2023) Adsorption of malachite green from polyaniline facilitated cobalt phosphate nanocomposite from aqueous solution. *Chem. Phys. Lett.* 820, 140469. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2023.140469>
23. Hojjati-Najafabadi A, Esfahani PN, Davar F, Aminabhavi TM, Vasseghian, Y (2023) Adsorptive removal of malachite green using novel GO@ ZnO-NiFe₂O₄-αAl₂O₃ nanocomposites. *J. Chem. Eng.* 471, 144485. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144485>



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Swelling and re-swelling performance of glutaraldehyde crosslinked wet chitosan hydrogels

H. Songül Kaçoğlu^a, Özgür Ceylan^b and Mithat Çelebi^{c*}

^aPolymer Materials Engineering, Institute of Graduate Studies, Yalova University, Yalova, 77100, Turke.

^bCentral Research Laboratory Research and Application Centre, Yalova University, Yalova, 77100, Turkey.

^cDepartment of Polymer Materials Engineering, Faculty of Engineering, Yalova University, Yalova, 77100, Turkey.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 May 2024

Received in revised form 5 September 2024

Accepted 10 October 2024

Available online

Keywords:

Chitosan

Storage modulus

Re-swelling

Wet hydrogel

Viscosity

ABSTRACT

Chitosan (Chi) is frequently used in hydrogels because of its natural characteristics. It is environmentally friendly, biodegradable, and does not include any harmful substances. Chitosan hydrogels were chemically synthesized by cross-linking with glutaraldehyde (GA) at various ratios ranging from 1% to 10% (w/w), employing two types of molecular weight chitosan. The degree of swelling of wet hydrogels (non-drying) was examined at pH 2.0, 5.6, and 7.4. After the swollen hydrogels dried, their re-swelling capabilities were examined in distilled water. Chemically cross-linked chitosan hydrogels were found to be stable, so the hydrogels were able to swell repeatedly 5 times without losing any of their swelling properties. The storage modulus properties of chitosan hydrogels were measured using a Discovery Hybrid Rheometer-1 at different temperatures. The storage moduli of chitosan hydrogels remained stable as temperature increased, with maximum values of 0.01 MPa and 0.02 MPa for low and medium molecular weight hydrogels. The viscosity of chitosan solutions was determined using two instruments: a Discovery Hybrid Rheometer-1 at 25 °C at different shear rates, and a Brookfield Viscometer. The viscosity of low and medium molecular weight chitosan solutions were measured using a Brookfield Viscometer, resulting in values of 101.5 and 333.5 cps, respectively.

I. INTRODUCTION

Hydrogels are 3-dimensional hydrophilic polymeric networks. These hydrogel polymers are hydrophilic because they have polar groups like hydroxyl (-OH), amidic (-CONH-), carboxylic (-COOH), and sulphonic (-SO₃H) [1]. Superabsorbent polymers can absorb water, saline water, or physiological fluid in a ratio ranging from 10 to 1,000 times their own weight [2]. Intermolecular forces like hydrogen bonding, electrostatic forces, and hydrophobic interactions are used to create physically crosslinked hydrogels which have relatively low mechanical strength and uncontrollable pore size. Some crosslinker molecules are used to make chemically crosslinked hydrogels. Chemically cross-linked hydrogels, on the other hand, exhibit relatively higher stability and mechanical strength because they are formed by chemical bonds between the polymer chains [3]. Chemical cross-linking increases the degree of crystallinity and hydrophobicity and decreases swelling in chitosan hydrogels [4]. Many studies have been conducted on the impact of covalent crosslinking on chitosan modification. Cross-linker type, and its density directly affect the final properties of hydrogels such as mechanical strength, mucoadhesiveness, swelling and drug release [5]. Deacetylating chitin produces chitosan, which has an amine group [6]. Chitosan is a biodegradable and biocompatible polymer because it is metabolized by certain human enzymes, such as lysozymes. It has been used in pharmaceutical and medical materials, such as the hydrogel system [7–9]. Chitosan is one of the most used semi-synthetic polymers due to its numerous advantages, as mentioned above [10, 11]. Ruiz et al. demonstrated that chitosan hydrogel cross-linked with

*Corresponding author. Tel.: +90-226-815-6386; e-mail: @mithat.celebi@yalova.edu.tr

glutaraldehyde is effective at adsorbing palladium ions. It has been discovered that the use of glutaraldehyde crosslinked chitosan hydrogel systems as an adsorbent, particularly for wastewater treatment, holds great promise [12]. According to Ozbas and Gürdag's (2016) study, 5-fluorouracil-loaded, glutaraldehyde-cross-linked chitosan hydrogels demonstrated efficient wound healing activity as well as anti-tumor and anti-metabolite properties in comparison to non-drug loaded hydrogels [13]. Pan et al. used hyaluronic acid hydrogel to deliver recombinant human bone morphogenetic protein to dental implants. This improved bone growth around the implants. This method does not require making a wet hydrogel on-site, which leads to better alkaline phosphatase activity and osterix expression [14]. The ability of hydrogels to re-swell can be utilized in various applications. Soft, wet, and biocompatible hydrogels have become appealing options for flexible electronics, as they have similar characteristics to biological tissues and can be easily customized [15]. Superabsorbent polymers are very compatible with concrete and have been found to improve self-healing and self-sealing in fractured concrete. The ability of superabsorbent polymers to re-swell is a key factor in determining how well they seal themselves in concrete [16]. Shur et al. conducted a study on the kinetics of hydrogel re-swelling in living organisms using microcomputed tomography. Their findings demonstrated that the shape of the implant and the presence of water had a major impact on the re-swelling process [17]. Superabsorbent polymers have the potential to mitigate water evaporation in arid regions. However, due to their limited salt resistance, water retention capacity, and swelling rate, they are less suitable for use in areas with scarce water supplies. Tian et al. reported that hydrogels are highly successful in preventing soil water evaporation. After 16 hours at 25 °C, the hydrogels retained 97.7% of the water, and after 5 cycles at 40 °C, they absorbed 832 g of water per gram of hydrogel. This finding presents new opportunities for their application [18]. Lipatova et al. synthesized chitosan hydrogels. When compared to films made from chitosan that have not been treated, films made by drying hydrogel have less crystallinity and can absorb more water vapor and Cu²⁺ ions. Additionally, these films have the ability to hold up to 5000% of water after re-swelling without undergoing any damage [19]. The most important difference of this study from the studies in the literature is that the synthesized hydrogels were not subjected to any drying process. The swelling properties of non-dried hydrogels were examined at different pHs. The swollen hydrogels were dried, and their swelling properties were examined again in distilled water.

II. EXPERIMENTAL METHOD

2.1 Materials and Preparation Techniques

The low and medium molecular weight chitosan, with a deacetylation degree of $\geq 75\%$, were acquired from Sigma-Aldrich. The following chemicals were also acquired from Sigma Aldrich: acetic acid, sodium acetate, disodium citrate, hydrochloric acid, sodium hydroxide, and glutaraldehyde (25% solution in water). All the other compounds were of high purity.

2.1.1 Solubility

Chitosan (0.1 g, 1% wt.) solution was prepared with acetic acid (1% wt.) in a centrifuge tube. After the dissolving process was completed, the mixture was further agitated for 40 minutes at 250 rpm and 25 °C. The centrifuge tube was kept in boiling water for 10 minutes. After the centrifuge tube was kept in boiling water for

10 minutes, the solution was cooled to room temperature and centrifuged at 1200 rpm. Once the liquid in the centrifuge tube was removed, the sediment at the bottom was rinsed with distilled water and centrifuged again. The insoluble solid part was dried at 60 °C for 24 hours. The percentage solubility value of chitosan was calculated using the initial and final dry matter amounts as shown in Equation 1.

$$S (\%) = \left(\frac{w_{\text{initial}} - w_{\text{insoluble part}}}{w_{\text{initial}}} \right) * 100 \quad (1)$$

S (%): solubility percentage of chitosan; w_{initial} : mass of chitosan initially weighed; $w_{\text{insoluble part}}$: The amount of chitosan remaining or insoluble part after the dissolution, heating, centrifugation, rinsing, and drying processes described above, respectively.

2.1.2 Viscosity

In this method, Brookfield viscometer (DV2T) was used to determine the viscosity values of low and medium molecular weight chitosan used in hydrogel preparation. Chitosan solution was prepared by dissolving in 1% wt. Acetic acid. The viscosity of 1% wt. low and medium chitosan solutions were determined using Spindle No: 3 at 100 rpm.

2.1.3 Preparation of hydrogels

The chitosan, with a concentration of 2% (w/v), is dissolved in a 2% (w/v) acetic acid solution by agitating it with a magnetic stirrer. The resulting mixture is then placed in an ultrasonic bath for approximately 30 minutes to eliminate any air bubbles. A 1% (w/w) aqueous solution was prepared with distilled water by diluting a 25% glutaraldehyde solution. Then, the glutaraldehyde crosslinker, prepared as a 1% (w/w) aqueous solution, was added at a rate of 1-10% by weight based on chitosan with an automatic pipette, mixed rapidly to ensure a homogeneous distribution and kept at room temperature for one day until the crosslinking reaction was completed [9]. Figure 1 illustrates the steps involved in determining the gelation time of hydrogels produced with chitosan of medium molecular weight. The gelation times of hydrogels were determined as 60 to 180 seconds (sec.), depending on the molecular weight and cross-linker concentration.

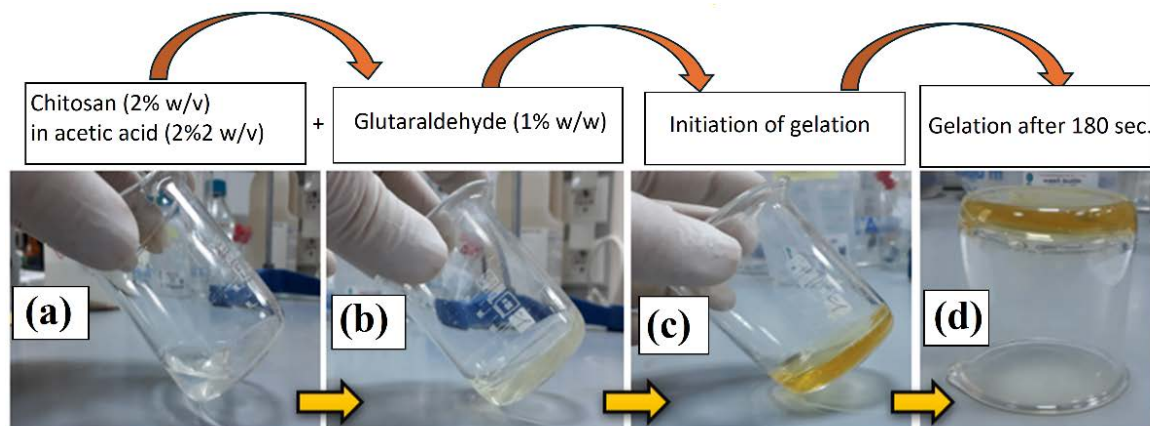


Figure 1. Illustration of the various stages involved in establishing the gelation time of medium chitosan hydrogel crosslinked with 1% glutaraldehyde

Two different molecular weight chitosan, including low and medium molecular weight, were used in this investigation. Chitosan with two different molecular weights were treated with glutaraldehyde at concentrations varying from 1% to 10% (w/w). The given hydrogels' sample codes are included in Table 1.

Table 1. Sample codes of different molecular weights chitosan-based hydrogels

GA (%) (w/w)	Specimens	
	Low Molecular Weight Chitosan Hydrogels	Medium Molecular Weight Chitosan Hydrogels
1	L-Chi/GA1	M-Chi/ GA1
3	L-Chi/GA3	M-Chi/ GA3
5	L-Chi/GA5	M-Chi/ GA5
7	L-Chi/GA7	M-Chi/ GA7
10	L-Chi/GA10	M-Chi/ GA10

2.2 FT-IR

Fourier transform infrared (FTIR) spectra of hydrogels were obtained using a Perkin-Elmer Spectrum 100 FT-IR spectrometer with ATR equipment in the range of 4000-650 cm^{-1} , at a resolution of 4 cm^{-1} .

2.3 Swelling Degree

Low and medium molecular weight chitosan hydrogels, at 5 different GA concentrations were cut into the same sizes and weighed. Then, the gels that were left in the swelling environments one by one were removed from these environments at certain periods, and after the excess water on them was removed with filter paper, they were carefully weighed and returned to the swelling environments. This process continued until the gel samples reached swelling equilibrium and the weights were constant. At the end of the process, the water content of the hydrogels that reached their maximum swelling value at equilibrium was calculated using Equation 2 [20].

$$S (\%) = \frac{w_s - w_i}{w_i} \times 100 \quad (2)$$

S (%) represents the swelling percentages of the hydrogel, w_s ; weight of the hydrogel in its swollen state, w_i ; the initial weight of the hydrogel. All swelling experiments were carried out on three samples for each GA concentration. The swelling capacities of the hydrogels were assessed in three different environments to simulate the conditions of the stomach, skin, and physiological pH levels. These environments had pH values of 2.0, 5.6 (distilled water), and 7.4, respectively.

In the present study, chitosan hydrogels were not subjected to drying using a freeze dryer or any other drying equipment. The hydrogels that were prepared were subjected to various conditions without undergoing the drying process, and their swelling properties were investigated.

2.4 Re-swelling performance of the hydrogels

Hydrogel specimens were initially dipped in distilled water for one day to allow them to reach their maximum swelling capacity. Hydrogel specimens were then weighed, dried in a vacuum oven at 50 $^{\circ}\text{C}$, and then placed back into the swelling medium for another day. The procedure was repeated for five cycles. Meanwhile, the

swelling values of the gel samples were measured and the swelling performances after the fifth repetition were evaluated.

2.5 Dynamic mechanical analyzer (DMA)

DMA of chitosan-based hydrogels specimens were performed using a Discovery Hybrid Rheometer-1 (DHR-1). Samples were tested in uniaxial tension mode at a heating rate of 3 °C/min and a frequency of 1 Hz. The flow properties of the chitosan solutions (1% w/v) were determined with the same device at 25 °C and shear rates between 0.5 and 1000 1/s.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Solubility

Chitosan solubility is directly affected by factors such as pH, molecular weight, chitin pretreatments, degree of deacetylation and process conditions (temperature, alkali concentration, processing time), ionic strength, and acetyl group distribution, so these parameters can be changed to control solubility. The solubility of chitosan is limited in water and common inorganic acids due to its high molecular weight and crystal structure. The most used solvent for chitosan is 1% acetic acid solution. One of the most critical factors influencing chitosan solubility is the medium's pH. Chitosan's free amino groups allow for protonation in $\text{pH} < 6$ conditions and easy dissolution via electrostatic repulsion of the cationic fields. At pH greater than 6.5, solubility stability weakens, and precipitation occurs as amino groups become less protonated [21–24]. In this study, the solubility percentages of commercially chitosan were determined according to equation 1. The solubility percentages of low and medium molecular weight chitosan were determined as 95.5% and 91.0%, respectively. It was found that increasing molecular weight causes chitosan to be more difficult to dissolve.

3.2 Hydrogel Preparations

Chitosan hydrogels were obtained because of the Schiff base reaction over the aldehyde groups (-CHO) in the structure of glutaraldehyde and the amine groups in the structure of chitosan (-NH₂) [25]. It was observed that the yellow color of the chitosan gel changed to orange as the glutaraldehyde concentration in the solution increased. This is the evidence of the reaction between chitosan and glutaraldehyde resulting in the formation of the Schiff base [26]. Hydrogel synthesis was prepared in a 2 ml syringe. The samples used for the swelling test were cut properly with a razor blade and then the swelling test was performed. Figure 2 illustrates the swelling of chitosan hydrogels before and after being treated with various amounts of glutaraldehyde. Also, it has been observed that increasing the cross-linking concentration in the gel content increases color darkening as well as cross-linking speed. In Figure 2a, the first two hydrogels from the left appear to be more rounded, while the next ones appear to have a more regular structure. Here too, the shapes are seen to be smoother as the cross-linker ratio increases. In addition, in Figure 2b, it is seen that the first hydrogel sample from the left cannot fully maintain its structural stability due to its lower cross-linking ratio.

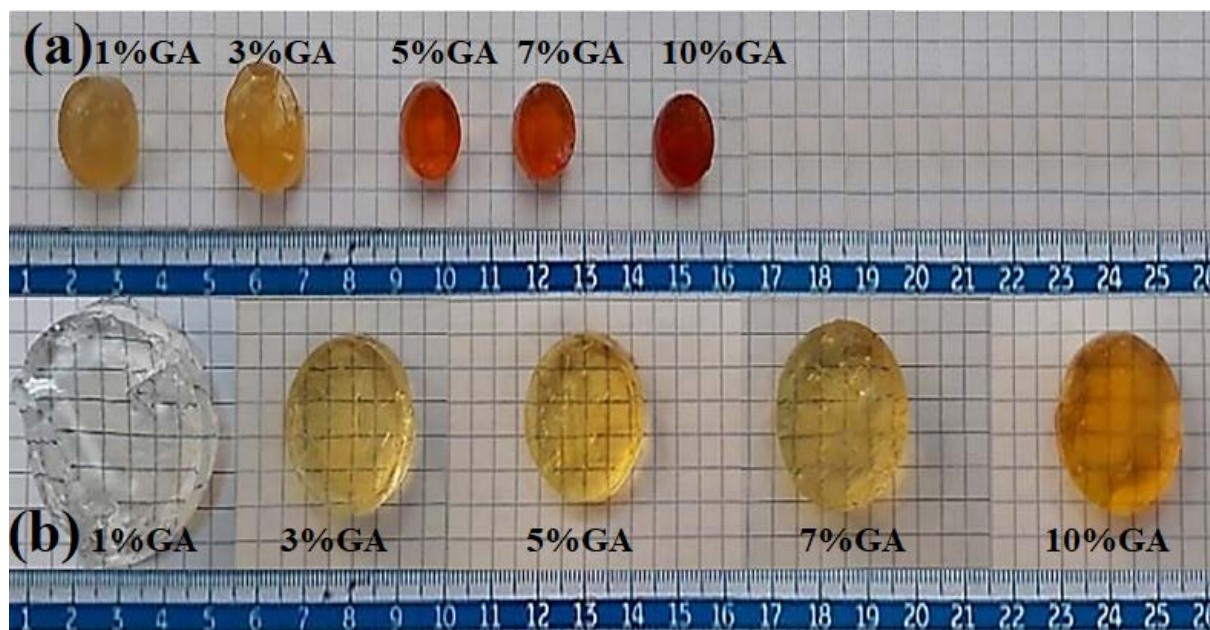


Figure 2. Before (a) and after (b) swelling images of medium molecular weight chitosan hydrogels in distilled water

3.3 FT-IR

FTIR experiments were carried out on both neat chitosan and chitosan hydrogels cross-linked with 7% w/w glutaraldehyde. Figure 3. shows the FTIR spectra for 7% GA/ L-CS and 7%/GA-CS hydrogels.

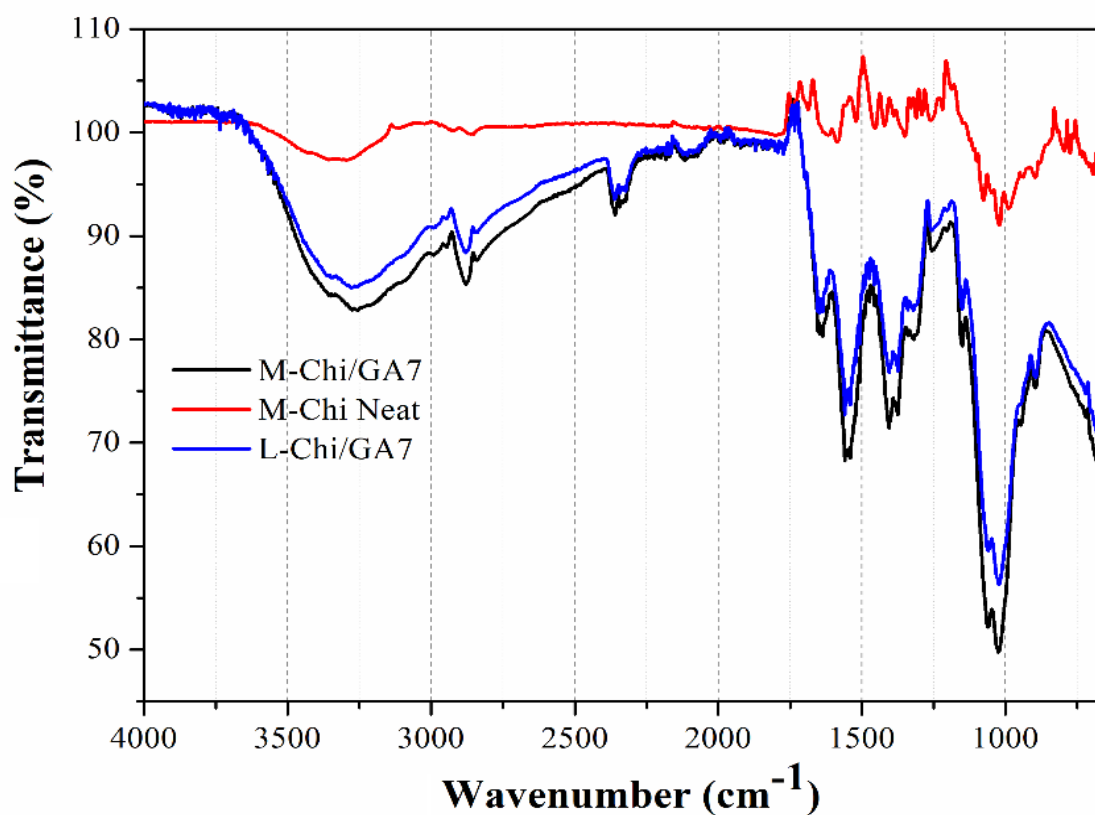


Figure 3. Fourier transform infrared spectra of neat medium molecular weight chitosan (M-Chi), M-Chi/GA7 and L-Chi/GA7 hydrogels

FT-IR spectrum (Figure 3) shows that a broad band ranging from 3500 to 3000 cm^{-1} , which is ascribed to the presence of N-H and O-H hydroxyl groups [1]. An analysis of the data presented in Figure 3 reveals a narrow band at 2880 cm^{-1} corresponding to the C-H asymmetric stretching bond, with sharp peaks in the range of 1677-1566 cm^{-1} attributed to the Amide II groups, indicative of N-H bending vibrations in free amine ($-\text{NH}_2$) groups [27]. Upon examination of the FTIR spectra of hydrogels cross-linked with 7% GA, minor peaks are observed at the 1640 cm^{-1} band. The peaks are corresponded to the C=N imine bonds formed between chitosan and GA [28]. The existence of this band validates the Schiff reaction, indicating covalent cross-linking between chitosan and GA. The intensity of the N-H bending vibration band of primary amines, located at 1650-1550 cm^{-1} , diminishes and changes to a lower wavenumber. This is ascribed to the diminished intensity of the N-H band associated with the decreasing $-\text{NH}_2$ groups due to the interaction of chitosan with GA. As the GA ratio rises, the intensity of the bands at 1058-1026 cm^{-1} increases, while the bending vibration band of $-\text{NH}_2$ is observed at 620 cm^{-1} [29]. FTIR study results support the cross-linking interaction between chitosan and GA. Upon examination of the FTIR spectra of M-Chi and 7% GA cross-linked chitosan hydrogels depicted in Figure 3, it is evident that there is no substantial variation in the spectra of hydrogels samples of differing molecular weights.

3.4 Swelling of Hydrogels

The swelling properties of the hydrogels whose swelling properties were examined without drying were different from the swelling properties of the dried hydrogels published in the literature [9]. The pH of a healthy human epidermal layer is naturally maintained at a slightly acidic level, with the skin's surface ranging from 4.5 to 5.3. The pH of wounds' microenvironment is naturally more alkaline due to the disruption of the acidic environment caused by trauma, which exposes underlying tissues with a physiological pH of 7.4 [30]. pH values of 2.0, 5.6, and 7.4 were selected as ideal options to mimic the acidity levels seen in the stomach, skin, and physiological environments. Figure 4 and Figure 5 show how the chitosan hydrogels swollen when they were put in a medium made by adding NaOH to distilled water to increase the pH to 7.4. Upon analyzing the figures provided, it was seen that higher concentrations of cross-linkers led to a notable decrease in the water absorption percentages of gels. In general, the swelling of hydrogels in distilled water is lower than the swelling values in acid solutions. This situation, resulting from the cationic structure of chitosan, which does not undergo protonation in neutral and basic states, also reduces swelling values with the effect of increasing the GA ratio [31]. Based on research by Hoffman et al. (2012) and Peppas et al. (2000), hydrogels can swell up to thousands of times their original size. This can happen depending on the pH and temperature of the environment, as well as the ionic strength of the environment [32, 33]. Berger et al. (2004) reported that the swelling capacity of chitosan-based hydrogels depends on the ambient pH as well as the cross-linker density, and that as the cross-link ratio increases, swelling values decrease and gel stability improves [34]. In contrast to the literature, the gels utilized in this investigation were synthesized, that is, without drying. In the present study, the higher swelling of chitosan gels in distilled water compared to pH 7.4 is related to the ionic strength of the water. Upon immersion in pH 7.4 phosphate buffer, the produced gels experienced water loss instead of swelling (results were not presented). Salts in the buffer solution increased the chemical potential of the solution. The water in the chitosan hydrogels in this solution moved out of the gel to decrease the chemical potential. Therefore, instead of swelling the gel in the phosphate buffer, the gel shrank, and the swelling percentage was negative. Water diffuses towards the side with a higher ionic strength. Thus, the pH of distilled water was adjusted to 7.4 by introducing NaOH to the distilled

water. Lower pH levels were expected to result in a greater swelling value. Nevertheless, when pH 2.0 was once again created using an acetate buffer, the expansion of the wet gel was significantly lower than anticipated. Hydrogels prepared with low-molecular-weight chitosan exhibit greater water retention percentages compared to hydrogels produced with medium-molecular-weight chitosan. As the concentration of cross-linkers in the hydrogels increased, the degree of swelling in the hydrogels reduced, as seen in Fig. 4 and Fig. 5.

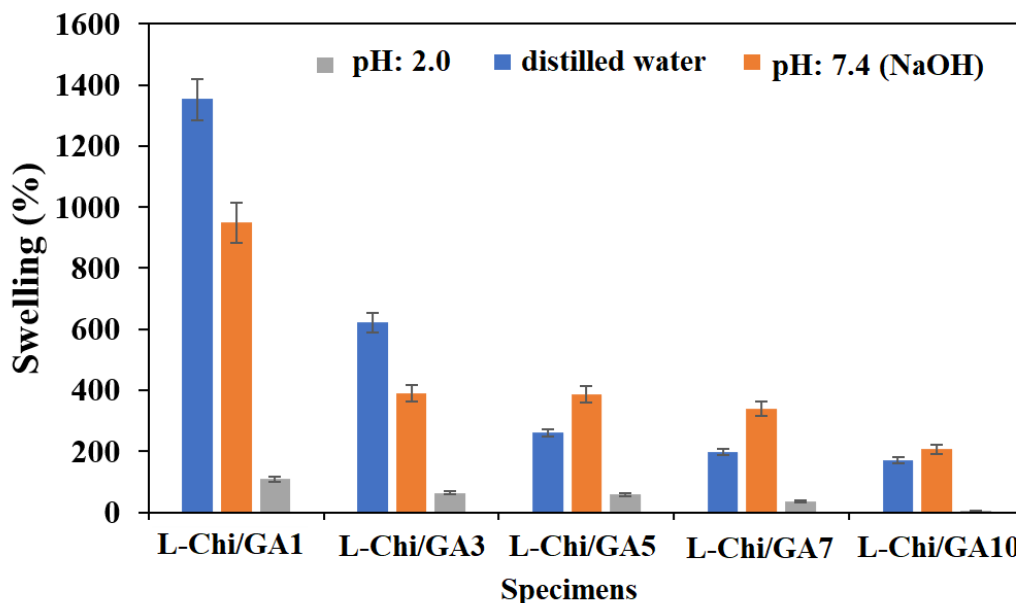


Figure 4. Swelling values of low molecular weight chitosan-based wet* hydrogels in distilled water and at different pHs after 24 hours (* wet hydrogel means that the hydrogels were not dried)

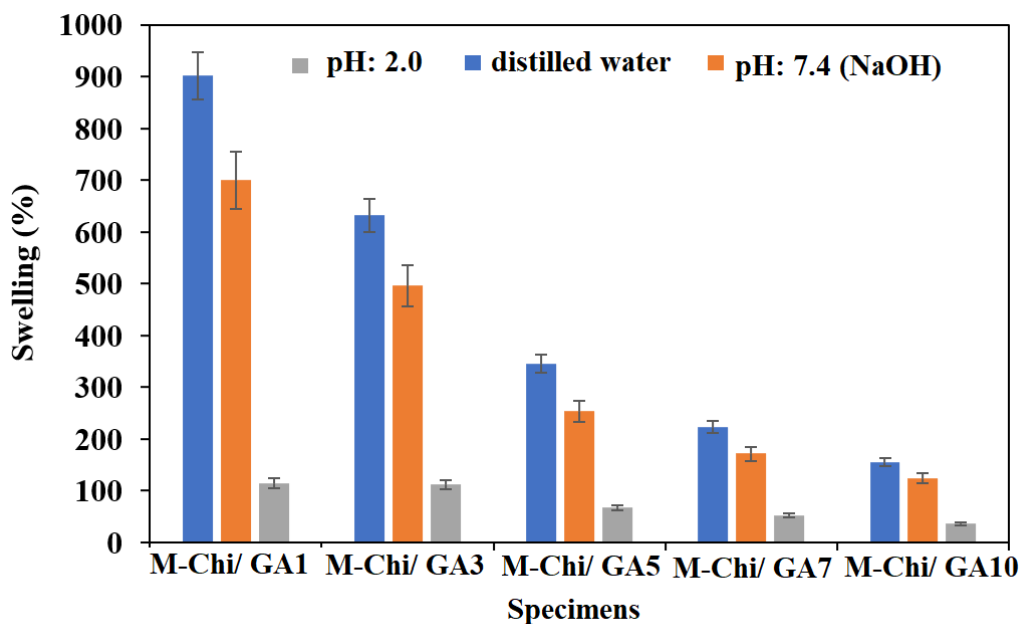


Figure 5. Swelling values of medium molecular weight chitosan-based wet hydrogels* in distilled water and at different pHs after 24 hours (* wet hydrogels means that the hydrogels were not dried)

3.5 Re-Swelling Performance of the Hydrogels

In this study, it was aimed to investigate the effect of the swelling percentage in chitosan hydrogels when immersed in distilled water on the swelling performance after repeated use. The effect of hydrogels prepared with low- and medium-molecular-weight chitosan on the reswelling performance is shown in Figures 6 and 7, respectively. The hydrogels, which reached maximum swelling equilibrium, were dried in a vacuum oven and placed back in the swelling environment, allowing them to swell again. This process was repeated 5 times. Chitosan gels cross-linked with GA revealed a swelling performance ranging from approximately 160% to 1350% in distilled water for both molecular weights. Although there was a slight decrease in the swelling performance of the hydrogels after the first use, there was no significant change in their subsequent re-swelling performance.

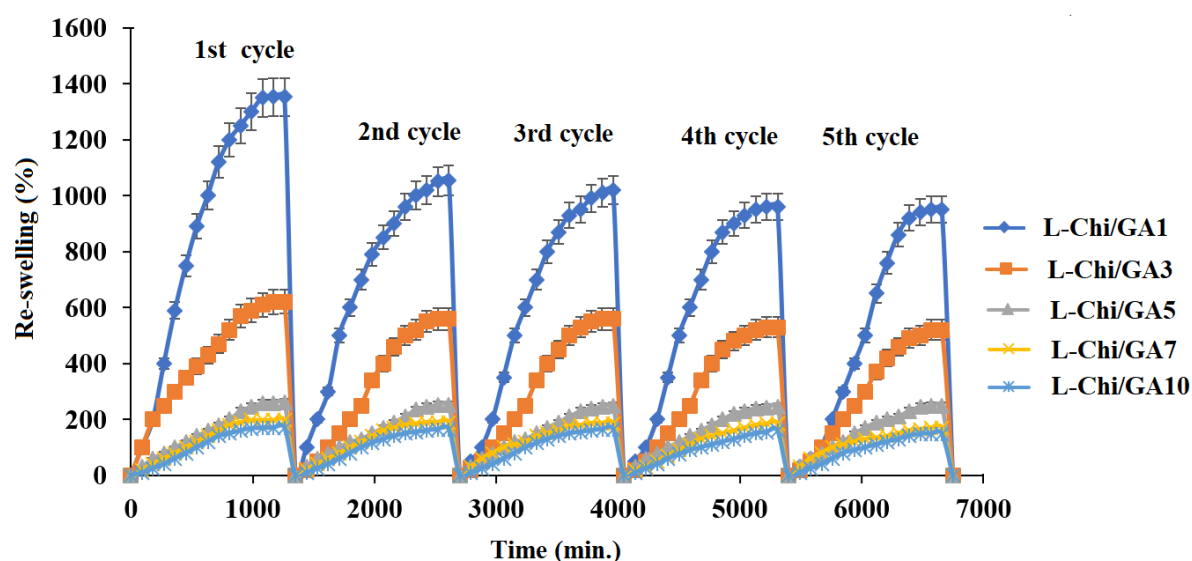


Figure 6. Change of re-swelling performance of Low molecular weight chitosan hydrogels prepared in different GA ratios in distilled water over time after 5 cycles

When the presented graphics are examined (Figure 6 and 7), it is seen that there is a decrease in swelling values with an increasing GA ratio for each cycle. As the crosslinking density increases in the hydrogel network, the hydrogel molecular network becomes denser. Relatively denser crosslinking causes a more rigid hydrogel structure, and this limits the swelling properties of the hydrogels. This increased crosslinking also affects the pore sizes of the hydrogel indirectly and reduces. While there was a noticeable difference in swelling percentages between the first and second uses, there was no substantial difference in the findings from the other uses, and the values were nearly identical. This situation; it has been explained that the hydrophilic groups in the structure of the gels, which are kept in the vacuum oven to be dried after the first use, reduce the swelling rate slightly by releasing the water trapped within them under the influence of heat, but as a result, the gel becomes more stable and firm, and there is no significant difference in the swelling rates in subsequent applications. In addition, the fact that no significant difference was observed in the swelling of the hydrogels after the 2nd cycle may also be due to the removal of unbound free polymers or the breakage of the pieces due to excessive swelling

in the first and second cycles swellings. According to Shu et al. (2001), certain ions and secondary parameters influence the water absorption and release properties of chitosan hydrogels. These elements provide a protective barrier that hinders interactions within the networked structure and reduces swelling [35].

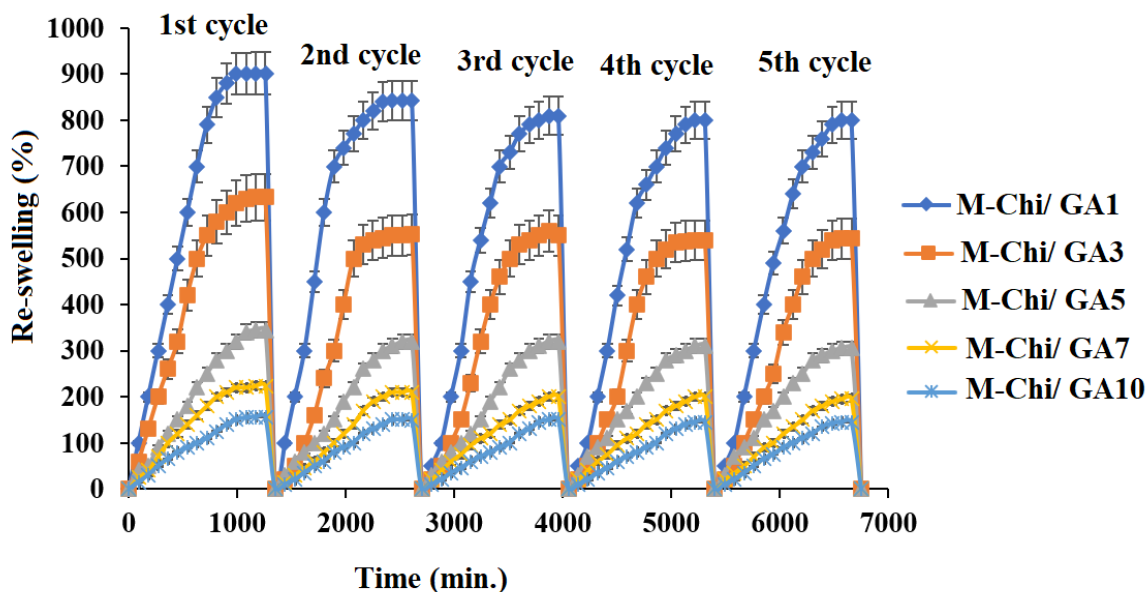


Figure 7. Change of re-swelling performance of Medium Mw chitosan hydrogels prepared in different GA ratios in distilled water over time after 5 cycles

3.6 Dynamic mechanical analysis (DMA)

Dynamic mechanical analysis (DMA) provides measurements of the storage or elastic modulus (G') and the loss or viscous modulus (G''), as well as the mechanical loss tangent ($\tan \delta = G''/G'$). The G' values indicate the amount of energy stored in the material under deformation stress, whereas G'' characterizes its viscous nature [36, 37].

We used a Discovery Hybrid Rheometer-1 (DHR-1) to find out how the chitosan hydrogels behaved when they were heated from room temperature to 40 °C. In Figures 8 and 9, the storage modulus values of hydrogels prepared with low and medium molecular weight chitosan are shown versus temperature. Since the experiments were conducted at a temperature below the glass transition temperature of chitosan, the storage modulus values did not change depending on the temperature. Because chitosan hydrogels are often utilized at room temperature or somewhat higher, no experiments were undertaken at temperatures near to the glass transition temperature of chitosan. When the number of cross-linkers in the hydrogel is low, the storage modulus is also lower. However, when the percentage of cross-linker ratio increases, the elastic modulus rises as well, resulting in a higher consistency of the hydrogel. But the amount of water in hydrogels has a big effect on their elastic modulus values, and the changes that have been seen cannot be explained by changes in the structure of the molecules [36]. In this study, the storage moduli of both categories of chitosan hydrogels remained relatively stable as temperature increased. The highest storage modulus values found were 0.01 MPa for low molecular weight chitosan hydrogels made with 10% glutaraldehyde and 0.02 MPa for medium molecular weight chitosan hydrogels.

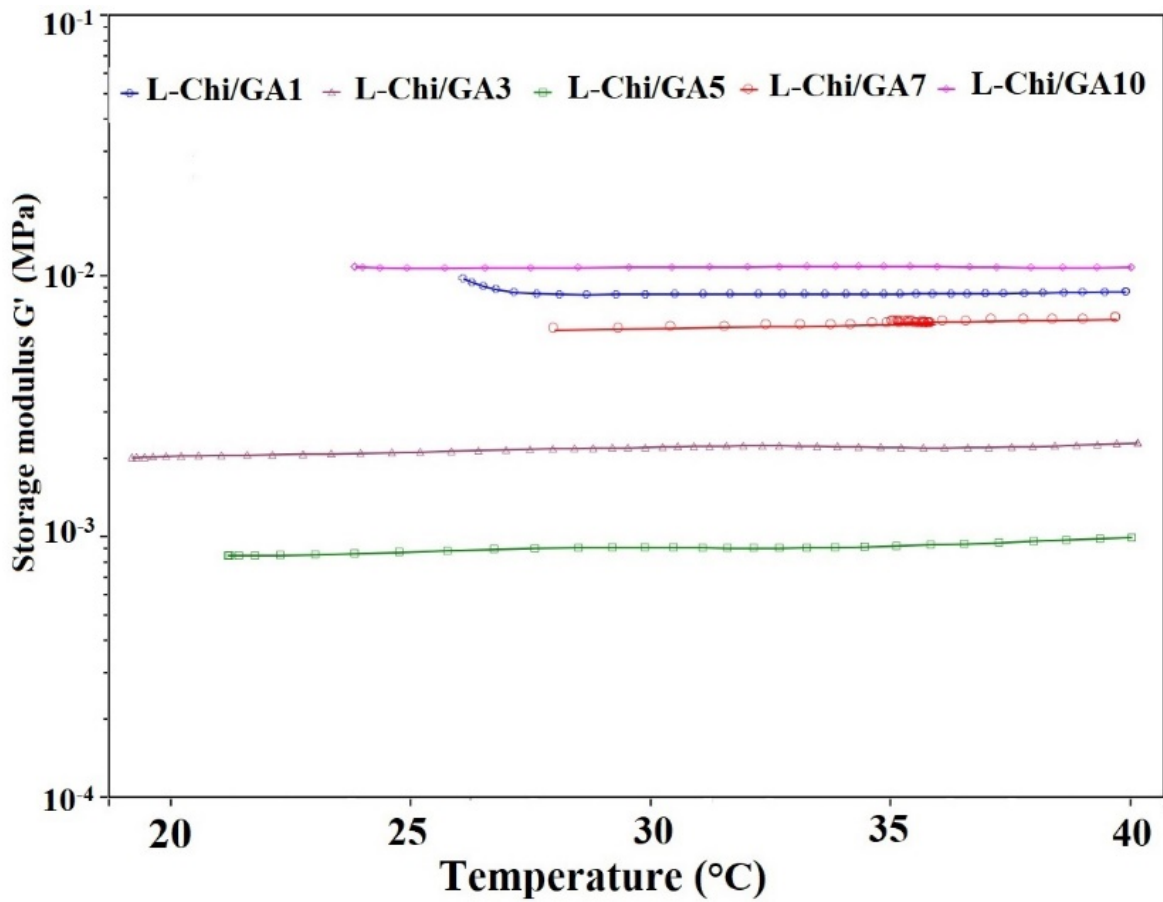


Figure 8. Storage modulus (G') of low molecular chitosan hydrogels crosslinked with glutaraldehyde

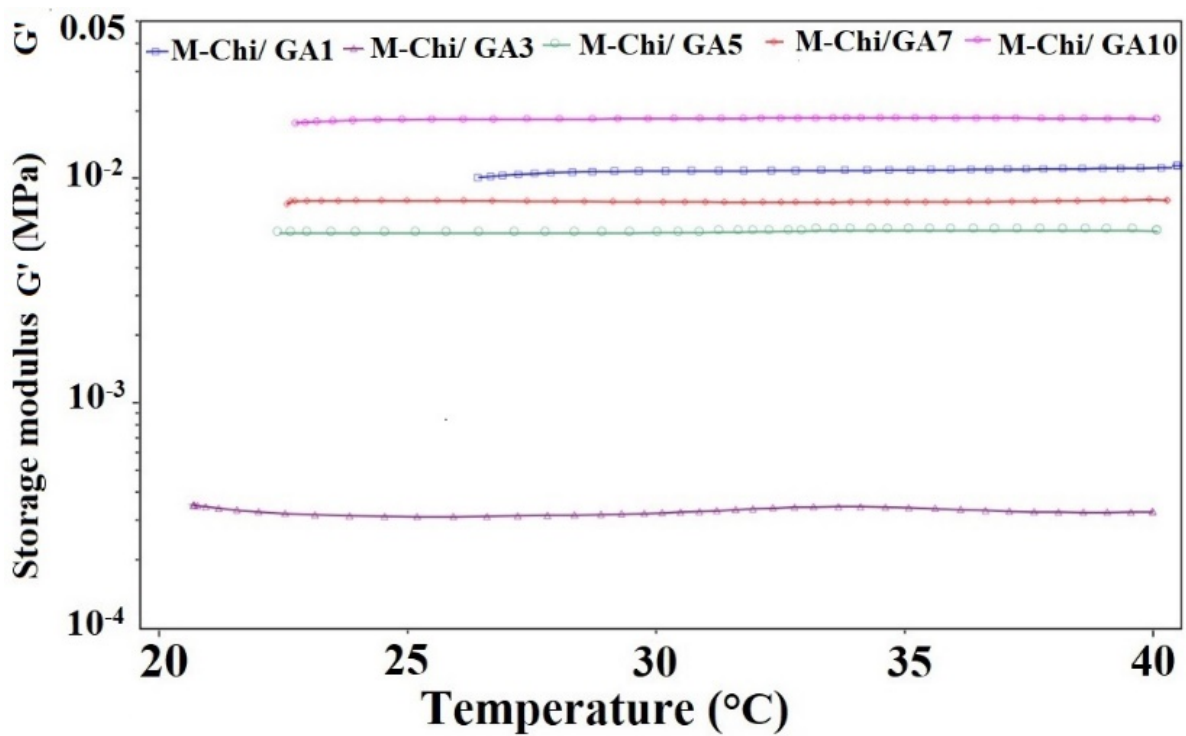


Figure 9. Storage modulus (G') of medium molecular chitosan hydrogels crosslinked with glutaraldehyde

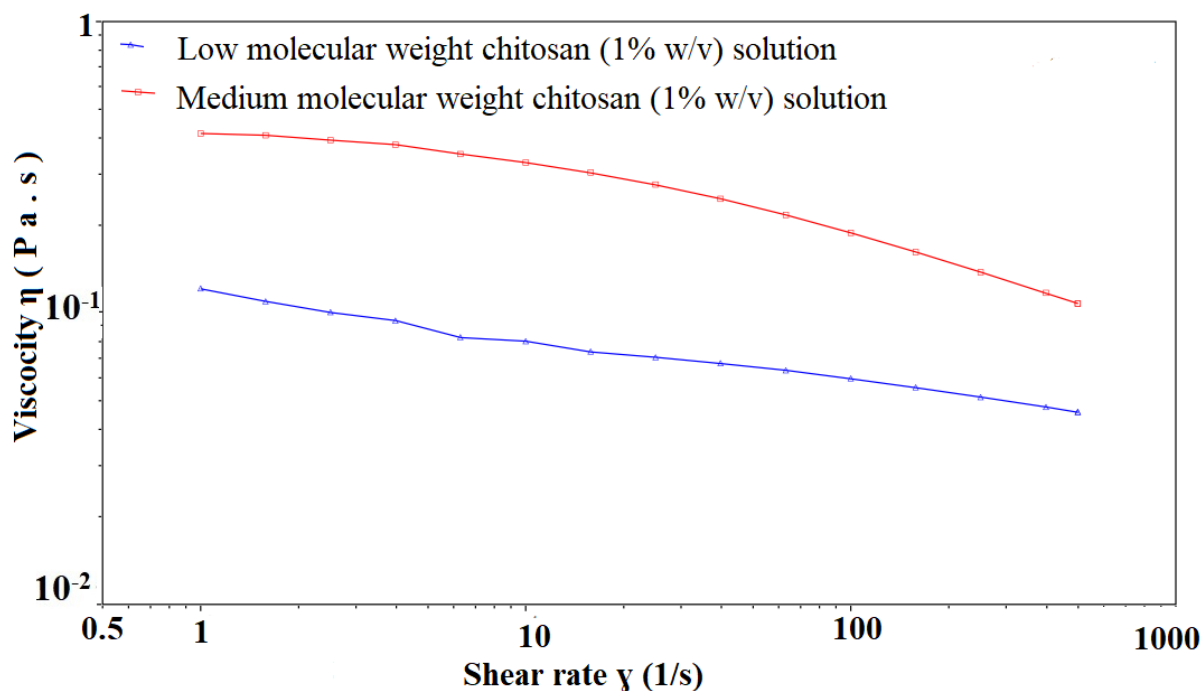


Figure 10. Viscosity of low and medium molecular weight chitosan solutions

Figure 10 displays the rheogram of chitosan solutions obtained using a Discovery Hybrid Rheometer-1 (DHR-1) at a temperature of 25 °C and shear rates ranging from 0.5 to 1000 1/s. It was observed that the viscosity of the chitosan solutions prepared with medium molecular weight chitosan (1% w/v) was higher than the chitosan solutions prepared with low molecular weight chitosan (1% w/v) due to the higher molecular weight effect. The viscosity value of chitosan solutions is affected by many factors, such as molecular weight, deacetylation degree, and ionic strength. These values may vary depending on the chitosan concentration in the solution as well as the acid environment in which the solution is prepared [24, 38]. The viscosity values of commercially used low molecular weight chitosan (%1 wt.) vary between 20-300 centipoise (cps), and the viscosity values of medium molecular weight chitosan (%1 wt.) vary between 200-800 cps in a 1% acetic acid solution at 25 °C [39]. Although high molecular weight chitosan (%1 wt.) has viscosity values of 2000 cps and above, they are not preferred in medical applications as the high viscous solutions to be obtained will cause processing difficulties. In addition, we employ other equipment to measure the viscosity of chitosan solutions. We also used a Brookfield Viscometer to measure the viscosity of low and medium molecular weight chitosan solutions in our study. The values we got were 101.5 and 333.5 cps, sincerely.

IV. CONCLUSIONS

The chitosan hydrogels, cross-linked with glutaraldehyde at different concentrations ranging from 1% to 10%, had their highest swelling values after 24 hours. Hydrogels made with both Low and Medium molecular weight chitosan exhibited greater swelling values when containing 1% glutaraldehyde compared to the other hydrogels. The study found that higher concentrations of cross-linkers led to a notable decrease in the water absorption percentages of hydrogels. The re-swelling properties of both hydrogel groups were found to be highly stable

throughout 5 cycles. The loss in swelling qualities was significantly reduced. These hydrogels are prepared chemically cross-linked to remain stable and resistant to re-swelling. The rehydration capability of hydrogels made with medium molecular weight chitosan was more consistent compared to hydrogels made with low molecular weight chitosan.

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by Yalova University BAPKO Graduate Thesis Project (2020/YL/0025).

REFERENCES

1. Nangia S, Katyal DN, and Warkar SG (2021) Kinetics, absorption and diffusion mechanism of crosslinked Chitosan Kinetics, absorption and diffusion mechanism of crosslinked Chitosan Hydrogels. *Ind J Eng Mater Sci* 28:374–384.
2. Karagöz İ, Yücel G (2020) Use of super absorbent polymers with *Euonymus* plants (*Euonymus japonicus* ‘*Aureomarginatus*’) in ornamental plant cultivation. *Journal of Agricultural Sciences* 26(2):201-211.
3. Wei B, Zou J, Pu Q, Shi K, Xu B, and Ma Y (2022) One-step preparation of hydrogel based on different molecular weights of chitosan with citric acid. *J. Sci of Food and Agri* 102(9):3826–3834.
4. Gupta KC, Jabrail FH (2008) Effect of molecular weight and degree of deacetylation on controlled release of isoniazid from chitosan microspheres. *Poly Adv Tech* 19:432–441.
5. Szymańska E, Winnicka K (2015) Stability of chitosan - A challenge for pharmaceutical and biomedical applications. *Marine Drugs*. 13(4):1819–1846.
6. Celebi M, Ozdemir ZO (2017) Dyestuffs removal from synthetic wastewater with chitosan, cross-linked chitosan and chitosan-poly (acrylic acid) conjugate. *Tekstil ve Konfeksiyon* 27(3):283–288.
7. Hee DH, Da EN, Dong HS et al (2004) Preparation and biodegradation of thermosensitive chitosan hydrogel as a function of pH and temperature. *Macr Res* 12(5):507–511.
8. Üçel İS, Demirel E (2022) Modification of PVDF Membranes Using Dopamine/Zinc Oxide for Lead Removal from Aqueous Media. *Open Journal of Nano* 7(2):53-73.
9. Kaçoğlu HS, Ceylan Ö, Çelebi M (2024) Comparative study of the effect of cross-linking degree on chitosan hydrogels synthesized with low and medium molecular weight chitosan. *Poly Eng and Sci* 64(3):1326-1339.
10. Liu L, Gao Q, Lu X, Zhou H (2016) In situ forming hydrogels based on chitosan for drug delivery and tissue regeneration. *Asian J Phar Sci* 11(6):673–683.
11. Mondal S, Das S, and Nandi AK (2020) A review on recent advances in polymer and peptide hydrogels. *Soft Matter* 16(6):1404–1454.
12. Ruiz M, Sastre AM, Guibal E (2000) Palladium sorption on glutaraldehyde-crosslinked chitosan. *Reactive & Functional Polymers* 45(3):155–173.
13. Özbaş Z, Gürdağ G (2016) Synthesis and Characterization of 5-Fluorouracil-Loaded Glutaraldehyde Crosslinked Chitosan Hydrogels. *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 20(3):460-467.
14. Pan H, Han JJ, Park YD et al (2016) Effect of sustained release of rhBMP-2 from dried and wet hyaluronic acid hydrogel carriers compared with direct dip coating of rhBMP-2 on peri-implant osteogenesis of dental implants in canine mandibles. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*. 44(2):116-125.
15. Xu C, Ma B, Yua S, Zhao C, Liu H (2020) High-Resolution Patterning of Liquid Metal on Hydrogel for Flexible, Stretchable, and Self-Healing Electronics. *Advanced Electronic Materials* 6(1):1900721.
16. Liu J, Yang H, Xue Y et al (2020) A Novel Method for Studying the Re-Swelling Capacity of Superabsorbent Polymers in An Artificial Crack. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition* 35(5):996-1002.
17. Shur M, Akouissi O et al (2023) Revealing the complexity of ultra-soft hydrogel re-swelling inside the brain. *Biomaterials* 294:122024.
18. Tian H, Cheng S, Zhen J, Lei Z (2023) Superabsorbent Polymer with Excellent Water/Salt Absorbency and Water Retention, and Fast Swelling Properties for Preventing Soil Water Evaporation. *J Poly and the Env* 31(2):812-824.
19. Lipatova IM, Yusova AA et al (2019) Gelation in solutions of low deacetylated chitosan initiated by high shear stresses. *Inter J Bio Macr* 139:550-557.

20. Akakuru O, Isiuku B (2017) Chitosan Hydrogels and their Glutaraldehyde-Crosslinked Counterparts as Potential Drug Release and Tissue Engineering Systems - Synthesis, Characterization, Swelling Kinetics and Mechanism. *J Phys Chem Biophys* 7(3):1-7.
21. Kumirska J, Weinhold MX et al (2011) Biomedical activity of chitin/chitosan-based materials- influence of physicochemical properties apart from molecular weight and degree of N-Acetylation. *Polymers* 3(4):1875–1901.
22. Kumar MNV (2000) A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and Functional Polymers* 46(1):1-27.
23. Dutta PK, Duta J, Tripathi VS (2004) Chitin and Chitosan: Chemistry, properties and applications. *J Sci Ind Res* 63(1):20-31.
24. Dash M, Chiellini F et al (2011) Chitosan - A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. *Progress in Polymer Science (Oxford)* 36(8):981–1014.
25. Wahba MI (2020) Enhancement of the mechanical properties of chitosan. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition* 31(3):350–375.
26. Monteiro O and Airoidi C (1999) Some studies of crosslinking chitosan–glutaraldehyde interaction in a homogeneous system. *Int J Bio Macro* 26:119–128.
27. Queiroz MF, Melo KRT et al (2015) Does the use of chitosan contribute to oxalate kidney stone formation? *Marine Drugs* 13(1):141-158.
28. Martínez-Mejía G, Vázquez-Torres NA et al (2019) Synthesis of new chitosan-glutaraldehyde scaffolds for tissue engineering using Schiff reactions. *Colloids and Surfaces A: Phys Eng Aspects* 579:123658.
29. Kamari A, Pulford ID, Hargreaves JSJ (2011) Chitosan as a potential amendment to remediate metal contaminated soil - A characterisation study. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 82(1):71-80.
30. Sim P, Strudwick XL, Song YM et al (2022) Influence of Acidic pH on Wound Healing In Vivo: A Novel Perspective for Wound Treatment. *Int J Mol Sci* 23 (21):13655.
31. Mirzaei BE, Ramazani A et al (2013) Studies on glutaraldehyde crosslinked chitosan hydrogel properties for drug delivery systems. *Int J Poly Mater and Polym Biomater* 62(11), 605–611.
32. Hoffman AS (2012) Hydrogels for biomedical applications. *Adv Drug Delivery Rev* 64:18–23.
33. Peppas NA, Bures P et al (2000) Hydrogels in pharmaceutical formulations. *Eur J Pharm Biopharm* 50(1):27-46.
34. Berger J, Reist M et al (2004) Structure and interactions in covalently and ionically crosslinked chitosan hydrogels for biomedical applications. *Eur J Pharm Biopharm* 57(1):19–34.
35. Shu XZ, Zhu KJ, Song W (2001) Novel pH-sensitive citrate cross-linked chitosan film for drug-controlled release. *Int J Pharm* 212(1):19-28.
36. Barros SC, da Silva AA B et al (2015) Thermal–mechanical behaviour of chitosan–cellulose derivative thermoreversible hydrogel films. *Cellu* 22(3):1911–1929.
37. Baloglu E, Karavana SY et al (2011) Rheological and mechanical properties of poloxamer mixtures as a mucoadhesive gel base. *Pharm Dev and Tech* 16(6):627–636.



Dönemsel optimum eğim açısıyla güneş enerji kazancında enlem, rakım ve karın etkisinin dört il örneğiyle incelenmesi

Kutbay Sezen^a

^aAlanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, ALTSO Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji, Antalya, 07425, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Ağustos 2024

Düzeltilme 12 Ekim 2024

Kabul 30 Ekim 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Güneş ışıması

Dönemsel optimum eğim açısı

Güneş paneli

Enlem

Rakım

Kar

Optimum dönem ayları

ÖZET

Güneş panellerin topladığı güneş enerjisi eğim açılarının belirli dönemler halinde optimize edilmesiyle artırılabilir. Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde, yıllık dönemsel optimum eğim açısı kullanılarak güneş enerjisi kazancında, enlem, rakım ve kar örtüsünün etkileri incelenmiştir. Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri illeri, enlem, yüksek rakım ve kar örtüsünün etkilerini karşılaştırmaya olanak sağlayan coğrafi ve iklimsel özelliklere sahip iller olarak seçilmiştir. Her il için 1, 2, 3 ve 4 dönemli optimum eğim açısı dönem başlangıç ve bitiş ayları manuel olarak değiştirilerek yıllık maksimum güneş enerji kazancı sağlanacak şekilde belirlenmiştir. Sonuçlar, yılın iki eğim açısı dönemine ayrılmasının her il için en büyük kazancı sağladığını, üç ve dört dönemli ayırmaların ek getirisinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Örneğin, Bursa'da iki, üç ve dört eğim açısı dönemi seçimi yıllık güneş ışımasında sırasıyla %4,54, %4,79 ve %5,26 kazanç sağlamaktadır. Dönemsel optimum açı seçiminin karlı bölgelerde daha fazla fayda sağladığı görülmüştür. Kar örtüsünün uzun sürdüğü Erzurum ve Hakkâri'de, yüksek eğim açılı dönemlerin 6 ay tutulması, kar yağışının az olduğu Antalya ve Bursa'da ise 7 ay tutulması daha yüksek güneş ışıması kazancı sağlamaktadır. Dört dönemli uygulamada, bahar ve sonbahar dönemlerinin Bursa, Antalya ve Hakkâri için ikişer ay seçilmesi avantajlıdır. Sonuç olarak, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak için her ilin coğrafi ve iklimsel özelliklerine göre optimum eğim açısı ve dönem değişimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde güneş enerjisinden maksimum fayda sağlanmasını mümkün kılacaktır.

Investigation of the effects of latitude, altitude, and snow on solar energy gain with periodic optimum tilt angle using four province examples

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 August 2024

Received in revised form 12 October 2024

Accepted 30 October 2024

Available online

Keywords:

Solar radiation

Solar panel

Seasonal optimum tilt angle

Latitude

Altitude

Snow

Optimum period months

ABSTRACT

Solar energy gain of solar panels can be increased by optimizing the tilt angles periodically. This study examines the periodic optimal tilt angle changes to maximize total solar radiation on inclined surfaces in four different provinces of Turkey: Bursa, Erzurum, Antalya, and Hakkari. These provinces were selected to examine the effects of latitude, high altitude, and snow cover. Monthly and annual total solar radiation incident on a horizontal surface was calculated for 1, 2, 3, and 4 optimal tilt angle periods for each province. Period durations were adjusted to maximize gains in each province rather than being of equal length. Results indicate that dividing the year into two tilt angle periods provides the greatest gains for each province, while the additional gains from three and four periods are limited. For instance, in Bursa, selecting two, three, and four tilt angle periods yields annual solar radiation gains of 4.54%, 4.79%, and 5.26%, respectively. The study shows that selecting the optimal seasonal angle in snowy regions provides greater benefits. In Erzurum and Hakkari, where snow cover is prolonged, maintaining high tilt angles for six months is beneficial, while in Antalya and Bursa, with minimal snowfall, seven months of high tilt angles yield better results. In the four-period application, selecting two months each for spring and autumn in Bursa, Antalya, and Hakkari is advantageous. In conclusion, enhancing the efficiency of solar energy systems requires determining optimal tilt angles and periods based on the geographical and climatic characteristics of each province. This approach will maximize the benefits of solar energy in Turkey's diverse regions.

I. GİRİŞ

Güneş enerjisi, sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Fosil yakıtların tükenme riski ve çevresel sorunların artması, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır [1]. Güneş enerjisi, çevre dostu ve tükenmeyen bir kaynak olarak öne çıkmakta ve bu nedenle birçok ülkenin enerji politikalarında büyük önem taşımaktadır [2]. Türkiye, coğrafi konumu sayesinde güneş enerjisi yüksek potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır [3]. Ülkenin farklı bölgelerinde bulunan çeşitli iklim koşulları ve coğrafi özellikler ise güneş enerjisi verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

Güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği, güneş panellerinin doğru konumlandırılması ve eğim açısının optimize edilmesi ile artırılabilir [4]. Eğim açısının optimize edilmesi, güneş ışınımından maksimum düzeyde faydalanmayı sağlar. Bu bağlamda, her bölgenin kendine özgü iklim ve coğrafi özellikleri göz önünde bulundurularak, optimum eğim açısı belirlenmelidir. Türkiye'nin farklı bölgelerinde yapılan araştırmalar, eğim açısının optimizasyonunun, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Atlım vd. [5] Balıkesir'de yaptığı çalışmada, farklı eğim açılarıyla yerleştirilmiş güneş panellerinin verimlilikleri karşılaştırılmış ve panel eğim açılarının doğru seçilmesi durumunda yıllık enerji üretiminde büyük kazançlar elde edildiği belirlenmiştir. Bakırcı [6], Ardahan ilinde yaptığı çalışmada yüzey eğimlerinin güneş enerjisi potansiyeline etkisini incelemiş ve optimum eğimli yüzeylerde %17'ye varan verim artışı sağlandığını ortaya koymuştur. Çağlar [7], farklı derece-gün bölgelerinde optimum eğim açısının belirlenmesi üzerine çalışmış ve yılın her ayında optimum eğim açılarını teorik hesaplamalarla tespit etmiştir. Dal [8] çalışmasında, Kayseri'de güneş enerji panellerindeki optimum eğim açısının verime etkisini incelemiş ve aylık optimum eğim açısı ile konumlandırmanın büyük avantaj sağladığını göstermiştir. Aynı yazarın [9] yat limanlarındaki güneş enerji santralleri üzerine yaptığı çalışmada ise, aylık optimum eğim açılarının değiştirilmesi ile üretim veriminin artırılacağı belirlenmiştir. Güner [10], Iğdır ilinde güneş enerjisi uygulamaları için yaptığı çalışmada, panellerin aylık optimum açıları ile yerleştirilmesinin diğer yöntemlere göre daha fazla güneş radyasyonu elde edilmesini sağladığını göstermiştir.

Kaba vd. [11], Erzincan'da yaptıkları çalışmada, güneş kolektörlerinin enerji ve ekserji analizleri yapılmış ve optimum eğim açılarındaki yüksek verim sağlandığı belirlenmiştir. Koçer vd. [12], Ankara ve ilçeleri için güneş kolektörü optimum eğim açısını belirlemiş ve ayda bir veya yılda en az iki kez eğim açısının ayarlanmasını tavsiye etmişlerdir. Yağlı ve Koç [13], Gaziantep bölgesinde güneş panellerinin optimum eğim açılarının belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, optimum açının 31° olduğunu ve bu açının enerji üretimini maksimize ettiğini ortaya koymuşlardır. Yücel vd. [14], güneş takip sistemiyle çalışan panellerin sulama uygulamalarında verimlilik düzeylerini incelemiş ve iki eksenli güneş takip sisteminin verimliliği artırarak enerji üretiminde %23 oranında katkı sağladığını göstermiştir. Arslan ve Türkdoğan'a ait çalışmada [15], Yalova ilindeki kamu binalarının çatılarında kurulabilecek güneş enerji santralleri ile enerji üretim potansiyelinin ne kadarının karşılanabileceği incelenmiştir. Ayrıca, mevcut potansiyelin artırılması için mimari planların tasarım aşamasında nasıl değiştirilebileceği ve mimari optimizasyon ile enerji üretim miktarlarının ne oranda artabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı enleme, rakıma ve kar örtüsü süresine sahip dört ili (Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri) için dönemsel optimum eğim açısı seçimi ile güneş enerji kazanımı incelenmiştir. Bu dört il için 1, 2, 3 ve 4 dönemli optimum eğim açısı seçiminde yatay yüzeye gelen aylık ve yıllık toplam güneş ışınımı değerleri geliştirilen model ve iteratif çözüm ile bulunmuştur. Ayrıca, dönemlerin en yüksek kazanç için hangi illerde hangi

aylardan oluşması gerektiği tespit edilmiştir. İncelenen iller arasında Bursa ve Erzurum kuzey illeri olarak benzer enlemlerde, Antalya ve Hakkâri ise güney illeri olarak benzer enlemlerdedir. Fakat benzer enlemdaki iller rakım ve kar örtüsü açısından farklılaşmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde, yıllık dönemsel optimum eğim açısı kullanılarak güneş enerjisi kazancında enlem, rakım ve kar örtüsünün etkilerini incelemektir. Enlem, rakım ve kar örtüsü süresi temel değişkenler olarak ele alınmış olup, seçilen dört il, bu parametrelerin optimum eğim açısına ve eğim açısı değişim periyoduna etkilerini karşılaştırmaya olanak sağlayan coğrafi ve iklimsel özelliklere sahiptir. Literatürde, benzer coğrafi ve iklimsel koşullara sahip illerde dönemsel optimum eğim açısı çalışmaları bulunmakla birlikte, enlem ve kar örtüsü açısından farklılık gösteren dört ilin birlikte değerlendirildiği bir karşılaştırma henüz gerçekleştirilmemiştir. Bu yaklaşım, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde güneş enerjisinden minimum kontrol ile maksimum fayda sağlanması açısından yol gösterici olacaktır.

II. TEORİK METOD

2.1 Eğik yüzeye gelen ışınım hesabı

Bir bölgede belirli periyotlarla değişen eğim açısındaki eğik düzleme düşen yıllık toplam güneş ışınımı, ayın ortalama gün değerine göre yapılan hesaplamalar ile aylık ışınımın ve bunların toplamı ile yıllık toplam ışınımın bulunması ile belirlenebilir. Bu çalışmada Liu ve Jordan [16, 17] tarafından geliştirilen matematiksel modellerden ve Yiğit ve Atmaca [18] tarafından derlenen ampirik eşitliklerden faydalanılmıştır. MS-Excel programının Solver eklentisinin iteratif çözüm kabiliyeti modele uygulanarak, en yüksek dönemsel güneş ışınımını veren optimum eğim açısı sayısal olarak hesaplanmıştır.

Eğik düzleme düşen günlük güneş ışınımı H_T , yatay düzleme düşen günlük güneş ışınımına H , H ışınımının direkt H_b ve yayılı H_d bileşenlerine, eğik düzlemin eğim açısına β , eğik ve yatay düzleme düşen direkt ışınım oranına \bar{R}_b ve yansıtma oranına ρ bağlı olarak Eş. 1'de ifade edilmiştir.

$$H_T = H_b \bar{R}_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

Yatay düzleme düşen toplam günlük güneş ışınımı H , yılın o günü için o bölgede atmosfer dışında yatay düzleme düşen güneş ışınımına H_o ve berraklık endeksi K_T 'ye bağlı olarak Eş. 2 ile hesaplanabilir.

$$H = K_T \cdot H_o \quad (2)$$

Atmosfer dışında yatay düzleme düşen güneş ışınımı H_o bölgenin enlem açısına ϕ , yılın gününe d bağlı değişen deklinasyon açısına δ ve bu iki açının bir bileşeni olan güneş batış açısına ω_s bağlı olarak Eş. 3 ile belirlenir. Eş.3'teki G_{sc} güneş sabitidir, atmosfer dışında yatay düzleme düşen güneş ışınım şiddeti olan 1367 W/m^2 olarak alınır.

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360d}{365}\right) \right] \cdot \left[\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin\phi \sin\delta \right] \quad (3)$$

Deklınasyon açısı δ Eş. 4 ile hesaplanabilir ve d değeri ayın ortalama gün değeri olarak alınabilir.

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+d}{365}\right) \quad (4)$$

Berraklık endeksi K_T ise a ve b bölgesel sabitlerine ve izafi güneşlenme süresine n/N bağı olarak Eş. 5 ile hesaplanır.

$$K_T = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

a ve b bölgesel sabitleri enlem açısına ϕ , deklınasyon açısına δ ve rakıma Z bağı olarak sırasıyla, Eş. 6 ve Eş. 7 ile hesaplanır.

$$a = 0,103 + 0,000017Z + 0,198 \cos(\phi - \delta) \quad (6)$$

$$b = 0,533 - 0,165 \cos(\phi - \delta) \quad (7)$$

İzafi güneşlenme süresine n/N bölgenin çevre şartlarına bağı gerçek günlük güneşlenme süresinin n gün uzunluğuna N oranıdır. Günlük güneşlenme süresi n ölçüme dayalı verilerdir ve MGM tarafından her il için paylaşılmıştır [19].

Gün uzunluğu N değeri güneş batış açısına ω_s bağı olarak Eş. 8 ile hesaplanır.

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (8)$$

Güneş batış açısı ω_s Eş. 9 ile hesaplanabilir.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \quad (9)$$

Yatay düzleme düşen güneş ışınımının direkt H_b ve yayılı H_d bileşenleri ise Eş. 10 ve Eş. 11 ile belirlenebilir.

$$H = H_d + H_b \quad (10)$$

$$\frac{H_d}{H} = 1 - 1,13K_T \quad (11)$$

Eğik ve yatay düzleme düşen direkt ışınım oranı \bar{R}_b ise enlem açısına ϕ , deklinasyon açısına δ , güneş batış açısına ω_s ve ayın ortalama gününde güneşin eğik yüzeye ilk düşüş saat açısına ω_s' bağlı olarak Eş. 12 ile hesaplanır.

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi-\beta)\cos\delta\sin\omega_s'+(\pi/180)\omega_s'\sin(\phi-\beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\cos\omega_s+(\pi/180)\omega_s\sin\phi\sin\delta} \quad (12)$$

ω_s' değeri Eş. 13'e göre belirlenir.

$$\omega_s' = \min \left[\begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan\phi\tan\delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi-\beta)\tan\delta) \end{array} \right] \quad (13)$$

Yansıtma oranı ρ , çevredeki binalar yeryüzü şekilleri gibi çevresel faktörlere göre değişmekle beraber, karlı günler için 0,7 diğer zamanlar için 0,2 alınabilir [18].

2.2 Çözüm prosedürü

Bölüm 2.1'de açıklanan matematiksel eşitlikler ile eğik yüzeye gelen günlük toplam güneş ışınım değeri hesaplanabilir. Gün değeri o ayın ortalama gün değeri olarak alınırsa o ayın ortalama günlük değeri bulunabilir ve buradan aylık değeri ve ayların toplamı ile yıllık toplam ışınım değeri belirlenebilir.

Eğik yüzeye gelen toplam güneş ışınımı bölgeye ait girdi parametrelerine ve eğik yüzeyin eğim açısına bağlıdır. Burada kurulum sonrası değiştirilebilecek tek değişken eğim açısıdır. Yüzeyin eğim açısının yıl içinde dönemler halinde optimum değişimi o dönem için en yüksek güneş ışınımı kazanımını sağlayabilir. Bu çalışmada, her il için yılın 1,2,3 ve 4 dönem olarak optimum açı ve en uygun aralıklarla bölünmesi amaçlanmıştır. Her dönem için maksimum enerji kazancını sağlayan optimum panel eğim açısı hesaplanmıştır. Panelin eğim açısının değiştirilmediği aylar dönemi oluşturur. Kar örtüsünün bulunduğu aylarda yansıtma oranı ρ 0,2, diğer aylarda 0,7 alınarak karlılık parametresinin etkisi eğik düzleme düşen günlük güneş ışınımı H_T hesabına Eş. 1'de dahil edilmiştir. Bölüm 2.1'de belirtilen eşitliklerle MS-Excel programında oluşturulan modelde, Solver eklentisi yardımı ile en yüksek dönemsel ışınım kazanımını sağlayan eğim açıları iteratif olarak çözümlenerek bulunmuştur. Dönem başlangıç ve bitiş ayları manuel olarak değiştirilerek uygun dönem uzunlukları yine maksimum güneş enerji kazancı için belirlenmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Türkiye’de enlem, rakım ve kar örtüsünün süresi açısından farklılık arz eden dört il (Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri) belirlenmiş ve bu iller için 1, 2, 3 ve 4 dönemli optimum eğim açısı seçiminde yatay yüzeye gelen aylık ve yıllık toplam güneş ışınımı değerleri bulunmuştur. Ayrıca dönemlerin en yüksek kazanç için hangi illerde hangi aylardan oluşması gerektiği tespit edilmiştir. Modelin kurulması için gerekli olan, incelenen illere ait aylık ortalama güneşlenme süreleri Tablo 1’de, enlem, rakım ve kar örtüsünün bulunduğu aylar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Dört ilin aylık ortalama güneşlenme süreleri n (h) [19]

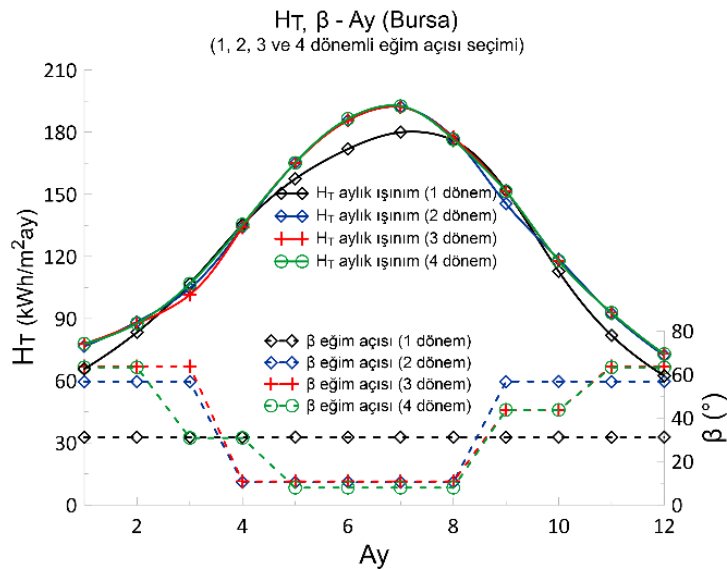
İl/Ay	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haz.	Tem.	Ağus.	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Bursa	2,8	3,4	4,2	5,8	7,8	9,7	10,7	10	7,9	5,5	4	2,9
Erzurum	3,4	4,4	5,2	6,3	7,9	10,2	11,3	10,7	9,1	6,9	4,9	3,2
Antalya	5,1	5,8	6,7	8,0	9,8	11,4	11,8	11,3	9,8	7,9	6,3	4,9
Hakkari	4,1	5,3	5,7	6,6	8,8	11,6	12,2	11,3	10	7,2	5,3	3,8

Tablo 2. Dört ilin enlem, rakım ve karlı ayları [18, 19]

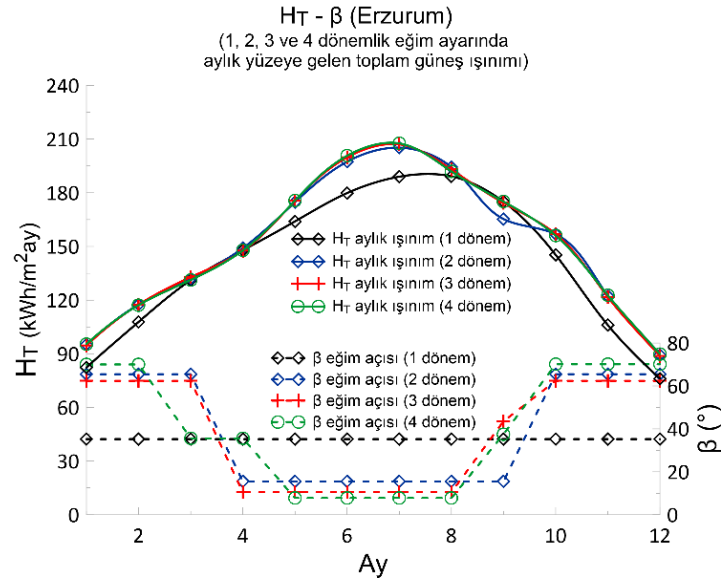
İl	ϕ - Enlem ($^{\circ}$)	Z - Rakım (m)	Karlı aylar
Bursa	40,21	100	Ocak
Erzurum	39,94	1758	Ekim, Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart
Antalya	36,91	42	-
Hakkari	37,41	1950	Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart

Bursa ve Erzurum kuzey illeri olarak benzer enlemlerde, Antalya ve Hakkâri ise güney illeri olarak benzer enlemlerdedir. Fakat Erzurum ve Hakkâri rakım ve karlı dönem açısından Bursa ve Antalya’dan farklılaşmaktadır. Seçilen illerin enlem, rakım ve kar durumu açısından farklılıkları, toplanan enerjideki kazanç açısından bu etkenlerin kıyaslanmasına olanak tanımıştır

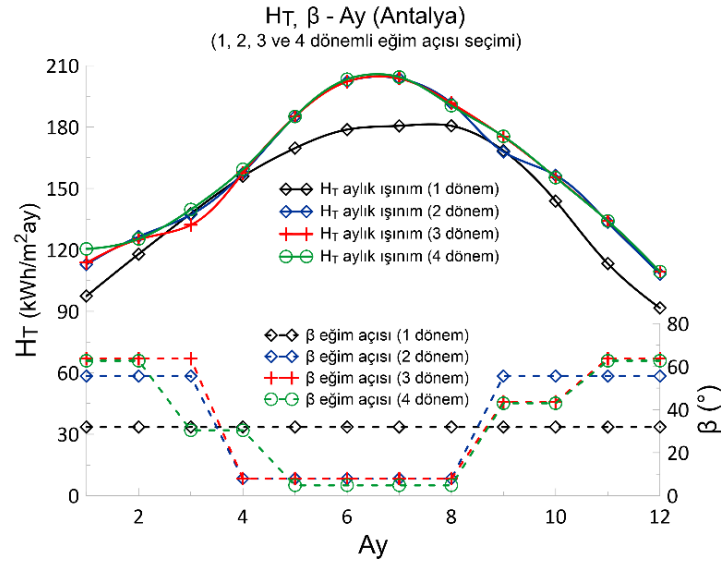
Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri illerine ait, belirlenen optimum açılı eğik yüzeye gelen aylık toplam güneş ışınımı değişimleri, 1, 2, 3 ve 4 dönemli eğim açısı seçimi durumu için belirlenmiş ve sırasıyla Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir.



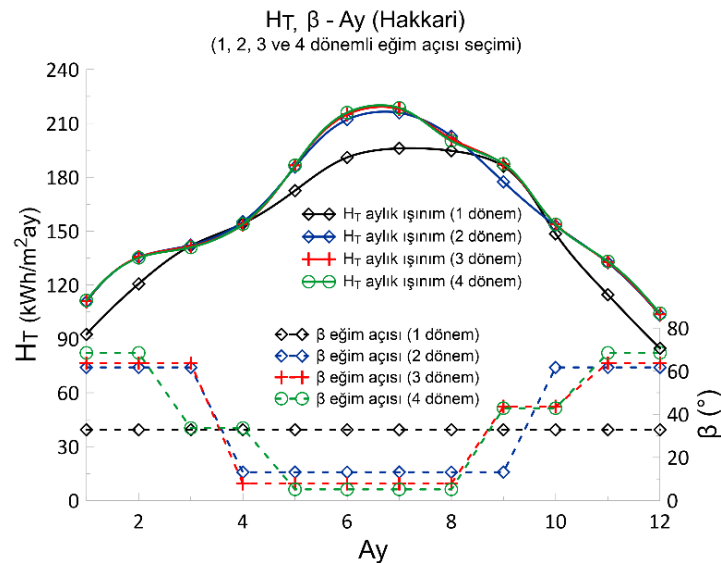
Şekil 1. Bursa ili aylık güneş ışınımı değerinin dönem sayısına göre değişimi, dönem ayları ve eğim açıları β



Şekil 2. Erzurum ili aylık güneş ışınımı değerinin dönem sayısına göre değişimi, dönem ayları ve eğim açıları β



Şekil 3. Antalya ili aylık güneş ışınımı değerinin dönem sayısına göre değişimi, dönem ayları ve eğim açıları β



Şekil 4. Hakkâri ili aylık güneş ışınımı değerinin dönem sayısına göre değişimi, dönem ayları ve eğim açıları β

İller için optimum açılı dönemleri, dönem başlangıç ve bitiş aylarının manuel olarak değiştirilerek yıllık maksimum güneş enerji kazancı sağlanacak şekilde belirlenmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4'te sırasıyla, dört il için iki ve dört dönemli optimum eğim açısı seçiminde en yüksek kazancı sağlayan dönem ile standart mevsimsel dönemin karşılaştırması yapılmıştır. Dönem ayları numara ile belirtilmiştir. Standart dört dönem kış, bahar, yaz ve sonbaharın üçer aylık dönemler, standart iki dönem ise nisan ile ekim ayları arası altışar aylık dönemlerdir. Bu çerçevede, yılın dönemlere bölümünde tek bir standart oluşturmaktansa, o il özelinde maksimum kazanç hesabının yapılarak gerekirse dönemi uzatıp kısaltmak ve başlangıç bitiş aylarını değiştirmek enerji kazanımını artırıcı bir unsur olarak ortaya konulmuştur. Kar örtüsünün uzun süre kaldığı Erzurum ve Hakkâri illerinde iki dönemlik uygulamada, yüksek eğim açılı döneminin 6 ay tutulması, kar yağışın olmadığı veya çok az olduğu Antalya ve Bursa illerinde ise 7 ay tutulması daha yüksek güneş ışınım kazanımı sağlamaktadır. Yüksek eğim açılı döneminin kısaltılması optimum eğim açısı değerini de arttırmaktadır. Benzer enlemlerde olmalarına rağmen, 7 aylık yüksek eğim açılı döneme sahip Antalya'da kışlık optimum eğim açısı $55,6^\circ$ iken, kar örtüsünün olduğu ve bu nedenle 6 aylık yüksek eğim açılı dönem seçilen Hakkâri'de eğim açısı $61,8^\circ$ 'dir. Bu eğim açısı artışı aynı zamanda güneş panelleri üzerinde kar birikimini de engeller.

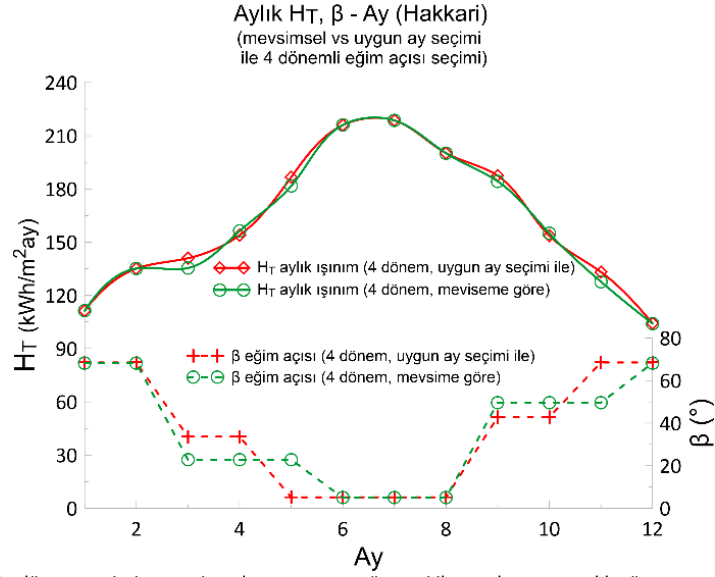
Tablo 3. Dört il için iki dönemli optimum eğim açısı seçiminde en yüksek kazancı sağlayan dönem ile standart mevsimsel dönemin karşılaştırması

İl	Dönem seçimi	Dönem ayları	Dönem eğim açıları ($^\circ$)	H_T (MJ/m ² yıl)
Bursa	En yüksek kazanca göre	4, 5, 6, 7, 8 / 9, 10, 11, 12, 1, 2, 3	56,7 / 10,5	1552,6
	Standart mevsimsel	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	56,7 / 15,1	1549,7
Erzurum	En yüksek kazanca göre	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	65,5 / 15,6	1799,2
	Standart mevsimsel	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	65,5 / 15,6	1799,2
Antalya	En yüksek kazanca göre	4, 5, 6, 7, 8 / 9, 10, 11, 12, 1, 2, 3	55,6 / 7,9	1882,6
	Standart mevsimsel	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	55,3 / 12,5	1824,4
Hakkâri	En yüksek kazanca göre	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	61,6 / 13,1	1924,7
	Standart mevsimsel	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	61,6 / 13,1	1924,7

Tablo 4. Dört il için dört dönemli optimum eğim açısı seçiminde en yüksek kazancı sağlayan dönem ile standart mevsimsel dönemin karşılaştırması

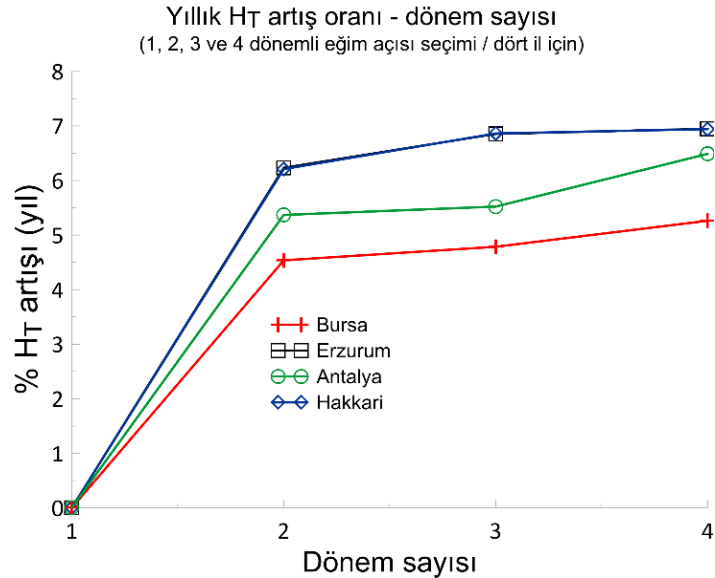
İl	Dönem seçimi	Dönem ayları	Dönem eğim açıları ($^\circ$)	H_T (MJ/m ² yıl)
Bursa	En yüksek kazanca göre	11,12,1,2 / 3,4 / 5,6,7,8 / 9,10	63,2 / 30,8 / 7,9 / 43,7	1563,4
	Standart mevsimsel	12,1,2 / 3,4,5 / 6,7,8 / 9,10,11	63,4 / 22,2 / 7,9 / 48,7	1555,7
Erzurum	En yüksek kazanca göre	10,11,12,1,2 / 3,4 / 5,6,7,8 / 9	70,0 / 35,6 / 7,8 / 37,5	1811,3
	Standart mevsimsel	12,1,2 / 3,4,5 / 6,7,8 / 9,10,11	69,7 / 25,5 / 7,8 / 54,5	1794,3
Antalya	En yüksek kazanca göre	11,12,1,2 / 3,4 / 5,6,7,8 / 9,10	62,7 / 30,4 / 4,8 / 43	1902,6
	Standart mevsimsel	12,1,2 / 3,4,5 / 6,7,8 / 9,10,11	63,4 / 22,2 / 7,9 / 48,7	1828,1
Hakkâri	En yüksek kazanca göre	11,12,1,2 / 3,4 / 5,6,7,8 / 9,10	68,5 / 33,6 / 5,2 / 42,8	1941,2
	Standart mevsimsel	12,1,2 / 3,4,5 / 6,7,8 / 9,10,11	68,2 / 22,8 / 5,0 / 49,7	1925,7

Dört dönemli eğim açısı seçiminde, Bursa, Antalya ve Hakkâri illerinde bahar ve sonbahar dönemlerinin sırasıyla 3, 4 ve 9, 10 numaralı aylar olarak ikişer ay seçilmesi üçer aylık dönemlere göre daha fazla kazanç sağlamaktadır. Erzurum da ise sonbahar dönemini daha da kısa sadece 9'ncü ay olarak seçmek daha avantajlıdır. Örnek olarak, Hakkâri ili için dört mevsim yerine uygun dört dönem seçiminin aylık güneş ışınımına etkisi Şekil 5'te karşılaştırılmıştır, farklı dönem seçimi ile eğik yüzeye gelen yıllık güneş ışınımı 1926 kWh/m²yıl'dan 1941 kWh/m²yıl'a yükselmektedir. Sonuç olarak maksimum fayda için, her ilin özelinde eğim açısı değişim periyotlarının belirlenmesi en uygun çözümdür.



Şekil 5. Hakkâri ili için dönem seçimin mevsimsel ve uygun ay yöntemi ile yapılmasının aylık güneş ışınımına etkisi (4 dönem)

İncelen dört il için eğim açısı bakımından yılın bölüneceği dönem sayısının yıllık toplam güneş ışınımı kazancına etkisi yüzdelerle Şekil 6'da birlikte verilmiştir. Optimum eğim açısının yılın iki dönemi içinin belirlenmesi asıl kazancı oluşturmaktadır, üç veya dört dönemli eğim açısı seçimin ek getirisi oldukça sınırlıdır. Örnek olarak, Bursa ilinde iki, üç ve dört dönemli optimum eğim açısı seçimi, yıllık güneş ışınımında sırasıyla, 4,54%, 4,79% ve 5,26% kazanç sağlamaktadır, Hakkâri ilinde ise bu oranlar sırasıyla, 6,21%, 6,86% ve 6,94%'tür.

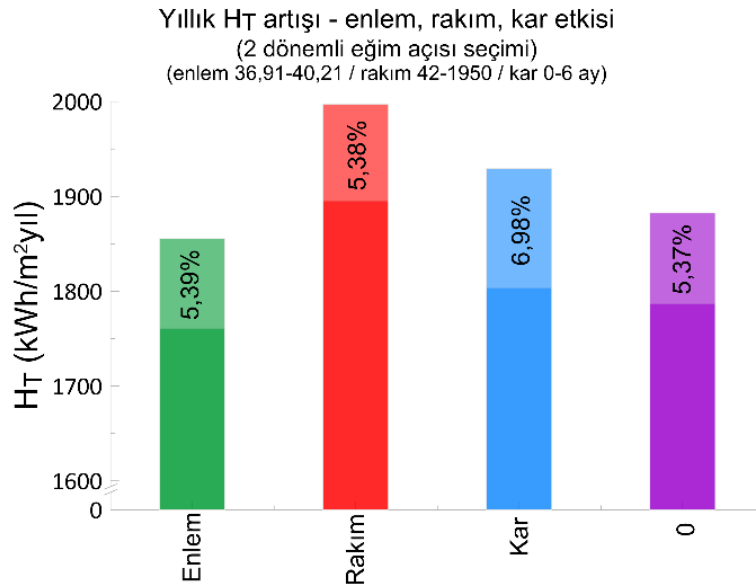


Şekil 6. Dört il için yıllık eğim açısı dönem sayısı seçimin güneş ışınımı kazancına etkisi

Optimum eğim açısı seçimi en yüksek yıllık kazancı Hakkari'de en düşük yıllık kazancı ise Bursa'da gerçekleştirmektedir. Erzurum da Hakkari'ye yakın kazanım artışları sunmaktadır. Bu durum enlemin optimum açıyla elde edilen kazanç artışında etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Kazanç artışını etkileyen etmenin rakım veya karlılık olup olmadığının tespiti için Erzurum ilinin karsız olduğu farazi durum incelenmiş, karsız

durumda kazancın 4,86% 'ya düştüğü bu nedenle asıl kazancı tetikleyen etkinin uzun süren kar örtüsü olduğu tespit edilmiştir.

Enlem, rakım ve kar etmeninin etkisinin daha somut olarak ortaya konulabilmesi açısından, Antalya ilinin enlem, rakım ve karlılık durumu farazi olarak ayrı ayrı değiştirilmiş ve iki dönemli eğim açısı seçiminde oluşan yıllık güneş ışınım kazanımları Şekil 7'de gösterilmiştir. 0 ile belirtilen bar, Antalya ili için gerçek hali temsil etmektedir. Görüldüğü üzere, en yüksek kazancı kar örtüsü sağlamaktadır. Antalya ilinde farazi altı aylık kar örtüsü durumunda iki dönemli optimum eğim açısı seçimi sistemde 6,98% ek kazanç sağlarken, enlemin 36,91° yerine 40,21° olması halinde kazanç 5,39%, rakımın 42 m yerine 1950 m olması halinde ise kazanç 5,38% olmaktadır. Antalya'nın gerçek değerleri için ise kazanç 5,37%'dir. Rakım ve enlem değerinin optimum eğim açısının kazancına görülür bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Tabi bu durumun Türkiye şartları için öngörüldüğü unutulmamalıdır. Yükseklik farkının daha fazla olduğu veya enlem farkının daha çok olduğu ülkeler için geniş aralıklı incelemeler yapılmalıdır.



Şekil 7. Enlem, rakım ve karlılık durumu değişiminin yıllık güneş ışınımına etkisi

Tablo 5. Sembollerin tanımları ve birimleri (Nomenclature)

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)			
d	Yılın gün değeri	n/N	İzafi güneşlenme süresi
G_{sc}	Güneş sabiti (1367 W/m ²)	\bar{R}_b	Eğik ve yatay düzleme düşen direkt ışınım oranı
H	Yatay düzleme düşen günlük güneş ışınımı (J/m ² gün)	Z	Rakım (m)
H_b	Yatay düzleme düşen günlük direkt güneş ışınımı (J/m ² gün)	β	Eğik düzlemin eğim açısı (°)
H_d	Yatay düzleme düşen günlük yayılı güneş ışınımı (J/m ² gün)	δ	Deklinasyon açısı (°)
H_o	Atmosfer dışında yatay düzleme düşen günlük güneş ışınımı (J/m ² gün)	ϕ	Enlem açısı (°)
H_r	Eğik düzleme düşen günlük güneş ışınımı (J/m ² gün)	ω_s	Güneş batış açısı (°)
K_T	Berraklık endeksi	ω_s'	Güneşin eğik yüzeye ilk düşüş saat açısı (°)
n	Gerçek günlük güneşlenme süresi (h)	ρ	Yansıtma oranı (0,2-0,7)
N	Gün uzunluğu (h)		

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı enleme, rakıma ve kar örtüsü süresine sahip dört ilinde (Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri) güneş enerjisi kazancını en üst düzeye çıkarmak için optimum eğim açısı seçimleri incelenmiştir. İllerin farklı coğrafi ve iklim özellikleri, güneş ışınımı kazancındaki değişkenlikleri ortaya koymada önemli rol oynamıştır. Bu çalışmanın sonuçları, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak için her ilin coğrafi ve iklimsel özelliklerine göre optimum eğim açısı ve dönem değişimlerinin belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Araştırma sonuçlarına göre;

Kar örtüsü süresinin uzun olması optimum eğim açısının kazancını arttıran en önemli etken olarak belirlenmiştir. Kar örtüsünün uzun süreli olduğu Erzurum ve Hakkâri illerinde, yüksek eğim açılı döneminin 6 ay tutulması, kar yağışının az olduğu Antalya ve Bursa illerinde ise 7 ay tutulması daha yüksek güneş ışınımı kazancı sağlamaktadır. Kış döneminin kısa seçilmesi optimum eğim açısını artırır bu ise ek bir fayda olarak yüzeyde kar birikimini azaltacaktır.

Yılın iki eğim açısı dönemine ayrılması asıl kazancı oluşturmaktadır. Üç ve dört dönemlik ayrımların ek getirisi oldukça sınırlıdır. Örnek olarak, Bursa ilinde iki, üç ve dört dönem belirlenmesi yıllık güneş ışınımında sırasıyla, 4,54%, 4,79% ve 5,26% kazanç sağlamaktadır. Yılda iki kez optimum açı değişimi, açı ayarlanabilir bir sistemin insan gücü ile yılda iki kez kumanda edilmesi ile sağlanabilir. Yaklaşık 5%'lik düşük kazanımına rağmen bu yöntem, kullanılacak sistemin basitliği ve harcanacak iş gücünün azlığı nedeniyle özellikle ticari işletmeler için faydalı olacaktır.

Yılın basmakalıp şekilde üçer aylık veya altışar aylık dönemlere bölünmesinden il özelinde yapılacak hesaplamalarla dönem uzunluklarının belirlenmesinin gerektiği görülmüştür. Örneğin, Bursa, Antalya ve Hakkâri ili için bahar dönemleri 3, 4 ve 9, 10 numaralı aylar olarak ikişer ay seçilmelidir.

Antalya ili enlem, rakım ve karlılık değerleri farazi olarak değiştirilerek yapılan analiz, dönemsel optimum açı seçiminin karlı bölgelerde daha fazla fayda sağladığını göstermiştir. Bunun nedeni, kar örtüsü ile artan yayılı ışınımından yüksek eğim açısı seçimi ile daha fazla faydalanılabilesidir.



Sonuç olarak, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak için her ilin özelinde optimum eğim açısı ve dönem değişimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde güneş enerjisinden maksimum fayda sağlanmasını mümkün kılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Ang TZ, Salem M, Kamarol M, Das HS, Nazari MA, Prabakaran N (2022) A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews* 43:100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
2. Pourasl HH, RV Barenji, Khojastehnezhad VM (2023) Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports* 10:3474-3493. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>
3. Endiz MS, Coşgun AE (2023) Assessing the potential of solar power generation in Turkey: A PESTLE analysis and comparative study of promising regions using PVsyst software. *Solar Energy* 266:112153. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112153>
4. Bakirci K (2012) General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8):6149-6159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.009>

5. Atlım F, Esen B, Demirtaş M (2019) Balıkesir ilinde farklı iki GES tesisinin panel yerleşimi açısından verimliliklerinin karşılaştırılması. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 21(2):679-696. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.636967>
6. Bakirci K (2020) Yüzey eğimlerinin güneş enerjisi potansiyeline etkisi. Tesisat Mühendisliği Dergisi 175:30-38.
7. Çağlar A (2018) Farklı derece-gün bölgelerindeki şehirler için optimum eğim açısının belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 22(2):849-854. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.9489>
8. Dal AR (2021) Güneş enerji panellerindeki optimum eğim açısının verime etkisinin incelenmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 8(1):241-250. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.878795>
9. Dal AR (2021) Yat limanlarındaki güneş enerji santralleri panel eğim açısı değişiminin elektrik üretimi açısından incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 9(4):1113-1127. <https://doi.org/10.29130/dubited.869639>
10. Güner E (2023) Iğdır ilinde güneş enerjisi uygulamaları için optimum panel eğim açısının belirlenmesi. Journal of the Institute of Science and Technology 13(4):2905-2914. <https://doi.org/10.21597/jist.1314641>
11. Kaba MY, Seyhan AK, Celen P, Celen A (2022) Farklı eğim açılarında güneş kolektörlerinin enerji ve ekserji analizi: Erzincan ili örneği. Konya Journal of Engineering Sciences 10(3):634-648. <https://doi.org/10.36306/konjes.1096936>
12. Koçer A, Şevik S, Güngör A (2016) Ankara ve ilçeleri için güneş kolektörü optimum eğim açısının belirlenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 21(1):63-78. <https://doi.org/10.17482/uujfe.80088>
13. Yağlı H, Koç Y (2020) Gaziantep bölgesi için güneş enerjisinden elektrik üretiminde kurulacak panellerin optimum eğim açılarının belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 19:475-483. <https://doi.org/10.31590/ejosat.733530>
14. Yücel M, Kılıçarslan Y, Yıldırım M (2018) Güneş takip sistemiyle çalışan güneş panellerin sulama uygulamasında verimlilik düzeyleri. ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi 6:123-130.
15. Arslan F, Türkdoğan S (2022) Kamu binalarında çatı üzeri fotovoltaik panel kurulum potansiyelinin belirlenmesi ve enerji üretim artışı için mimari tasarımın ele alınması: Yalova ili örneği. Journal of Innovative Engineering and Natural Science 2(2):76-94. <http://dx.doi.org/10.29228/JIENS.63060>
16. Liu B, Jordan R (1960) The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy 4(3):1-19.
17. Liu B, Jordan R (1961) Daily insolation on surfaces tilted towards equator. Journal of ASHRAE 10:53-59.
18. Yiğit A, Atmaca İ (2010) Güneş Enerjisi. Alfa Aktüel Yayınları, Bursa
19. T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2024), Güneşlenme süreleri. <https://www.mgm.gov.tr/kurumici/turkiye-guneslenme-suresi.aspx?l=tr>. Erişim 20 Temmuz 2024

CFD evaluation of wind catcher geometry and internal partitions for enhanced ventilation in Nizwa

 Ahmad Rateb Alhraki^a, and  Bahar Sultan Qurraie^{a,*}

^aArchitecture Department, Karabük University, Safranbolu/ Karabük 7860, Türkiye.

ARTICLE INFO

Article history:

Received

Received in revised form

Accepted

Available online

Keywords:

Wind catchers

Hot- arid climates

CFD analysis

BIM

Ventilation Rate.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effectiveness of wind catchers as a passive cooling strategy in regions with hot climates, where their potential remains largely unexplored. Focusing on a mosque building in Nizwa, Oman, the research investigates the impact of windcatcher geometry and internal partitions on indoor ventilation. The existing case is analyzed, and indoor ventilation conditions are simulated, followed by the generation of various scenarios, including different windcatcher shapes (Square and Rectangular) and various internal partition types (X blades, + blades, and H blades). Each scenario is subjected to CFD analysis. Results show that a Square windcatcher with X+ combination type partitions increase indoor ventilation, raising air velocity from 0.333508 m/s (base case) to 0.693379 m/s (scenario), leading to a 51.9% improvement in indoor ventilation rate. This research suggests valuable insights for architects and designers, advocating for the utilization of windcatcher principles to promote more sustainable architectural practices.

I. INTRODUCTION

Passive cooling design relies heavily on the concept of natural ventilation. This principle plays an essential role in sustainable and bioclimatic architecture, defined as "the passive low-energy design approach that uses the ambient energies of the climate of the locality to create conditions of comfort for the users of the building" [1]. To enhance human thermal comfort, sustainable building design incorporates strategies that respond to climatic and environmental conditions [2-4]. Most of the studies concluded that the fundamental solution of sustainable building design is most likely found in vernacular architecture, where many worthy traditional examples still exist. Within this context, passive heating and cooling subjects play an essential role that depends on the concept of natural ventilation [5-8]. Sorensen [9] identifies three primary methods for achieving passive cooling through natural ventilation: cross ventilation driven by pressure differences, chimney ventilation exploiting the stack effect, and wind-driven ventilation using wind towers or catches (Figure 1).

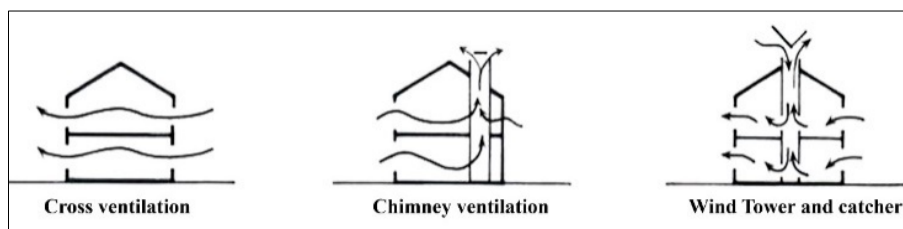


Figure 1. Natural ventilation basic models [9]

*Corresponding author. Tel.: +90-370-418-8659; e-mail: baharsultan@karabuk.edu.tr

Wind catchers are taller and smaller in hot, dry climates compared to humid ones. To capture cooler air, they are positioned to draw air from higher altitudes where it is cleaner and cooler [10, 11]. Unlike humid regions, wind catchers in arid climates typically extend to the lowest inhabited floor [12-15]. Wind towers are passive cooling systems that harness natural ventilation. Similar in principle, wind catchers utilize both the stack effect and wind pressure to induce airflow. The design of wind catcher openings and the vertical shaft geometry influence how effectively wind is captured and directed into the building [16, 17]. The fundamental workings of a wind catcher are visually represented in Figure 2.

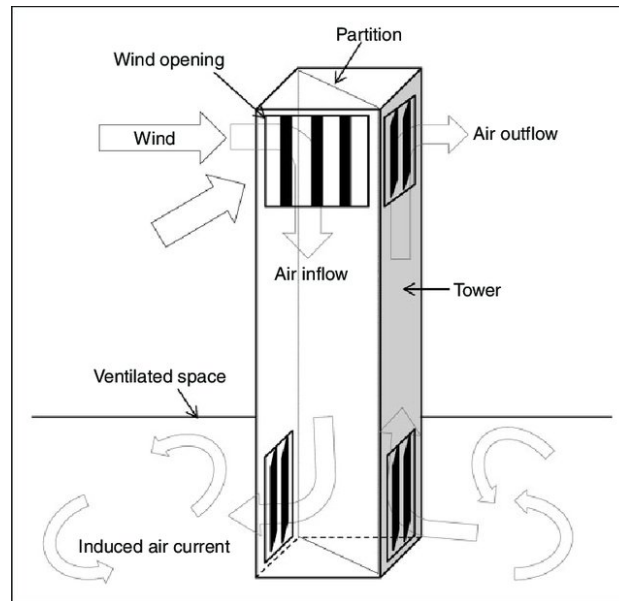


Figure 2. Windcatcher basic principles [28]

Wind catchers are categorized into two primary types: traditional and modern designs [6, 18]. Traditional wind catchers consist of several components, including openings, a roof, a head section, a channel, and internal partitions, as illustrated in Figure 3.

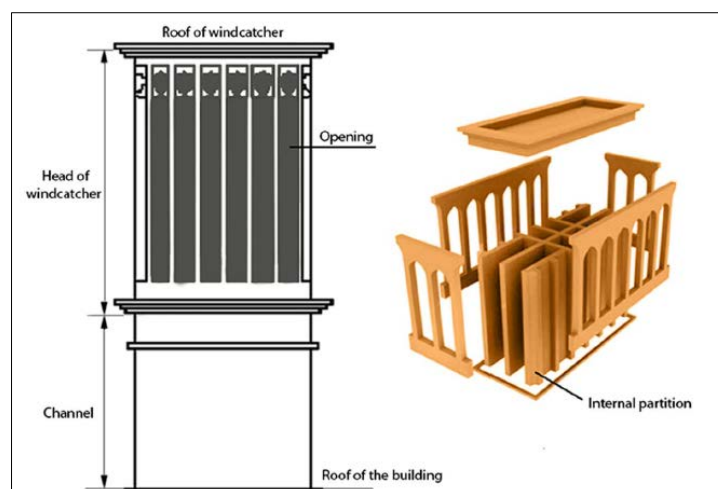


Figure 3. Traditional windcatcher components [19].

Wind catchers can be categorized by their shape, typically circular, square, or rectangular, as shown in Figure 4. [20]. Additionally, they can be classified based on the number of wind-facing sides, ranging from one to eight, or by their internal configuration [20, 21].







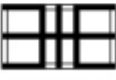




Form	Samples of Plan	
Circle		
Square	 + BLADE	 X BLADE  H BLADE
Rectangle	 + WITH EQUAL CHANEL  + WITH DIFFERENT CHANEL  H BLADE	 X BLADE  K BLADE  I BLADE

Figure 4. Plan shape-based classification of wind catchers [22]

Wind catchers, traditional architectural elements that harness natural wind for ventilation, are gaining renewed interest due to their potential to reduce energy consumption in modern buildings. Evaluating their performance is crucial for optimizing their design and effectiveness.

Existing research employs various methods to assess wind catchers, including Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, field measurements, and comparative studies. Studies by Lia and Mak [17], Hosseini et al. [23], Kabir et al. [24], Montazeri et al. [25], Abdo et al. [26] Sheikhshahrokhdehordi et al. [27] and Ghadiri et al. [28] demonstrate the effectiveness of CFD simulations in evaluating wind catcher performance and airflow patterns. Mahmoudi et al. [22] explored the architectural design principles of wind catchers through field surveys, while El-Shorbagy [23] highlighted the historical and cultural significance of wind catchers in traditional architecture.

While these studies provide valuable knowledge on wind catcher effectiveness, a more nuanced understanding is needed regarding their optimal design for specific climates and building types. This is particularly relevant for regions that share similar climatic characteristics to traditional wind catcher applications, but may have variations in wind patterns, building materials, or urban contexts.

This study aims to address this gap by investigating the potential of wind catchers as a passive cooling strategy in Nizwa, Oman. Nizwa experiences a hot, dry climate like Yazd, Iran, where wind catchers are prevalent. However, there might be subtle differences in wind patterns or urban layouts that could influence wind catcher performance. By employing CFD simulations to analyze the impact of wind catcher geometry and internal configurations on indoor air velocity in the context of Nizwa, this research seeks to identify the relationship between windcatcher design parameters and indoor air velocity, providing insights for enhancing ventilation in similar climatic conditions.

II. METHODOLOGY

This study aims to investigate the impact of windcatcher geometry and internal partitions on indoor ventilation performance within a mosque building located in Nizwa, Oman. By conducting computational fluid dynamics (CFD) simulations of various windcatcher configurations, this research seeks to identify the optimal design parameters for enhancing indoor air quality and thermal comfort in hot arid climates.

To achieve this objective, a case study was selected in Nizwa City, Oman, representing a typical hot and dry climate. The chosen case study is a mosque building centrally located within the old town of Nizwa, situated adjacent to the historical Nizwa castle. This urban context provides a representative environment for evaluating the windcatcher's performance under real-world conditions.

The research methodology involves a comparative analysis between the base case of the selected building (without a wind catcher) and successive windcatcher scenarios with different geometries and internal partition types. The existing case study was modeled in Autodesk Revit Architecture to create a 3D BIM model, along with the scenarios. These models were then exported to Autodesk Computational Fluid Dynamics (CFD), with details such as location, orientation, and wind flow input and output. Each model was prepared separately in CFD using the SAT file format to transfer information from Revit. Boundary conditions, such as air velocity from the prevailing wind direction (2.36 m/s) and pressure output, were set for the models. The windcatcher models adhered to fixed criteria, ensuring consistency across scenarios.

The CFD simulation phase involved solving 100 iterations to ensure reliable results for comparative analysis, focusing on airflow (air velocity) due to the research's scope of comparing natural ventilation rates before and after adding windcatcher scenarios. The simulation covered three key points (A, B, C) in the base model and the scenarios: Point A at the windcatcher opening, Point B above the water bond before entering the indoor space, and Point C within the extended mosque space. The results were compared at these points, leading to conclusions and suggestions for future studies connected to previous research and findings. Figure 5 illustrates the location of the reference points.

Since the study's main purpose is to examine the effect of windcatcher on natural ventilation rate in hot-arid regions, it was essential to determine various scenario of windcatcher geometry and internal partitions. The study assumes some scenarios of wind catchers with some fixed and variable parameters. Some parameters were specified, such as windcatcher height, location, the opening ratio of the windcatcher, and the gross area of the windcatcher. In addition, all wind catchers were suggested to be in a four-sided direction. In this context, the variables were also determined as windcatcher geometry (Square and Rectangular) and type of internal partitions (+ type X, H, and X+ combination type).

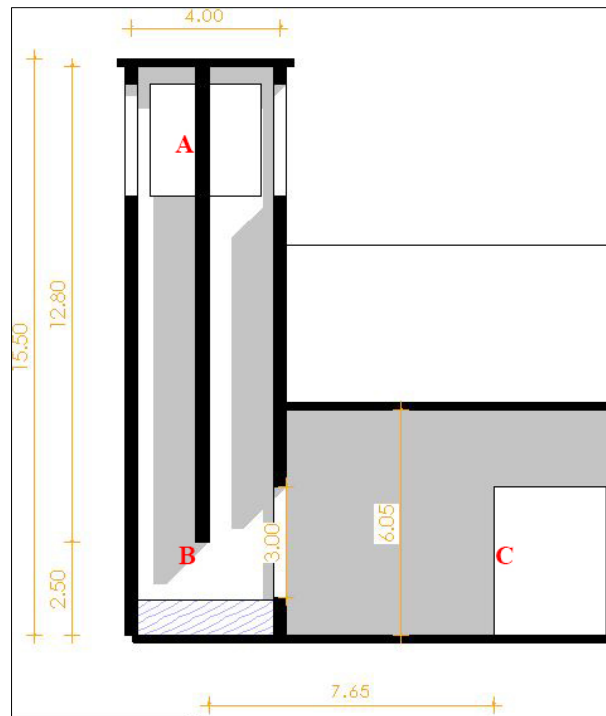


Figure 5. Location of reference points.

2.1. Case Study

The case study was selected as a mosque building that is called "Alqala' mosque" or "mosque of Fort" in Nizwa city of Oman. The selection of the case depended on some pre-set criteria that included:

1. The case study location is in an urban context to include the effect of the surroundings on the wind rate flow.
2. The case study has natural ventilation problems due to the opening ratio compared to the opaque parts.
3. The case study is public building with frequent uses to examine the effect of using a windcatcher on the occupant comfort.

The mosque consists of two main sections: the original structure and a subsequent 1980s extension. The building's orientation deviates slightly from the north-south axis, with the prayer direction (Qibla) facing west. Accessed from the north, worshippers enter the newer section first, then proceed to the older part through four interior doors (Figure 6). The extension features are fixed, arched glass windows on the east and operable windows with a 16% window-to-wall ratio on the south. Both the original and extended sections are primarily constructed of clay.

Weather data for Nizwa was collected using the Ladybug tool for the period between 2007 and 2021. Temperatures in Nizwa fluctuated between 7.4 °C and 46.7 °C annually, with July as the hottest month (36 °C) and January as the coldest (19 °C). Relative humidity varied from 12.7% to 100%, peaking in January (41%) and reaching a low of 19% in May. Predominant wind directions in Nizwa were south and southwest, with an average speed of 2.36 m/s. Figure 97 visually represents the wind speed variations throughout the year.



Figure 6. a) Southwest view of the mosque b) Master Plan of the mosque c) The position of the mosque on map [29, 30]

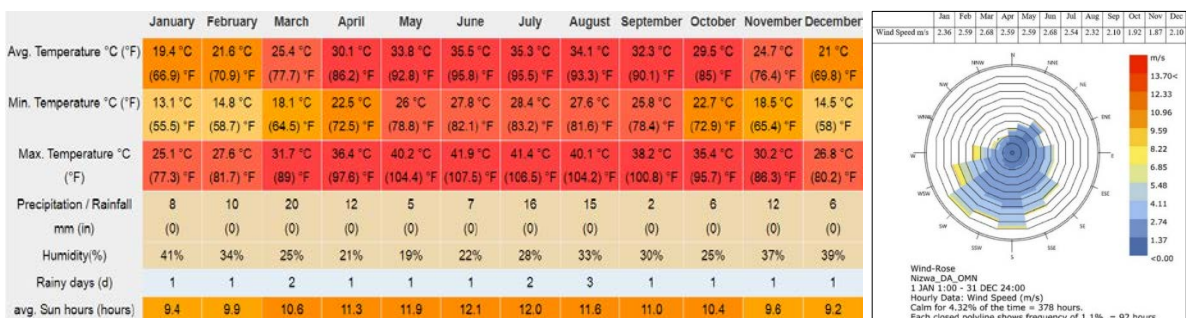


Figure 7. The climate data of Nizwa [31]

To understand the existing wind patterns, the case study building, a mosque, was oriented 20 degrees deviating from the north-south axis, with its longer elevation facing north and south on a rectangular 50x70 meter plan. Given the predominant wind direction in Nizwa - south, southeast, and southwest - the windcatcher was strategically positioned on the southern facade, 25 meters from the building's eastern extremity. This orientation aimed to optimize wind capture and maximize its potential impact on indoor ventilation. Figure 8 illustrates the mosque's floor plan, outlining the placement of windcatchers for each of the simulated scenarios.

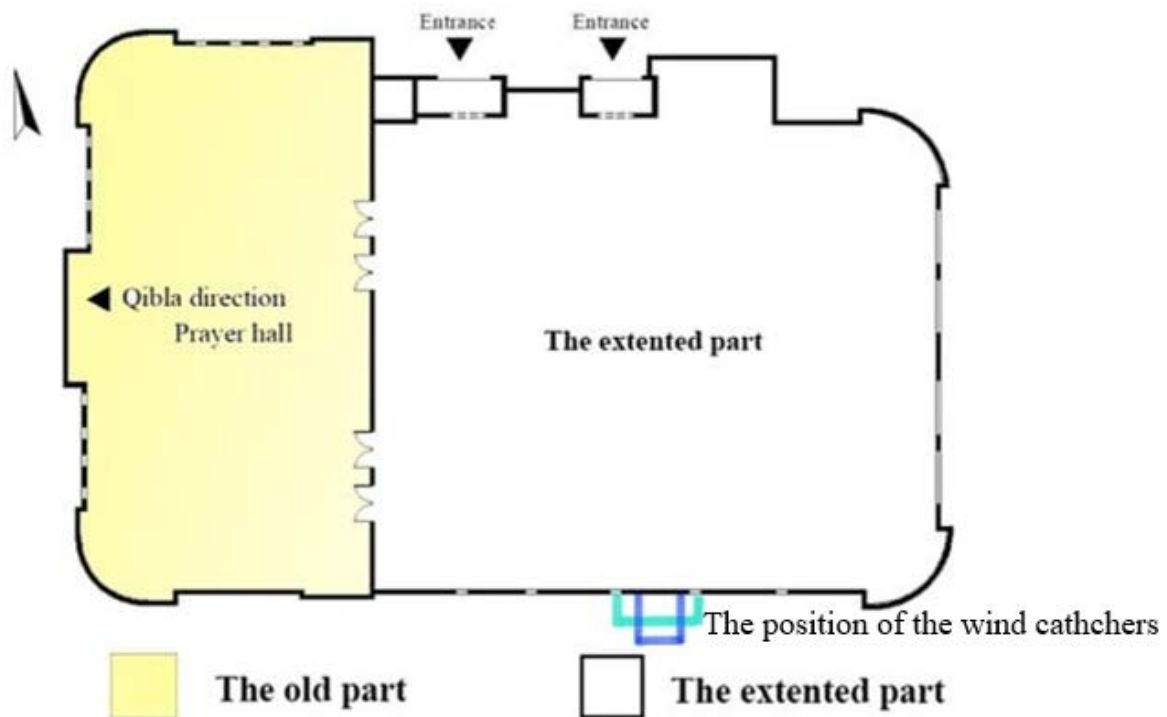


Figure 8. The Ground floor plan of the mosque, windcatcher locations and configurations [29]

It is also worth mentioning that the location and height of the windcatcher were determined after the CFD simulation of the existing case where the highest magnitude of air velocity was found. The location of the windcatcher was determined to be at the southern facade of the building and in the middle distance, while the height of the windcatcher was fixed to be 15.50 meters from the ground floor level. The windcatcher height of 15.50 meters was established by considering both general design guidelines and site-specific factors. While a typical range of 5 to 20 meters is often recommended for windcatchers in hot, arid climates [16], the final height for this study was determined through an analysis of the surrounding building environment. Drawing on the findings of Afshin et al. [32], which demonstrated the significant influence of neighboring building height and placement on windcatcher performance, the windcatcher height was optimized to enhance airflow and ventilation. By carefully considering these factors, the chosen height aimed to maximize the windcatcher's effectiveness in the specific context of the study. The following explains the suggested solutions and properties for the added wind catchers. The general workflow of the study is shown in Figure 9.

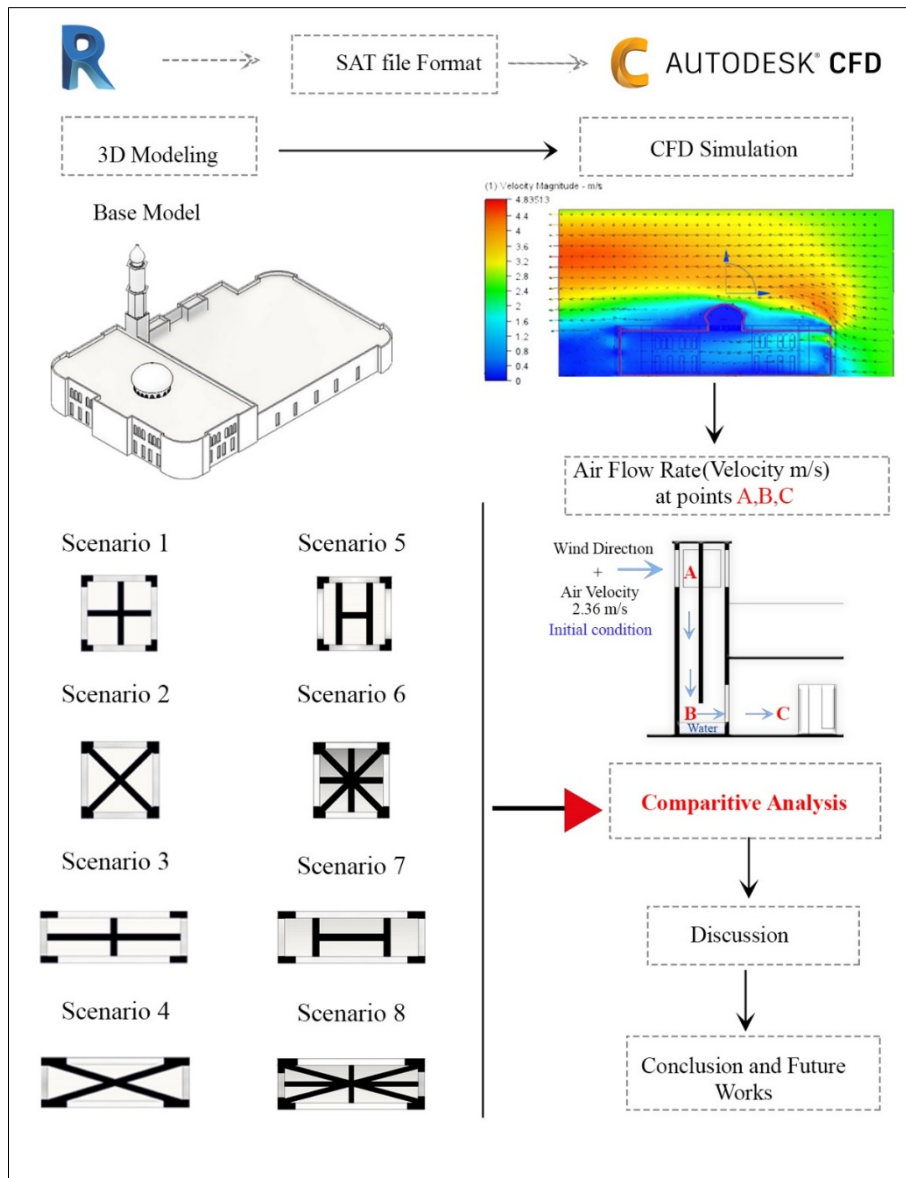


Figure 9. General workflow of the study

III. RESULTS

This study examines how effective a win catcher can be as a cooling method in a hot and dry region. An analysis of a mosque in Nizwa, an Omani city, was conducted as part of the study. In general, the results of this study provide useful insight into the potential of windcatchers to reduce energy consumption in hot-arid climates. The findings of this study can also be used to inform the design of future buildings.

The methodology was based on establishing different Scenarios of windcatcher typology to be applied to the existing case study. This study is intended to test scenarios that might suggest that architects and designers in hot-arid zones should incorporate windcatcher principles into their future designs as passive cooling systems. In that respect, windcatcher scenarios were determined by geometry and partition parameters, whereas other design parameters were fixed. There were fixed parameters such as height, construction materials, opening ratio, and gross area of the suggested windcatchers. Accordingly, the primary variable parameters in the simulation are shown in Table 1. In this study, squares and rectangles were examined as plan-based shapes with specific

dimensions. Additionally, different X, +, and H types of internal blades of scenarios were selected. A total of eight scenarios were developed and examined to come up with an overall conclusion. The results of the scenarios were used to identify the best course of action. The results of the scenarios were then used to develop a comprehensive solution. Using a CFD analysis, the indoor ventilation rate was determined in terms of air velocity (m/s) based on the existing case and the generated scenarios. An analysis and comparison of the results of the study were conducted to determine and compare the optimal solutions.

Table 1. Variable Parameters in the Windcatcher Simulation

Variable Parameter	Values
Windcatcher Geometry	Square, Rectangular
Windcatcher Dimensions	4x4 m (Square), 2x8 m (Rectangular)
Internal Partitions	+, X, H, X+

Using air velocity (m/s), the results were assessed. A specific analytical plane was established to measure air velocity at designated points in this study. Analytical Plane 1 intersects all openings on the ground floor and is positioned horizontally 2 meters above the ground floor. On the other hand, Analytical Plane 2 traverses the windcatcher location, heading into the mosque's extension and ending at the northern entrance.

The base model results showed that the average indoor air velocity at analytical plane 1 is 0.327872 m/s (Figure 10b). At analytical plane 2, points A and B do not exist in the base model, whereas the air velocity at point C was 0.333508 m/s, as shown in Figure 10 (c), respectively.

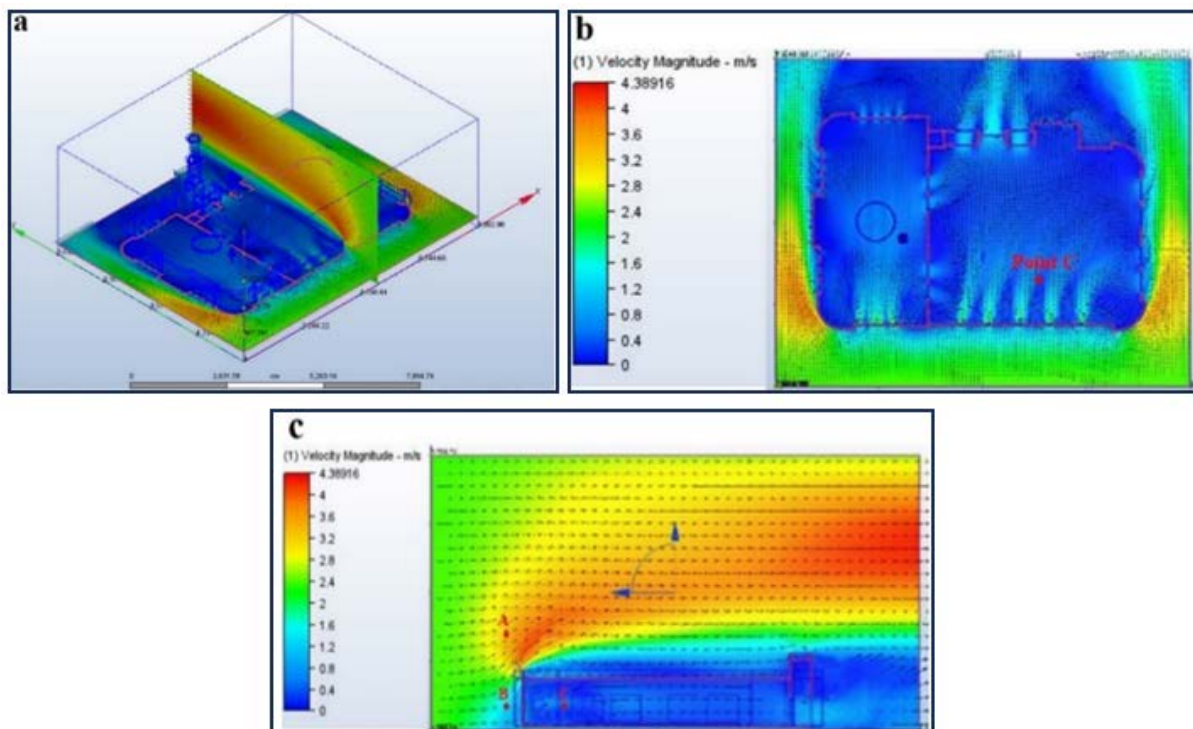


Figure 10. (a) CFD simulation of the base model (b) Analytical plane one results (c) Analytical plane two results.

3.1. Analyses of results at analytical plane 1

The results showed that all the windcatcher Scenarios increased the average air velocity at analytical plane one compared to the base case. Within this context, the square geometry of the windcatcher with X-type internal partitions achieved the highest ventilation rate at analytical plane 1. In this scenario, the average air velocity increased from 0.327872 m/s in the base model to 0.457457 m/s.

Compared to the base model, the square geometry of the windcatcher with + type and H type internal partitions also increased the ventilation rate up to 0.437706 m/s and 0.424831 m/s, respectively. It seems that the square geometry has a better effect on the overall ventilation rate in the building. However, the Square X+ combination type has less impact on increasing the overall ventilation rate.

On the other hand, the rectangular geometry of the windcatcher with X, +, and H types also increased the ventilation rate compared to the base model results at analytical plane 1. However, this increase is less than the square geometry shown in Figure 11. In addition, it can be noticed from the results of rectangular geometry Scenarios that the X and + internal partition types increased the overall ventilation rates more than the H and X+ Scenarios. The Rectangular H-type internal partition achieved the lowest improvement, where the air velocity increased from 0.327872 m/s to only 0.334773 m/s, as shown in Figure 11.

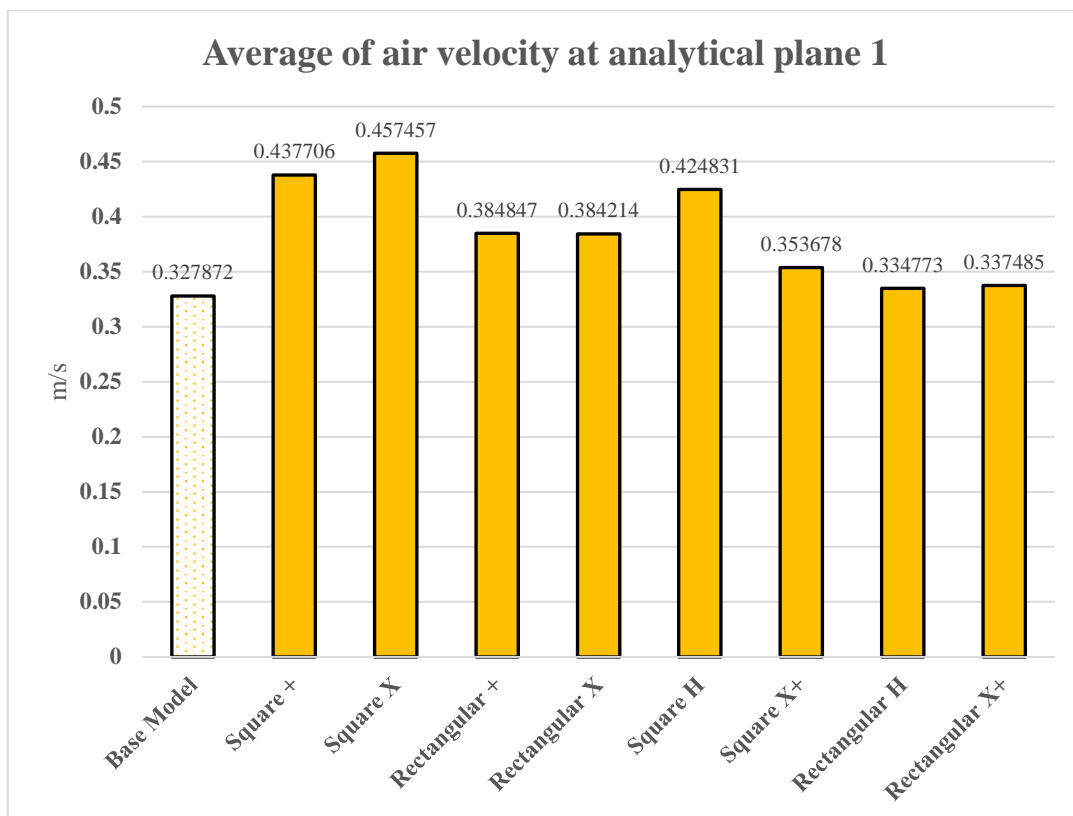


Figure 11. The results of average air velocity at analytical plane 1

3.2. Analyses of results at analytical plane 2

The findings as shown in Figure 12 provide valuable insights for optimizing wind catcher design in Nizwa's hot, dry climate:

- While the annually averaged simulated wind speeds at Point C within the mosque fell within the generally accepted comfort range of approximately 0-5 m/s [33], it's crucial to consider that human comfort is influenced by a combination of factors including temperature, humidity, and individual perception.
- Square Geometry with X or X+ Partitions: Square wind catchers equipped with X-shaped internal partitions, or a combination of X and + partitions (X+), exhibited superior performance across all measurement points. Notably, at point C, situated within the occupied space, the square X configuration achieved a remarkable 51.9% increase in air velocity compared to the baseline scenario. This significant improvement leads to enhanced natural ventilation and improved occupant comfort.
- Rectangular Geometry with X or + Partitions: While less effective than square geometries, rectangular wind catchers with either X or + type internal partitions still demonstrated positive impacts on indoor air velocity at point C. The X type partitions yielded slightly better results compared to the + type in rectangular configurations. These findings suggest that rectangular wind catchers can be a viable option, but their effectiveness is not as pronounced as that of square geometries.
- H Type Internal Partitions: Regardless of the wind catcher geometry (square or rectangular), the H type internal partitions consistently resulted in the lowest air velocity across all reference points. This suggests that H partitions are not suitable for maximizing ventilation performance in Nizwa's climate.

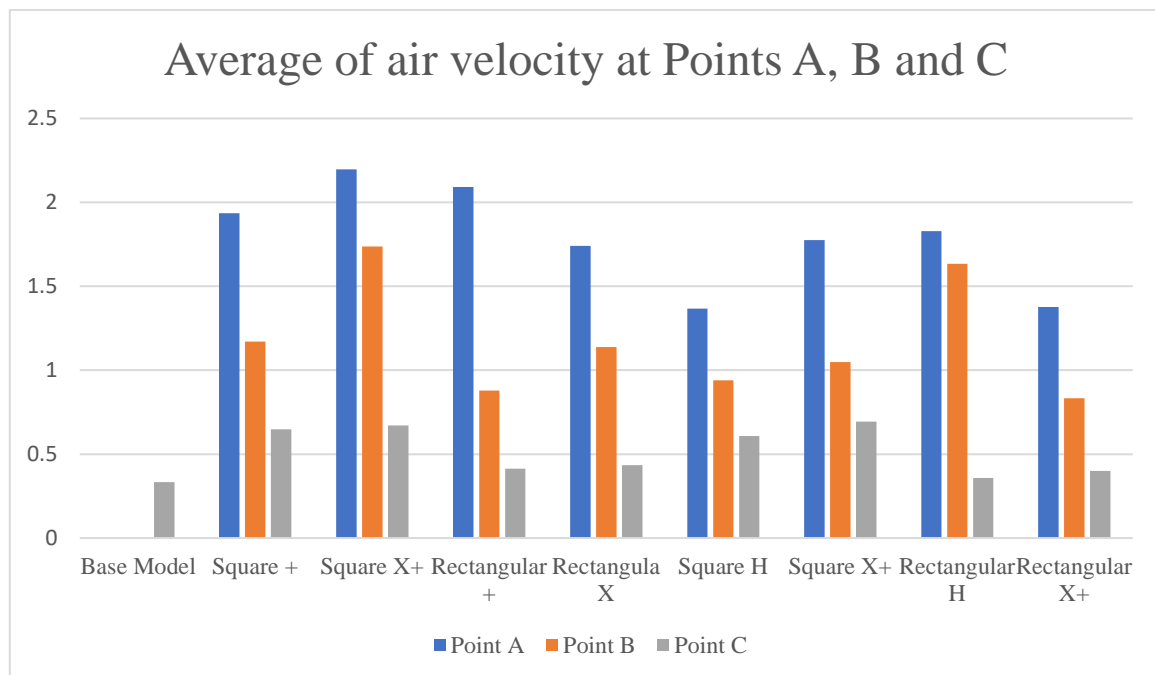


Figure 12. The results of air velocity at Points A, B and C at analytical plane 2

IV. DISCUSSION

This study [34] investigated the effectiveness of wind catchers as a passive cooling strategy in Nizwa, Oman, a hot, dry climate. The research employed CFD simulations to evaluate the impact of wind catcher geometry (square vs. rectangular) and internal partition configuration (X, +, and H types) on indoor air velocity at three key points within the building. The findings align with and expand upon existing literature, providing valuable insights for

optimizing wind catcher design in similar climates. Table 2 compares the ventilation performance of different wind catcher designs to an existing model for point C.

Table 2. Comparing the indoor ventilation rate results of the wind catcher Scenarios with the existing model

Scenario	Windcatcher Geometry	Internal Partitions	Increase (%)
1	Square	+	48.48
2	Square	X	50.34
3	Rectangular	+	19.47
4	Rectangular	X	23.24
5	Square	H	45.18
6	Square	X+	51.90
7	Rectangular	H	6.97
8	Rectangular	X+	16.81

4.1. Optimizing wind catcher design

The study confirms the importance of wind catcher geometry and internal partition configuration for maximizing ventilation performance, as previously highlighted by Jomehzadeh et al. [35]. Square wind catchers with X or X+ partitions emerged as the most effective design in this context. These configurations achieved significantly higher air velocity at all measurement points than other scenarios, particularly at point C within the occupied space. This finding aligns with prior research emphasizing the benefits of square geometries and specific internal partition arrangements. The study also observed that rectangular wind catchers with X or + partitions offered some improvement in air velocity compared to the baseline scenario. However, their effectiveness was consistently lower than that of square geometries. This reinforces the notion that square geometries are generally more suitable for enhancing ventilation rates in hot, dry climates like Nizwa.

The research discourages the use of H type internal partitions for wind catchers in Nizwa, regardless of the chosen geometry. This aligns with the limited studies on H partitions, as noted by Jomehzadeh et al. [35], which suggest their inferiority compared to other configurations in terms of airflow optimization.

Integration with Other Strategies:

While this study focused solely on wind catchers, it underscores the potential benefits of combining them with other passive cooling systems. Previous research by Liu et al. [36] demonstrates the positive effects of integrating wind catchers with open windows on the leeward side of buildings to enhance ventilation rates. Future research could explore the integration of wind catchers with other passive cooling strategies, such as solar chimneys (investigated by Nejat et al. [37]) or PV panels prepared by Hughes and Ghani [38], to achieve optimal natural ventilation and energy efficiency in Nizwa's climate.

Based on the study's outcomes, the following design recommendations are proposed for wind catchers in Nizwa:

- **Prioritize Square Geometry:** Square wind catchers offer a clear advantage in terms of enhancing indoor ventilation rates. Their superior performance justifies their prioritization during the initial design stages.
- **X or X+ Partitions:** When employing square wind catchers, X-shaped internal partitions or a combination of X and + partitions (X+) are highly recommended. These configurations demonstrably optimize airflow within the wind catcher, leading to significant improvements in indoor air velocity.
- **Rectangular Geometry as Alternative:** If spatial constraints necessitate the use of rectangular wind catchers, consider X or + type internal partitions. While their effectiveness is lower compared to square geometries, they can still provide some improvement in ventilation rates.

- **Avoid H Type Partitions:** The study discourages the use of H type internal partitions for wind catchers in Nizwa, irrespective of the chosen geometry (square or rectangular). Their consistently low performance across all scenarios indicates their ineffectiveness in promoting optimal ventilation.

V. CONCLUSION AND FUTURE WORKS

This study investigated the effectiveness of wind catchers as a passive cooling strategy for buildings in Nizwa, Oman, a hot-dry climate. Employing CFD simulations, the research analyzed eight scenarios with varying wind catcher geometries (square vs. rectangular) and internal partitions (X, X+, and H types). The primary focus was on assessing the impact of windcatcher geometry and internal partitions on indoor air velocity through computational fluid dynamics simulations.

The findings demonstrate that wind catchers can significantly improve indoor ventilation in Nizwa. Square wind catchers with X or X+ internal partitions emerged as the most effective configurations, achieving over 50% improvement compared to a scenario without a wind catcher. Rectangular wind catchers with X or X+ partitions were also beneficial, although less impactful (around 23% improvement). H-type partitions proved to be the least effective design for both square and rectangular geometries.

These results highlight the potential of wind catchers as a sustainable cooling technique for buildings in Nizwa. Interestingly, the most successful design – square wind catchers with X or X+ partitions – deviates from the traditional wind catcher practices observed in Yazd, Iran, where rectangular shapes and + type partitions are more common. This underlines the importance of tailoring wind catcher designs to specific regional climatic conditions for optimal performance. Furthermore, the observed discrepancies suggest that established design principles from one region may not translate directly to another, even with similar climates. This underscores the need for research that investigates wind catcher performance in various geographical contexts to establish a comprehensive knowledge base for informed design decisions.

This study acknowledges limitations inherent to CFD simulations, such as the difficulty in accurately capturing real-world phenomena like dust storms. As noted by Liu et al. [39], field studies alongside computational modeling would provide valuable insights for refining wind catcher design strategies in regions with high dust levels. Future research should consider the following areas for further investigation in External Design Parameters. Expanding the analysis to include the impact of external factors, such as neighboring buildings, vegetation, and air/noise pollution, is crucial, especially in urban environments. This aligns with the call for future studies highlighted by Calautit et al. [40].

To further refine wind catcher design for Nizwa's climate and broaden the knowledge base for wind catchers in general, several avenues for future research are suggested:

- Explore additional wind catcher geometries and partitions (hexagonal, octagonal, circular) for a broader design toolbox.
- Investigate the impact of wind catchers on thermal comfort and indoor air quality for a more holistic understanding of occupant well-being.
- Consider a wider range of design parameters (height, opening ratio, blades, materials) in future simulations using a parametric modeling workflow.
- Analyze wind speed variations within the wind catcher to optimize placement and design.

- Explore wind catcher integration with other passive cooling strategies and their impact on building energy efficiency.

ACKNOWLEDGMENT

This study was carried out from the Master thesis titled " The Impact of Wind Catcher's Typology on Ventilation Rate of Buildings in Hot Dry Climates: An Example on A Mosque in Nizwa-Oman" by Ahmad Rateb Alhraki. The study is under construction at the Graduate Education Institute of Karabük University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, supervised by its member Bahar Sultan Qurraie.

REFERENCES

1. Yeang K (1991) Designing the green skyscraper. *Habitat International* 153:149-166.
2. Daemei AB, Eghbali SR, and Khotbehsara EM (2019) Bioclimatic design strategies: a guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones. *Journal of Building Engineering* 25:100758.
3. Sultan Qurraie B and Sertyamaç R (2024) Investigation of energy performance of nanotechnological material and double-skin facade system in office buildings in Türkiye. *Intelligent Buildings International* 15(6):251-265.
4. Salehi A, et al (2019) Investigation of thermal comfort efficacy of solar chimneys under different climates and operation time periods. *Energy and buildings* 205:109528.
5. Sultan Qurraie B and Kılıç Bakırhan E (2023) Evaluation of facade systems in different climate zones regarding energy, comfort, emission, and cost. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences* 301:123-136.
6. Jomehzadeh F, et al. (2017) A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70:736-756.
7. Karimi H, Adibhesami MA, Hoseinzadeh S, Salehi A, Groppi D, and Astiaso Garcia D (2024) Harnessing Deep Learning and Reinforcement Learning Synergy as a Form of Strategic Energy Optimization in Architectural Design: A Case Study in Famagusta, North Cyprus. *Buildings* 145:1342.
8. Qurraie BS and Havva K (2023) The Energy Performance of Shading Element and Double Skin Facade System Integration into Office Buildings in Turkey. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»* 102:293-309.
9. Widera B, 2014, Bioclimatic architecture as an opportunity for developing countries. Presented at Proceedings of the 30th International PLEA Conference, Sustainable Habitat for Developing Societies: Choosing the Way Forward, Centre for Advanced Research in Building Science and Energy CEPT University, Ahmedabad, India.
10. Amiri-Kordestani M (2014) Natural air conditioning, traditions and trends: high performance of sustainable indoor ventilation in a hot and dry climate. Dissertation, Université de Montreal.
11. Chohan AH and Awad J (2022) Wind catchers: an element of passive ventilation in hot, arid and humid regions, a comparative analysis of their design and function. *Sustainability* 1417:11088.
12. Noroozi A (2019) Augmenting traditional wind catcher with combined evaporative cooling system and solar chimney. Dissertation, National Technical University of Athens.
13. Nazir H, Abro S, and Iqbal A (2024) Windcatchers as a Green Ventilation Device: A Lost Tale From Hyderabad, Sindh, Pakistan. *Journal of Asian and African Studies*, 00219096241230486.
14. Qurraie BS and Arslan B (2022) Investigation of Thermal and Energy Performance of Double Skin Facades in Hot Climate Regions in Turkey. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering* 8(3), 2811.
15. Salehi A, Delfani S, Karami M, and Bozorgi M (2020) The effect of climatic conditions on the performance of a new configuration of solar chimney. *Journal of Solar Energy Research* 51:332-340.
16. Maleki BA (2011) Wind catcher: passive and low energy cooling system in Iranian vernacular architecture. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)* 8:130-137.
17. Li L and Mak CM (2007) The assessment of the performance of a windcatcher system using computational fluid dynamics. *Building and environment* 423:1135-1141.
18. Sangdeh PK and Nasrollahi N (2022) Windcatchers and their applications in contemporary architecture. *Energy and Built Environment* 31:56-72.
19. Zarandi MM (2009) Analysis on Iranian wind catcher and its effect on natural ventilation as a solution towards sustainable architecture (Case Study: Yazd). *International Journal of Humanities and Social Sciences* 36:668-673.
20. Masrouf M, Abbasi M, and Hallaj HM (2012) Study of wind catchers: the mass flow rate and inlet air to the building in traditional wind catchers. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 610:159-165.
21. Bahadori MN, Dehghani-sanij A, Sayigh A, Bahadori MN, Dehghani-sanij A, and Sayigh A (2014) The Architecture of Baudgeers. *Wind Towers: Architecture, Climate and Sustainability*, 63-100.
22. Branch CT (2013) Ancient Iran, the origin land of wind catcher in the world. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 58:433-439.

23. Hosseini S, Shokry E, Hosseini AA, Ahmadi G, and Calautit J (2016) Evaluation of airflow and thermal comfort in buildings ventilated with wind catchers: Simulation of conditions in Yazd City, Iran. *Energy for Sustainable Development* 35:7-24.
24. Kabir IFSA, Kanagalingam S, and Safiyullah F (2017) Performance evaluation of air flow and thermal comfort in the room with Wind-Catcher using different CFD techniques under neutral Atmospheric Boundary Layer. *Energy Procedia* 143:199-203.
25. Montazeri H, Montazeri F, Azizian R, and Mostafavi S (2010) Two-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modeling. *Renewable Energy* 357:1424-1435.
26. Abdo P, Taghipour R, and Huynh BP (2020) Three-dimensional simulation of wind-driven ventilation through a windcatcher with different inlet designs. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* 124:041008.
27. Sheikhshahrokhdehordi M, Khalesi J, and Goudarzi N (2020) High-performance building: Sensitivity analysis for simulating different combinations of components of a two-sided windcatcher. *Journal of Building Engineering* 28:101079.
28. Ghadiri MH, Lukman N, Ibrahim N, and Mohamed MF (2013) Computational analysis of wind-driven natural ventilation in a two sided rectangular wind catcher. *International Journal of Ventilation* 121:51-62.
29. Nizwa (2009) Nizwa – The State Visits – In the City. <https://thestatevisitsinthecity.home.blog/2009/01/02/nizwa/> Erişim 10.05.2023.
30. GoogleMap (2024) Al- Qala Mosque. <https://www.google.com/maps/place/Al+Qala'a+Mosque/@22.9339101,57.5301356,306m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x3e8ef0c0260783c5:0x969c0a8d5d5fe9e3!8m2!3d22.9336105!4d57.5308966!16s%2Fg%2F1v6p2rs1?authuser=0&entry=ttu>. Erişim. 10.05.2024
31. weatherspark (2019) Climate and Average Weather Year Round in Nizwá. <https://weatherspark.com/y/105716/Average-Weather-in-Nizwa%2C%20A1-Oman-Year-Round>. Erişim 02.05.2023.
32. Afshin M, Sohankar A, Manshadi MD, Daneshgar M, and Kamaragi GD (2014) Visualized Flow Patterns around and inside a Two-Sided Wind-Catcher in the Presence of Upstream Structures. *International Journal of Energy and Power Engineering* 812:1312-1317.
33. Willemsen E and Wisse JA (2007) Design for wind comfort in The Netherlands: Procedures, criteria and open research issues. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 959:1541-1550.
34. Alhraki AR (2023) The impact of wind catcher's typology on ventilation rate of buildings in hot dry climates: An example on a mosque in Nizwa-Oman. Dissertation, Karabuk University.
35. Jomehzadeh F, Hussen HM, Calautit JK, Nejat P, and Ferwati MS (2020) Natural ventilation by windcatcher (Badgir): A review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate. *Energy and Buildings* 226:110396.
36. Jones BM and Kirby R (2010) The performance of natural ventilation windcatchers in schools-A comparison between prediction and measurement. *International Journal of Ventilation* 93:273-286.
37. Nejat P, Calautit JK, Majid MZA, Hughes BR, Zeynali I, and Jomehzadeh F (2016) Evaluation of a two-sided windcatcher integrated with wing wall (as a new design) and comparison with a conventional windcatcher. *Energy and Buildings* 126:287-300.
38. Hughes BR and Ghani SA (2011) A numerical investigation into the feasibility of a passive-assisted natural ventilation stack device. *International Journal of Sustainable Energy* 304:193-211.
39. Liu M, Jimenez-Bescos C, and Calautit J (2022) CFD investigation of a natural ventilation wind tower system with solid tube banks heat recovery for mild-cold climate. *Journal of Building Engineering* 45:103570.
40. Calautit JK, O'Connor D, and Hughes BR (2014) Determining the optimum spacing and arrangement for commercial wind towers for ventilation performance. *Building and environment* 82:274-287.



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Investigation of wear properties of elastomer modified wollastonite and hazelnut shell flour reinforced polypropylene composites

İlyas Kartal^{a,*}, Mehmet Mudu^b, Kenan Büyükkaya^c and Halil Demirer^a

^aMarmara University, Faculty of Technology, Metallurgical and Materials Engineering, Istanbul, 34840, Turkey^bYalova University, Faculty of Engineering, Yalova, 77100, Turkey^cGiresun University, Technical Sciences Vocational School, Mechanical and Metal Technologies, Giresun, 28000, Turkey

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 March 2024

Received in revised form 8 October 2024

Accepted 23 October 2024

Available online

Keywords:

Hybrid composite

Polypropylene

SEBS

Ground Hazelnut Shell

Wollastonite

ABSTRACT

In this study, hybrid composites were produced by using polypropylene (PP) polymer as matrix material, and hazelnut shell (HS) and wollastonite (W) as reinforcement in different ratios. Hazelnut shell flour (HSF) and wollastonite reinforced polypropylene mixtures were modified with poly(styrene-*b*-ethylene-co-butylene-*b*-styrene) (SEBS) triblock copolymer and maleic anhydride grafted SEBS (SEBS-*g*-MA). Wear properties of the hybrid composites were investigated as a function of elastomeric component. First, the reference hybrid composites were prepared from PP and W + HSF mixtures in the ratio of 80/10+10 by weight through extrusion method. SEBS and SEBS-*g*-MA modified hybrid composites (% by weight ratios - 3, 6, 9) were then prepared by using these reference mixtures. The goal of this study is to investigate the effect of elastomeric modifications on the wear properties of the hybrid composites. Wear test samples prepared out of those mixtures by injection molding. In order to avoid any degradation due to the temperature sensitivity of the hazelnut shell, temperatures were kept close to lower limits during extrusion processing. Wear features of the samples were investigated by using an abrasion tester. Scanning electron microscopy was used for analyzing morphological features of the worn surfaces. It was found that SEBS and SEBS-*g*-MA modifications resulted in the reduction of the weight loss.

I. INTRODUCTION

Composite materials are produced with approximately 90% by polymer based matrices. Advanced plastic-polymer group matrix materials are composite materials in this group that are reinforced materials mostly in fiber form. However, fibers with superior physical, chemical and mechanical properties are used in the advanced composites group. These materials have high strength (tensile and compressive strength), high elastic modulus and high toughness. Because of these advantages, polymer composites are widely used in important areas such as aircraft and space industry [1-3]. The use of organic and inorganic fillers in polymer-based composites is common, recently organic and inorganic fillers are used together in polymer-based composite materials. The use of two different filler materials in polymer based composite materials gives different properties to the composite material that cannot be achieved with a single type filler. These properties are briefly considered as cost, ease of processing, low density, aesthetic, strength and abrasion resistance [4-12].

Polypropylene (PP) is a widely used polymer with various applications in the market. However, its relatively poor impact resistance, especially at low temperatures limits its application as an engineering thermoplastic. Plastic deformation ability of the matrix can be increased to increase the toughness. Addition of elastomers in order to improve the fracture toughness of PP is a common approach, but the strength and stiffness of PP are also

*Corresponding author. Tel.: +90-216-777-3932; e-mail: ilyaskartal@marmara.edu.tr

simultaneously reduced. On the other hand, although using inorganic fillers generally improves strength, stiffness, hardness, and abrasion resistance of PP, it usually reduces the fracture strength of PP [13-20].

Hard fillers such as silica and alumina increase the wear resistance by providing high hardness and strength to the composite material. Hard fillings minimize surface wear and deformations in composite materials, which extends the life of the material. However, the high hardness of hard fillings can lead to brittleness under certain conditions (for example, under high impact), which can cause the surface to crack quickly and wear faster.

Hazelnut shells are used as fillers in composites because they are biodegradable, renewable and environmentally friendly. Natural fillers such as hazelnut shells add lightness to composite materials while also contributing to the improvement of certain mechanical properties. Especially when used in polymer matrix composites, hazelnut shell fillers can increase the wear resistance of the composite and provide cost-effectiveness. However, organic fillers such as hazelnut shells do not provide as high abrasion resistance as hard inorganic fillers; however, they improve impact resistance by increasing flexibility. The use of hazelnut shell fillers in composites is an important step in sustainable material development and an ideal approach to reduce environmental impacts [20]. In such systems, both properties can be improved by the simultaneous utilization of rigid fillers such as wollastonite and elastomeric phase such as SEBS. This approach has been successful in providing rigidity-toughness balance [21-26]. In multi-phase materials, it is suggested that the fillers in the matrix change crack propagation direction and increase the fracture surface area thereby increasing the toughness. Another way to increase the toughness is to encapsulate the fillers by using a low modulus component which is an elastomeric phase. Elastomeric components absorb some of the impact energy in multi-phase polymer composites [20, 27-28].

Moreover, the mechanical and other properties of multi-phase polymer composite systems are improved by creating interfacial interactions between the phases. For this purpose, functional groups are grafted to polymers in neutral state, usually by reactive extrusion, and these polymers are used to bring about interfacial interactions with other phases. SEBS elastomer grafted with maleic anhydride interacts with active groups such as hydroxyl (-OH) through carboxyl groups present in maleic anhydride resulting in an esterification reaction [13, 28].

In this study, it is aimed to investigate wear properties of polypropylene having the additions of both rigid fillers and soft elastomeric phases. The world's center of hazelnut production is Turkey, with an annual hazelnut harvest of over 700,000 tons. Considering that half of the hazelnut weight is shell, a very large amount of hazelnut shell is obtained as waste. The aim of this study is to evaluate waste hazelnut shell, which is mostly consumed as fuel, in composites to improve wear properties and thus to have high added value. In this respect, the study differs from the literature.

II. MATERIALS AND METHOD

2.1 Materials

In this study, homopolymer polypropylene (PP MH418; polymer known as Petkim's Petoplen) was used as matrix material. Poly(styrene-*b*-ethylene-*co*-butylene-*b*-styrene) block copolymers (SEBS; KratonTM G-1652) and the corresponding maleated SEBS block copolymer grafted with 1.7 wt% of maleic anhydride (SEBS-*g*-MA;

Kraton™ FG-1901) were supplied by Kraton (Kraton Polymers LLC) and were used as thermoplastic elastomers. SEBS and SEBS-g-MA are linear triblock copolymers with ~30 wt% of styrene and have number average molecular weights (Mn) of 65.900 and 47.300 g mol⁻¹, respectively. Structural views of SEBS and SEBS-g-MA elastomers were given in Figures 1a and 1b. Two types of fillers, which are hazelnut shell flour (HSF) and wollastonite, were used to get a hybrid composite structure. Hazelnut shell flour was ground in a mill. It can be clearly seen that the shell consists of two main layers when viewed as a macro on the hazelnut shell. The outer layer is of a hard structure, which is surrounded by a soft, loose layer. Therefore, the crushed hazelnut shell contains these two parts.

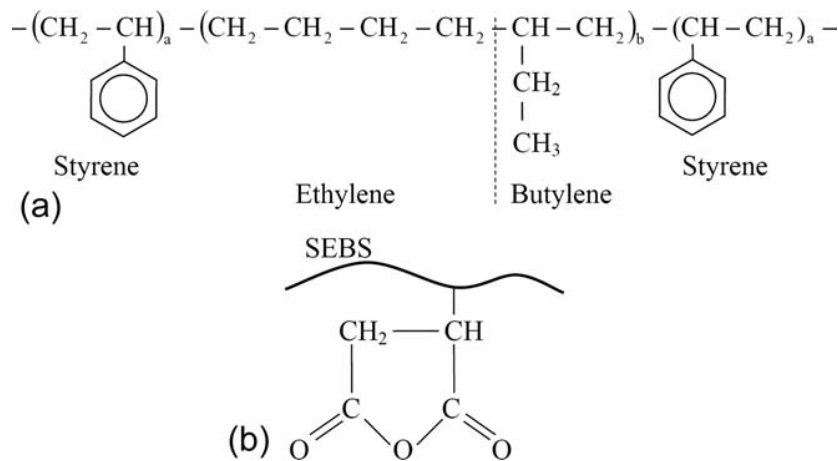


Figure 1. Structural Views of SEBS (a) and SEBS-g-MA (b).

In this study, the powder obtained from the hard part of the shell was separated from the soft part and used. Hazelnut shell is basically a wood-like cellulosic structure, so it is a very sensitive material against water. This sensitivity increases as the surface becomes bigger through the formation of smaller dust. For this reason, the hazelnut shell powder was dried before processing in the extruder. In the study, HSF with dimensions in the range of 200-250 microns was used. A macrophotograph of a lump of HSF was presented in Figure 2.



Figure 2. An Optical Image of Hazelnut Shell Flour

Wollastonite (W; Nyglos 18) with an aspect ratio of nearly 19/1 (~150 μm /8 μm), a specific gravity of 2,9 g cm^{-3} and a specific surface area of 1,2 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ was supplied by Nyco Minerals Ltd. and was used as received with its original surface treatment. Polyethylene wax OX.PE WAX LE 262 produced by Innospec Leuna was supplied by ERAL Turkey to facilitate processing as a lubricant. The IRGANOX 1010 antioxidant (supplied by the Ciba Geigy Turkey) was used to minimize any possible oxidation during the mixing in the extruder and during the injection molding.

2.2 Preparation of Test Specimens

An extruder (screw diameter: 30 mm, L/D ratio: 25) at a speed of 120 rpm was used for compounding of PP with the elastomers and the fillers. The barrel temperature profile was set at 160, 170, 180, and 185 $^{\circ}\text{C}$ for zones from feed to die.

The strands obtained from the extruder were cooled immediately in water and then granulated. The granules were dried in an oven at 100 $^{\circ}\text{C}$ for 4 hours before injection molding. Test specimens were molded in accordance with ISO 527 using a Supermaster SM-60HC injection molding machine. The cylinder temperature profile of the injection molding equipment was set at 200 $^{\circ}\text{C}$, and the mold temperature was set at 40 $^{\circ}\text{C}$.

HSF was dried at 100 $^{\circ}\text{C}$ for 2 hours just before mixing with PP and, wollastonite, SEBS, SEBS-g-MA were weighed with respect to the specified weight ratios. In order to avoid degradation due to the sensitivity of the HSF to heat, temperatures during extrusion process were kept close to the lower limits. In addition, slip agent and antioxidant were added to all mixtures to minimize degradation.

First, binary hybrid composites were prepared from polypropylene + wollastonite (PP/W) and polypropylene + HSF PP/HSF in certain ratios (% by weight ratios - 80/20), ternary PP/W/HSF composites (% by weight ratios - 80/15/5, 80/10/10, 80/5/15), quaternary PP/W/HSF/SEBS and PP/W/HSF/SEBS-g-MA composites (% by weight ratios - (80/10/10)/3, (80/10/10)/6, (80/10/10)/9) were prepared. 10% W + 10% HSF filled polypropylene composite from these hybrid group composites was considered as the reference group. Toughness was increased by adding SEBS or SEBS-g-MA elastomers while rigidity increased by incorporating wollastonite and hazelnut shell flour into polypropylene. This reference group was modified by adding SEBS and SEBS-g-MA at 3-6 and 9% by weight of the hybrid composite.

2.3 Characterization

2.3.1 Wear tests

A standard single pin-on-disc machine at dry conditions was used for performing abrasive wear tests. All specimens were tested at a constant load of 30 N and a sliding speed of 8,75 m/s at room temperature. Each test was performed at least in triple to ensure the reliability and the average of these results was reported. Five different sliding distances (100, 200, 300, 400, 500 m) were adopted for the wear tests. After completing each sliding distance, the test was interrupted and the weight was measured after carefully cleaning the samples.

2.3.2 Morphology investigations

Worn surfaces were investigated by using a JEOL JSM-5910 LV scanning electron microscope.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

The combined use of organic and inorganic fillers enables high-performance properties to be achieved in composite materials. This hybrid structure combines the hardness, strength and thermal resistance provided by inorganic fillers with the flexibility, lightness and environmental sustainability properties of organic fillers. As a result, composite materials are optimized in terms of both mechanical strength and workability, while at the same time being environmentally friendly and economically advantageous. This combination enables the production of versatile materials, offering innovative solutions for a wide range of applications.

As can be understood from Figure 3 the highest wear loss occurred in the pure PP sample. The lowest mass loss was observed in 20% W filled composite. As expected, the wear loss increased as the organic filler added to the mixture increased. Wear properties of organic fillers are weaker than inorganic fillers. PP-10% HSF-10% W sample was selected as a reference sample from these composite groups.

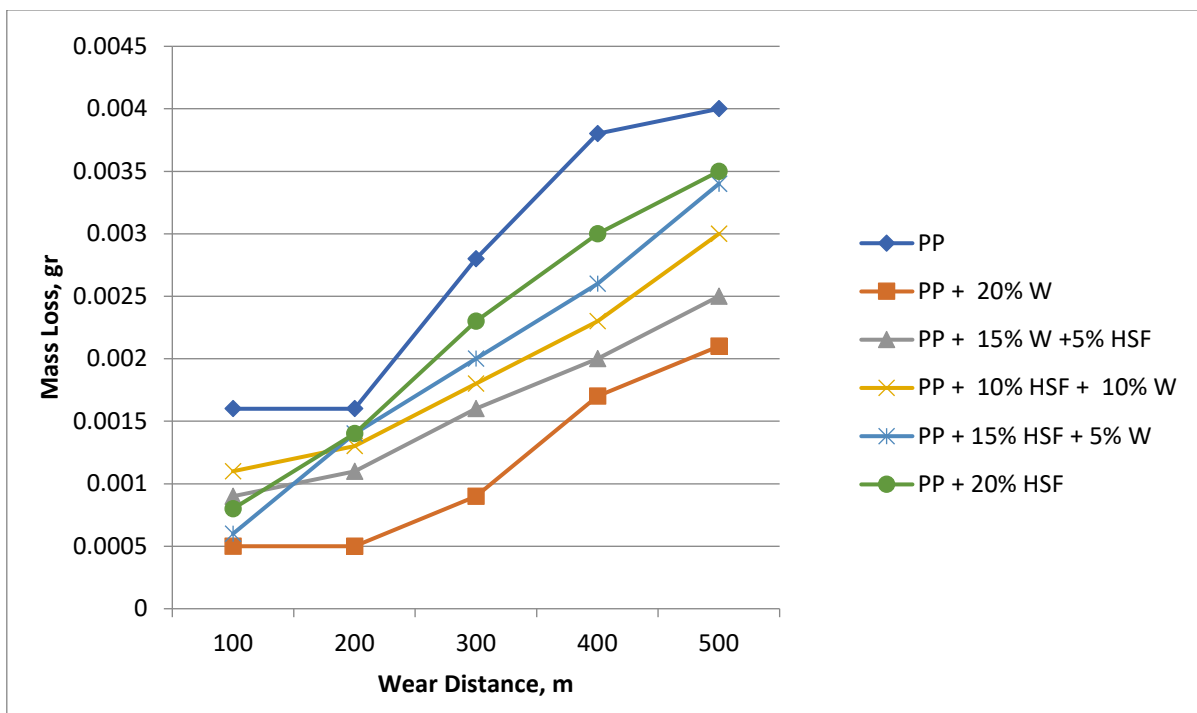


Figure 3. Mass Loss vs. Wear Distance for Hybrid Composites

The mass loss of the reference sample PP-HSF-W composite can be significantly reduced by the addition of SEBS as seen in Figure 4. This improvement can be attributed to the wear behavior of elastomeric materials.

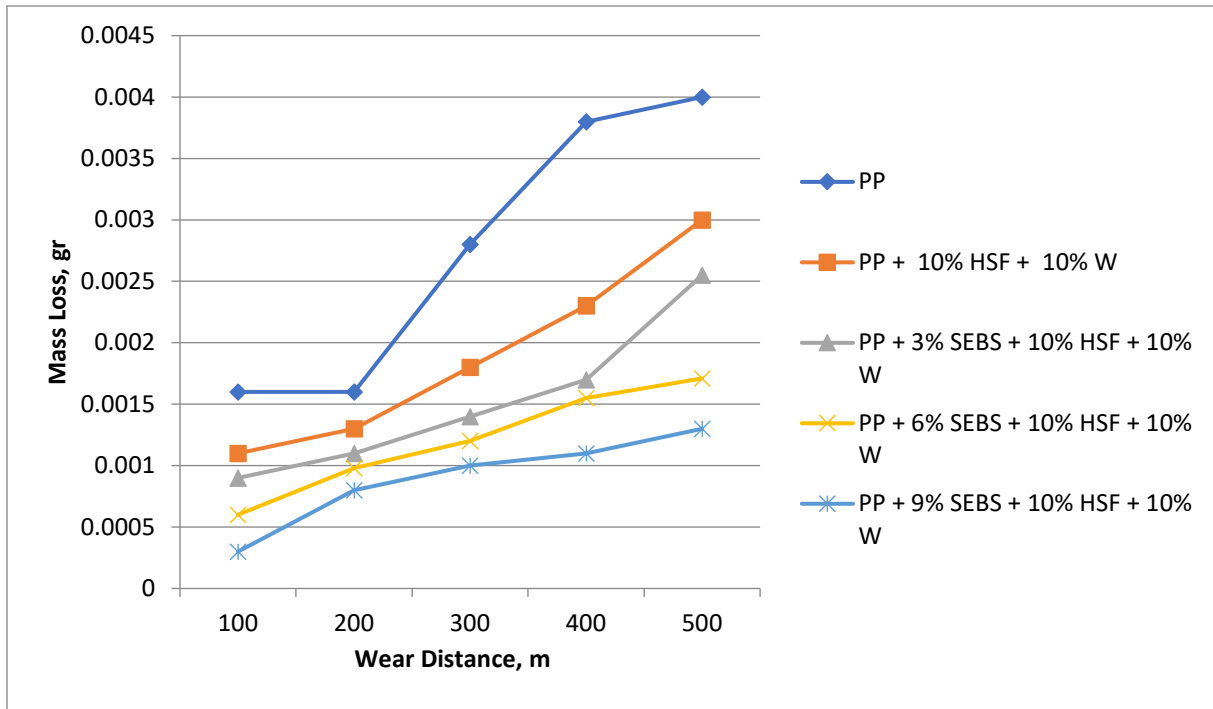


Figure 4. Mass Loss vs. Wear Distance for SEBS Modified Composites

Again, as seen in Figure 5 the mass loss of PP-HSF-W composite can be significantly reduced by the addition of SEBS-g-MA. This improvement can also be stemmed from the wear behavior of elastomeric materials.

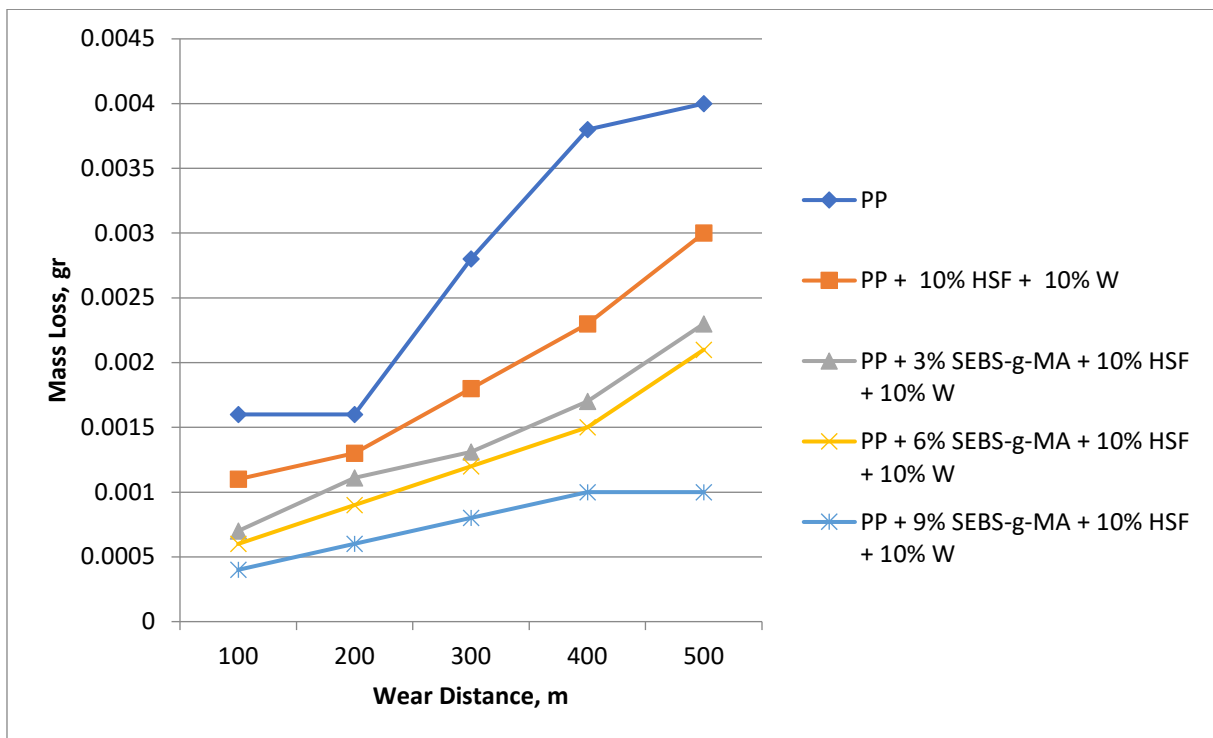


Figure 5. Mass Loss vs. Wear Distance for SEBS-g-MA Modified Composites

From Figure 6 it is clearly seen that the mass loss of SEBS-g-MA modified composites is lower than the SEBS modified composites. This difference is related to the differences in the adhesion behavior of these elastomers. Between the phases of hybrid composites, SEBS-g-MA exhibits stronger bonds than the SEBS modified ones.

Worn surfaces of 10% W + 10% HSF filled polypropylene hybrid composites, PP/W/HSF/SEBS hybrid composites, and PP/W/HSF/SEBS-g-MA hybrid composites were presented in Figures 7a, 7b, and 7c respectively. As clearly shown in Figure 7, the additions of the SEBS and SEBS-g-MA as elastomeric phases affected considerably the wear behavior of hybrid composites. The number of scratches and the scratch intensity reduced with the elastomeric additions.

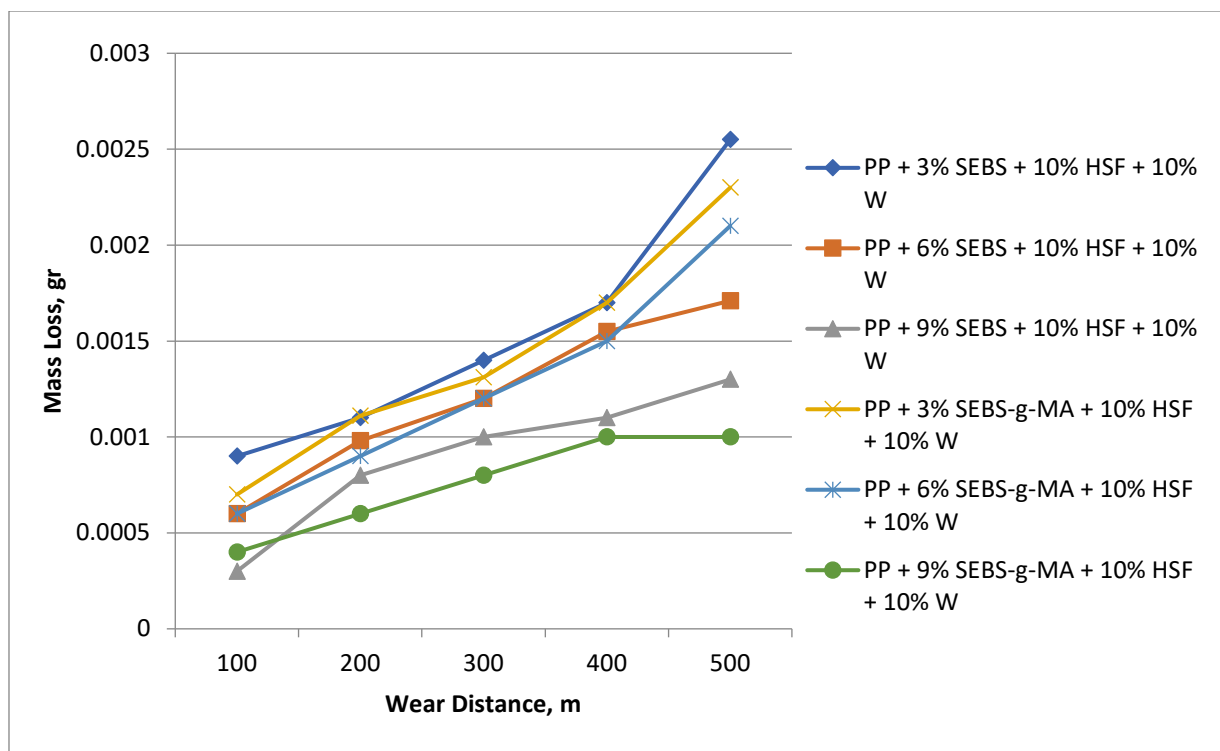


Figure 6. Mass Loss vs. Wear Distance for SEBS and SEBS-g-MA Modified Composites

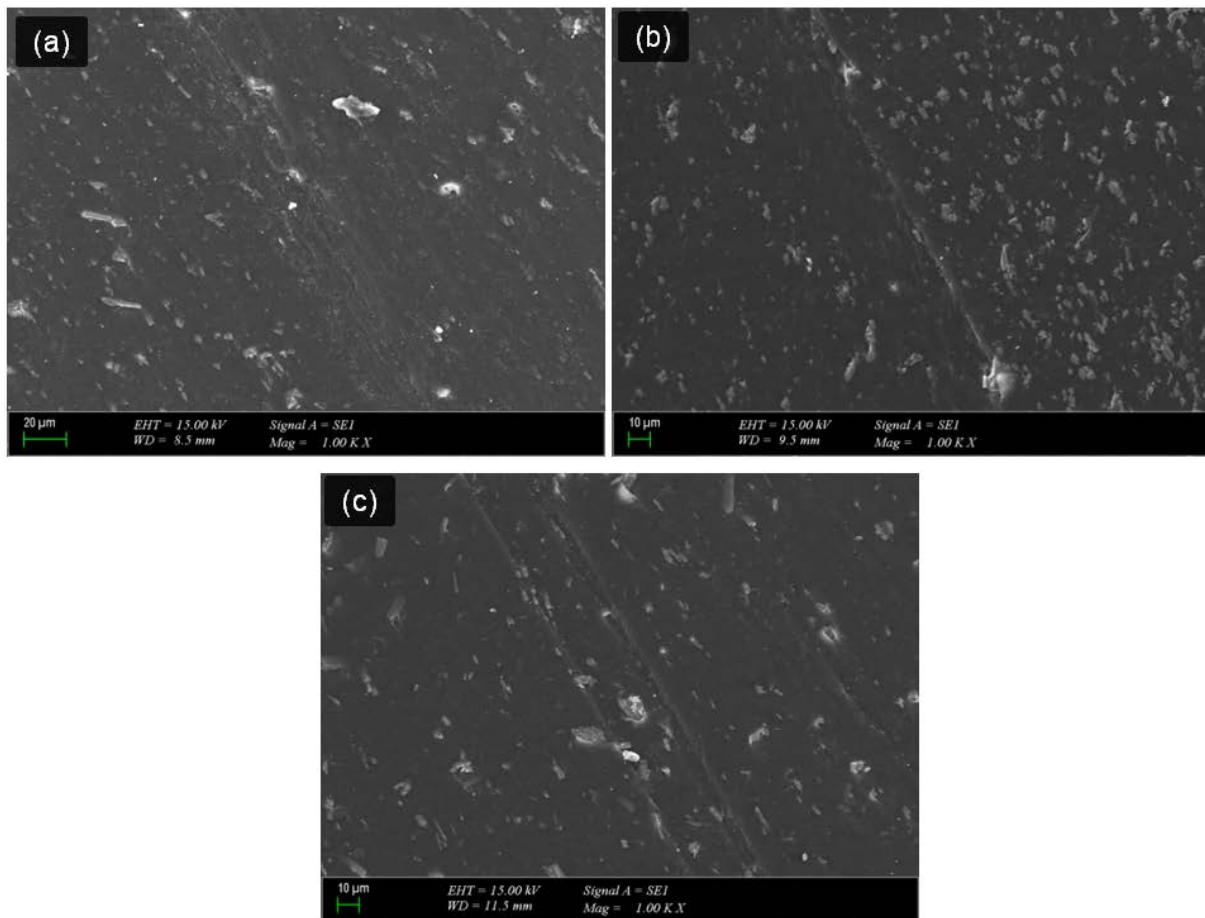


Figure 7. SEM Images of the Worn Surfaces of Hybrid Composites

IV. CONCLUSIONS

In this study, the effect of hazelnut shell, which is produced intensively in Turkey, on wear properties was investigated by using it together with inorganic filler in thermoplastic based composites. Hazelnut shell was used as an organic filler and wollastonite was used as an inorganic filler. From the above-mentioned data, the following conclusions can be drawn:

1. Pure PP has the lowest abrasion resistance
2. Only inorganic filled composite exhibited higher abrasion resistance than only organic filled composites
3. Elastomeric additions improved the abrasion resistance of hybrid composites
4. SEBS-g-MA modified composites exhibited lower mass loss than the SEBS modified composites due to the increases in bond strength of the constituent phases.

Funding

The author(s) received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

Declaration of conflicting interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

REFERENCES

1. Leong YW (2004) Comparison of the mechanical properties and interfacial interactions between talc, kaolin, and calcium carbonate filled polypropylene composites. *J Appl Polym Sci* 91:3315-3326.
2. Unal H, Fındık F, Mimaroglu A (2003) Mechanical behavior of nylon composites containing talc and kaolin. *J Appl Polym Sci* 88:1694-1697.
3. Unal H, Mimaroglu A, Alkan M (2003) Mechanical properties and morphology of nylon-6 hybrid composites. *Society of Chemical Industry* 53:56-60.
4. Kartal İ (2020) Effect of hornbeam sawdust size on the mechanical properties of polyethylene composites. *Emerging Materials Research* 9(3):979-984.
5. Kartal İ, Naycı G, Demirer H (2019) Investigation of the mechanical properties of chestnut/hornbeam sawdust filled vinyl ester composites. *European Journal of Science and Technology* (16):723-728.
6. Kartal İ, Naycı G, Demirer H (2020) The effect of chestnut wood flour size on the mechanical properties of vinyl ester composites. *Emerging Materials Research* 9(3):960-965.
7. Adibelli Ü, Mutlu D, Çakır Yiğit N, Karagöz İ (2022) Ceviz kabuğu dolgulu epoksi hibrit kompozit malzemelerin hazırlanması ve karakterizasyonu. 10. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları, Sempozyumu, İstanbul Teknik Üniversitesi, 13-14 Mayıs İstanbul, ss.152-159.
8. Kartal İ, Sengor İ (2023) Fabrication and characterization of hazelnut shell powders-loaded poly (lactic acid)(PLA) composite fibers. *Journal of the Chemical Society of Pakistan* 45 (5):361-367.
9. Kartal İ, Selimoğlu H (2023) Usability of pine sawdust and calcite together as filler in polyester composites. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering* 9(3):267-273.
10. Kartal İ, Selimoğlu H (2023) Investigation of the mechanical behavior of recycled polypropylene-based composite materials filled with waste cotton and pine sawdust. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering* 9(4):412-418.
11. Kartal İ, Özcan Z (2023) Investigation of effect of chestnut sawdust on mechanical properties of epoxy matrix composites. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science* 3(2):67-74.
12. Kartal İ, Kasap K, Demirer H (2023) Investigation of mechanical properties of domestic black tea waste filled vinylester composites. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering* 9(4):435-440.
13. Mudu M (2010) Investigation of mechanical properties of organic-inorganic hybrid reinforced composites. Dissertation, Marmara University Institute of Pure and Applied Sciences.
14. Demirer H, Kartal İ, Yıldırım A, Büyükkaya K (2018) The utilisability of ground hazelnut shell as filler in polypropylene composites. *Acta Physica Polonica A* 134:254-256.
15. Lin TA, Lin J-H, Bao L (2020) Polypropylene/thermoplastic polyurethane blends: mechanical characterizations, recyclability and sustainable development of thermoplastic materials. *Journal of Materials Research and Technology* 9:5304-5312.
16. Klapiszewski Ł, Zasadzińska AG, Borysiak S, Jesionowski T (2019) Preparation and characterization of polypropylene composites reinforced by functional ZnO/lignin hybrid materials. *Polymer Testing*. 79:106058.
17. Somashekhar S, Shanthakumar GC, Nagamadhu M (2020) Influence of fiber content and screw speed on the mechanical characterization of jute fiber reinforced polypropylene composite using Taguchi method. *Materials Today:Proceedings* 24(4):2366-2374.
18. Mo J, Zeng L, Liu Y, Ma L, Cheng G, et al (2020) Mechanical properties and damping capacity of polypropylene fiber reinforced concrete modified by rubber powder. *Construction and Building Materials* 242:118111
19. Ray K, Patra H, Swain AK, Parida B, Rana S, et al (2020) Glass/jute/sisal fiber reinforced hybrid polypropylene polymer composites: fabrication and analysis of mechanical and water absorption properties. *Materials Today: Proceedings* 33:5273-5278.
20. Kinloch AJ, Young RJ (1983) Fracture behaviour of polymers. Applied Science Pub. Ltd, Essex, England.
21. Demirer H, Kartal İ, Ünlü K, et al (2018) Investigation of mechanical and thermal properties of waste EPDM and polypropylene mixtures. *Acta Physica Polonica* 134:257-259.

22. Mengual A, Juárez D, Balart R, et al (2017) PE-g-MA, PP-g-MA and SEBS-g-MA compatibilizers used in material blends. *Procedia Manufacturing* 13:321-326.
23. Yu S, Oh KH, Hong SH (2019) Effects of silanization and modification treatments on the stiffness and toughness of BF/SEBS/PA6,6 hybrid composites. *Composites Part B: Engineering* 173:106922.
24. Li H, Xie XM (2017) Morphology development and superior mechanical properties of PP/PA6/SEBS ternary blends compatibilized by using a highly efficient multi-phase compatibilizer. *Polymer* 108:1-10.
25. Hajibabazadeh S, Palahang M, Razavi MK (2019) Effect of morphology development on mechanical properties and fracture behavior of PP/EPDM/SiO₂ blend-nanocomposites. *Polymer Testing* 73:124-134.
26. Inácio LN, Nonato RC, Baltus C (2018) Mechanical and thermal behavior of aged composites of recycled PP/EPDM/talc reinforced with bamboo fiber. *Polymer Testing* 72:357-363.
27. Elshereksi N., Mohamed SH, Arifin A, Ishak ZA (2009) Effect of filler incorporation on the fracture toughness properties of denture base poly(methyl methacrylate), *Journal of Physical Science* 20(2):1-12.
28. Balkan O, Ezdesir A, Demirer H (2010) Microstructural characteristics of glass bead- and wollastonite-filled isotactic-polypropylene composites modified with thermoplastic elastomers. *Polymer Composites* 31:1265-1284.



Cam tozu kullanılarak iyileştirilen zeminin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve maliyetinin araştırılması

Tacettin Geçkil^a, Talha Sarıcı^a ve Bahadır Karabaş^{a,*}

^a*İnönü Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, 44280, Türkiye*

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 3 Temmuz 2024

Düzeltilme 1 Ekim 2024

Kabul 10 Kasım 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Kil

Cam tozu

Zemin ıslahı

Esnek üst yapı

Ulaştırma geotekniği

ÖZET

Bu çalışmada, atık camların geri dönüşümünde elde edilen cam tozu (CT) ile kil bir zemini iyileştirmenin, üzerine tasarlanan esnek üst yapıya etkileri, tabaka ve ilk yapım maliyetleri esas alınarak araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak zemin örneklerinin özelliklerinin belirlenmesine yönelik bazı deneyler yapılmıştır. Daha sonra zemine ağırlıkça %3, %6, %9, %12 CT ilave edilerek hazırlanmış deney numunelerine proktor deneyi uygulanmıştır. Ardından, hazırlanan serbest basınç deneyi örneklerine 28 gün kür süresi sonrası serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri sonucunda, en yüksek dayanım %9 CT içeren karışımlardan elde edilmiştir. Son olarak, katkısız ve %9 CT katkılı numuneler üzerinde 28 gün kürün akabinde yapılan Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) deneyleri neticesinde, CBR değerinin %9 CT eklenmesiyle %142,7 arttığı belirlenmiştir. Elde edilen CBR değerleri esas alınarak, iyileştirilen ve iyileştirme yapılmamış zemin üzerine esnek yol üstü yapısı tasarımı yapılarak üstü yapı tabaka kalınlıkları ve maliyetleri araştırılmıştır. Hesaplamalar incelendiğinde, %9 CT ile yapılan iyileştirmenin, üstü yapı tabaka kalınlıklarını azalttığı ve maliyetlerini %1,3 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir.

Investigation of layer thickness and cost of flexible pavement designed on subgrade improved with glass powder

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 July 2024

Received in revised form 1 Sept 2024

Accepted 10 November 2024

Available online

Keywords:

Clay

Glass powder

Soil stabilization

Flexible pavement

Transportation geotechnics

ABSTRACT

In this study, the effects of improving a clayey soil with glass powder (GP) obtained from recycled waste glass on the flexible pavement designed over it were investigated, focusing on layer thickness and first construction costs. For this purpose, firstly, some tests were conducted to determine the properties of the soil samples. Subsequently, proctor tests were performed on specimens prepared by adding 3%, 6%, 9%, 12% GP by weight to the soil. Then, unconfined compression tests were performed on the prepared samples after a curing period of 28 days. The results of the unconfined compression tests showed that the highest strength was obtained from mixtures containing 9% GP. Lastly, following 28 days of curing, California bearing ratio (CBR) tests were conducted on both untreated and 9% GP treated samples, revealing that the CBR value increased by 142.7% with the addition of 9% GP. Based on the obtained CBR values, flexible pavement designs were made on both improved and unimproved soils, and the layer thicknesses and costs were investigated. The calculations indicated that the improvement with 9% GP reduced the pavement layer thicknesses reduced and the costs by 1.3 %.

I. GİRİŞ

Ulaşım ihtiyacının giderilmesi için belirlenen yol güzergâhları; ekonomik ve teknik analizler neticesinde, güvenlik ve çevresel etkiler göz önüne alınarak en düşük maliyetle en yüksek faydayı elde etmek esasına dayanarak belirlenmektedir. Güzergâhların tetkik edilmesinde önemli kriterlerin başında, tasarlanan karayolu üst

yapılarının ilgili standart ve güvenlik şartlarını sağlayarak, sorunsuz ve kesintisiz bir şekilde ulaşımın sağlaması yer almaktadır. Ancak, bu şartların sağlanmasında karayolunun tasarlandığı arazi koşulları ve zeminin teknik özellikleri büyük önem arz etmektedir. Özellikle tasarımlarda güvenlik ve maliyet kriterlerini zorlayacak hususların başında taşıma gücü düşük zeminler ve bunların ıslahı problemi yer almaktadır. Bu zeminlerin güvenli ve ekonomik olarak projelerde kullanılmasının sağlanmasında katkılı zemin stabilizasyonu önemli bir yer tutmaktadır [1-3]. Bu tarz stabilizasyon uygulamalarında çimento, kireç ve bitüm gibi malzemelerin [4] yanında, alternatif malzemeler kullanılmasına yönelik çalışmalar vasıtasıyla [5-10] tasarımların daha güvenli, ekonomik ve çevreye saygılı bir şekilde tasarlanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Kumar vd. [11] yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve zemin karışımlarının kireç ve polyester fiber malzeme ile stabilizasyonunun zeminin mühendislik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, polyester fiber, kireç ve uçucu külün birlikte kullanımının zemin stabilizasyonu için uygun olduğunu belirlemişlerdir. Ansary vd. [12] tarafından yapılan araştırmada, Bangladeş'in Chittagong sahil bölgesinde bulunan Anwora ve Banshkali bölgelerinden elde edilen iki farklı zemin türüne uçucu kül ile stabilizasyon uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, %12 ile %18 arasında uçucu kül ve %3 kireç ilavesi yapıldığında, hafif trafikli yolların temel ve alt temelleri için gerekli olan dayanım şartlarının karşılandığını belirlemişlerdir. Dompheou ve Eisazadeh [13] yaptıkları çalışmada pirinç kabuğu külü, hindistan cevizi lifi ve kireç ile stabilize edilmiş laterit zeminin dayanım özelliklerini araştırmışlardır. Laterit zemine farklı oranlarda pirinç kabuğu külü, hindistan cevizi lifi ve kireç karıştırılarak numuneler hazırlamışlar, ardından karışımlar üzerinde modifiye proktor testi, serbest basınç testi, likit limit ve plastik limit deneyleri uygulamışlardır. Optimum karışımın %20 pirinç kabuğu külü, %1 hindistan cevizi lifi, %8 kireç oranında olduğunu değerlendirmişlerdir. Çelik vd. [14], yüksek plastisiteli zeminin, çay fabrikası atıklarının piroliziyle elde edilen biyokömürün uçucu kül ile karıştırılmasıyla yapılan stabilizasyon neticesinde serbest basınç dayanımında %51-%163 arasında artış olduğu, en iyi sonuca 14,5 gün kür süresi, %11,5 katkı miktarı ve %23,6 su içeriğindeki karışımlarda görüldüğünü tespit etmişlerdir. Lakkimsetti ve Nayak [15], çalışmalarında yüksek fırın cürufunu killi zemin özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanmışlardır. Farklı oranlarda (%10 ile %45 arasında) yüksek fırın cürufunu kuru ağırlıkla zemine ekleyerek taşıma kapasitesi ve kayma mukavemeti değerlerini belirlemişlerdir. Deney sonuçlarına göre en optimal katkı oranının %10 ve üzerindeki karışımlarda olduğunu ve serbest basınç dayanımının 2.5 katına kadar arttığını belirlemişlerdir. Uysal vd. [16], çalışmalarında uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve cam tozu ile stabilize edilmiş ince taneli zeminin mühendislik özelliklerini belirlemeyi amaçlamışlardır. İnce taneli zemin, kuru ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında katkı malzemeleri kullanılarak stabilize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüksek fırın cürufunun kayma mukavemetini artırmada en etkili katkı olduğu, artan silis dumanı oranı ve yüksek fırın cürufu ile cam tozu karışımının özellikleri iyileştirmede etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Günümüzde birçok alanda kullanılan camın atık hale gelmesi ile cam geri dönüşümünden elde edilen cam tozunun stabilizasyon malzemesi olarak çeşitli zemin tiplerinin iyileştirilmesine yönelik araştırmalarda [17-22] kullanıldığı ve kullanımının uygun görüldüğü belirlenmiştir. Babatunde vd. [17] cam tozunun zeminin mühendislik özelliklerine etkisini değerlendirmek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Ağırlıkça %0, %2, %4, %6 ve %8 gibi farklı yüzdelerde cam tozunu deneylerde kullanılmıştır. Cam tozunun %4 olduğu karışımlarda mukavemet değerinde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, %8 cam tozu ilaveli karışımda plastik limit değerinde düşüş belirlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, cam tozunun zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini tavsiye etmişlerdir. Ogundairo vd. [18], kil bir zemini iyileştirmek maksadıyla polietilen tereftalat ve atık cam tozunun

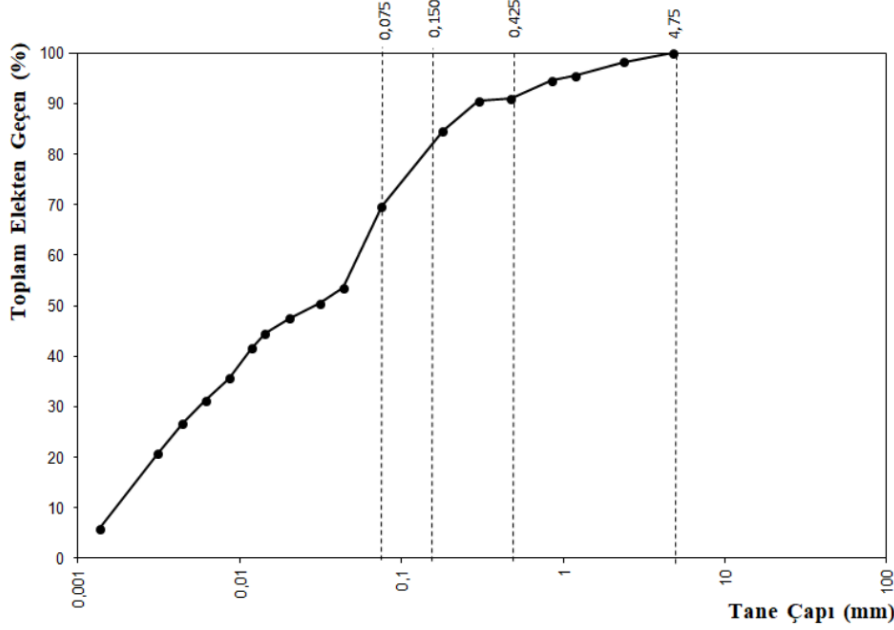
stabilizatör olarak kullanıldığı durumdaki etkinliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneyler neticesinde %5 polietilen tereftalat, %5-20 arasında atık cam tozu ve 2 molar sodyum hidroksit çözeltisi ile aktive edilerek elde edilen karışımlarda serbest basınç dayanımında dikkate değer bir artış olduğunu belirlemişlerdir. Bosco vd. [19], AASHTO zemin sınıfına göre A-6 (5) sınıflandırılan düşük plastisiteli killi zeminin iyileştirilmesine yönelik olarak atık cam tozunun (WGP) kullanımına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Zemine %3, 5, 7 ve 9 WGP ilave edilerek hazırlanan karışımlar neticesinde, WGP eklenmesinin karışımları güçlendirdiği ve hacim değişimine olan duyarlılığını azalttığını tespit etmişlerdir. En yüksek basınç dayanımının, %7 WGP ile elde edildiğini belirlemişlerdir. Perera vd. [20], genişleyen kil zemine farklı yüzdelerde (kil kuru ağırlığının %0, %5, %10, %15 ve %20'si) kırılmış cam eklemişler bir dizi mekanik ve mikro yapısal analizler yürütülmüşlerdir. Yapılan deneyler neticesinde %10-15 oranında kırılmış cam eklenmesinin, mekanik özellikleri (serbest basınç dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı ve esneklik modülü) önemli ölçüde iyileştirdiğini, şişme ve büzülme potansiyellerini azalttığını, ayrıca kilin su tutma özelliklerini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Olufowobi vd. [21] cam tozunun killi zemin üzerindeki stabilize edici etkisini araştırmışlardır. Zemin örneğine ağırlığına göre %1, %2, %5, %10 ve %15 gibi değişen oranlarda cam tozu ve %15 çimento oranında çimento eklenerek deneyler yapmışlardır. AASHTO sınıflandırma sistemi kullanılarak A-6 tespit edilen zemine özgül ağırlık, elek analizi ve atterberg limit testleri yapılmıştır. Daha sonra yapılan neticesinde killi zemin özellikleri açısından en iyi sonuçlar %5 ila %10 arasında cam tozu ilave edilen numunelerde tespit etmişlerdir. Perera vd. [22], düşük plastisiteli kilin kırılmış cam (CG) ile özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Uygulanan malzeme özellikleri, mikro yapısal özellikler ve mekanik mukavemet özelliklerinin belirlenmesine yönelik testler neticesinde CG'nin %15'lik optimum eklenmesi ile düşük plastisiteli kilin özelliklerinin iyileştiğini belirlemişlerdir.

Son yıllarda, literatürde çeşitli katkı maddeleri ile zeminin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmaların oldukça popüler olduğu görülmüştür. Bu araştırma kapsamında yapılan literatür incelemesi neticesinde, çalışmamızın killi bir yol tabanının cam tozu kullanılarak stabilize edilmesinin esnek üst yapı tasarımına etkilerini, tabaka kalınlığı ve ilk yapım maliyeti bakımından inceleyen nadir çalışmalardan biri olacağı değerlendirilmektedir. Bu amaçla öncelikle zeminin özellikleri, elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri ve piknometre gibi deney yöntemleriyle belirlenmiştir. Ardından, zemine ve zeminin ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 oranında cam tozu katılarak stabilize karışımlar hazırlanmıştır. Katkisiz ve katkılı zemin örneklerine standart proktor deneyi, serbest basınç deneyi ve Kaliforniya taşıma gücü oranı deneyleri uygulanmıştır. Son olarak, saf (iyileştirilmemiş) ve optimum katkı oranı kadar cam tozu katılarak iyileştirilmiş kil zemini üzerinde esnek yol üst yapı tasarımı yapılmıştır. Esnek yol üst yapı tasarımı AASHTO'nun 1993 yılında önerdiği yöntemle gerçekleştirilmiş, tasarım tabaka kalınlıkları ve ilk yapım maliyetleri hesaplanmıştır.

II. DENEYSEL METOT

2.1 Malzemeler

Çalışma kapsamında, İnönü Üniversitesi Kampüsünün Güney bölümünden killi zemin örneği temin edilmiştir. Zemin örneğinin özelliklerini belirlemek için elek analizi ile hidrometre deneyi ASTM C136/C136M ve ASTM D422-63'göre yapılmış ve zeminin tane çapı dağılımı tespit edilmiştir. Zeminin tane çapı dağılım grafiği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tane çapı dağılımı eğrisi

Ardından, zemin örneğinin ASTM D4318'e göre kıvam limitleri belirlenmiştir. Özgül ağırlığın tespiti için ASTM D824 standardına göre piknometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, zeminin maksimum kuru yoğunluğu (ρ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) standart proktor deneyi ile ASTM D698 esaslarına uyularak belirlenmiştir. İncelenen zeminin düşük plastisiteli kil (CL) ve AASHTO sınıflandırma yöntemine göre (A-6) zemin sınıfına ait olduğu tespit edilmiştir. Tablo 1'de deneyler ile belirlenen zemin özellikleri sunulmuştur.

Tablo 1. Zemin numunesinin belirlenen özellikleri

Değişken Adı	Simge	Değeri	Birim	Standart
Plastisite İndisi	PI	11,88	%	ASTM D4318
Likit limit	ω_L	30,58	%	ASTM D4318
Plastik limit	ω_p	18,70	%	ASTM D4318
Optimum su içeriği	ω_{opt}	18,10	%	ASTM D698
Maksimum kuru yoğunluk	ρ_{kmax}	1,752	g/cm ³	ASTM D698
Tane yoğunluğu	ρ_s	2,720	g/cm ³	ASTM D824
Efektif Çap	D ₁₀	0,00238	mm	ASTM D2487
%30 Geçen Çap	D ₃₀	0,00584	mm	ASTM D2487
%60 Geçen Çap	D ₆₀	0,05730	mm	ASTM D2487
No:4 Elekten Geçen	-	99,71	%	ASTM D2487
No:200 Elekten Geçen	-	69,63	%	ASTM D2487
Sınıflandırma	-	CL	-	ASTM D2487

Çalışmamızda incelenen CL (A-6) zemini literatürde [3, 23-25] kireç ve çimento ile stabilizasyonu tavsiye edilen zemin sınıfları arasında yer almaktadır. Ayrıca A-6 zeminin AASHTO zemin sınıfına ait sınıflandırma tablosunda, siltli killi zeminler bölümünde A-4, A-5, A-6, A-7 zemin tiplerinin bulunduğu kısımda ortadan

kötüye olarak sınıflandırma bölümünde yer aldığı ve A-6 zemininde içinde bulunduğu “siltli-killi” zeminlerin, taban zeminini olarak yetersiz kalacağına literatürde [26] ifade edildiği görülmektedir. Bu durumda literatürdeki CL (A-6) zeminine ait tavsiyeler dikkate alınarak, geleneksel çimento ve kireç gibi stabilizasyon malzemelerinin yerine cam tozu ile yapılacak stabilizasyonun, esnek üstyapı ilk yapım maliyetinin azaltılabileceği hususunun ispatlanmasına yönelik araştırmamızda, İnönü Üniversitesi Kampüsünün Güney bölümünden alınan killi zeminin kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Cam, yapısını meydana getiren temel hammaddelerinin (SiO_2 , Na_2O , CaO vd.) yüksek sıcaklıkta eritilmesinin ardından ani olarak soğutması neticesinde oluşan bir malzemedir. Cam ani soğutulmuş oksitlerle meydana gelmesinin yanında ana maddesi silisyumdur (SiO_2). Üretim sırasında hızlı soğuma nedeniyle kristal yapı yerine amorf yapısını koruyarak katılaştır. Bu yapı cama mukavemet özelliğini kazandırmaktadır [27]. Günümüzde birçok alanda kullanılan cam, kullanıldıktan sonraki atık hali ile doğada uzun süre yok olmaz, yüzlerce yıl boyunca aynı kalmaktadır. Bu nedenle, cam atıklarının doğru bir şekilde bertaraf edilmesi ve geri dönüştürülmesi, doğal kaynakların korunması için önemlidir. Ayrıca, cam geri dönüşümü, enerji tasarrufu sağlamak ve çevre kirliliğini azaltmaktadır [28]. Çalışmamızda kullanılan cam tozu ise, atık camların cam kumbaraları ve fabrikalardan toplanarak geri dönüşümünden elde edilmiştir. Bu süreç cam atıklarının toplanması, ayrıştırılması ve eleme işlemlerinden sonra öğütülmesi ile tamamlanmaktadır. Çalışma kapsamında, 1-50 mikron aralığında cam tozu kullanılmıştır. Cam tozunun kimyasal özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur. Zemin ve cam tozu numunesinin görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Cam tozunun kimyasal özellikleri

Parametre	Değer
Renk	Beyaz
SiO_2	%73
CaO	%10
Al_2O_3	%1
MgO	%4
Na_2O	%12



Şekil 2. Zemin ve cam tozu numunesinin görüntüsü

2.2. Elek Analizi ve Hidrometre, Standart Proktor, Serbest Basınç ve Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deneyleri

Zemin örneklerinin özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla ASTM C136 / C136M uygun elek analizi ve ASTM D422-63'e göre hidrometre deneyi yapılarak, zemin içindeki tane boyutlarının dağılımı ait tane çapı dağılım eğrisi hazırlanmaktadır. Elek analizi ve hidrometre deneyi uygulamasında, yaklaşık 200-500 g zemin numunesi etüvde 105 °C'de 24 saat tutularak kurutulur. Ardından elekler ve tava tartılır. En büyük elek açıklığı olan elek en üstte olmak üzere elekler sıralanır. En üst eleğe hazırlanan zemin numunesi konularak cihaz çalıştırılır, 15 dk sarma işlemi tamamlandıktan sonra, elekler üstünde ve tavada kalan numune miktarları tartılır ve elekten geçen numune miktarı yüzde olarak hesaplanır, toplam geçen yüzde (%) numune miktarı ve tane çapının bulunduğu tane çapı dağılım eğrisi çizilir. Elek analizinin tamamlanmasından sonra No:200 (0,075 mm) elekten geçen malzeme miktarının %10'dan fazla olduğu durum için ASTM D422-63'e göre, 0,075 mm elek altında kalan malzemenin tane boyutunun belirlenmesi maksadıyla hidrometre deneyi yapılır. Söz konusu deney Stokes Yasasına dayanır. Bu analizde zemin daneleri özel solüsyonlu (sodyum metafosfatlı) cam çöktürme silindirinin içerisinde kendi ağırlığı ve yerçekimi etkisi ile çökerken hidrometre adı verilen cam alet ile tane çökme mesafesi ve zemin-su yoğunluğu ölçülmekte, ölçümler 10, 15, 30, 60, 120, 240, 1440 dakikada sıcaklıkta dikkate alınarak yapılmaktadır. Yapılan ölçüm hesaplamalar ile tane çapı ve yüzdesi hesaplanmaktadır [29].

Standart proktor deneyi, su ile mekanik gereçler kullanılmasıyla havanın zemin ve su karışımından atılmasına dayanır. Söz konusu deney ASTM D698 standardına uygun olarak gerçekleştirilir. Zemin numunesinin ρ_{kmax} ve ω_{opt} belirlenmesi maksadıyla yapılır. Deneye ait kalıp boyutları yaklaşık olarak 105 mm çapında 115,5 mm yüksekliğindedir. Deneyde 105 °C'de 24 saat kurutulmuş örnek kullanılmalıdır. İstenen su oranlarıyla yoğrulan örnekler kalıba yerleştirilir. 2,5 kg ağırlığındaki tokmak ile vurularak (25 defa) sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilir. Serilme süreci 3 aşamada yapılır, son katmandan sonra üstü düzeltilir ve ağırlığı belirlenir. Bu süreç, değişik oranlarda su içeriklerinde 5 kez tekrarlanır ve her birinde su içeriği ile kuru yoğunluğu hesaplanır. Belirlenen veriler doğrultusunda doygunluk eğrisi oluşturulur ve ρ_{kmax} ile ω_{opt} belirlenir [29]. Şekil 3'te standart proktor deneyi aşamaları görülmektedir.



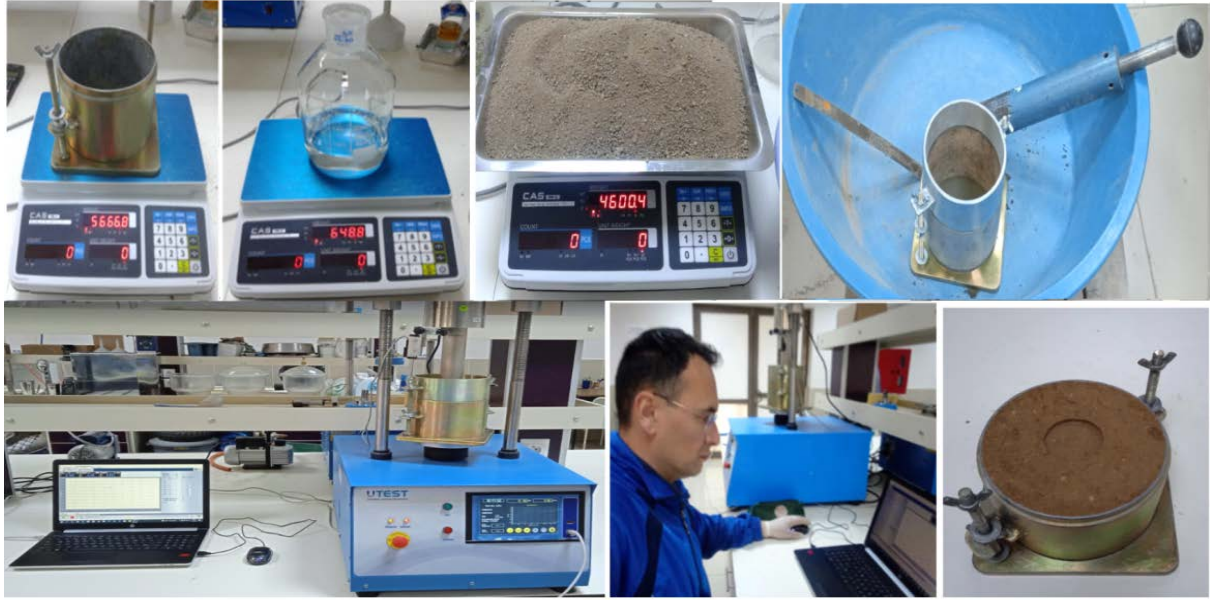
Şekil 3. Standart proktor deneyi aşamaları

Serbest basınç deneyi, ASTM D2166 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere belirli kür sürelerinin ardından dayanımlarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilir. Uygulama sırasında, zemin numunesi etüvde 24 saat boyunca 105 °C'de kurutulur. Kullanılacak kalıbın boyutları (çap 38 mm ve boy 76 mm) deney başlamadan önce ölçülerek kontrol edilir. Önceden hesaplanan miktarlarda su ilave edilerek hazırlanan örnekler, kalıba 4 aşamada serilir. Her tabakadan sonra tokmakla 10 defa vurularak sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra numune kalıptan çıkarılır. Belirlenen kür süresince oda sıcaklığında bekletilir ve beklenen kür süresi sonrası örnekler cihaza yerleştirilir. Birim boy kısalması %0,5 ve %2 arasında (dakikada) olmalıdır. Deney süresi 10 dakikayı geçmemelidir. Deney sonrasında şekil değişimleri ve deformasyonlar gözlemlenerek numunelerin dayanım değerleri belirlenir [30]. Bu çalışmada, serbest basınç deneyi, zemin ve karışım numunelerine ASTM D2166 standardına uygun olarak, 28 günlük kür süresinin ardından gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te serbest basınç deneyi seti ve oluşan deformasyon gösterilmektedir.



Şekil 4. Serbest basınç deneyi seti ve deney sonucu oluşan deformasyon

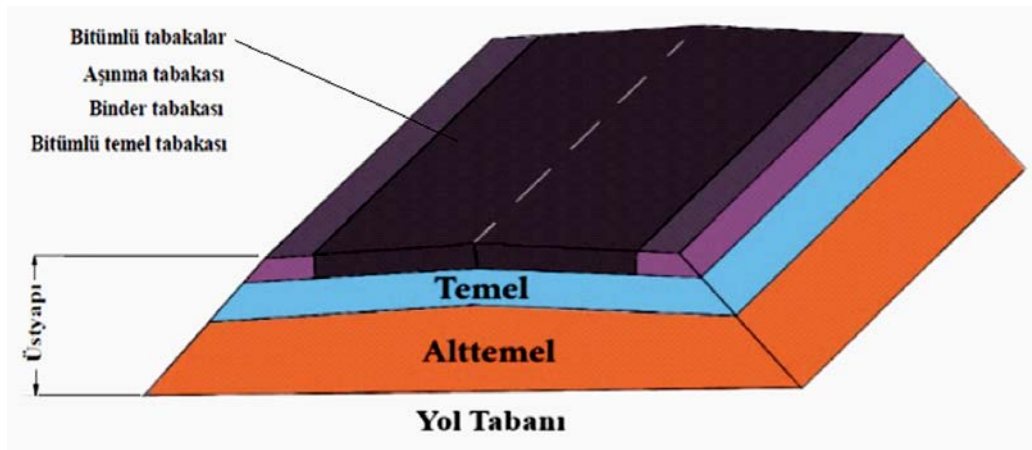
Kaliforniya taşıma gücü oranı deneyi, önceden tespit edilen ρ_{kmax} ile ω_{opt} verilerine göre hazırlanan numunelere, belirlenen kür süresinin ardından, 1,27 mm/dk hızla yaklaşık 1935 mm² alanlı pistonun zemine itilmesi ile taşıma kapasitesinin belirlenmesine dayanır. ASTM D1883-13'e göre gerçekleştirilir. CBR değeri, zeminin belirli penetrasyon (2,5 mm ile 5 mm) değerlerinde tatbik edilen yükün kırma taş örneğine, aynı miktarda batması için tatbik edilen yüke orantılanmasıyla hesaplanır. Deneyin uygulanmasında, kullanılacak kalıbın boyutları ölçülür ve kaydedilir. Ardından, zemin örneği 24 saat 105 °C'de bırakılır. ρ_{kmax} ile ω_{opt} değerinde numune hazırlanır. Karışım CBR kalıbına (Çap 152 mm, h=127 mm) 3 aşamada ve her tabakada tokmakla 56 defa vurularak sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi tamamlanınca numune bulunan kalıp tartılır. Numuneler belirlenen kür süresinde (28 gün) oda sıcaklığında ve dış ortamdan etkilenmeyecek muhafazalı ortamda tutulmuştur. Tamamlanan kür süresinin ardından kuru CBR deneyi uygulanmıştır. Deney neticesinde CBR değerleri penetrasyonun 2,5 ile 5 mm değerleri için belirlenir [29]. Şekil 5'te CBR deney aşamaları görülmektedir.



Şekil 5. Kaliforniya taşıma gücü oranı deneyi uygulama aşamaları

2.3 Esnek Üst Yapı Tasarımı

Esnek üst yapı tasarımı, asfalt çimentosunun bağlayıcı olarak kullanılma esasına göre yapılmaktadır. Asfalt betonu kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşan bir yapıya sahiptir. Tasarım aşamasında, tasarım ömrü, tabaka kalınlıkları, trafik yoğunluğu, yöresel faktörler, ekonomik ve zemin koşulları gibi çeşitli unsurlar dikkate alınır [31]. Şekil 6'da esnek üstyapıdaki tabakaları göstermektedir.



Şekil 6. Esnek üstyapı kesit görünümü [1]

Tabaka kalınlıkları hesabı Denklem (1) kullanılarak AASHTO 1993 esaslarına göre yapılmaktadır [31].

$$\log(T_{8.2}) = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log(SN+1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log M_R - 8.07 \quad (1)$$

Burada;

$T_{8,2}$: Proje trafiğinin eşdeğer standart tek dingil yükü tekerrür sayısı (8,2ton),

SN: Üstyapı sayısı (üstyapı kalınlığını için),

Z_R : Standart sapma,

M_R : Taban zemini için etkili elastisite modülü (psi),

P_0 : Başlangıç hizmet kabiliyeti indeksi,

S_0 : Performans ve trafik tahmininin bileşik standart hatası,

Δ PSI: Toplam hizmet kabiliyeti kaybı

P_t : Nihai hizmet yeteneği indeksini gösterir.

Denklem 1 kullanılarak SN değeri belirlendikten sonra, tabaka katsayıları Tablo 3'ten alınarak tabaka kalınlıkları Denklem 2 ile hesaplanır [31].

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times M_2 + a_3 \times D_3 \times M_3 \dots \dots \dots a_i \times D_i \quad (2)$$

Burada, a_1 , a_2 , a_3 ise kaplama, temel ile alttemel tabakaları izafi mukavemet katsayılarını; D_1 , D_2 , D_3 kaplama, temel ile alttemel tabaka kalınlıklarını ifade eder. M_2 ve M_3 ise temel ve alttemel tabakalarının drenaj katsayılarını belirtir. Tablo 3'te tabaka katsayıları sunulmuştur.

Tabaka kalınlıklarının hesaplanmasının ardından, temel üzerine ihtiyaç duyulan üstyapı kalınlığı (SN_1), alttemel üzerine ihtiyaç duyulan (SN_2), taban üzerine ihtiyaç duyulan (SN_3) tabaka kalınlıkları kontrolü yapılır [31].

Tablo 3. Tasarım katsayıları [32]

Tabaka Adı	CBR (%)	İzafi Mukavemet Katsayısı (a)	
Kaplama Tabakası	Aşınma	-	0,42
	Binder	-	0,40
Temel Tabakası	Bitümlü Temel	-	0,36
	Plentmiks Temel	≥ 120	0,15
	Granüler Temel	≥ 100	0,14
Alttemel Tabakası	Kırmataş Alttemel	≥ 50	0,13
	Kum-Çakıl Alttemel	≥ 30	0,11

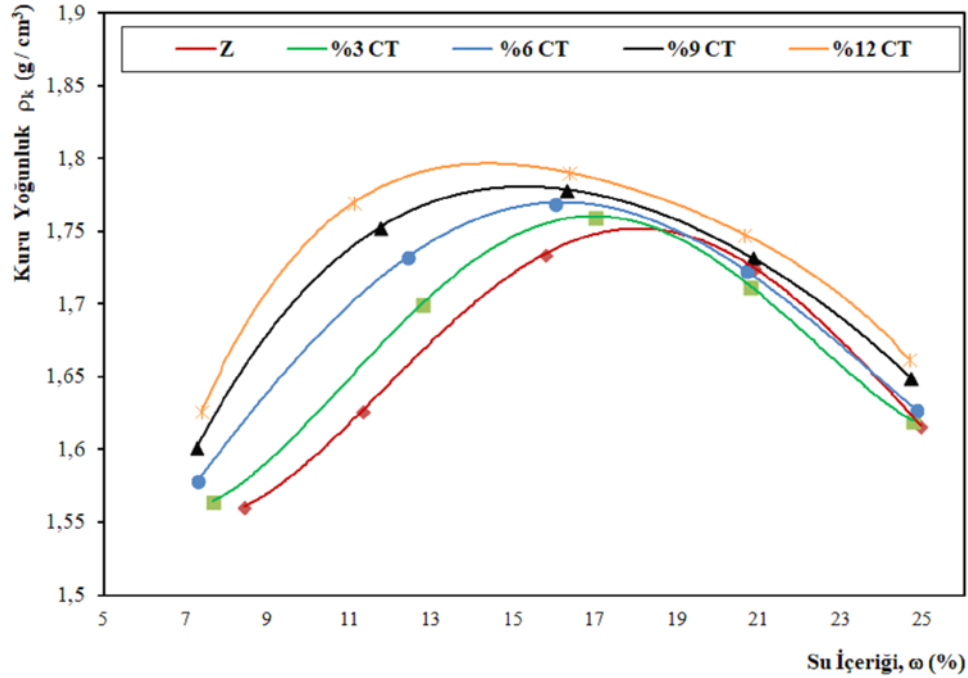
III. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

Cam tozu kullanılarak iyileştirilen zemininin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve ilk yapım maliyetinin araştırıldığı bu çalışmada, uygulanan deneylerin ve tasarımların sonuçları bölümler halinde sunulmuştur.

3.1 Standart Proktor Deneyi Bulguları

Katkısız zemin (Z) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 cam tozu (CT) katkılı örneklere standart proktor deneyi

uygulanmıştır. Deney neticesinde belirlenen ω (su içeriği, %) ve ρ_k (kuru yoğunluk) sonuçlarına göre Şekil 7'de çizilen kompaksiyon eğrileri verilmiştir. Belirlenen ω_{opt} ile ρ_{kmax} sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 7. Standart proktor deneyine ait kompaksiyon eğrileri

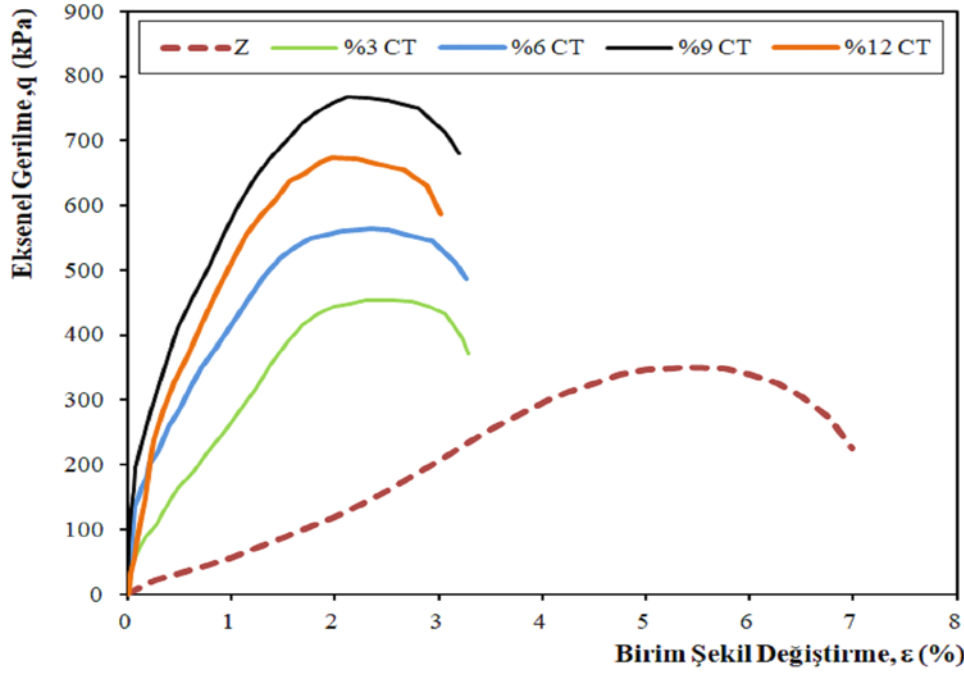
Tablo 4. Katkısız zemin ve cam tozu katkılı zeminin standart proktor deneyi sonuçları

Test Numunesi	ρ_{kmax} (g/cm ³)	ω_{opt} (%)
Z	1,752	18,10
%3 CT	1,762	16,85
%6 CT	1,770	16,09
%9 CT	1,781	15,20
%12 CT	1,797	14,38

Proktor deneyi sonuçlarında hazırlanan karışımlarda CT oranının artmasıyla ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulguların, literatürde [33-35] belirtilen çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durumun CT'nin zemin numunesinden daha az su emme kapasitesine sahip olması nedeniyle meydana geldiği bu sebeple ω_{opt} değerlerinin azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca, ρ_{kmax} değerinin artışında cam tozunun ince tane yapısı sayesinde karışımın boşluklarını doldurmasının etkili olduğu değerlendirilmektedir.

3.2 Serbest Basınç Deney Bulguları

Katkısız zemin (Z) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 CT katkılı numuneler, tespit edilen ω_{opt} ile ρ_{kmax} değerleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Numuneler, oda sıcaklığındaki 28 günlük kür süresi sonrası serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Deneylerin 10 dakikayı aşmadığı gözlemlenmiştir. Katkısız zemin ve MK katkılı numunelerin; eksenel gerilme (q) ile birim şekil değiştirme (ϵ) sonuçları Şekil 8'de, serbest basınç mukavemeti (q_u) ve serbest basınç mukavemeti (ϵ_u) değerleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 8. 28 günlük kür sonrası katkısız ve cam tozu katkılı numunelerin q-ε grafiği

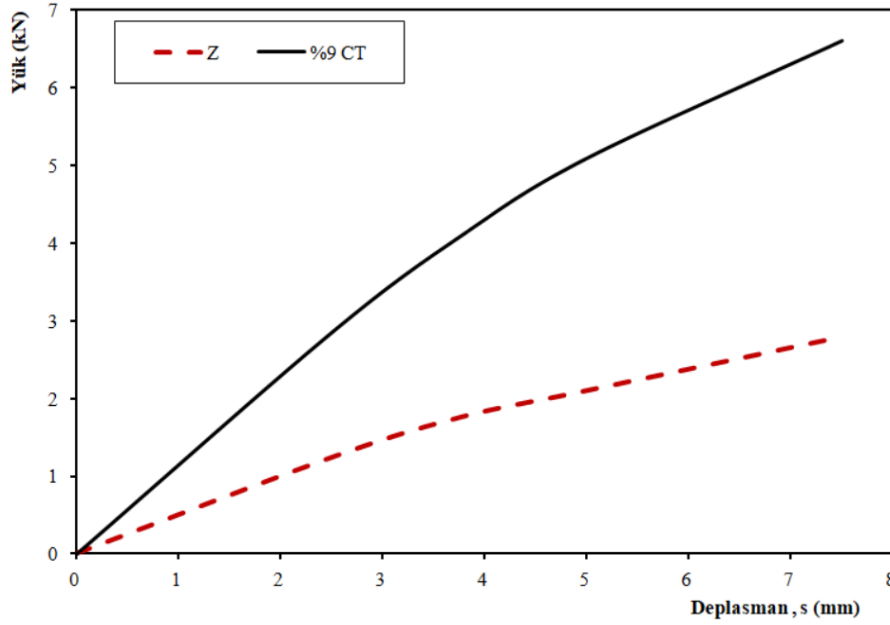
Tablo 5. 28 günlük kür sonrası katkısız ve cam tozu katkılı numunelerin q_u - ϵ_u verileri

Test Numunesi	q_u (kPa)	ϵ_u (%)
Z	350,63	5,37
%3 CT	455,27	2,58
%6 CT	564,67	2,35
%9 CT	767,43	2,11
%12 CT	674,07	1,97

Serbest basınç deneyi sonuçlarında, katkısız zeminin serbest basınç dayanımının CT'lı numunelerden daha az olduğu belirlenmiştir. CT katkısının zeminin dayanımını artırdığı ve bu sonuçların literatürle [33-35] uyumlu olduğu tespit edilmiştir. CT ilavesi yapılan tüm numunelerin serbest basınç dayanımlarının katkısız zemine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. %3, %6, %9 ve %12 oranlarında cam tozu ilavesiyle hazırlanan karışımlarda, mukavemet değerinde en iyi artış %9 CT oranında görülmüş ve bu artışın 2,19 kat olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, birim şekil değiştirmenin CT miktarının artmasıyla azaldığı ve bu durumun CT'nin numunelerin sertliğini artırması nedeniyle olduğu, elde edilen sonuçların literatürde [36] belirtilen sert zeminlerin birim şekil değiştirmesinin yumuşak zeminlerden daha az olması görüşüyle örtüştüğü belirlenmiştir.

3.3 Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deney Bulguları

CBR deneyi kapsamında, katkısız zemin (Z) ve serbest basınç deneyleri neticesinde elde edilen optimum %9 CT oranı esas alınarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken ω_{opt} ve ρ_{kmax} değerleri kullanılmıştır. Numuneler belirlenen 28 günlük kür süresi boyunca oda sıcaklığında ve dış ortamdan etkilenmeyecek muhafazalı ortamda tutulmuştur. Tamamlanan kür süresinin ardından kuru CBR deneyi uygulanmıştır. Tespit edilen yük-deplasman grafiği Şekil 9'da ve CBR değerleri ise Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 9. 28 günlük kür ardından katkısız ve cam tozu katkılı numunelerin yük-deplasman ilişkisi

Tablo 6. 28 günlük kür ardından katkısız ve cam tozu katkılı numunelerinin test sonuçları

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Z	9,34	10,52
%9 CT	21,54	25,53

CBR deneyi uygulanan numunelerde 28 günlük kür süresinin ardından, 2,5 ile 5 mm deplasman için elde edilen CBR değerleri katkısız zemin için sırasıyla %9,34 ve %10,52; %9 CT ilaveli zemin için ise sırasıyla %21,54 ve %25,53 olarak tespit edilmiştir. CBR değerinin, CT katkılı örneklerde 2,5 ile 5 mm penetrasyon için katkısız zemin numunelerine göre sırasıyla %130,6 ve %142,7 oranında arttığı belirlenmiştir. CT'li karışımların CBR değerinin katkısız numuneden daha yüksek olduğu bu durumun literatürde [17, 33, 35, 37] CT katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiği görüşü ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneyler neticesinde yüksek olan CBR değerleri esas alınarak katkısız zemin için %10,52 ve %9 CT ilaveli karışım için %25,53 değerleri hesaplamalarda kullanılmıştır.

Literatürde [38-40], geri dönüşümden elde edilen CT'nin ana maddesi camın üretimi sırasında hızlı soğuması nedeniyle yapısının kristal yerine amorf olarak meydana geldiği ve bu yapının yüksek oranda silisyum ($\text{SiO}_2 > \%70$) içeriğine sahip olması nedeniyle puzolanik özellik gösterdiği belirtilmiştir. Özellikle tanecik boyutunun 0,075 mm'den daha az olduğu durumda bu yapının puzolanik özelliğinin arttığı bilgisi de yer almaktadır. Ayrıca, cam tane çaplarının azalması, daha büyük temas yüzeyleri meydana getirerek, cam tanelerinin daha fazla reaksiyona girmesini sağladığı ve ilaveten ince cam tozu tanelerinin zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurarak taşıma gücünü artırdığı bilgisine de yer verilmiştir. Çalışmamızda hazırlanan karışımlarda kullanılan CT'nin yapısı ve tane çapı da göz önüne alınarak puzolanik özellik gösterdiği, ilaveten CT'nin zemin boşluklarını doldurduğu bu durumun ρ_{kmax} değerlerinin artışının görülmesi ile desteklendiği, bu sayede karışımların mekanik özelliklerinin iyileştiği değerlendirilmiştir. Ancak, karışımlar ile yapılan deneyler neticesinde elde edilen optimum katkı oranının, karışımların dayanımlarına belirli bir oranın üzerinde CT katılmasının fayda sağlamayacağına işaret ettiği değerlendirilmektedir.

3.4 Esnek Üst Yapısı Tasarımı Yapılması

Üstyapı tasarımı için AASHTO 1993'te belirtilen şartlara uygun olarak, 28 günlük kür ardından belirlenen en yüksek CBR değerleri kullanılmıştır. Hesaplamalarda, CBR değerleri esas alınarak katkısız zemin için %10,52 ve %9 CT ilaveli karışım için %25,53 değerleri kullanılmıştır. Hesaplamalarda ilk adım olarak, yol taban zemininin esneklik modülü (M_R) belirlenmiştir. M_R hesaplanmasında, 2024 yılı ocak ayında AASHTO tarafından yayımlanan mekanik-ampirik teknik revizyonları içeren kaplama tasarım kılavuzu 3. baskısında (MEPDG-3) yer alan, zemine ait M_R (psi) = 2555 (CBR)^{0,64} korelasyonu [41] kullanılmıştır. Katkısız zemin için M_R değeri 11.521 psi (79453490 Pa) ve %9 CT'lı karışım için M_R değeri 20.319 psi (140131388 Pa) hesaplanmıştır. Tablo 7'deki veriler kullanılarak Bağıntı 1 ile taban üzerine gereken SN_3 katkısız zemin için 6,92 inç (17,58 cm) ve %9 CT ilaveli zeminler için 5,83 inç (14,81 cm) hesaplanmıştır. Esnek kaplama hesabında kullanılan parametreler Tablo 7'de sunulmuştur. Burada model alınan otoyol 4 (2 x 2) şeritli, 30 yıl proje analiz süresinin olduğu, günlük trafiğin ilk yıl için kamyon 495 adet, treyler 247 adet, minibüs 352 adet, otobüs 464 adet, otomobil 5400 adet olduğu, 50.000.000 olarak eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı belirlenmiştir

Tablo 7. Tasarım parametreleri

Parametre	Tasarım Verileri
$T_{8,2}$, Eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı	50.000.000
P_0 , Yolun ilk servis yeteneği	4,2
S_0 , Toplam standart sapma	0,45
P_t , Yolun son servis yeteneği,	2,5
ΔPSI , Servis yeteneği indeksi,	1,7
Z_R , Güvenilirliğin standart normal sapması	-3,090

3.4.1 Tabaka kalınlıklarının hesaplanması

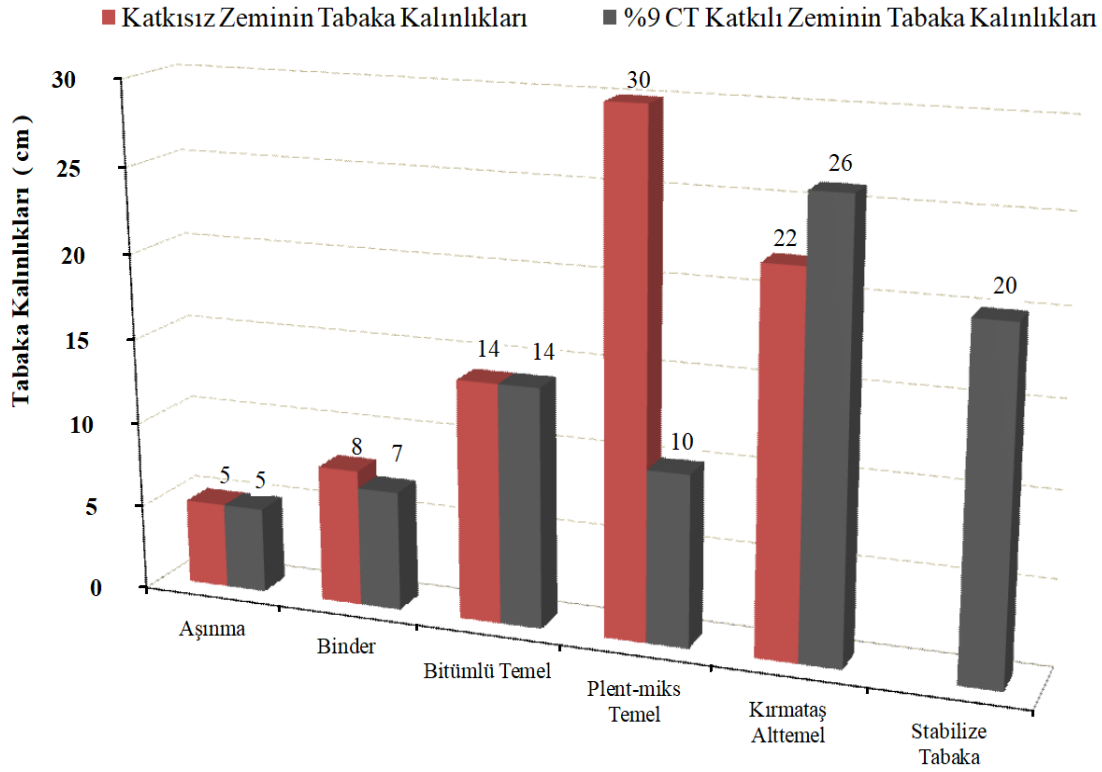
Bağıntı 1 kullanılarak SN_3 değerleri 28 günlük kür uygulanan katkısız zemin ve %9 CT katkılı zeminler için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Tablo 8 ve 9'da seçilen tabaka kalınlıkları sırasıyla sunulmuştur. Tablolarda SN bağıntı (1) ile hesaplanan, SN^* kullanılan gerçek değerler ile bulunan değerdir. Ayrıca Şekil 10'da tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 8. Katkısız zemin için belirlenen tabaka kalınlık detayları

Tabaka İsmi	D_i (cm)	a_i	$SN^* = a_i \times D_i$	Açıklama
Aşınma	5	0,42	2,10	
Binder	8	0,40	3,20	$SN^* > SN$ (17,70 > 17,58)
Bitümlü Temel	14	0,36	5,04	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-miks Temel	30	0,15	4,50	
Kırmataş Alttemel	22	0,13	2,86	

Tablo 9. %9 CT katkılı zemin için belirlenen tabaka kalınlık detayları

Tabaka İsmi	Di (cm)	ai	SN*= ai x Di	Açıklama
Aşınma	5	0,42	2,10	
Binder	7	0,40	2,80	SN* > SN (14,82>14,81)
Bitümlü Temel	14	0,36	5,04	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-miks Temel	10	0,15	1,5	
Kırmataş Alttemel	26	0,13	3,38	

**Şekil 10.** Katkısız Zemin ve %9 CT Katkılı Zemin için Seçilen Tabaka Kalınlıkları

Tabaka kalınlıklarının kontrolü amacıyla Tablo 3'ten plentmix kırmataş temeli için CBR=120 için ve kırmataş alt temeli için CBR=50 için esas alınmıştır. SN değerleri Bağıntı 1 kullanılarak plentmix kırmataş temeli $SN_1 = 3,62$ inç (9,19 cm), kırmataş alt temeli ise $SN_2 = 4,50$ inç (11,43 cm) olarak hesaplanmıştır. Bağıntı 2'de, kullanılarak yapılan kontrolde, katkısız zeminlerde, kırmataş temeli için $10,34 > 9,19$ ve kırmataş alt temeli için $14,84 > 11,43$ olduğu, %9 CT içeren zeminlerde kırmataş temeli için $9,94 > 9,19$ ve kırmataş alt temeli için $11,44 > 11,43$ olduğu belirlenmiştir, bu da esnek tabaka kalınlıklarının yeterli olduğunu göstermektedir.

Bağıntı 2'de, kullanılarak katkısız zemin için aşınma, binder ve bitümlü temel kalınlığının toplam 27 cm, plentmix kırmataş temel ve kırmataş alt temelin toplam 52 cm olduğu hesaplanmıştır. Aynı şekilde %9 CT katkılı zemin için aşınma, binder ve bitümlü temel kalınlığının toplam 26 cm, plentmix kırmataş temel ve kırmataş alt temelin toplam 36 cm olduğu hesaplanmıştır. %9 CT'li zeminler için üstyapı kalınlığında katkısız zemine kıyasla aşınma, binder ve bitümlü temel kalınlığının 27 cm'den 26 cm'ye azaldığı, plentmix kırmataş temel ve kırmataş alt temelin toplamda 52 cm'den 36 cm'ye azaldığı görülmektedir.

3.5 Esnek Üstyapı Tasarımının Ekonomik Analizi

Cam tozu kullanılarak iyileştirilen karayolu zemininin üzerine tasarlanan esnek üst yapının ilk yapım maliyetinin, ekonomik analizi Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) poz no'ları [42] kullanılarak yapılmıştır. Katkısız zemin ve %9 CT katkılı zeminlerin esnek yol üstyapı kalınlıklarının m² cinsinden birim maliyetleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 10 ve Tablo 11'de sunulmuştur. Ayrıca, %9 CT ile yol tabanının 20 cm kalınlığında stabilize edilmesindeki analizde; malzemenin taşınması, traktör riperi ile zeminin kabartılması, traktör buldozeri ile stabilizatör malzeme dağıtılması, greyder ile serme ve karıştırma, arazöz ile sulama, titreşimli silindirle ve lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması esas alınmıştır. CT'nin ton bazında şantiye mahalline teslim fiyatı göz önüne alınmıştır. Tablo 12'de stabilizasyonun m² birim maliyetleri verilmiştir. Ayrıca, katkısız zemin ile %9 CT katılarak iyileştirilen zeminler göz önüne alınarak Şekil 11'de tabaka maliyetleri karşılaştırma grafiği sunulmuştur.

Tablo 10. Katkısız zemin için tabaka kalınlıkların birim maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ² /cm	Maliyet (TL) m ²
KGM/6405/S-M	5 cm aşınma tabakası yapımı	m ²	113,19	22,64	113,19
KGM/6308	8 cm binder tabakası yapımı	m ²	139,02	17,38	139,02
KGM/6214	14 cm bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	229,35	16,38	229,35
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması	ton	416,13	9,99	299,61
KGM/6000	Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	378,99	3,79	83,38
Toplam Maliyet				864,55	

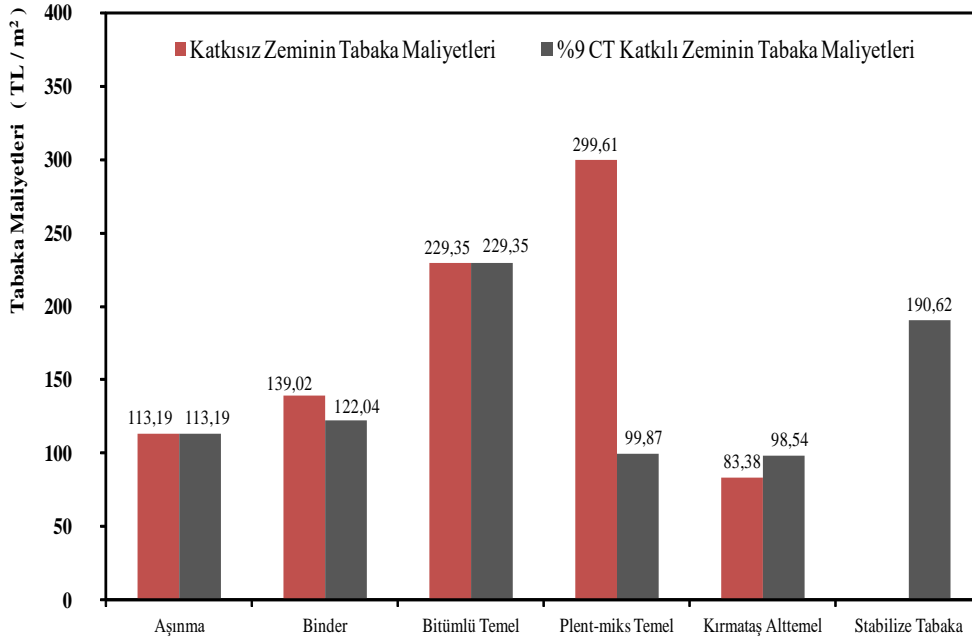
Tablo 11. %9 CT Katkılı zemin için tabaka kalınlıkların birim maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ² /cm	Maliyet (TL) m ²
KGM/6405/S-M	5 cm aşınma tabakası yapımı	m ²	113,19	22,64	113,19
KGM/6307	7 cm binder tabakası yapımı	m ²	122,04	17,43	122,04
KGM/6214	14 cm bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	229,35	16,38	229,35
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması	ton	416,13	9,99	99,87
KGM/6000	Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	378,99	3,79	98,54
Toplam Maliyet				662,99	

Tablo 12. %9 CT katkılı zemin için stabilizasyon birim maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ² /cm	Maliyet (TL) m ²
KGM 03.507	Traktör riperin bir saatlik ücreti	saat	2083,73	0,0208	0,42
KGM 03.511	Traktör Buldozerin 1 saatlik ücreti	saat	1946,93	0,0876	1,75
KGM/15.140	Makina ile serme ve karıştırma (Greyder kullanılarak)	m ³	13,95	0,1395	2,79
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	ton	104,79	0,1048	2,10
KGM/15.052/3	Titreşimli silindirle sıkıştırma yapılması	saat	1221,53	0,1222	2,44
KGM/15.058/1	Lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması	saat	891,94	0,0892	1,78
Piyasa	%9 CT Temini Nakliye Dahil	kg	6,10	8,9670	179,34
Toplam Maliyet				190,62	

Katkısız zemin ve %9 CT ilaveli zemin için yol üstyapılarının maliyetleri sırasıyla 864,55 TL/m² ve 662,19 TL/m² olarak belirlenmiştir. Ayrıca, CT ilaveli stabilize zeminin maliyeti 190,62 TL/m² olarak hesaplanmıştır. Tabaka kalınlıklarının maliyetleri göz önüne alındığında, yapım maliyetinde %1,3 oranında bir azalma görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bir yolda, %9 CT ile iyileştirilmiş bir yol tabanı ile 218.856,00 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanacaktır.



Şekil 11. Katkısız zemin ve %9 CT ilaveli zemin için tabaka maliyetleri

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Cam tozu kullanılarak iyileştirilen karayolu zemininin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve ilk yapım maliyetinin araştırıldığı bu çalışmanın sonuçları aşağıda sunulmuştur.

1. Standart proktor deneyi sonuçlarında hazırlanan karışımlarda CT oranının artmasıyla ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin arttığı, bu durumun CT'nin zemin numunesinden daha az su emme kapasitesine sahip olması ve zeminden daha küçük tanelere sahip cam tozunun zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurması nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir.
2. Serbest basınç deneyi %3, %6, %9 ve %12 oranlarında cam tozu ilavesiyle hazırlanan karışımlarda, mukavemet değerinde en iyi artış %9 CT oranında görülmüş ve bu artışın 2,19 kat olduğu hesaplanmıştır. Bu artışın, CT'nin karışımların kayma direnci ve kohezyon kuvveti üzerindeki olumlu etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
3. Serbest basınç deneyi numunelerindeki kırılma anındaki birim şekil değiştirmelerin CT miktarının artmasıyla azaldığı ve bu durumun CT'nin numunelerin sertliğini artırması nedeniyle meydana geldiği düşünülmüştür.
4. CBR deneyi uygulanan numunelerde 28 günlük kür süresinin ardından, %9 CT katkılı örneklerde 2,5 ile 5 mm penetrasyon için CBR değerinin %130,6 ve %142,7 oranında arttığı belirlenmiştir. CT katkısının zeminin taşıma gücünü iyileştirdiği belirlenmiştir.
5. CBR ve serbest basınç deney sonuçlarından, cam tozunun yapısı ve tane çapı sayesinde puzolanik özellik gösterdiği ve hazırlanan karışımların boşluklarını doldurarak, karışımların dayanım özellikleri geliştirdiği görülmektedir.
6. Esnek üstyapı tasarım sonuçlarında ise, %9 CT içeren stabilize zeminler için tasarlanan üstyapı kalınlığında azalma olduğu, bu durumun CT'nin karışım dayanımlarına etkisinden kaynaklandığı

değerlendirilmektedir.

7. Maliyet analizi sonuçlarında ise, %9 CT katkılı stabilize zeminlerin üstyapı maliyetlerinin, katkısız zemine kıyasla %1,3 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar ışığında, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bölünmüş bir yolda, %9 CT ile yol taban zemininin iyileştirilmesi durumunda üstyapı maliyetinde 218.856,00 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanacaktır.
8. Bu çalışmada, cam tozunun stabilizasyon maksadıyla kullanılmasının serbest basınç mukavemetini ve CBR değerini arttırmasından ötürü, zeminin oturma potansiyelini, şişme ve büzülme davranışını, drenaj kapasitesini vb. azaltabileceği, kayma mukavemeti parametrelerini ise arttırabileceği öngörülmüştür. Bu ön görüşümüzün dayanağı olarak, güçlendirme etkisinin zemin boşluklarının cam tozu tarafından doldurulması ve bir miktar bağlayıcı reaksiyonu ile meydana gelmesinin olabileceği düşünülmüştür. Ancak bu durumu daha iyi yorumlayabilmek için deneysel yöntemler kullanılarak bu konuların araştırılmasının ve yol üstyapılarına etkilerinin açığa çıkarılmasının literatüre katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

Sonuç olarak, günümüz Dünyasının önemli çevresel problemleri arasında yer alan atık bertarafının önemli bir parçası olan geri dönüşüm sistemi sayesinde, cam atıklardan elde edilen cam tozu kullanılarak iyileştirilen karayolu zemininin, taşıma kapasitesinin arttığı, esnek üst yapı tabaka kalınlığı ve ilk yapım maliyetinin azaldığı belirlenmiştir. Bu sayede doğada uzun süre yok olmayan cam atıklarının geri dönüştürülmesi ile doğal kaynakların korunmasının sağlanacağı, ayrıca esnek üst yapı yapımında kullanılan malzeme miktarının da azaltılması ile, bu malzemelerin üretimi, taşınması ve uygulanmasında meydana gelen CO₂ salımı başta olmak üzere çevreye verilen zararın azaltılacağı ve çevrenin korunmasına katkı sağlanacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, cam tozunun atık malzemeden elde edildiği düşünülerek CT temininin süreklilik arz ettiği ve karayolu projelerindeki tonajlı alımlar sayesinde proje maliyetlerinin daha da azaltılabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'nün İÜ-BAP FDK-2023-3325 numaralı projesi tarafından desteklenmiştir. BAP Koordinasyon Birimi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Kök BV (2019) Karayolu Mühendisliği ve Tasarımı, Nobel Akademik Yayıncılık Ankara.
2. Uzuner BA (2016) Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi Trabzon
3. Tunç A (2002) Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Nobel Yayınevi, Ankara,
4. Tunç A (2007) Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayınevi, Ankara.
5. Demir A, Sarıcı T (2017) Bearing capacity of footing supported by geogrid encased stone columns on soft soil. *Geomechanics and Engineering* 12(3):417-439. <https://doi.org/10.12989/GAE.2017.12.3.417>
6. Sarıcı T, Ok B, Mert A, Çömez Ş (2023) The resilient modulus of hybrid construction and demolition wastes reinforced by a geogrid. *Acta Geotechnica Slovenica* 19(2022/2).
7. Ok B, Demir A, Sarıcı T, Ovalı M (2021) Geosentetiklerle güçlendirilmiş karayolu temellerinin plaka yükleme deneyleri ile değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 27(6):718-728.

8. Sarıcı T (2014) Geosentetik ile güçlendirilmiş taş kolonların taşıma kapasitesinin analizi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
9. Geçkil T, Sarıcı T, Karabaş B (2021) Siyah karbon ile stabilize edilen taban zeminin yol esnek üst yapı maliyetine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (23):222-235.
10. Geçkil T, Sarıcı T, Karabaş B (2021) Siyah karbon stabilizasyonlu zeminin rijit kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri, *ECJSE* 8(3):1372-1384.
11. Kumar A, Walia BS, Bajaj A (2007) Influence of fly ash, lime and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soils. *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(3):242-248.
12. Ansary MA, Noor MA, Islam M (2006) Effect of fly ash stabilization on geotechnical properties of chittagong coastal soil. *Geotechnical Symposium, March, Roma*, pp. 443-454.
13. Domphoeun R, Eisazadeh A (2024) Flexural and shear strength properties of laterite soil stabilized with rice husk ash, coir fiber, and lime. *Transp Infrastruct Geotech.* <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00364-5>
14. Çelik M, Kuvat A, Abut Y, Ceyhan Erdoğan M, Yalçın BS (2024) Biyokömür ile aktive edilmiş küllerin zemin stabilizasyonuna yönelik kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi* 4(2):354-371. <https://doi.org/10.61112/jiens.1421364>
15. Lakkimsetti B, Nayak S (2022) Experimental investigation and performance evaluation of lithomargic clay stabilized with granulated blast furnace slag and calcium chloride. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 8(1), 12.
16. Uysal F, Yılmaz V, Topçu HM (2020) Farklı atık malzemeler ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özellikleri. *Çukurovaummfd* 35(1):19-26. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.764507>
17. Babatunde OA, Sani JE, Sambo AH (2019) Black cotton soil stabilization using glass powder. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology* 8(5):5208-5214.
18. Ogundairo T, Olukanni D, Akinwumi I (2024) Geopolymer production from waste polyethylene terephthalate and glass for clay subgrade stabilization. *The Journal of Solid Waste Technology and Management* 50(1):441-457.
19. Niyomukiza JB, Eisazadeh A, Akamumpa J, Kiwanuka M, Lukwago A, Tipoti P(2023) Use of waste glass powder in improving the properties of expansive clay soils. *Global NEST Journal*, 25:139-145.
20. Perera STAM, Saberian M, Zhu J, Roychand R, Li J (2022) Effect of crushed glass on the mechanical and microstructural behavior of highly expansive clay subgrade. *Case Studies in Construction Materials* 17, e01244.
21. Olufowobi J, Ogundoju A, Michael B, Aderinlewo O (2014) Clay Soil Stabilisation Using Powdered Glass. *Journal of Engineering Science and Technology* 9(5):541-558.
22. Perera STAM, Saberian M, Zhu J et al (2023) Improvement of Low Plasticity Clay with Crushed Glass: A Mechanical and Microstructural Study. *Int J Pavement Res Technol* 1-21.
23. National Concrete Pavement Technology Center (2020) Guide to Cement-Stabilized Subgrade Soils, Iowa State University, Institute for Transportation, USA.
24. National Cooperative Highway Research Program Web-Only Document 144 (2009). Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials, Texas Transportation Institute Texas A&M University College Station, Texas, USA.
25. AASHTO Designation: R Draft (2008) Standard Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials, Washington, D.C., USA.
26. KGM (2021) Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvar El Kitabı, ARGE Daire Başkanlığı Ankara.
27. Öbelik Y (2011) Cam Hammaddesi Mineralojisi ve Cam Teknolojisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi.
28. Türkiye Çevre Şehircilik İklim Değişikliği Bakanlığı Sıfır Atık Projesi. <https://sifiratik.gov.tr/cam-atik> (Erişim Tarihi:06.06.2024).
29. Yılmaz I, Yıldırım M, Keskin İ (2017) Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler, Seçkin Kitabevi Ankara.
30. Orhan M et al. (2013) Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri, Gazi Kitabevi Ankara.
31. AASHTO (1993) Interim Guide For Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
32. Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi (2008) T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
33. Blayia RA, Sherwania AFH, Ibrahim HH, Farajc RH, Daraeia A (2020) Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials* 13, e00427.
34. Ibrahim HH, Mawlood YI, Alshkane YM (2019) Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq. *Int J Geotech Eng* 1-8.
35. Javed SA, Chakraborty S (2020) Effects of waste glass powder on subgrade soil improvement. *World Scientific News* 144:30-42.
36. Uzuner BA (2014) Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitabevi Trabzon.

37. Benny JR, Jolly JK, Sebastian JM, Thomas M (2017) Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* 6(5):228-231.
38. Vijayakumar G, Vishaliny H, Govindarajulu D (2013) Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 3(2):153-157.
39. Borges AL, Soares SM, Freitas TOG, Oliveira Júnior A, Ferreira EB, Ferreira FGS (2021) Evaluation of the pozzolanic activity of glass powder in three maximum grain sizes. *Materials Research*, 24(4), e20200496. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0496>
40. Sheob M, Sajid M, Ansari MA, Rais I, Sadique MR, Ahmad A (2023) Using a blend of cement and waste glass powder to improve the properties of clayey soil. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.440>
41. AASHTO (2024) Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, 3rd Edition (MEPDG-3), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
42. Karayolları Genel Müdürlüğü Birim Fiyatları (2024). <http://www.kgm.gov.tr> (Erişim Tarihi:06.06.2024).



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

CTAB-modifiye haloysit nanotüp stabilize Pickering emülsiyonlardan poliHIPE kompozitlerinin sentezi ve karakterizasyonu: CTAB immobilize edilmiş nanotüp'ün surfaktan kullanımını azaltmadaki etkisi

Hatice Hande Mert^a, Sinan Şen^{b,*}

^aYalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Yalova, 77200, Türkiye.

^bYalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yalova, 77200, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 20 Ağustos 2024

Düzeltilme 30 Eylül 2024

Kabul 10 Kasım 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Pickering emülsiyon

PoliHIPE

Silika nanotüp

Boya adsorpsiyonu

Isıl kararlılık

ÖZET

Bu çalışmada, haloysit (HL) nanotüpleri, gözenekli kompozitlerin hazırlanmasında yüksek iç faz emülsiyonlarının (HIPE'ler) stabilizasyonuna katkıda bulunan katı partiküller olarak kullanılmıştır. Bu HIPE'lerin sürekli fazının polimerizasyonu ile poliHIPE'ler elde edilmiştir. HL yüzeyine setiltrimetilamonyum bromür (CTAB) immobilizasyonu, çözeltide adsorpsiyon (SOL) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nanodolgu ihtiva etmeyen HIPE'nin kararlılığı hacimce %5 surfaktan kullanımı ile sağlanabilmiştir. Bununla birlikte, organofilik HL dolgulı (ağırlıkça %0,25-%1,00) HIPE malzemelerinin emülsiyon kararlılıkları için surfaktan gereksinimi %1'e düşmüştür. Sabit CTAB-SOL-HL kil miktarlarında, surfaktan konsantrasyonunun azaltılması farklı boyutlarda gözeneklerin oluşmasına neden olurken, surfaktan konsantrasyonu sabit tutulduğunda ise dolgu maddesi miktarının artırılması gözenek boyutunda bir azalmaya ve boyut dağılımının iyileşmesine neden olmuştur. En yüksek katyonik boya (Nile Blue) adsorpsiyon değerleri %0,50 ve %1,00 CTAB-SOL-HL içeren polyHIPE kompozitleri tarafından sergilenmiş ve %1 dolgu kullanımı ile saf poliHIPE'ye kıyasla yaklaşık %100 daha fazla adsorpsiyon elde edilmiştir. Ağırlıkça %0,50 ve üzerinde CTAB-SOL-HL kullanımı ile saf polyHIPE'ye nazaran, kompozitlerde daha yüksek ısıl bozunma sıcaklıklarına ulaşılmıştır. Gözenekli kompozitlerin hazırlanmasında HL nanotüplerin kullanımı, emülsiyon stabilitesinin sağlanmasına yardımcı olmasının yanı sıra hem malzemelerin termal performansının iyileştirilmesi hem de boyanın adsorpsiyonunda aktif rol alması açısından olası mühendislik ve çevresel faydalar açısından büyük önem taşımaktadır.

Synthesis and characterization of polyHIPE composites from CTAB-modified halloysite nanotube stabilized Pickering emulsions: Effect of CTAB immobilized nanotube on reducing surfactant usage

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 Aug 2024

Received in revised form 30 Sept 2024

Accepted 10 Nov 2024

Available online

Keywords:

Pickering emulsion

PolyHIPE

Silica nanotube

Dye adsorption

Thermal stability

ABSTRACT

In this study, halloysite (HL) nanotubes were used as solid particles contributing to the stabilization of high internal phase emulsions (HIPEs) in the preparation of porous composites. PolyHIPEs were obtained by polymerization of the continuous phase of these HIPEs. Immobilization of cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) on the HL surface was carried out using the adsorption in solution (SOL) technique. The stability of HIPE without nanofiller was achieved with the use of 5% surfactant by volume. However, the surfactant requirement for the emulsion stability of HIPE materials with organophilic HL fillers (0.25-1.00 wt%) was reduced to 1%. At constant CTAB-SOL-HL clay amounts, decreasing the surfactant concentration resulted in the formation of pores of different sizes, while increasing the amount of filler while keeping the surfactant concentration constant resulted in a decrease in pore size and improved size distribution. The highest adsorption values of cationic dye (Nile Blue) were exhibited by polyHIPE composites containing 0.50 and 1.00 wt% CTAB-SOL-HL, and about 100% more adsorption was obtained with 1% filler compared to pure polyHIPE. The use of CTAB-SOL-HL at 0.50 wt% and above, higher thermal degradation temperatures were achieved in the composites compared to pure polyHIPE. The use of HL nanotubes in the preparation of porous composites is of great importance in terms of possible engineering and environmental benefits in terms of both improving the thermal performance of the materials and taking an active role in the adsorption of the dye, as well as helping to ensure emulsion stability.

I. GİRİŞ

PoliHIPE'ler, yüksek iç faz emülsiyonlarından (HIPE'ler) sentezlenen emülsiyon kalıplı gözenekli polimerlerdir. HIPE'ler, hacmin %74'ünden fazlasını oluşturan bir sürekli faz (iç faz) ile bu faz içinde dağılmış bir dış faz içeren yüksek viskoziteli, macun benzeri emülsiyonlardır [1]. Örneğin, yağ içinde su (w/o) HIPE'lerde, iç faz sudur ve dış fazdaki hidrofobik monomerler içinde bu faz dağıtılır. HIPE'leri stabilize etmek için birçok surfaktan sistemi kullanılmaktadır. Son yıllarda, katyonik bir yüzey aktif madde olan setiltrimetilamonyum bromür (CTAB), w/o HIPE'leri stabilize etmek için dış organik faza eklenmiştir. Pickering emülsiyonları (HIPE) ise, stabilizasyon sağlamak için katı amfifilik partiküller kullanır. Bu partiküller yağ-su arayüzünde yer alarak damlacıkların birleşmesini önler ve yüzey aktif madde içermez [2-4]. Hacimce % 80'den yüksek oranda iç fazdan oluşan Pickering emülsiyonları, monomer doğasına bağlı olarak farklı oranlarda katı partikül/dolgu maddesi içerirler [5]. Surfaktanlardan farklı olarak, katı dolgu malzemelerinin emülsiyonların ara yüzeyindeki yüksek enerjili adhezyonlarından dolayı, geri dönüşümsüz olarak adsorbe olurlar ve bu nedenle iyi surfaktan özellikleri gösterirler [3]. Son yıllarda, Pickering HIPE'lerden poliHIPE'lerin hazırlanması üzerine yapılan çalışmalar, nanopartikül yüzeylerinin modifiye edilmesi ve hidrofilik-hidrofobik özelliklerinin değiştirilmesi, böylece yağ-su arayüzeyinde tutunmalarının sağlanması (örneğin, surfaktanların partikül yüzeyine adsorpsiyonu veya silanizasyon) üzerine odaklanmıştır. Nanopartikül yüzeyine fonksiyonel grupların eklenmesi, stabilizasyonun ötesinde çeşitli ek özelliklerin kazanılmasına da olanak sağlar [3].

Literatürde, surfaktan ve partiküller ile stabilize edilmiş Pickering yüksek iç faz emülsiyonları üzerine ve silika nanopartikülleri (monomerin %3'ü) ile stabilize edilmiş Pickering HIPE'ler ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Pickering emülsiyonlardan üretilen poliHIPE malzemeleri çoğunlukla kapalı hücreli yapılar oluştururlar. Bu sistemlerde, katı partikül yanında az oranda surfaktan kullanımı, poliHIPE malzemelerinin açık hücreli yapılara dönüşmesini sağlamaktadır [5]. Cui ve çalışma grubu, kuaterner amonyum tuzu ile organofilikleştirilmiş montmorillonit kullanarak yağ/su (o/w) türde Pickering emülsiyonlarının kararlılığını sağlamışlardır. Yağ fazı olarak polideken kullanılmıştır. Emülsiyonların kararlılıkları, sadece MMT, sadece yüzey aktif madde ve yüzey aktif madde ile muamele edilmiş montmorillonit varlığında araştırılmıştır. Emülsiyon stabiliteyi mikroskopik yöntemle izlenmiştir. Emülsiyon stabilizasyonu, hidrofilik karakteri yüksek olan Berol R648 (kuaterner amonyum tipi yüzey aktif madde) kullanıldığında daha iyi sağlanmıştır [6]. Hermant ve araştırma grubu, karbon nanotüpler kullanarak Pickering emülsiyonlardan iletken özellikte ve köpük formda poliHIPE kompozitler hazırlamıştır. Stiren monomeri ve DVB çapraz bağlayıcısı kullanılarak oluşturulan su/yağ (w/o) emülsiyonlarının kararlılığı, polimer yüzey aktif madde poli(stiren-b-dimetilaminoetil metakrilat) ve karbon nanotüp (CNT) parçacıkları ilavesiyle sağlanmıştır. Sentezlenen poliHIPE malzemelerin morfolojik özelliklerinin ve iletkenliğinin, CNT varlığından büyük ölçüde etkilendiği raporlanmıştır [7]. Diğer bir çalışmada, Pickering emülsiyonlara az oranda iyonik olmayan ve yağ içinde çözünür bir surfaktan (Hypermer 2296) eklenmesinin, açık hücre gözenekleri olan makrogözenekli poliHIPE malzemelerinin gaz geçirgenlik özelliklerini değiştirdiği gözlemlenmiştir [8]. Akrilonitril/stiren esaslı poliHIPE malzemelerinin üretiminde, surfaktan yanında stabilize sağlamak için katı partikül olarak organofilik montmorillonit kili (Cloisite 30B) kullanımının, nanokompozit köpüklerin Young modülü değerlerini, organokil içermeyenlere kıyasla, düşürdüğü bulunmuştur [9].

Yüksek iç faz emülsiyonlarından elde edilen gözenekli polimerler (poliHIPE), geniş yüzey alanları ve makrogözenekli yapıları nedeniyle adsorpsiyon kapasitesinin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Üretim sırasında, adsorpsiyon özelliklerini geliştirmek için bu gözenekli polimerlere, hedef maddeye yüksek afiniteye sahip fonksiyonel gruplar eklenir. Yang ve çalışma grubu, CuSO₄ çözeltisindeki bakır (II) iyonlarının adsorpsiyonu için, lignin partikülleri ile kararlı kılınmış Pickering emülsiyonlarından (yağ/su) elde edilen poliHIPE köpük malzemelerini kullanmışlardır. Araştırma sonucunda açık hücre yapılı polimer köpüklerin, kapalı hücre yapılı köpüklere göre daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu raporlanmıştır. SEM görüntüleri, CuSO₄ mikrokristallerinin köpük yüzeyinde yaygın olarak dağıldığını göstermiş ve birbirine bağlı makrogözenekli köpüklerin Cu⁺² iyonlarını etkili bir şekilde adsorbe ettiğini kanıtlamıştır [10]. Başka bir çalışmada, yüksek iç fazlı su/yağ (w/o) emülsiyonlarından organofilik montmorillonit (Cloisite 30B) katkılı vinilbenzil klorür/DVB monomerlerinden poliHIPE malzemeleri hazırlanmıştır. Bu malzemeler, amino-fonksiyonelleştirilmiş poliHIPE'ler elde etmek amacıyla trietilamin (TEA) ve trimetilamin (TMA) çözeltileri ile muamele edilmiştir. Bu ürünlerin nitrat adsorpsiyonu incelendiğinde, amin ajanları ile modifiye edilmiş poliHIPE membranlarının nitrat iyonlarını başarılı bir şekilde uzaklaştırdığı görülmüştür. Adsorpsiyon, Temkin, Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri kullanılarak değerlendirilmiş ve en iyi uyum sonucu Freundlich izoterm modelinden elde edilmiştir [11].

Mevcut çalışmada, Pickering HIPE emülsiyonlarının kararlılığını artırmak için katı partikül olarak Halosyt (HL) nanotüp dolgu maddesi kullanılmıştır. HL, alüminosilikat yapıya sahip, biyoyumlu, ucuz ve çevre dostu bir kildir ve geniş bir yüzey alanına sahiptir [12-13]. Bu nano killerin iç yüzeyleri ve dış yüzeyleri sırasıyla, aluminol (AlOH) ve siloksan (Si-O-Si)/silanol (Si-OH) fonksiyonlu grupları içermektedir. Lümen boşluğuna sahip çok duvarlı halosyt nanotübünün çapı yaklaşık 2-120 nm aralığında iken uzunlukları 500 nm ile 1,5 mikron aralığındadır [14-15]. Halosyt nanotüplerin yüzeyinin geniş bir pH aralığında, özellikle yüksek pH değerlerinde negatif yüke sahip olduğu belirtilmiştir. HL nanotüpler gözenekli yapıları ve termal ve kimyasal dirençlerinin yüksek olması sayesinde ilaç dağıtımı, hidrojen depolama ve kirletici giderimi gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilirler [12]. Önceki çalışmalarımızdan birinde, yüksek iç fazlı emülsiyondan poliHIPE kompozitleri, spirulina biyosorbent modifiye HL nanotüp ve iyonik olmayan Span-80 surfaktan kullanılarak hazırlanmıştır. Kararlı bir stiren/divinilbenzen esaslı yağ içinde su tipi konsantre emülsiyon elde etmek için saf poliHIPE'nin sentezinde, en az hacimce %5 Span-80 surfaktana ihtiyaç duyulmuş, spirulina modifiye HL nanotüp içeren poliHIPE kompozitler için gerekli olan emülsiyon kararlılığını sağlamada ise bu değer hacimce % 2 ye düşürülebilmektedir. Tüm poliHIPE kompozitlerinde açık gözenek elde edilmiştir. Ağırlıkça % 0.25 spirulina modifiye nanotüp ve hacimce % 2 surfaktan içeren kompozitin, saf poliHIPE'ye kıyasla yaklaşık % 250 daha fazla boya adsorpladığı raporlanmıştır [16]. Konvansiyonel surfaktanlar emülsiyon stabilizasyonu ve istenen gözenekli morfolojiyi sağlamalarına rağmen, nispeten yüksek maliyetleri nedeniyle, özellikle yüksek yüklemelerde kullanılırken bir dezavantaj yaratmaktadırlar. Surfaktanların uygulama alanlarında büyük miktarlarda kullanımları, giderim süreçlerinde istenmeyen zorluklara neden olabilmektedir [5, 17].

Bu çalışmanın amacı, surfaktan kullanım oranını azaltarak Pickering emülsiyon yöntemi ile tüpsü geometriye sahip halosyt (HL) dolgulu polistiren esaslı gözenekli polimerlerin sentezlenmesidir. Bu çalışmada ayrıca, elde edilen organik-inorganik gözenekli hibrit malzemenin bir uygulama örneği olarak boya giderim potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, emülsiyon stabilitesini artırmak amacıyla polistiren bazlı gözenekli

polimerlerin üretiminde kullanılan nano HL dolgu maddesi kuaterner amonyum tuzu (CTAB) ile modifiye edilmiştir. Modifikasyon ajanının HL dolgu maddesi üzerine immobilizasyonunda, çözelti içinde fiziksel adsorpsiyon tekniği uygulanmıştır. Emülsiyon stabilitesini artırmanın yanı sıra, modifiye edilmiş dolgu maddesinin elde edilen gözenekli kompozit malzemelerin termal özellikleri ve boya adsorpsiyon davranışı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

II. DENEYSEL METOT

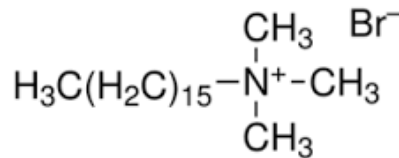
2.1 Malzemeler

Stiren (Merck, Darmstadt, Almanya), divinilbenzen (%80, Aldrich Kimya, Steinheim, Almanya), Span-80 (Aldrich Kimya, Steinheim, Almanya), CTAB (Merck), kalsiyum klorür dihidrat (CaCl₂·2H₂O, Tekkim Kimya Ltd. Şti., Bursa) ve Nil Mavisi (Merck, Darmstadt, Almanya) alındığı gibi kullanılmıştır. AIBN (2,2'-azobisisobütironitril, %98, Aldrich Kimya, Steinheim, Almanya) ise etanol içinde yeniden kristalleştirildikten sonra kullanılmıştır. Halloysit (HL) nanotüp, Esan-Eczacıbaşı (İstanbul-Türkiye) tarafından temin edilmiştir. Tüm deneylerde deiyonize su kullanılmıştır.

2.2 Halloysit (HL) Modifikasyonu

Pickering emülsiyonlarından gözenekli polimerlerin hazırlanmasında stabilize edici katı nanopartiküller olarak modifiye edilmiş halloysit (HL) dolgu maddesi kullanılmıştır. CTAB, nano boyutlu dolgu maddelerinin hidrofilik-hidrofobik özelliklerini değiştirmek ve böylece yüksek iç faz emülsiyonlarının stabilitesini artırmak için çözeltide fiziksel adsorpsiyon (SOL) tekniği ile HL yüzeyine immobilize edilmiştir.

CTAB bir kuaterner amonyum tuzudur ve kimyasal yapısı Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Setiltrimetilamonyum bromür (CTAB)'ün kimyasal yapısı

Modifikasyon işleminin ilk aşamasında, 2 gram HL maddesi 300 ml, 2 gram CTAB ise 200 ml saf suda ayrı ayrı 50°C'de 1 saat karıştırılmıştır. Daha sonra HL içeren çözeltiye, CTAB çözeltisi eklenmiştir. Ardından toplam hacim 600 ml'ye tamamlanmış ve karışım aynı sıcaklıkta 4 saat daha karıştırılmıştır. Organofilik HL (CTAB-SOL-HL) santrifüjleme yoluyla çöktürülmüştür. Deiyonize su kullanılarak yıkanan CTAB-SOL-HL, 48 saat boyunca 50°C'de vakum altında kurutulmuştur.

2.3 Saf PoliHIPE ve Kompozitlerinin Üretilmesi

PoliHIPE malzemeleri, yüksek miktarda iç faz (hacimce %80) ve daha az miktarda sürekli faz (hacimce % 20) ihtiva eden yüksek iç faz emülsiyonlarının (HIPE) polimerizasyonu ile üretilmiştir. Deneylede monomer olarak stiren (toplam monomer miktarının hacimce %90'ı) ve çapraz bağlayıcı olarak divinil benzen (hacimce %10) kullanılmıştır. Emülsiyonlar, AIBN başlatıcısı (mol bazında %1) ve değişen oranlarda Span 80 surfaktan içeren sürekli faza, modifiye dolgu maddesi (ağırlıkça değişen oranlarda) eklenerek ve ardından iç faz olarak CaCl₂ içeren deiyonize su, damla damla ilave edilerek hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, emülsiyon, kapaklı polietilen tüplere aktarılmış ve 24 saat boyunca 70°C'de polimerize edilmiştir. Hazırlanan numuneler daha sonra 24 saat boyunca Soxhlet ekstraktöründe etanol ile ekstrakte edilmiş ve 40°C'de vakumlu fırında kurutulmuştur. Saf poliHIPE malzemesi, CTAB-SOL-HL kullanılmadan, aynı prosedüre göre üretilmiştir.

2.4 Karakterizasyon

Saf HL ve CTAB-SOL-HL dolgu maddelerinin kristal yapıları X-ışını kırınımı (XRD) tekniği (Rigaku D/Max 2200 Ultimat difraktometre, CuK α radyasyonu, $\lambda=1.54$ Å, Rigaku, Tokyo, Japonya) kullanılarak incelenmiştir. Analizler 40 kV ve 40 mA çalışma koşullarında 2 °/dak tarama hızında gerçekleştirilmiştir. HL dolgu maddesinin CTAB ile etkileşimi ve elde edilen poliHIPE malzemelerin termal kararlılığı, termogravimetrik analiz (TGA) ile değerlendirilmiştir. Bu analizler, Seiko TG/DTA 6300 cihazı (Seiko Instruments) kullanılarak azot atmosferi altında 10 °C/dak ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. HL dolgu maddelerinin ve elde edilen gözenekli polimerlerin morfolojisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ile araştırılmıştır (ESEM-FEG/EDAX Philips XL-30 mikroskop, Philips, Eindhoven, Hollanda).

Malzemelerin spesifik yüzey alanı ölçümleri, Brunauer-Emmet-Teller (BET) adsorpsiyon modeline dayalı Micromeritics Gemini VII 2390t Tam Otomatik BET Cihazı (Micromeritics Instrument Corporation) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen malzemelerin boya adsorpsiyon özelliklerini belirlemek için pH 5 - 5.5 aralığında ve 1.10^{-5} M konsantrasyonunda Nile Blue boyasının sulu çözeltisi hazırlanmış ve poliHIPE kompozitler, bu çözeltiliye daldırılmıştır. Adsorpsiyon işlemi sırasında çözeltinin absorbans değerleri 635 nm dalga boyunda, UV-VIS spektrofotometre (T80+ UV/VIS, PG Instruments Ltd.) cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Adsorpsiyon kapasitesi değerleri, sulu çözeltilideki kalan boyanın absorbans değerleri ölçülerek hesaplanmıştır. 1 g poliHIPE'nin adsorbe ettiği boya mg olarak Denklem 1 yardımıyla belirlenmiştir:

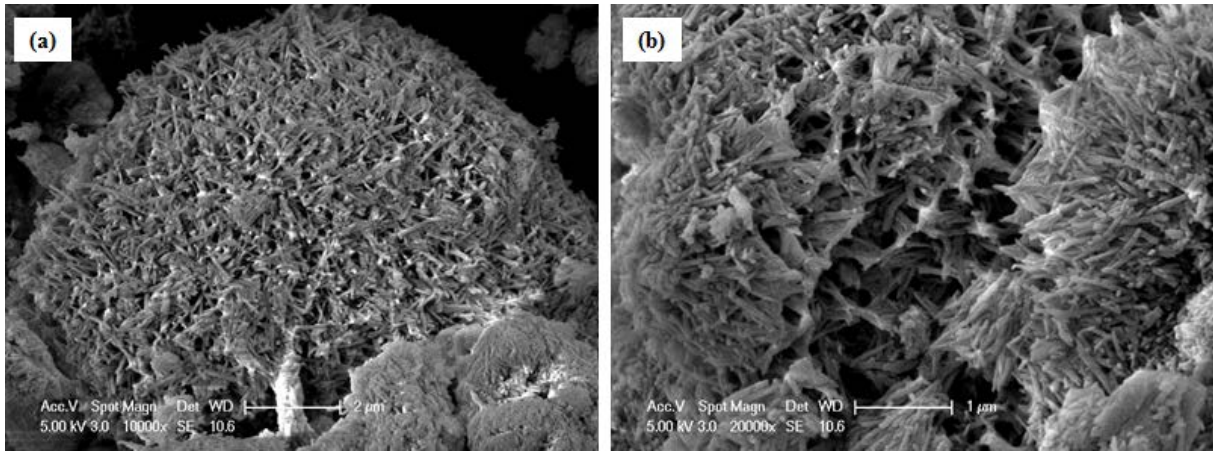
$$q_t = \frac{[(C_0)-(C_t)]xV}{W} \quad (1)$$

Bu denklemde, C₀ ve C_t sırasıyla başlangıçtaki ve belirli bir zaman aralığındaki boya çözeltisi konsantrasyonlarını (mg/L), V boya çözeltisinin hacmini (L) ve W adsorpsiyon analizi yapılan malzemenin ağırlığını (g) temsil etmektedir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 CTAB ile modifiye edilmiş HL dolgusunun karakterizasyonu

CTAB-SOL-HL dolgu maddesinin karakterizasyonuna ait SEM görüntüsü Şekil 2'de sunulmuştur. Saf HL nanotüpünün SEM görüntüsü (Şekil A1, EK A) [16] ile karşılaştırıldığında, modifikasyon işlemi sonrası CTAB moleküllerinin HL yüzeyleri ile etkileştiği ve nanotüplerin uçlarından birbirlerine bağlanarak istiflenmelerini sağladığı söylenebilir. SEM görüntülerinden, modifikasyon sonrası da tüpsü geometrinin var olduğu ve tüpler arasındaki etkileşimin arttığı görülmüştür

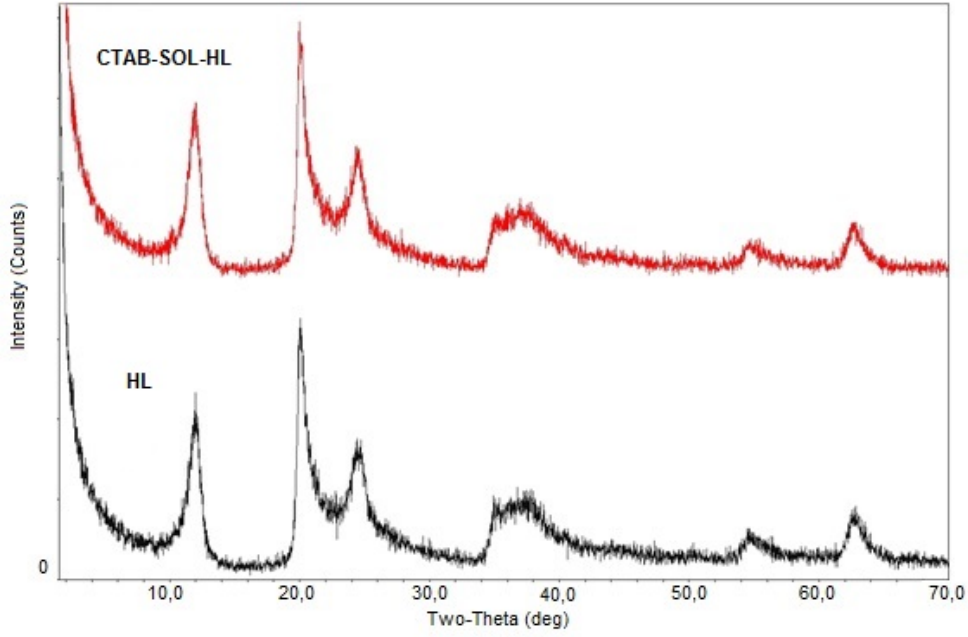


Şekil 2. CTAB-SOL-HL'in farklı magnifikasyonlardaki SEM görüntüleri: (a) 10 000 x ve (b) 20 000 x

Şekil 3, nanotüplerin XRD grafiklerini göstermekte, Tablo 1 ise, XRD analiz sonuçlarını özetlemektedir. HL nanotüpün ana düzlemdeki (d_{001} yansıması) 12.02° kırınım açısı' na (2θ) karşılık gelen katmanlar arası mesafe değeri 7.35 \AA olarak bulunmuştur. 24.96° kırınım açısındaki (d_{002} yansıması) pikin varlığı ise HL nanotüplerin yapısının dihidrat formunu açıklamaktadır. $62,83^\circ$ kırınım açısındaki (2θ) pikin karşılık geldiği katman mesafesi $1,47 \text{ \AA}$ olup, sahip tüp geometrisini temsil etmektedir [15]. Silika nanotüplerin, CTAB modifikasyon ajanı ile immobilizasyonundan sonra, d_{002} yansıma piki $24,62^\circ$ kırınım açısına kaymış ve aluminasilikat katmanları arası uzaklık $3,56 \text{ \AA}$ değerinden $3,61 \text{ \AA}$ 'a yükselmiştir. Bu bulgular, CTAB ajanının nanotüp yüzeylerine adhezyonunun yanı sıra, nanotüp lümenlerine kısmen nüfuz ettiğini de göstermektedir. Bu nedenle, tüp katmanları arasındaki genişlemenin bir sonucu olarak nanotüp kristallliği azalmıştır denilebilir. Modifikasyon işleminden sonra, d_{006} yansımasına ait $2\theta=62.77^\circ$ kırınım açısındaki pikin varlığı ise nanotüp morfolojisinin korunduğunu göstermiştir [15].

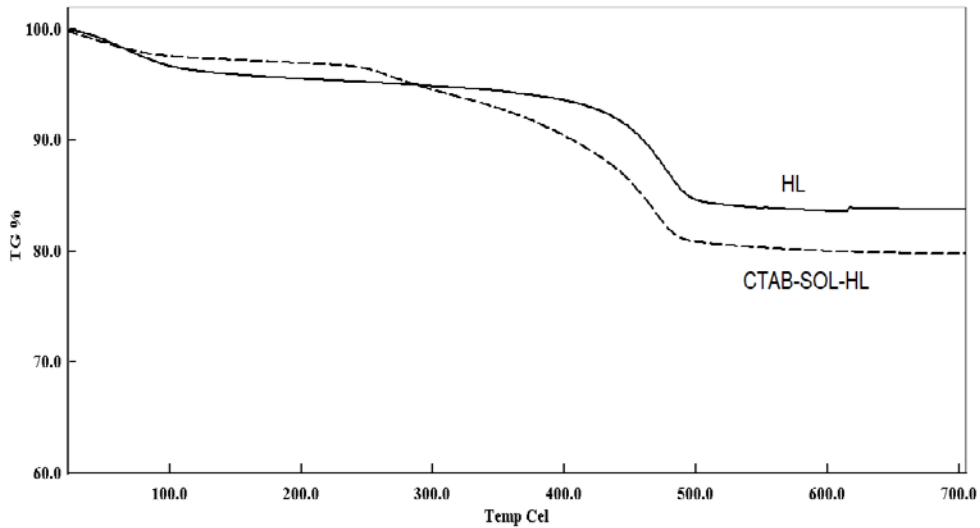
Tablo 1. Nanotüplerin XRD analiz sonuçları (Parantez içindeki veriler difraksiyon açılarını (2θ) göstermektedir.)

d-açıklığı (Å)	HL	CTAB-SOL-HL
d_{001}	7,35 (12,02°)	7,38 (11,98°)
d_{002}	3,56 (24,96°)	3,61 (24,62°)
d_{006}	1,47 (62,83°)	1,47 (62,77°)



Şekil 3. HL ve CTAB-SOL-HL nanotüplerinin XRD eğrileri

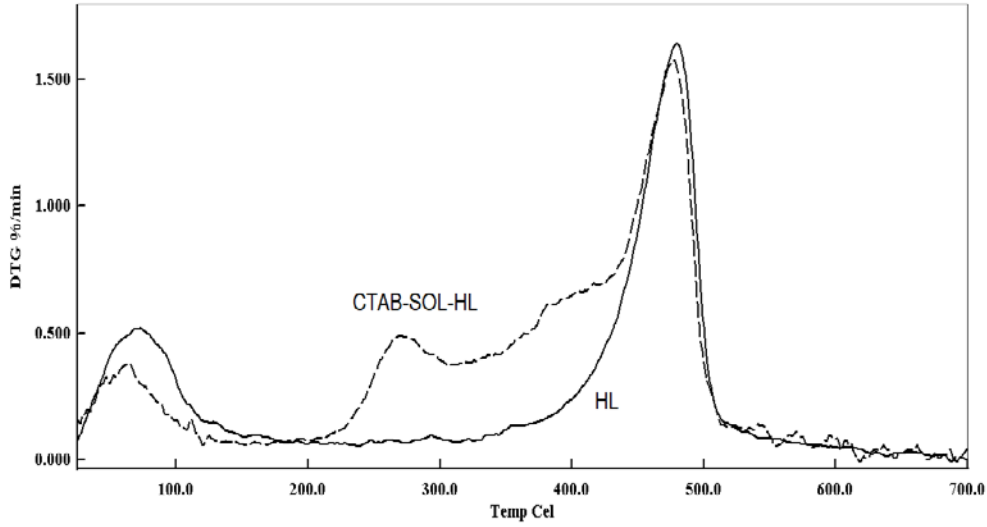
Çözeltide harmanlama yöntemi kullanılarak HL dolgusunun organofilik modifikasyonu, TGA tekniğiyle de karakterize edilmiştir. Silika nanotüplerin ısıl bozunma eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, CTAB-SOL-HL, saf HL'ye kıyasla daha fazla ağırlık kaybı sergilemiştir. 700 °C'deki kül oranları karşılaştırıldığında CTAB-SOL-HL nano dolgusunun, saf HL'ye göre %3,90 daha fazla ağırlık kaybettiği tespit edilmiştir.



Şekil 4. HL nanotüplere ait TGA termogramları

Şekil 5'te ki türevsel TGA termogramları incelendiğinde de, CTAB-SOL-HL nanotüğü, HL'den farklı olarak, CTAB modifikasyon ajanı nedeniyle 200 ile 500°C arasında organik grubun uzaklaşmasına karşılık gelen bir

bozunmaya uğramaktadır. Sonuç olarak, SEM, XRD ve TGA sonuçlarından, CTAB modifikasyon ajanının HL nanotüp yüzeyine başarılı bir şekilde immobilize olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5. HL nanotüplere ait türevsel TGA eğrileri

3.2 HIPE Malzemelerinin Kararlılığı

Saf HIPE ve CTAB-SOL-HL dolgusunu içeren yüksek iç faz emülsiyonlarının stabilite koşulları Tablo 2’de sunulmuştur. Modifiye HL katkılı emülsiyonların stabilitesinin elde edildiği minimum surfaktan miktarı hacimce %1 olmuş, surfaktan kullanılmadığında ise stabiliteye ulaşılamamıştır. CTAB-modifiye HL dolgusu kullanılmadan, emülsiyon stabilitesini sağlamak için en az %5 surfaktan gerekirken, sadece %1 surfaktan varlığında CTAB modifiye HL kilinin emülsiyon stabilitesine ve gözenekli yapıda poliHIPE üretimine olumlu katkı sağladığı açıkça anlaşılmıştır. Bu sonuç, daha önceki çalışmada üretilen spirulina modifiye HL katkılı poliHIPE kompozitlerinde, ihtiyaç duyulan minimum Span-80 surfaktan miktarından (hacimce %2) [16] daha düşük bir oranda surfaktan (hacimce %1) kullanılarak elde edilmiş olması açısından bir avantaj sağlamaktadır.

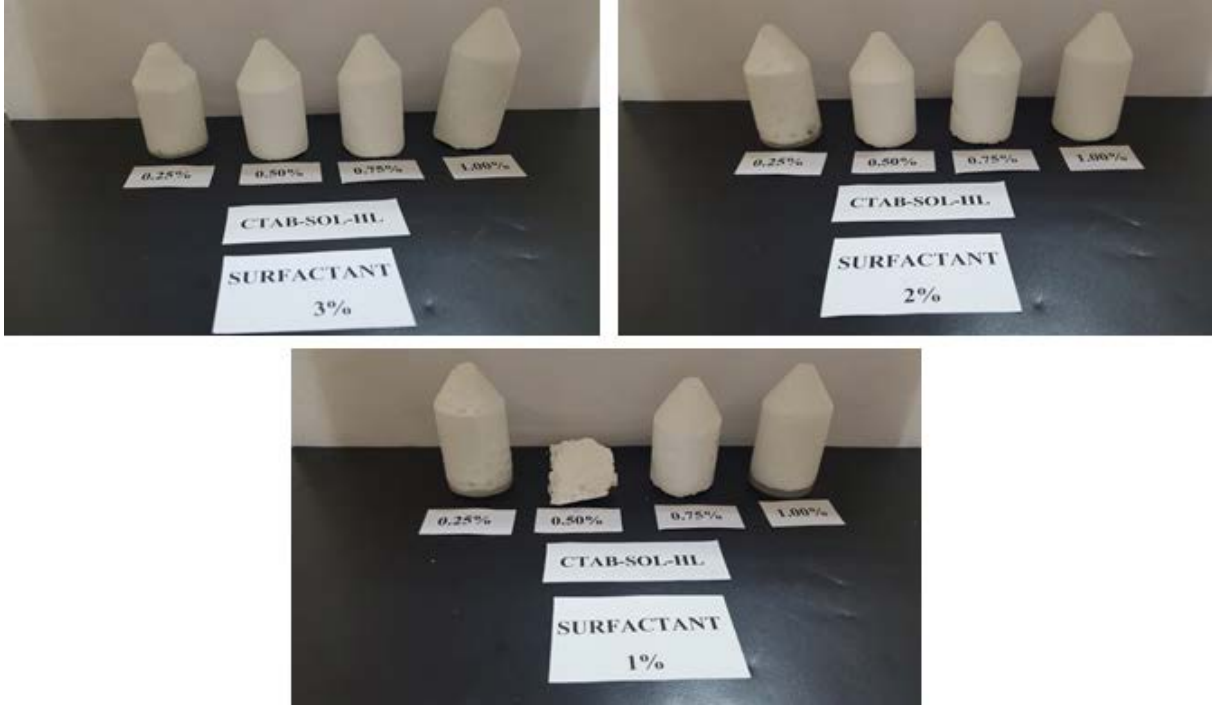
Tablo 2. Saf ve CTAB-SOL-HL içeren Pickering emülsiyonların kararlılıkları

Malzeme	% CTAB-SOL-HL	% Surfaktan	Emülsiyon Kararlılığı
Saf HIPE	-	5	Kararlı
Saf HIPE	-	3	Kararsız
Saf HIPE	-	2	Kararsız
0.25CTAB-SOL-HL(%3 surf.)	0,25	3	Kararlı
0.50CTAB-SOL-HL(%3 surf.)	0,50	3	Kararlı
0.75CTAB-SOL-HL(%3 surf.)	0,75	3	Kararlı
1.00CTAB-SOL-HL(%3 surf.)	1,00	3	Kararlı
0.25CTAB-SOL-HL(%2 surf.)	0,25	2	Kararlı
0.50CTAB-SOL-HL(%2 surf.)	0,50	2	Kararlı
0.75CTAB-SOL-HL(%2 surf.)	0,75	2	Kararlı
1.00CTAB-SOL-HL(%2 surf.)	1,00	2	Kararlı
0.25CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	0,25	1	Kararlı
0.50CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	0,50	1	Kararlı
0.75CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	0,75	1	Kararlı
1.00CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	1,00	1	Kararlı

3.3 Saf PoliHIPE ve PoliHIPE Kompozitlerinin Morfolojik ve Yüzey Alanı Analizleri

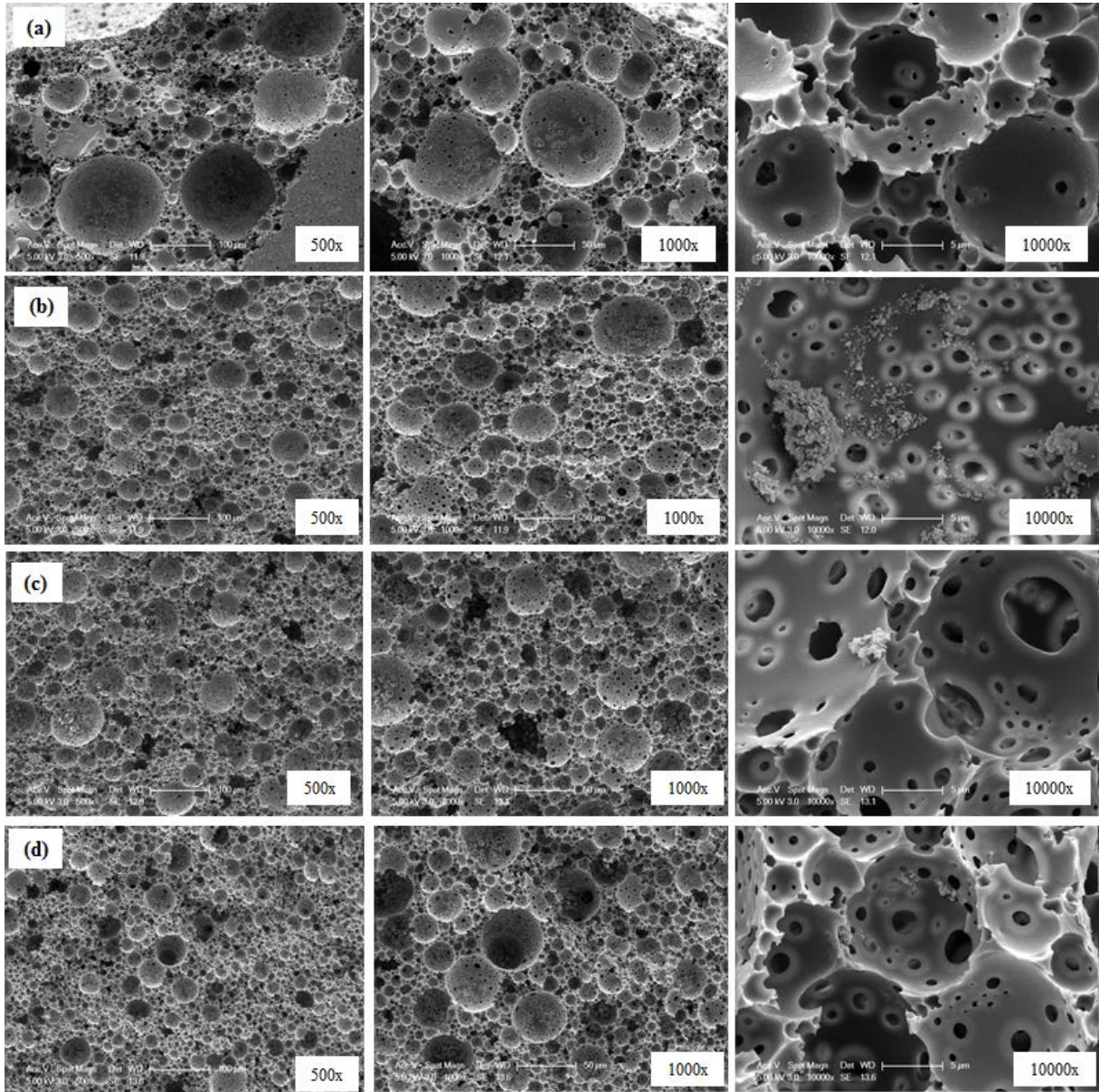
Saf poliHIPE'nin SEM görüntüleri Şekil A2 de (EK A) [16] verilmiştir. CTAB-SOL-HL kullanılmadan, hacimce %5 surfaktan varlığında sentezlenmiş saf PoliHIPE, şekilden de görüldüğü gibi geleneksel poliHIPE de gözlenen gözenekli ara bağlantılara sahip açık hücreli bir yapı sergilemiştir [16].

CTAB-SOL-HL nanotüp katkılı poliHIPE kompozitleri Şekil 6'da SEM görüntüleri ise Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur.



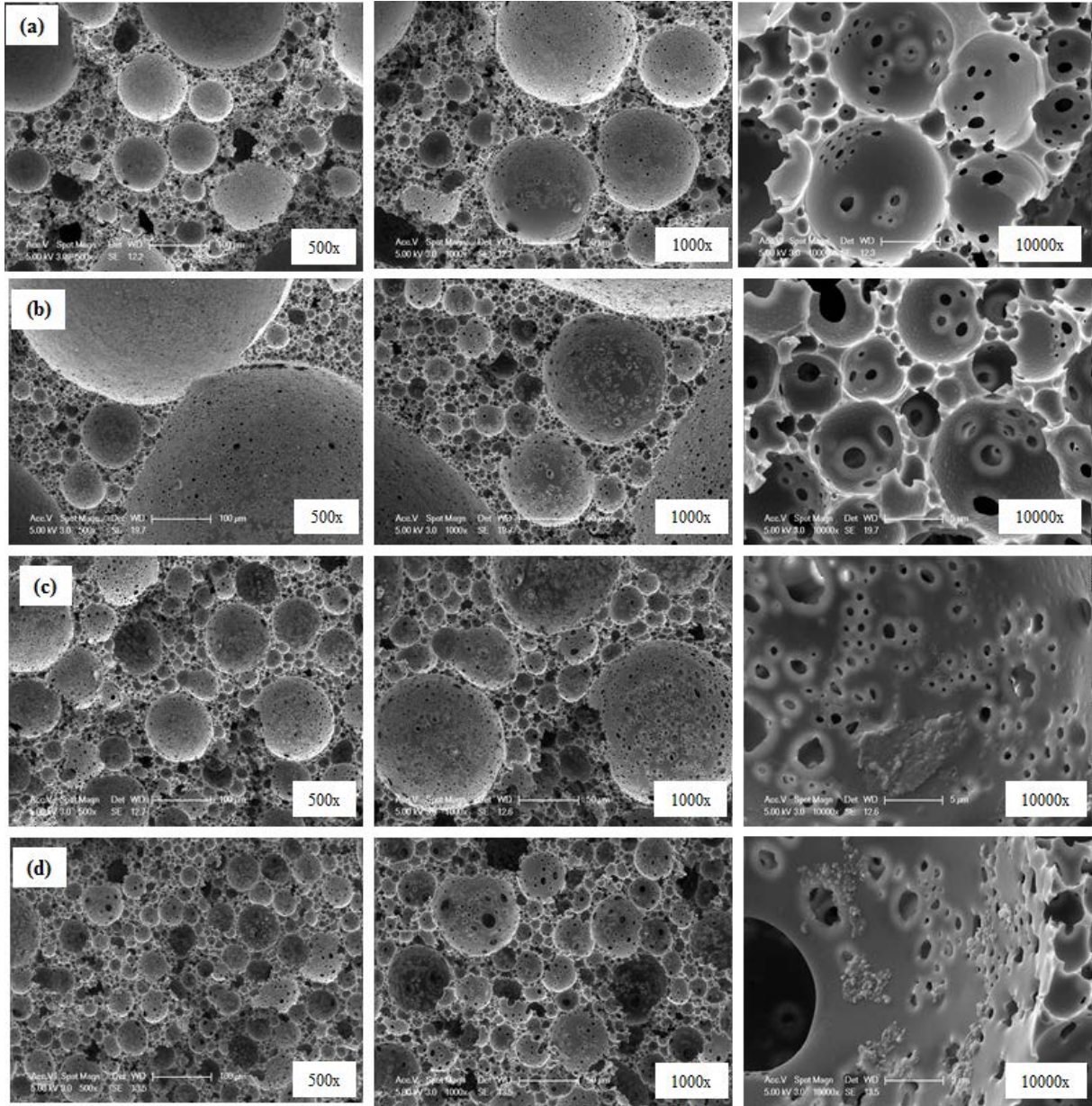
Şekil 6. Farklı miktarlarda Span-80 surfaktan ve CTAB-SOL-HL içeren poliHIPE malzemeler

SEM görüntüleri incelendiğinde, poliHIPE malzemelerde kullanılan dolgu maddesinin miktarına göre genellikle açık ve birbirine gözenek geçitleri ile bağlı gözenekler oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 7'de gösterildiği gibi, malzemeye eklenen CTAB-SOL-HL miktarı arttıkça (sabit %3 surfaktant varlığında), oluşan gözeneklerin boyutlarında ve dağılımında azalmaya yol açmıştır. PoliHIPE kompoziti, hacimce %3 oranında surfaktan ve ağırlıkça %0,25 oranında CTAB-SOL-HL ile üretildiğinde, elde edilen malzemenin yapısında (Şekil 7a), küçük gözenek geçitlerine sahip daha büyük boyutlarda heterojen dağılmış gözenekler olduğu görülmüştür. Ancak CTAB-SOL-HL miktarı %0,25'in üzerinde kullanıldığında, daha küçük gözeneklerin oluştuğu ve dağılımın da homojen hale geldiği izlenmiştir (Şekil 7b-d). Yüksek büyütme SEM görüntülerinden, CTAB-SOL-HL miktarındaki artışa paralel olarak gözenek duvarlarındaki dolgu miktarının da arttığı ve açık hücreli poliHIPE morfolojisinin korunduğu görülmüştür.



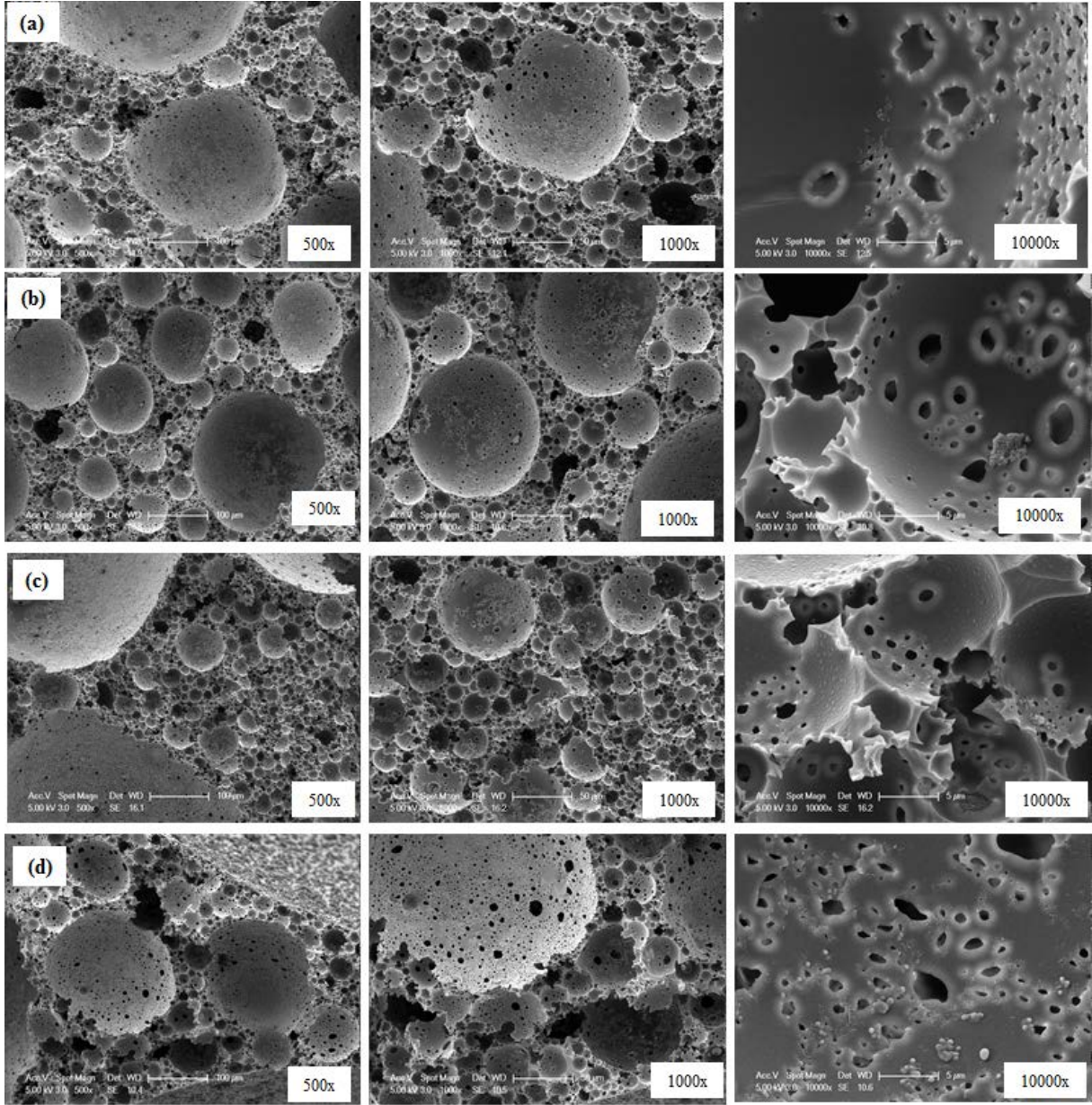
Şekil 7. %3 surfaktan içeren (a)%0,25 (b)%0,50 (c)%0,75 (d)%1,00 CTAB-SOL-HL nanotüp katkılı poliHIPE malzemelerinin SEM görüntüleri

PoliHIPE kompozitlerde %2 surfaktan konsantrasyonunda elde edilen morfoloji (Şekil 8) ile %3 surfaktan konsantrasyonundaki morfoloji (Şekil 7) arasında benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. Surfaktan konsantrasyonunun %3'ten %2'ye gözenek boyutları artmış ancak CTAB-SOL-HL'in %0,75 ve üzerinde kullanılmasıyla küçülmüş ve daha homojen dağılımlı bir yapı oluşmuştur (Şekil 8c ve d). CTAB-SOL-HL nanotüp miktarı artışı ile iç gözeneklerin/gözenek geçitlerinin nanotüplerle kaplanarak kapanması da daha fazla olmuştur. Bu sonuç, CTAB-SOL-HL'in %1 oranında kullanıldığında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır (Şekil 8d-10000x).

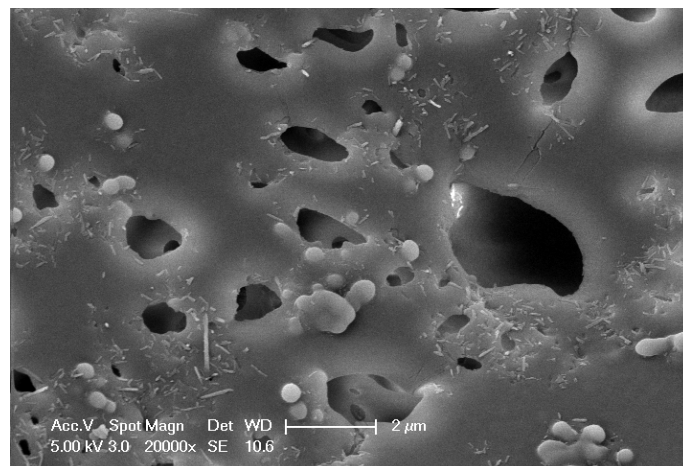


Şekil 8. %2 surfaktan içeren (a)%0,25 (b)%0,50 (c)%0,75 (d)%1,00 CTAB-SOL-HL nanotüp katkılı poliHIPE malzemelerinin SEM görüntüleri

Şekil 9'da %1 oranında surfaktan madde kullanılarak üretilen poliHIPE malzemelerinin mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu malzemelerde, surfaktan miktarının azaltılmasıyla birlikte hem daha küçük hem de daha büyük gözeneklerin bir arada olduğu, heterojen bir yapı olduğu gözlemlenmiştir. CTAB-SOL-HL oranının artması ile gözenek duvarlarının nanotüplerle kaplanması sonucu gözenek geçitlerinin kapanmasının arttığı görülmektedir. Şekil 9'da gözenek geçitlerinin kısmen kapanmaya başlaması ile boyutlarının da CTAB-SOL-HL miktarının artmasıyla azaldığı açıkça görülmektedir. Ayrıca, CTAB-SOL-HL nanotüplerinin polimer matris içinde ve gözenek duvarlarındaki dağılımı yüksek büyütme SEM görüntülerinden (Şekil 10) açıkça fark edilmektedir.



Şekil 9. %1 surfaktan içeren (a)%0,25 (b)%0,50 (c)%0,75 (d)%1,00 CTAB-SOL-HL nanotüp katkılı poliHIPE malzemelerinin SEM görüntüleri



Şekil 10. %1 sabit surfaktan ve %1 CTAB-SOL-HL katkılı poliHIPE kompozitinin yüksek büyütmeli SEM görüntüsü

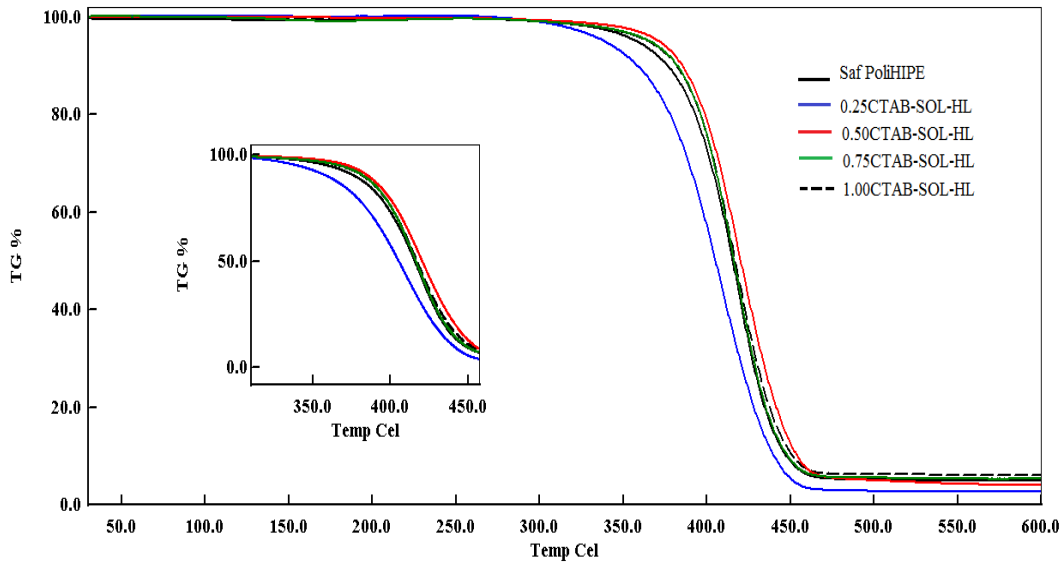
Farklı miktarlarda CTAB-SOL-HL dolgusu ve hacimce %1 surfaktan katkıli poliHIPE kompozitlerinin yüzey alanı değerleri, azot adsorpsiyon/desorpsiyon izotermi ve BET yöntemi kullanılarak saptanmıştır. Spesifik yüzey alanı (δ_{BET}) değerleri Tablo 3'te sunulmaktadır. Kompozitler için elde edilen yüzey alanı değerleri, saf poliHIPE'nin değerine (1,80 m²/g) [16] kıyasla, HL partikül dağılımına ve iç gözeneklerin kapanmasına bağlı olarak az oranda düşüş sergilemekle birlikte önemli bir farklılık göstermemektedir denilebilir. PoliHIPE kompozit malzemelerinin adsorpsiyon performanslarının, malzemelerin yüzey alanları ile, gözenek duvarlarında bulunan silika nanotüplerin reseptör görevi gören siloksan, silanol ve alüminol fonksiyonlu gruplarından da etkileneceği düşünülmüştür [18].

Tablo 3. CTAB-SOL-HL katkıli poliHIPE kompozitlerinin yüzey alanları

Malzeme	CTAB-SOL-HL (%)	Span-80 (%)	δ_{BET} (m ² /g)
0.25CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	0,25	1	0,91
0.50CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	0,50	1	1,16
0.75CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	0,75	1	1,42
1.00CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	1,00	1	1,05

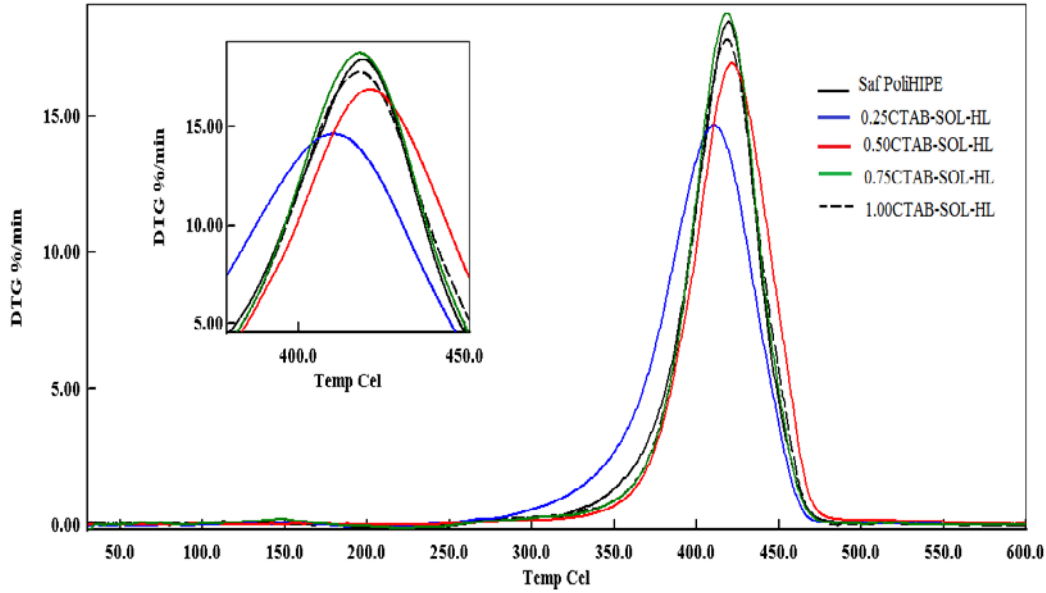
3.4 Saf PoliHIPE ve PoliHIPE Kompozitlerinin Isıl Kararlılıkları

Saf poliHIPE malzemesinin ve %1 surfaktan ile CTAB-SOL-HL dolgusu katkıli poliHIPE malzemelerinin termal stabiliteyi, termogravimetrik analiz (TGA) tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Termogram sonuçları Şekil 11 ve Şekil 12'de, malzemelerin bozunma başlangıç sıcaklığı (T_{d10}), %50 ağırlık kaybının meydana geldiği sıcaklık (T_{d50}) ve kül miktarı değerleri ise Tablo 4'te verilmiştir. Termogramlar ve Tablo 4'teki sonuçlar incelendiğinde, 0,25CTAB-SOL-HL malzemesi dışında, diğer poliHIPE malzemelerinin T_{d10} ve T_{d50} değerlerinin, saf poliHIPE'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Diğer kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında, büyük gözeneklerin yanı sıra çok daha fazla küçük ve açık gözeneklere sahip olan %0,50 CTAB-SOL-HL içeren kompozit (Şekil 9b), en yüksek T_{d10} ve T_{d50} değerlerine sahiptir.



Şekil 11. Saf poliHIPE ve CTAB-SOL-HL katkıli poliHIPE malzemelerinin TGA eğrileri

Ayrıca Şekil 12'de görüldüğü gibi bu kompozit, daha düşük bozunma hızı ve daha yüksek bozunma pik sıcaklığı ile termal kararlılığı en yüksek malzeme olarak öne çıkmaktadır. Saf poliHIPE'ye kıyasla, ağırlıkça %0.25 den daha yüksek oranda HL kullanımı ile sağlanan yüksek ısıl kararlılık, uçucu bozunma ürünlerinin hapsedildiği nanotüp lümenleri tarafından sağlanan bariyer özelliğine dayandırılabilir [19]



Şekil 12. Saf poliHIPE ve CTAB-SOL-HL katkılı poliHIPE malzemelerinin türevsel TGA eğrileri

Tablo 4. Saf haldeki poliHIPE ve CTAB-SOL-HL katkılı poliHIPE malzemelerinin TGA sonuçları

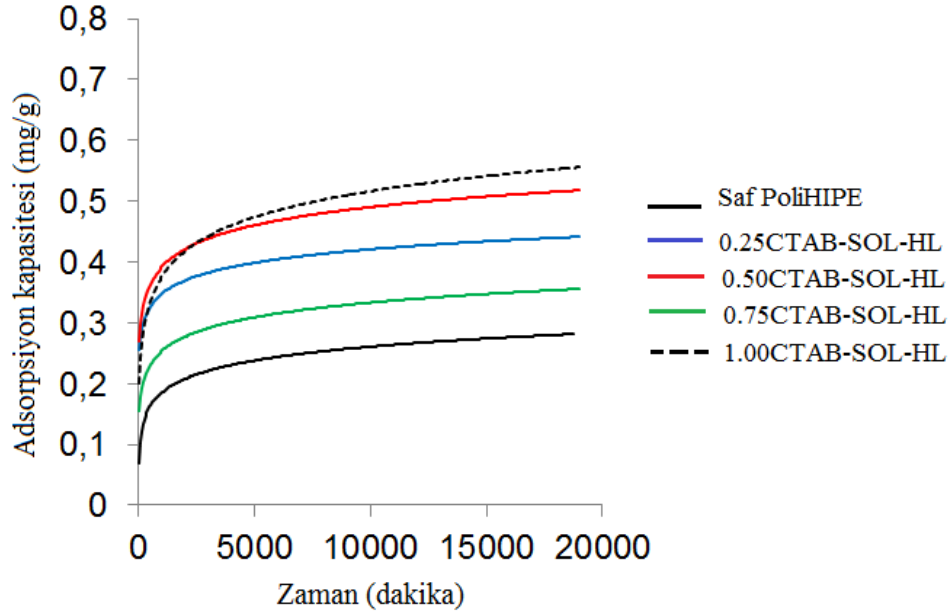
Malzeme	Td ₁₀ (°C) ^a	Td ₅₀ (°C) ^a	Bozunma Hızı ve Pik Maksimum Sıcaklığı ^b (%.dk ⁻¹ , °C)	600°C'deki kalıntı miktarı (%) ^a
Saf poliHIPE	375,30	415,3	18,44 (419,40 °C)	5,00
0.25CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	358,10	404,90	14,73 (410,80 °C)	2,70
0.50CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	385,40	420,00	16,91 (421,70 °C)	4,00
0.75CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	382,70	416,30	18,75 (417,90 °C)	5,30
1.00CTAB-SOL-HL(%1 surf.)	381,90	416,70	17,78 (418,40 °C)	6,00

^a TGA termogram eğrilerinden elde edilmiştir. ^b Türevsel termogramlardan elde edilmiştir.

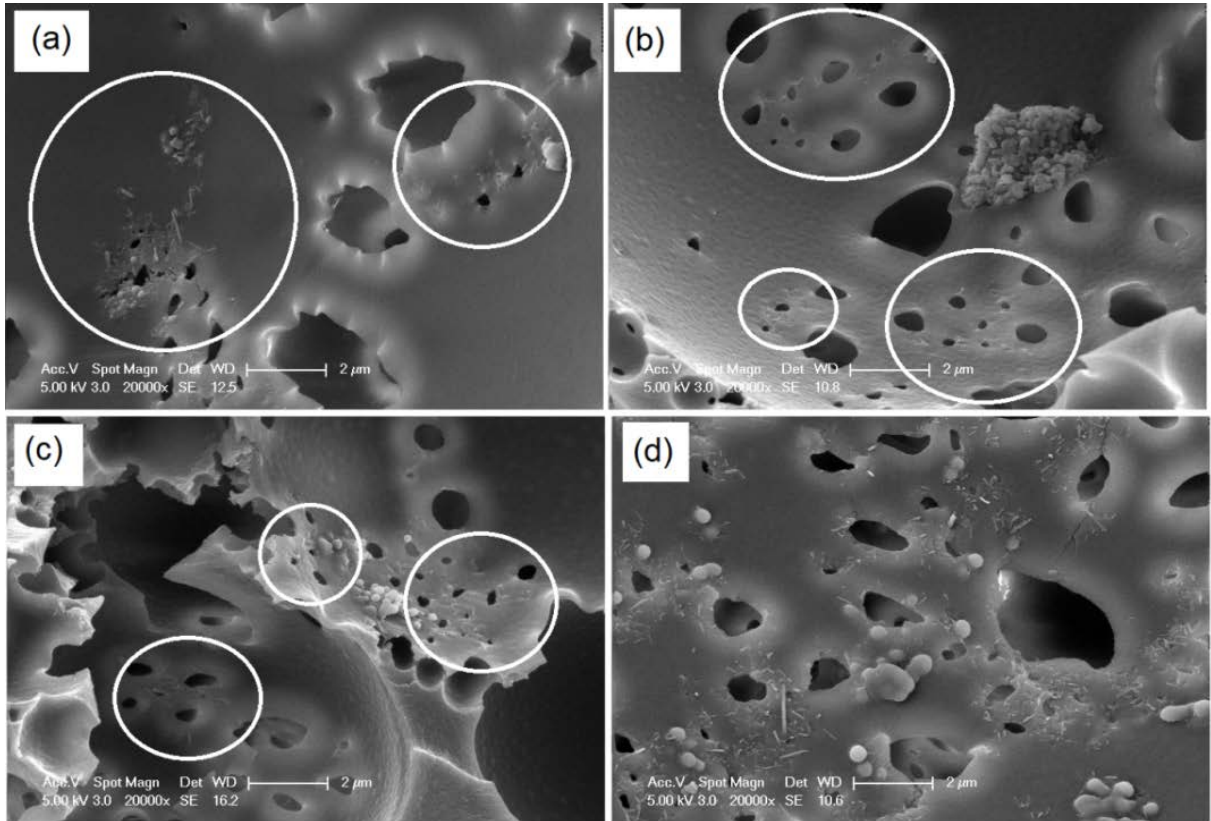
3.5 Saf PoliHIPE ve PoliHIPE Kompozitlerinin Boyar Madde Adsorpsiyon Kapasiteleri

Farklı oranlarda CTAB-SOL-HL dolgusu ile hacimce %1 surfaktan kullanılarak üretilen poliHIPE kompozitleri ve saf poliHIPE'nin boya adsorpsiyon kapasiteleri Şekil 13'te verilmiştir. Adsorpsiyon davranışları incelendiğinde, tüm CTAB-SOL-HL katkılı poliHIPE malzemelerinin, saf poliHIPE'ye (0,28 mg/g) kıyasla daha fazla boya adsorbe ettiği görülmüştür. En yüksek adsorpsiyon kapasitesi, %1.00 CTAB-SOL-HL kullanımı ile 0,55 mg/g değerinde bulunmuştur. %0,25, %0,50 ve %0,75 CTAB-SOL-HL dolgulama derecelerinde ise, sırasıyla 0,44 mg/g, 0,51 mg/g ve 0,35 mg/g adsorpsiyon kapasitelerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, adsorpsiyon performansının %0,75 dolgulama derecesi haricinde, CTAB-SOL-HL miktarı artışıyla arttığını göstermektedir. Muhtemelen heterojen dolgu dağılımı nedeniyle %0,75 dolgu oranı ile nispeten daha düşük bir değer elde edilmiştir ama bu değer, yine de saf poliHIPE'ye nazaran yüksektir. En yüksek dolgulama derecesinde (%1) elde edilen en yüksek adsorpsiyon kapasitesi ise, artan dolgu miktarı ile daha iyi bir nanotüp dağılımı sergileyen

1.00CTAB-SOL-HL(%1 surf.) (Şekil 14d) kompozitinde, HL yüzeyindeki polar fonksiyonlu grupların (Si-O-Si, Si-OH ve Al-OH), Nile Blue boyar maddesiyle daha fazla iyon-dipol ve dipol-dipol etkileşimleri kurmasına dayandırılabilir [18].



Şekil 13. %1 surfaktan içeren poliHIPE malzemelerinin boyar madde adsorpsiyon kapasiteleri



Şekil 14. %1 surfaktan içeren (a)%0,25 (b)%0,50 (c)%0,75 (d)%1,00 CTAB-SOL-HL dolgulı poliHIPE kompozitlerinde nanotüp dağılımını gösteren SEM görüntüleri (Mag: 20 000 x)

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, polistiren esaslı gözenekli polimerlerin Pickering emülsiyonlarından üretilmesinde surfaktan miktarını azaltmak amaçlı halosyt (HL) nanotüp kullanılmıştır. HL dolgusunun CTAB ile modifikasyonu çözeltide harmanlama yöntemiyle başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Hacimce %5 surfaktan ile kararlı hale gelebilen HL içermeyen saf HIPE'ye kıyasla, modifiye HL dolgusu içeren emülsiyonlarda stabilite sağlayan minimum gerekli surfaktan miktarı hacimce %1 olmuştur. CTAB-SOL-HL dolgu oranına bağlı olarak genellikle açık hücreli gözenekli kompozit malzemelerin oluştuğu ve bu hücrelerin birbirleriyle bağlantısını sağlayan gözenek geçitlerinin de var olduğu gözlemlenmiştir. CTAB-SOL-HL dolgusunun sabit miktarlarında azalan surfaktan konsantrasyonu, farklı boyutlarda gözeneklerin oluşmasına neden olmuştur. Diğer yandan, surfaktan miktarı sabit tutulup, nanotüp miktarı arttırıldığında, daha küçük gözenekler ve daha homojen boyut dağılımı elde edilmiştir. Modifiye HL nanotüplerin, birbirinden bağımsız olarak poliHIPE kompozit yapı içerisinde dağıldığı SEM görüntülerinden açıkça tespit edilmiştir. Gözenek yapısı bakımından çok daha küçük ve açık gözeneklere sahip ve en düşük surfaktan konsantrasyonu (%1) ile elde edilen 0,50CTAB-SOL-HL kompoziti, daha yüksek bozunma başlangıç sıcaklığı (Td10), Td50 ve maksimum kütle kaybı sıcaklığı değerleri ile termal kararlılığı en yüksek malzeme olarak belirlenmiştir. Sentezlenen poliHIPE malzemeleri için bir uygulama alanı olarak boya adsorpsiyon kapasiteleri araştırılmıştır. Saf poliHIPE ile karşılaştırıldığında, %1 surfaktan içeren tüm kompozit malzemelerin Nile Blue boyar maddesi için adsorpsiyon kapasiteleri daha yüksek bulunmuştur. En yüksek boya adsorpsiyon kapasitesi, sabit %1 surfaktan varlığında, %1.00 CTAB-SOL-HL kullanımı ile 0.55 mg/g olarak elde edilmiştir ki bu değer saf poliHIPE'nin adsorpsiyon performansının yaklaşık iki katıdır. Sonuç olarak, poliHIPE gözenekli malzemelerin üretiminde HL silika nanotüplerin varlığı, daha düşük bir surfaktan varlığında emülsiyon kararlılığını sağlamaya yardımcı olmuş hem de ısıl kararlılıklarının artmasını sağlarken, içerdiği reseptör polar gruplarla boyar madde adsorpsiyon uygulamasında da yüksek bir performans sergilemiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 2015/D/061 numaralı Yalova Üniversitesi BAPKO Lisansüstü Tez projesi kapsamında desteklenmiştir.

YAZAR BEYANLARI

Bu makalenin ortak yazarı olan Sinan Şen, JIENS dergisinin Alan Editörleri ve Yayın Kurulu Üyesidir. Bu durum hakemlik sürecini etkilememiştir. Sinan Şen, dergiye makale gönderimi haricinde, makalenin hakem seçimi, değerlendirilmesi ve kabulü süreçleri üzerinde etkisi yoktur. Yazarlar başka bir çıkar çatışması beyan etmemiştir.

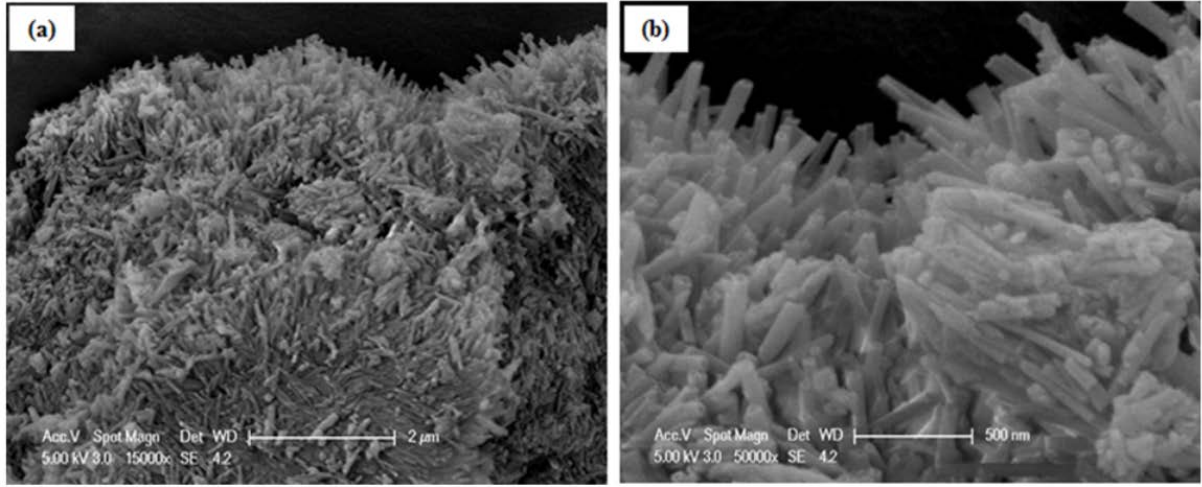
KAYNAKLAR

1. Lissant KJ, Peace BW, Wu SH, Mayhan KG (1974) Structure of high-internal-phase-ratio emulsions. J. Colloid Interface Sci. 47:416-423. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(74\)90273-2](https://doi.org/10.1016/0021-9797(74)90273-2)

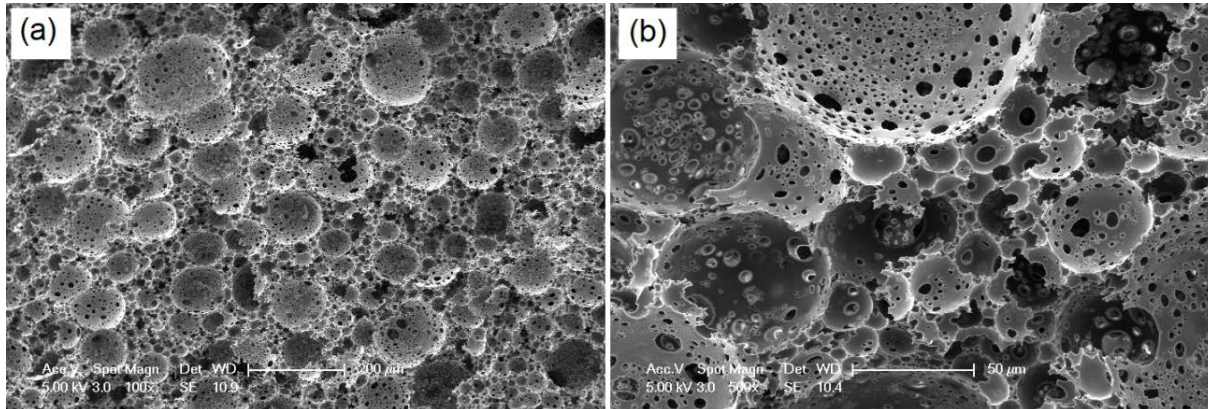
2. Menner A, Ikem V, Salgueiro M, Shaffer, MS, Bismarck A (2007) High internal phase emulsion templates solely stabilised by functionalised titania nanoparticles. *Chemical Communications* 41: 4274-4276. <https://doi.org/10.1039/B708935J>
3. Ikem VO, Menner A, Bismarck A (2008) High internal phase emulsions stabilized solely by functionalized silica particles. *Angewandte Chemie International Edition* 47(43):8277-8279. <https://doi.org/10.1002/anie.200802244>
4. Song X, Zhao Y, Wang H, Du Q (2009) Fabrication of polymer microspheres using titania as a photocatalyst and Pickering stabilizer. *Langmuir* 25(8): 4443-4449. <https://doi.org/10.1021/la8039237>
5. Silverstein MS (2014) PolyHIPEs: Recent advances in emulsion-templated porous polymers. *Progress in Polymer Science* 39(1):199-234. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.07.003>
6. Cui, Threlfall M, van Duijneveldt JS (2011) Optimizing organoclay stabilized Pickering emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science* 356(2):665-671. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.01.046>
7. Hermant MC, Klumperman B, Koning CE (2009) Conductive Pickering-poly (high internal phase emulsion) composite foams prepared with low loadings of single-walled carbon nanotubes. *Chemical communications* 19:2738-2740. <https://doi.org/10.1039/B820638D>
8. Ikem VO, Menner A, Horozov TS, Bismarck A (2010) Highly permeable macroporous polymers synthesized from pickering medium and high internal phase emulsion templates. *Advanced Materials* 22(32):3588-3592. <https://doi.org/10.1002/adma.201000729>
9. Abbasian Z, Moghbeli MR (2011) Preparation of highly open porous styrene/acrylonitrile and styrene/acrylonitrile/organoclay polymerized high internal phase emulsion (PolyHIPE) foams via emulsion templating. *Journal of Applied Polymer Science* 119(6):3728-3738. <https://doi.org/10.1002/app.33086>
10. Yang Y, Wei Z, Wang C, Tong Z (2013) Lignin-based Pickering HIPEs for macroporous foams and their enhanced adsorption of copper (II) ions. *Chemical Communications* 49(64): 7144-7146. <https://doi.org/10.1039/C3CC42270D>
11. Alikhani M, Moghbeli MR (2014) Ion-exchange polyHIPE type membrane for removing nitrate ions: preparation, characterization, kinetics and adsorption studies. *Chemical Engineering Journal* 239: 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.11.013>
12. Rawtani D, Agrawal YK (2012) Multifarious applications of halloysite nanotubes: a review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 30(3): 282-295.
13. Kamble R, Ghag M, Gaikawad S, Panda B K (2012) Halloysite nanotubes and applications: a review. *Journal of Advanced Scientific Research* 3(02): 25-29.
14. Chen H, Zhao J, Wu J, Yan H (2014) Selective desorption characteristics of halloysite nanotubes for anionic azo dyes. *RSC Advances* 4(30):15389-15393. <https://doi.org/10.1039/C3RA47561A>
15. Tekay E, Nugay N, Nugay T, Şen S (2019) Revolution/rotation-type mixing-assisted masterbatch process for polypropylene-based high-impact ternary nanocomposites. *Polymer Composites* 40(1): 24-36. <https://doi.org/10.1002/pc.24592>
16. Mert HH, Şen S (2016) Synthesis and characterization of polyHIPE composites containing halloysite nanotubes. *e-Polymers* 16(6): 419-428. <https://doi.org/10.1515/epoly-2016-0175>
17. Menner A, Verdejo R, Shaffer M, Bismarck A (2007) Particle-stabilized surfactant-free medium internal phase emulsions as templates for porous nanocomposite materials: poly-pickering-foams. *Langmuir* 23(5): 2398-2403. <https://doi.org/10.1021/la062712u>
18. Palantöken S, Tekay E, Şen S, Nugay T, Nugay N (2016) A novel nonchemical approach to the expansion of halloysite nanotubes and their uses in chitosan composite hydrogels for broad-spectrum dye adsorption capacity. *Polymer Composites* 37(9): 2770-2781. <https://doi.org/10.1002/pc.23473>
19. Tekay E, Şen S (2022) High strength, tough/damping and creep resistant EVA/HNT nanocomposites via help of EVA-g-MA compatibilizer. *Journal of Composite Materials* 56(19): 2951-2962. <https://doi.org/10.1177/00219983221107829>

EKLER

EK A



Şekil A1. Saf HL nanodolgununun (a) düşük ve (b) yüksek magnifikasyondaki SEM görüntüleri [16]



Şekil A2. Saf poliHIPE malzemesinin (a) düşük ve (b) yüksek magnifikasyondaki SEM görüntüleri [16]



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Assessing the reliability of the lightweight deflectometer test for compaction control in highway subbase layers through SPSS analysis

Mehmet Tevfik Seferoğlu^{*a}, Ayşegül Güneş Seferoğlu^a, Muhammet Vefa Akpınar^b Divine Iribagiza^a

^aGümüşhane University, Department of Civil Engineering, Engineering and Natural Sciences Faculty, 29100, Gümüşhane/Türkiye

^bKaradeniz Technical University, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, 61080, Trabzon/Türkiye

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 October 2024

Received in revised form 2 December 2024

Accepted 10 December 2024

Available online

Keywords:

Nuclear density gauge (NDG)

Lightweight deflectometer (LWD)

Compaction control

Stiffness modulus

SPSS analysis

ABSTRACT

The condition of the highway base/subbase layers is critical for the durability and performance of the road pavement. Compaction control plays an important role in determining the ability of these layers to support traffic loads, their strength and stability. Various methods are used to evaluate the compaction rate of subbase layers; such as nuclear density gauge (NDG) and sand cone. These methods also have their own limitations and difficulties. While the NDG test is used to determine the compaction percentages, the lightweight deflectometer (LWD) test is used as a relatively more practical, portable and non-destructive method to measure the surface stiffness modulus (E_{mod}). In this study, the possibility of using the surface stiffness modulus obtained by the LWD test in the subbase layer instead of each other is investigated by establishing a correlation between the compaction percentages determined by the NDG test. To investigate how well the LWD results are in line with established methods, only correlation and regression analysis of SPSS software are focused on. Correlation analysis helped us assess the strength and direction of the relationships between LWD modulus values and compaction percentages, while regression analysis provided insights into the predictive capability of LWD in estimating compaction outcomes. These methods helped evaluate the reliability and accuracy of LWD as a compaction control tool, providing a deeper understanding of the role of LWD in highway subbase layer assessment.

I. INTRODUCTION

The long-term performance and structural integrity of roads depend largely on the quality of the underlying base/subbase layers. These layers must be sufficiently compacted to withstand the setbacks caused by traffic and to provide the necessary support and stability. It is important to achieve optimum compaction, as inadequate compaction can lead to premature road damage, increased maintenance costs and potential safety hazards. Various methods are used to determine the compaction percentages of highway pavement layers. For example; nuclear density gauge (NDG), sand cone, etc. However, these methods are time consuming, costly and in some cases can cause delays in the construction process.

Recently, lightweight deflectometer (LWD) testing has emerged as an extremely easy-to-apply and non-destructive tool for in-situ evaluation of the stiffness of granular soils. In addition, LWD is a more portable, faster and real-time alternative to measuring soil flexibility compared to traditional methods. Despite the many benefits provided by this method, it is known that the measurements obtained can be affected by the physical condition of the surface and the measurement depth is limited. In this respect, the LWD test is more suitable for soils that are well compacted and whose surface is smooth enough. The surface irregularities and heterogeneity of the tested soil can negatively affect the accuracy of LWD data.

*Mehmet Tevfik Seferoğlu. Tel.: +90-530-406-2462; e-mail: mtseferoglu@gumushane.edu.tr

LWD is used to determine the stiffness modulus (E_{mod} , E_{LWD}) to provide design and performance characteristics of highways, and it can also predict the behavior of the road structure under load by integrating the measurement data into mechanical-empirical formulas. The LWD testing is a very powerful method for determining the E_{mod} in the evaluation of compacted pavement layer performance [1].

NDG is a non-destructive testing method used to determine the soil compaction percentage by obtaining soil density (maximum dry unit weight) and water content. NDG testing should not be used if the content of large size (>37.5 mm) material in the mixture is more than 20% by mass [2]. NDG test is applied on soil, aggregate, asphalt and concrete layers with a depth of up to 30 cm [3]. This test method is not applicable to clean gravel or clean crushed rock due to excessive surface voids which have the potential to affect gauge measurements [4]. Although it provides highly accurate results, difficulties in practice may arise due to the requirements for the use of radioactive materials and the need for trained operators and licenses. These issues make LWD a suitable alternative in road construction works where time and accuracy are critical.

The relationship between LWD and NDG test results has been investigated by some researchers. The LWD and NDG results are closely related in obtaining the compaction percentages of granular soils [5]. The LWD provides sufficiently accurate results for quality control, even if there are minor differences between the stiffness modulus obtained from LWD and other traditional methods [6]. The data obtained from LWD and also standard density tests and concluded that LWD can be used instead of NDG testing, especially in many large-scale road construction projects, due to its simpler and faster operation [7]. The LWD is a useful method for assessing the compaction quality of unbound soils, but the accurate measurement depth is usually shallower than NDG [8].

The soil E_{mod} determined by LWD may differ due to various reasons such as layer thickness, soil type, granulometry, water content and location. Also explored the correlation between FWD and LWD results, obtaining an R^2 value between 0.5 and 0.9 [9]. In a study conducted by Singh et al. (2010), the relationships between dry unit weight and LWD deflection are investigated. It is observed that as the dry density increased, the dynamic modulus of the soil also increased. However, they did not report the correlation coefficient between the values [10]. Rahman et al. (2008) reported that there is no correlation among the California bearing ratio (CBR), falling weight deflectometer (FWD), LWD and dynamic cone penetrometer (DCP) testing devices used on Kansas highway pavements. They discussed the concept of influence depth related to the LWD, stating that this instrument is effective at depths ranging from 24 to 28 cm [11]. Livneh and Goldberg (2001) noted that the results obtained from the FWD instrument are 2.5 to 3.3 times higher than those obtained from the LWD device for the same area [12]. Steinert et al. (2005) determined a correlation coefficient between the compaction percentages of the subgrade and the results obtained from the LWD, revealing an R^2 value ranging from 0.1 to 0.5. This suggests that the relationship is quite weak [13].

As a result, the increasing body of literature supports the adoption of the LWD as a reliable tool for compaction control in highway construction. While NDG and other traditional destructive tests continue to be important, the rapidity, portability, and non-destructive nature of LWD make it a good alternative. Further research into the correlation between LWD and NDG results will play a significant role in shaping standards for LWD compaction control, potentially leading to wider acceptance of LWD in road construction projects.

In this study, SPSS analysis is used to examine the relationship between LWD measurements and a traditional compaction control method (NDG). Among the various analytical tools available in SPSS, only correlation

analysis and regression analysis are focused on to explore how well LWD results align with the established methods. Correlation analysis helped us assess the strength and direction of the relationships between LWD modulus values and compaction percentages, while regression analysis provided insights into the predictive capability of LWD in estimating compaction outcomes. These methods helped in evaluating the reliability and accuracy of LWD as a compaction control tool, offering a deeper understanding of LWD role in highway subbase layer assessment.

II. EXPERIMENTAL METHOD

A 25 cm-thick plant-mix subbase (PMSB) type-B layer, which is laid on a 5 m wide strip of a highway with a 10 m platform width on a section between 65²⁰⁰-96⁰⁰⁰ km of the Trabzon-Kürtün (Gümüşhane) highway, is selected as the study area. Aggregates of three different grain size groups, (19-50 mm), (7-19 mm) and (0-7 mm) produced in the quarry, are used for the subbase layer.

The LWD and NDG tests are carried out respectively on fifteen different measuring points on the study area, with 2.5 m between them (Fig. 1). Thus, a comprehensive data set is obtained in order to compare the results of both methods. The stiffness modulus value of the subbase layer at determined points is evaluated with the LWD test, and its density is evaluated with NDG.

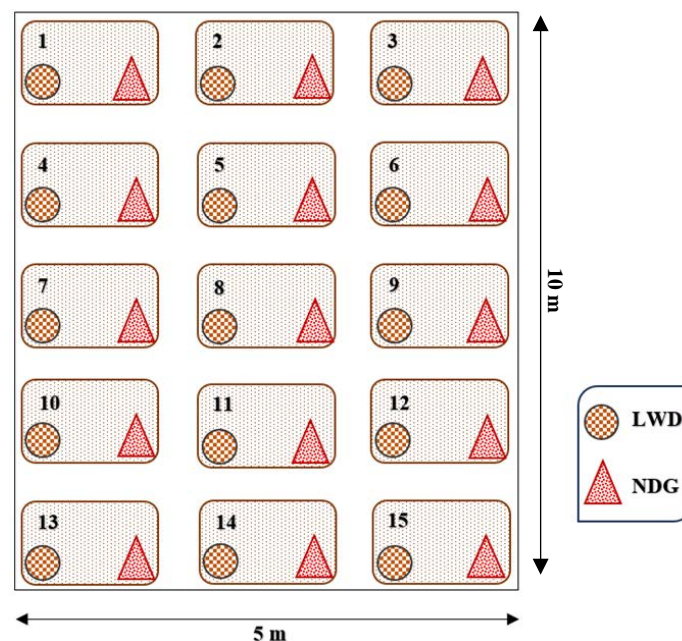


Figure 1. The LWD and NDG measurement points

2.1 Lightweight Deflectometer (LWD) Test

LWD is a portable test method used to evaluate the stiffness of soil and unbound pavement layers in road construction. It works by dropping a known weight onto a loading plate placed on the surface of the material to be tested, creating a force that causes deflection on the surface. This deflection is measured by sensors, and from

these measurements, the device calculates the material's stiffness modulus (E_{mod} , E_{LWD}). The E_{mod} indicates the material's stiffness, which is critical in assessing whether a compacted layer meets the required strength for construction.

In this study, LWD test is carried out according to ASTM 2583 to determine the stiffness of PMSB [14]. In test, falling mass is 10 kg, the diameter of the loading plate is 300 mm. After the LWD device is placed on the surface of the subbase layer, the depth-dependent stiffness values are automatically measured by this device for the subbase surface and for depths of 5, 10 and 15 cm.

2.2 Nuclear Density Gauge (NDG) Test

The NDG test is a non-destructive method used for controlling soil compaction in the field. NDGs take measurements using a radioactive isotope source placed either on the soil surface or within the ground. The isotope source emits photons (gamma rays) that are detected by sensors in the measurement device's lower unit. Dense soils absorb more radiation than loose soils and the readings reflect the overall density. Additionally, moisture content can be measured within a few minutes, as the gamma rays are absorbed by both water and soil. Denser soils and those with higher water content absorb more gamma rays. The NDG testing can be applied at depths ranging from 5 to 37.5 cm. In this study NDG test is carried out according to ASTM D 6938-23 [4].

2.3 Device Positioning

Measurements are conducted on a single 5 m wide lane of the road, which has an approximate platform width of 10 m. A total of fifteen measurement points is created with a distance of 2.5 m between them in both directions. (Fig. 2). At these marked fifteen measuring points, first the LWD test is performed and then measurements are taken with NDG.



Figure 2. Study area (a) Measuring points (b) Positioning of measuring instruments

2.4 Statistical Analysis

Data obtained from the LWD and NDG experimental tests conducted on the study area are subjected to a statistical analysis using SPSS software. The analysis focused on determining the correlations, regression patterns and

variances between the results obtained from the tests and provided a detailed comparison of their effectiveness in measuring compaction on a well-compacted road subbase section. Thus, the relationships between the methods are determined and an evaluation is made whether these tests could be used interchangeably in the field.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Results Related to Subbase Layer

A set of test results related to the relevant subbase layer aggregates and the criteria of the Türkiye Department of Transportation (TürkiyeDOT) Technical Specifications [15] are shown in Table 1

Table 1. Aggregate test results and specification criteria

Tests	Test results	Specifications
Resistance to Weather Effects (%)	2.4	< 20
Abrasion Loss (%)	22.0	< 50
Flatness Index (%)	13.0	< 40
Liquid Limit	N.P.	< 25
Plasticity Index	N.P.	< 6

The data obtained from the sieve analysis tests performed on the aggregates are determined as design granulometry. The design gradation values remained within the limits specified in the TürkiyeDOT Technical Specification for plant-mix subbase (PMSB) type-B. The maximum aggregate grain size is 50 mm as specified in the TürkiyeDOT Technical Specification for PMSB type-B [15]. The design granulometry of PMSB type-B and the lower and upper limits of the specification are shown in Fig. 3.

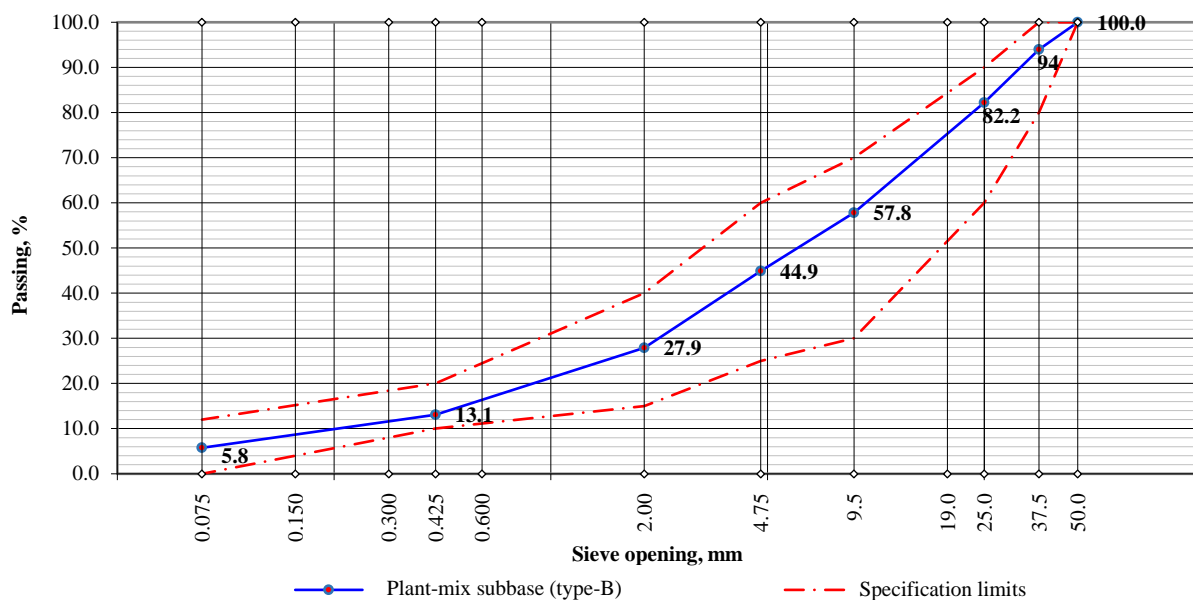


Figure 3. PMSB type-B mixture grain size distribution curve and specification limits

The relationships between the maximum dry unit weight and optimum water content of the PMSB layer are determined using the modified proctor method. Additionally, the soaked CBR values of the samples compacted with modified proctor energy are also determined, and the results are presented in Table 2.

Table 2. Modified proctor and soaked CBR test results

Modified Proctor Test	Maximum dry unit weight (ton/m^3)	2.254
	Optimum water content (%)	4.35
Soaked CBR Test	CBR (%)	120

The minimum soaked CBR value criterion of 50% for PMSB type-B, as specified in the specification [15], is comfortably exceeded at 120%. PMSB type-B is compacted to at least 98% of the maximum dry unit weight, based on the aggregate design gradation within the specified tolerance limits.

3.2 Results Related to LWD and NDG

The road section in the study area is well compacted, with nuclear test results indicating an average compaction level of 99%. Across the test points, minimal variation is observed in compaction, with values ranging from 98% to 100%. The average water content from the NDG tests is 5%, signifying uniformity in moisture distribution. When analyzing the regression and correlation values between the E_{LWD} and NDG compaction percentage at different depths, it's important to focus on the strength and direction of the relationships.

The E_{mod} values obtained from LWD and NDG tests are shown in Fig. 4. The correlation coefficient obtained by the SPSS analysis from the distribution graph in Fig. 4 is determined as -0.465.

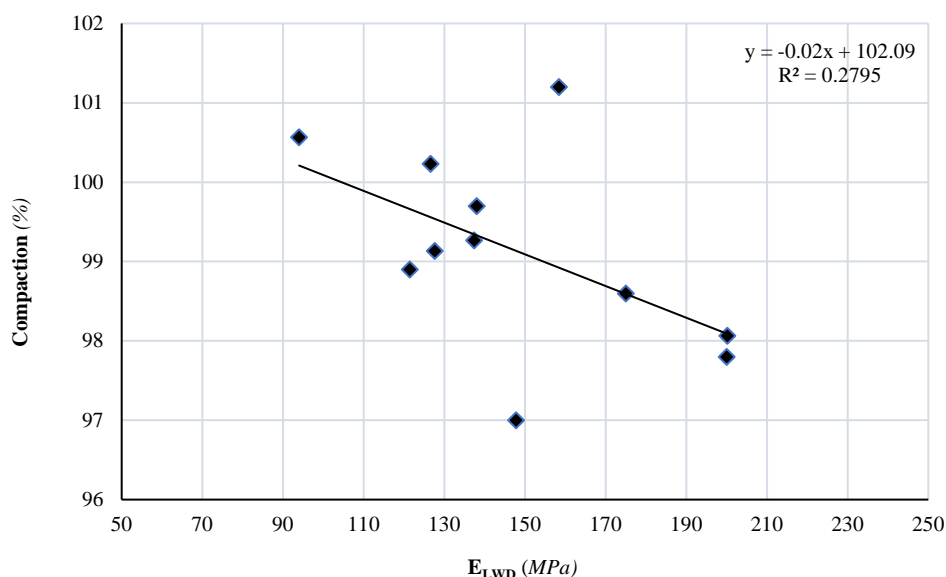


Figure 4. The regression analysis between LWD and NDG results at the surface level

Fig. 5 provides a comparison of the E_{mod} values obtained from the LWD and the compaction percentages recorded by the NDG at a depth of 5 cm below the surface. The distribution graph generated from the SPSS analysis, illustrated in Fig. 5, reveals a correlation coefficient of 0.245836.

Fig. 6 offers a comprehensive comparison of the E_{mod} values obtained from the LWD and the compaction percentages measured by the NDG at a depth of 10 cm beneath the surface. The distribution graph produced from the SPSS analysis, depicted in Fig. 6, demonstrates a correlation coefficient of -0.05688.

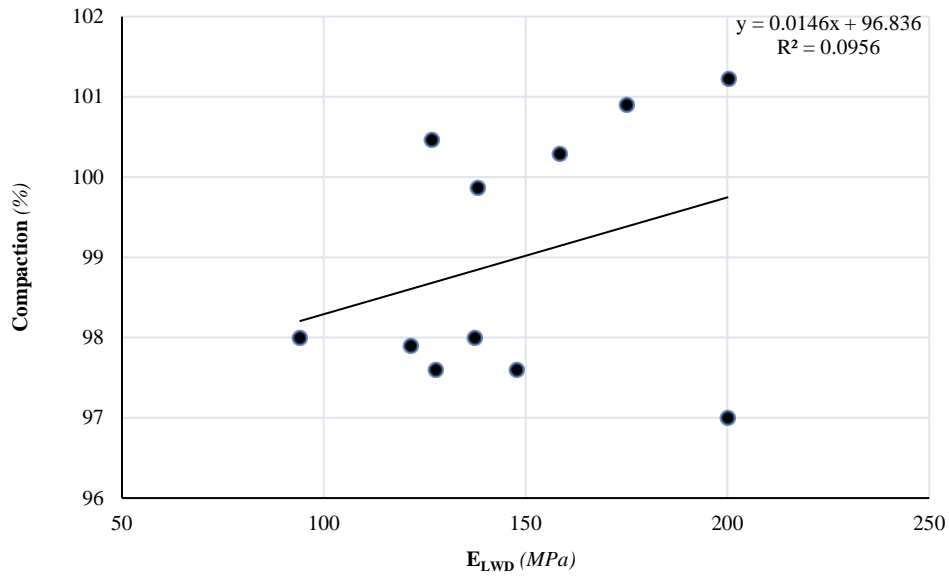


Figure 5. The regression analysis between LWD and NDG results at a depth of 5 cm

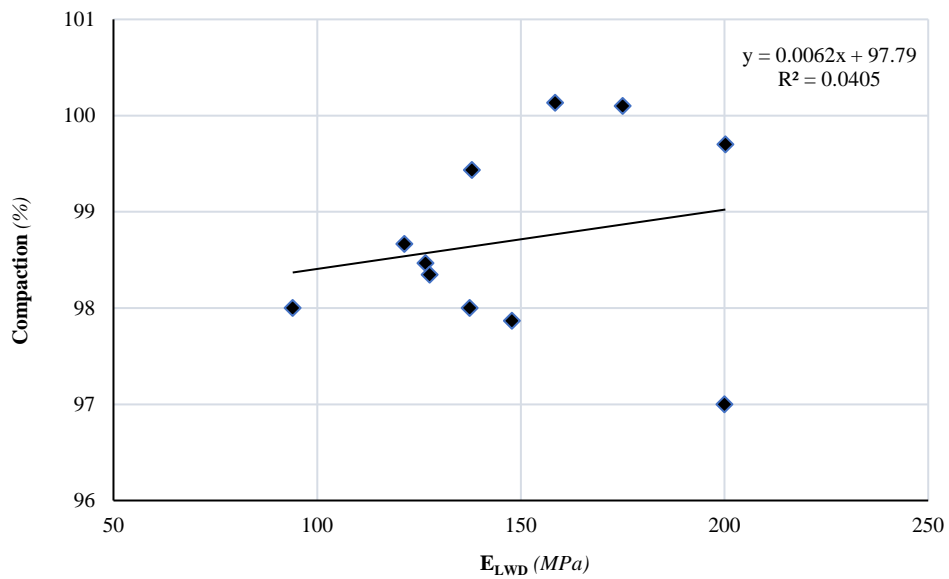


Figure 6. The regression analysis between LWD and NDG results at a depth of 10 cm

Fig. 7 presents a comparison of the E_{mod} values derived from the LWD and the compaction percentages obtained from the NDG at a depth of 15 cm below the surface. The distribution graph generated from the SPSS analysis, illustrated in Fig. 7, reveals a correlation coefficient of 0.196679.

As seen above from Fig. 4, starting from the surface, ground level, the negative correlation (-0.465) suggests that as the E_{LWD} increases, the compaction percentage measured by NDG tends to decrease slightly at the surface. The regression value also indicates a weak relationship between the two variables. This might imply some discrepancy or inconsistency between the two methods at this shallow level, possibly due to surface irregularities or environmental factors affecting the LWD readings.

The positive correlation (0.245836) in Fig. 5 suggests a weak but direct relationship between the E_{LWD} and NDG compaction, meaning as one increase, so does the other. The low regression coefficient indicates the relationship is not strong, but it is positive compared to the surface level.

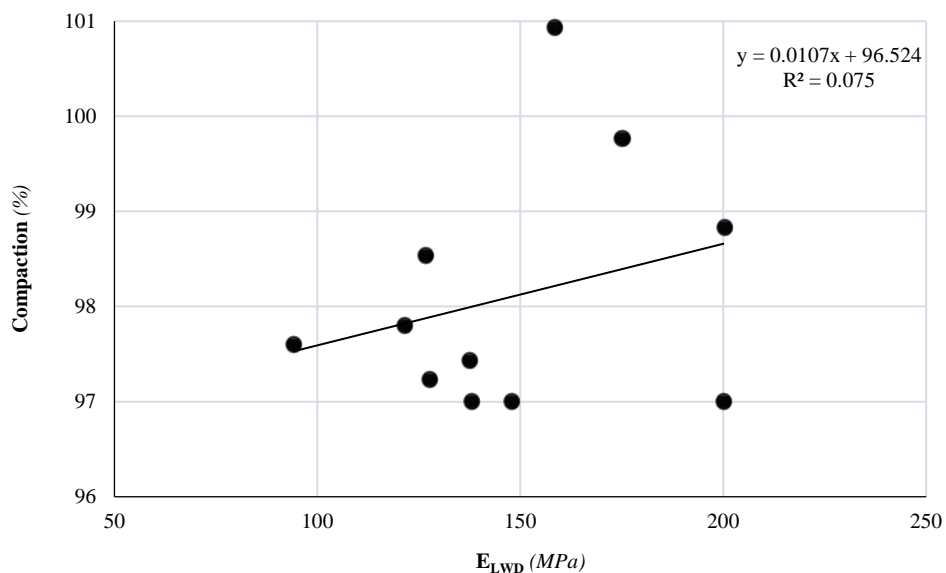


Figure 7. The regression analysis between LWD and NDG results at a depth of 15 cm

For Fig. 6 at 10 cm of depth both the regression and correlation values are very close to zero (-0.05688), indicating almost no relationship between the E_{LWD} and NDG compaction at this depth. This could suggest that at this depth, the two methods are measuring different characteristics, or the accuracy of one or both methods decreases with increasing depths.

Although the correlation remains weak at 15 cm of depth, it is positive, suggesting a minor direct relationship between E_{LWD} and NDG compaction at this depth. The low regression value still implies that the LWD and NDG do not strongly align at deeper levels, though the relationship improves slightly compared to the 10 cm depth.

From the surface, 5 cm, 10 cm and 15 cm of depth, the results indicate that the correlation between LWD and NDG varies with depth, being weakest at 10 cm and slightly improving at 15 cm. The discrepancies at the surface may be due to factors such as surface roughness or external influences affecting LWD readings, while the deeper

measurements show weak to moderate positive relationships. This suggests that LWD results can may not always correlate perfectly with NDG results, especially at near-surface depths.

Considering that the correlation coefficient between LWD and compression range in the study of Steinert et al. (2005) [13] is between 0.1-0.5, which they describe as a weak relationship, it can be said that a low relationship has been established between NDG and LWD for all depths obtained from the study. More realistic results can be obtained in cases such as more precise control of the interface conditions on the contact surface of the LWD/NDG devices with the subbase layer. Since the LWD device takes measurements from a point location, the fact that the tip of the measuring tool comes to a different point such as a different aggregate, soil, or porous structure at each measurement point may also be the reason for the low correlation. It is thought that performing the tests under laboratory conditions on a completely homogeneous layer will increase the correlation between NDG and LWD.

IV. CONCLUSIONS

In this study LWD and NDG measurements are taken at fifteen different locations on a road section between Trabzon and Kürtün (Gümüşhane); on the surface, at depths of 5 cm, 10 cm and 15 cm from the surface. Regression and correlation analyses are performed in the SPSS program to examine the convergence of LWD and NDG tests on the results. As a result of the evaluation, it is seen that the measurement depth played a major role in the correlation between LWD and NDG.

The LWD measurements show weaker correlation and inconsistent regression trends with increasing depth compared to surface readings of NDG measurements. The decreasing regression coefficients and correlations with increasing depth (as low as 0.0032 for regression and -0.05688 for correlation at 10 cm) are consistent with previous studies [5] emphasizing the depth of surface influence.

The observed discrepancy between LWD and traditional methods such as NDG highlights the need for further calibration of LWD measurements, especially when applied to multilayered or complex superstructures. In addition, the weak statistical significance, as indicated by the p-values in both correlation and regression analyses, requires more comprehensive datasets to establish stronger relationships.

From a statistical point of view, according to SPSS analysis, although LWD provides useful information on surface hardness, its role in determining compaction quality at different depths remains unclear, which may affect its general usability in highway construction quality assurance programs.

Despite the statistical limitations, LWD remains a highly practical tool for field use. Its advantages, such as the elimination of radioactive materials and ease of transportation, cannot be ignored. However, the weak correlations observed in this study imply that LWD may need to be supplemented by other methods (e.g., Sand Cone or NDG) to ensure accurate compaction control, particularly in critical or high-load-bearing sections of road construction. Additionally, its utility may be more relevant for surface layer analysis, where it has demonstrated higher reliability.

Based on this research, in conclusion, even though LWD could still be useful as a complementary tool for surface-level assessments, especially given its speed and non-destructive nature, the statistical analysis shows that LWD offers limited accuracy in replicating the results of NDG tests, particularly at greater depths. While LWD's ease

of use and quick results make it a valuable tool in road construction, it cannot fully replace traditional methods in terms of depth-sensitive compaction control without further refinement and calibration. Thus, a hybrid approach, utilizing both LWD and traditional methods, may currently offer the best balance between practicality and accuracy in field compaction assessments.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Türkiye General Directorate of Highways (Project No: KGM-ARGE/2012-22).

REFERENCES

1. Jitarekul P, Sawangsuriya A, Singhatiraj P (2017) Integration of pavement layer evaluation using LWD for road safety control. *Procedia Engineering* 189:111-117. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.019>.
2. Technical Guide, L-G-002, Field density testing by using a nuclear density gauge. Transport, February 2015.
3. <https://www.utest.com.tr/tr/20348/nukleer-yogunluk-olcum-cihaz#:~:text=do%c4%9frudan%20iletim%20y%c3%b6ntemi%2030%20santime,asfalt%20ve%20beton%20tabakalar%c4%b1nda%20uygulan%c4%b1r>, accessed on 29.11.2024
4. ASTM D 6938-23 (2023) Standard test methods for in-place density and water content of soil and soil aggregate by nuclear methods (shallow depth). American Society for Testing and Materials, 1-11.
5. Fleming PR, Frost MW, Rogers CDF (2000) A comparison of devices for measuring the in-situ stiffness of highway foundation materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport* 141(2):67-72.
6. Jakubinek R, Horvat M (2012) Correlation between light weight deflectometer and traditional methods in road construction. *Journal of Pavement Engineering* 17(3):142-150.
7. Schmalz A, Wagner S, Koch T (2014) Evaluating the use of light weight deflectometers in road construction projects: A comparison with standard density tests. *Int J of Geotechnical Eng* 8(2):65-72.
8. Wu J, Xu Q, Li L (2013) Evaluation of lightweight deflectometer for compaction quality control of unbound granular base. *Int J of Pavement Eng* 14(4):358-367.
9. Fleming PR, Frost MW, Lambert JP (2007) Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of pavement material stiffness. *Transportation Research Record* 2004(1):80-87. <https://doi.org/10.3141/2004-09>
10. Singh N, Mejia C, Martison T, Shah F, Fleming C, Fitzpatrick J (2010) Use of the light weight deflectometer (LWD) at Highland Valley Copper Mine. *Proceedings from the 63rd Canadian Geotechnical Conference*, Alberta, Canada, 12-16.
11. Rahman F, Hossain M, Hunt MM, Romanoschi SA (2008) Soil stiffness evaluation for compaction control of cohesionless embankments. *Geotechnical Testing J*,31(5):442-451. <https://doi.org/10.1520/GTJ100971>
12. Livneh M, Goldberg Y (2001) Quality assessment during road formation and foundation construction: Use of falling-weight deflectometer and light drop weight. *Trans Res Rec: J of the Trans Res Board* 1755:69-77. <https://doi:10.3141/1755-08>
13. Steinert BC (2005) Field and laboratory evaluation of the portable falling weight deflectometer. *Electronic Theses and Dissertations*, <https://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/856>
14. ASTM E2583-07 (2020) Standard test method for measuring deflections with a light weight deflectometer (LWD). American Society for Testing and Materials, 1-3.
15. Türkiye Department of Transportation (TürkiyeDOT) (2013) Technical Specification, Ankara, Section 401, 1-6.



Comparative assessment of element types for evaluating local elastic buckling behavior of rectangular hollow sections using finite element analysis

Mehmet Akif Dundar^{a*}, Kazım Ercan^a and Osman Özenç^a

^aYozgat Bozok University, College of Engineering, Mechanical Engineering Department, 66100, Yozgat/Turkey

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 September 2024

Received in revised form 10 November 2024

Accepted 6 December 2024

Available online

Keywords:

Axial compression

Major axis bending

Minor axis bending

Local elastic buckling

Rectangular hollow sections (RHSs)

Element types

Finite element analysis

ABSTRACT

This study systematically evaluates the performance of conventional shell elements in Abaqus for predicting the local elastic buckling behavior of rectangular hollow sections (RHSs) under various loading conditions, including axial compression, major axis bending, and minor axis bending. Theoretical local buckling coefficients were first derived based on the cross-sectional dimensions of RHSs and used to calculate the critical local buckling stress for each loading scenario. Finite element analyses (FEA) were then performed using different shell element types, including four-node and eight-node elements, to assess their accuracy and computational efficiency. The results indicate that four-node shell elements (S4, S4R) offer a favorable balance of accuracy and significantly reduced computational time, making them the most efficient option. In contrast, eight-node elements (S8R, S8R5) provide marginally higher accuracy but require substantially longer computation times and have limited applicability. This study underscores the importance of selecting appropriate elements to achieve a balance between accuracy and efficiency, providing valuable guidance for engineers in structural design. By optimizing element selection for modeling local elastic buckling in RHSs, the research improves computational efficiency and supports the development of more reliable, cost-effective designs.

I. INTRODUCTION

The analysis of local buckling behavior in structural elements is a critical aspect of engineering design, especially for thin-walled structures such as rectangular hollow sections (RHSs) [1]. Local buckling significantly affects the load-bearing capacity and overall stability of these sections under various loading conditions, including axial compression and bending about both the major and minor axes [1-4]. Accurate prediction of local buckling behavior is essential to ensure the safety and performance of structures in diverse applications, ranging from civil engineering to aerospace and automotive industries. Finite element analysis (FEA) has become an indispensable tool for predicting the buckling behavior of structures [5-10]. Among the many FEA software available, Abaqus is widely recognized for its robust capabilities in handling complex structural [5, 7-17]. In Abaqus, various conventional shell element types are available, each offering different levels of computational accuracy and efficiency. These elements include the four-node shell elements S4 and S4R, and the eight-node reduced integration shell elements S8R and S8R5 [6, 18, 19].

The S4 element is a versatile four-node quadrilateral shell suitable for both thick and thin shells, capable of accommodating complex geometries, finite rotations, and membrane strains [6, 18-20]. The S4R, a reduced integration version of the S4, enhances computational efficiency and mitigates shear locking, making it ideal for large-scale models in industries such as automotive and aerospace [6, 9, 12, 19, 21]. The S4R5, using five degrees of freedom per node, accurately captures transverse shear deformation, benefiting thick-walled structures [19, 22,

*Corresponding author. Tel.: +90-544-463-4075; e-mail: m.akif.dundar@yobu.edu.tr

23]. The S8R, an eight-node quadrilateral shell with reduced integration, provides higher-order interpolation for accurately modeling curved geometries and high deformation gradients [19, 24-26]. The S8R5 combines this higher-order interpolation to better capture transverse shear effects, making it suitable for detailed analyses of thick shell structures [6, 7, 19, 27, 28]. These elements are selected based on a balance of computational efficiency and accuracy to meet specific simulation needs. Among the aforementioned conventional shell elements, only the S4 uses full integration; others employ reduced integration [19]. The S4, S4R, and S4R5 elements use linear interpolation, while the S8R and S8R5 elements employ quadratic shape functions. S4 and S4R are four-node, doubly-curved shells with six degrees of freedom per node (three translational and three rotational) [19]. The S4R5, also four-node, has five degrees of freedom (three translational and two in-plane rotational). The eight-node S8R uses reduced integration with six degrees of freedom per node, suitable for higher-order interpolation. The S8R5, another eight-node element, combines higher-order interpolation with five degrees of freedom per node, enhancing transverse shear effect modeling for thin shells [19].

The aforementioned element types have been widely employed by researchers in finite element analyses of local buckling behavior of structural members typically subjected to axial compression [6, 18, 21, 24, 28–37]. The literature review revealed that the S4 and S4R elements are more commonly used in local buckling simulations. Their frequent use can be attributed to their optimal balance between computational efficiency and accuracy, making them highly suitable for diverse structural analysis applications [2, 3, 18, 21, 28, 31–33, 35, 38]. These elements apply thick shell theory when the shell thickness increases and transition to discrete Kirchhoff thin shell elements as the thickness decreases. A significant advantage of these two element types is their ability to account for variations in shell thickness [6]. However, studies have indicated that the S4 element, while achieving superior numerical convergence, demands more computational time compared to the S4R element [6]. Conversely, research has indicated that the S4R element yields results comparable to the S4 element but requires significantly less computational time. This difference in processing time is especially notable for large local buckling models, where memory requirements are a critical concern [18]. Additionally, studies have reported that the S4R5 element is not well-suited for finite strain problems [35]. A study reported that the S8R element, intended for thick shells with a thickness greater than 1/15 of the characteristic length, supports large arbitrary rotations but only small strains and ignores deformation in the thickness direction [6]. Moreover, the S8R5 element, although suitable for thin shells, can produce inaccurate buckling results due to the potential misalignment of the internally defined center node with the actual shell surface [6]. Additionally, these element types require significantly longer computational times, which further limits their practicality in certain applications.

Despite the availability of various shell elements, comprehensive studies comparing their performance specifically in the context of local elastic buckling of RHS under different loading conditions are lacking. Such a comparative study is crucial to understand the trade-offs between computational efficiency and accuracy, guiding engineers and researchers in selecting the most appropriate element types for their applications.

Thus, this study aims to evaluate the computational accuracy and efficiency of the aforementioned conventional shell element types in Abaqus for modeling the local elastic buckling behavior of RHS under axial compression, major axis bending, and minor axis bending. By conducting detailed simulations and comparing the results with theoretical predictions, this study endeavors to identify the most suitable element types for accurate and efficient simulation of local elastic buckling phenomena. The outcomes of this research will provide valuable insights for

the engineering community, aiding in the optimization of structural designs and contributing to the advancement of computational mechanics.

II. THEORETICAL BACKGROUND AND CALCULATIONS

1. Theory

The critical local elastic buckling stress (σ_{cr}) for box sections under any type of loading can be determined using the well-known formula written below [1, 5, 38-40].

$$\sigma_{cr} = k_{\sigma} \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{d}\right)^2 \tag{1}$$

where k_{σ} is the local elastic buckling coefficient and E is the elastic modulus. ν represents the Poisson's ratio. d is the width or height of the relevant wall segment of a box section and t denotes the thickness of the relevant wall segment.

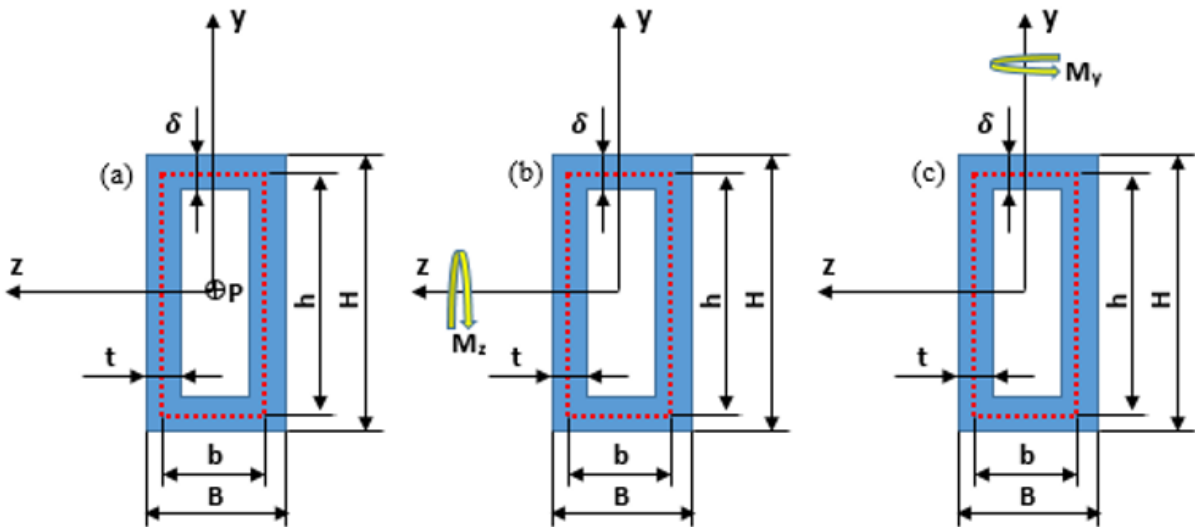


Figure 1. A cross-section of RHS under various loads, (a) Axial compression (P), (b) Major axis bending (M_z) and (c) Minor axis bending (M_y)

Eq. (1) can be rearranged for the RHS depicted in Figure 1, as follows:

$$\sigma_{cr} = k_w \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{h}\right)^2 = k_f \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{\delta}{b}\right)^2 \tag{2}$$

where k_w and k_f are the local elastic buckling coefficients for the web and flange segments of the section, respectively. t and δ represent the thickness of the web and flange segments, respectively. b and h are the mid-

line width and mid-line height of the section, respectively. These two parameters (b and h) can be identified as given below.

$$b = B - t \text{ and } h = H - \delta \quad (3)$$

where H is the height of the RHS and B is the width, as demonstrated in Figure 1. Solving the equality given in Eq. (2) yields the following expression, which relates the local elastic buckling coefficient of the flange segment to that of the web segment [39, 41].

$$k_f = k_w \left(\frac{b}{h}\right)^2 \left(\frac{t}{\delta}\right)^2 \quad (4)$$

When $t = \delta$, Eq. (4) further reduces to

$$k_f = k_w \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (5)$$

Eq. (2) is rearranged to highlight its simplification as follows:

$$\sigma_{cr} = k_w \cdot n \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2 \text{ or } \sigma_{cr} = k_f \cdot n \cdot \left(\frac{\delta}{b}\right)^2 \quad (6)$$

Here, n is the notation and represents $n = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}$.

The local elastic buckling coefficients, k_w and k_f , are essential in determining the critical local elastic buckling stress. The accuracy of σ_{cr} is heavily dependent on the precise value of the relevant coefficients, highlighting the necessity of a thorough understanding of this parameter. Despite its importance, limited studies [39–41] specifically address the determination of the buckling coefficients, which is affected by boundary conditions, the main dimensions of the box section, and loading types, such as axial compression, major axis bending, minor axis bending, and biaxial bending.

A noteworthy study developed an analytical expression for calculating the local elastic buckling coefficient of a box section under axial compression (Figure 1a) with simply supported boundary conditions [40]. This study introduced two specific buckling coefficients: k_w for the web segment and k_f for the flange segment, both critical for accurately predicting the local buckling behavior.

The local elastic buckling coefficient for the flange segment of the RHS subjected to axial compression (Figure 1a) can be calculated using the following expression [40].

$$k_f = \frac{4}{\left(\frac{h}{b}\right)^{1.7}} \quad (7)$$

Similarly, the local elastic buckling coefficient for the web segment of the RHS under major axis bending (Figure 1b) can be calculated using the following formula [40].

$$\frac{1}{k_w} = \frac{0.19}{(h/b)^3} + 0.03 \quad (8)$$

Furthermore, the local elastic buckling coefficient for the flange segment of the RHS under minor axis bending (Figure 1c) can be specified using the following expression [40].

$$k_f = \frac{5.5}{(h/b)^2} \quad (9)$$

Emphasizing here, the formulas presented in Eqs. (7) – (9), are applicable exclusively to box sections possessing equal wall segment thicknesses [2, 5, 38–40]. Given Eq. (5), knowing one of the relevant buckling coefficients implies that the other is also known.

The critical local elastic buckling load of axially compressed RHS can be determined using the formula written below [40].

$$P_{cr} = \sigma_{cr} \cdot A_g \quad (10)$$

where A_g is the gross cross-sectional area of the RHS and can be calculated as follows:

$$A_g = H \times B - (H - 2\delta)(B - 2t) \quad (11)$$

The critical local elastic moment of the RHS under major axis bending can also be determined by the expression given below [40].

$$M_{cr,major} = \sigma_{cr} \cdot w_z \quad (12)$$

Herein, w_z is the section modulus of the RHS about the z- axis (strong axis), illustrated in (Figure 1b), and can be determined as follows [38, 40]:

$$w_z = \frac{BH^2}{6} \left[1 - \left(1 - \frac{2t}{B} \right) \left(1 - \frac{2\delta}{H} \right)^3 \right] \quad (13)$$

In the same manner, the critical local elastic moment of the RHS under minor axis bending can be computed using the expression given below [2, 38, 40].

$$M_{cr_minor} = \sigma_{cr} \cdot w_y \quad (14)$$

where w_y is the section modulus about the y-axis (weak axis), depicted in Figure 1c, and can be defined by [38]:

$$w_y = \frac{HB^2}{6} \left[1 - \left(1 - \frac{2\delta}{H} \right) \left(1 - \frac{2t}{B} \right)^3 \right] \quad (15)$$

2. Calculations of the Critical Local Elastic Buckling Loads for RHS

This section addresses the determination of critical local buckling loads for axial compression, major axis bending, and minor axis bending of RHS with the geometric specifications documented in Table 1.

Table 1. The geometric specifications of the RHS addressed

Specimen	b (mm)	h (mm)	t = δ (mm)	L (mm)
RHS-20 x 40 x 1	20	40	1	200

Note that L in Table 1 represents the length of the RHS profile. Additionally, the RHS addressed in this study is assumed to be fabricated from S235 steel grade, with the corresponding material properties detailed in Table 2 [42].

Table 2. Material properties of S235 steel grade [42]

Material	E (GPa)	ν	σ _y (GPa)	σ _u (GPa)
S235	210	0.3	0.282	0.324

In Table 2, σ_y and σ_u denote the yield strength and ultimate strength of the RHS material, respectively.

Procedure for calculating critical local elastic buckling loads of the RHS under axial compression, major axis bending, and minor axis bending is as follows:

- Determine local elastic buckling coefficients:
 - For the flange segment: k_f using Eq. (7) for axial compression, Eq. (5) for major axis bending, and Eq. (9) for minor axis bending.
 - For the web segment: k_w using Eq. (5) for axial compression, Eq. (8) for major axis bending, and Eq. (5) for minor axis bending.
- Calculate the parameter n using material properties from Table 2 for all loading conditions.
- Calculate critical local elastic stress using Eq. (6) for all cases.

- Determine additional parameters:
 - Gross cross-sectional area using Eq. (11) for axial compression.
 - Section modulus about the z-axis (w_z) using Eq. (13) for major axis bending.
 - Section modulus about the y-axis (w_y) using Eq. (15) for minor axis bending.
- Calculate critical local elastic buckling loads/moments:
 - Using Eq. (10) for axial compression.
 - Using Eq. (12) for major axis bending.
 - Using Eq. (14) for minor axis bending.

Upon completing the outlined calculation steps, the results for the RHS subjected to axial compression, major axis bending, and minor axis bending are presented in Tables 3, 4, and 5, respectively.

Table 3. The critical local elastic buckling stress and corresponding bifurcation load of RHS under axial compression

Loading Type	k_f	k_w	n (GPa)	σ_{cr} (GPa)	A_g (mm ²)	P_{cr} (kN)
Axial Compression	1.231	4.924	189.8	0.584	120	70.08

Table 4. The critical local elastic buckling stress and corresponding bifurcation moment of the RHS under major axis bending

Loading Type	k_f	k_w	n (GPa)	σ_{cr} (GPa)	w_z (mm ³)	M_{cr_major} (kN.mm)
Major Axis Bending	4.651	18.604	189.8	2.207	1302	2873.5

Table 5. The critical local elastic buckling stress and corresponding bifurcation moment of the RHS under minor axis bending

Loading Type	k_f	k_w	n (GPa)	σ_{cr} (GPa)	w_y (mm ³)	M_{cr_minor} (kN.mm)
Minor Axis Bending	1.375	5.5	189.8	0.652	890.5	580.6

In essence, the critical local elastic buckling stresses and corresponding bifurcation loads of the RHS subjected to various types of loading, including axial compression, major axis bending, and minor axis bending, have been theoretically determined. The analytical expressions and procedures presented in this study can also be applied to determine the critical local elastic buckling stresses of RHSs with different h/b ratios under the aforementioned loading conditions.

III. FINITE ELEMENT PROCEDURE

To investigate the influence of different element types on the local elastic buckling behavior of rectangular hollow sections (RHS) under various loading conditions, a linear elastic eigenvalue buckling analysis was conducted. The RHS model was discretized using five distinct shell elements: S4, S4R, S4R5, S8R, and S8R5. This comprehensive analysis is crucial for understanding how each element type affects the accuracy and computational efficiency of predicting buckling behavior. By comparing these shell elements, the study aims to provide insights that will guide the selection of the most appropriate element type for various engineering applications, ensuring optimal performance and reliability in structural analysis and design.

In Abaqus, various conventional shell element types are designed to meet different modeling requirements with distinct advantages. The S4 is a four-node, doubly curved general-purpose shell element capable of handling finite membrane strains [6, 43-45]. This element type is versatile and suitable for complex geometries, providing reliable

results for both thick and thin shell applications. The S4R is a similar four-node element but features reduced integration with hourglass control, enhancing computational efficiency while also accommodating finite membrane strains [2, 8, 38, 44]. The reduced integration helps mitigate shear locking, making S4R ideal for large-scale models in industries such as automotive and aerospace. The S4R5, another four-node element, is optimized for thin shell applications, incorporating reduced integration, hourglass control, and five degrees of freedom per node to accurately capture transverse shear deformations [35, 37, 44, 45]. This makes the S4R5 particularly useful for detailed analyses of thick-walled structures.

The S8R is an eight-node, doubly curved thick shell element that employs reduced integration, making it suitable for thick shell applications [6, 26, 44]. It supports large arbitrary rotations but only small strains, and it ignores deformation in the thickness direction. Despite providing accurate results in specific scenarios, its applicability can be limited due to these characteristics. The S8R5, an eight-node thin shell element with reduced integration and five degrees of freedom per node, improves the accuracy of transverse shear effects. However, the potential misalignment of the internally defined center node with the actual shell surface can lead to inaccurate buckling results, particularly in thin shell applications [44, 46, 47].

Each element type offers a balance between computational efficiency and precision tailored to the specific needs of various simulations. The choice of element type is critical in ensuring the optimal performance of finite element models, particularly in large-scale or computationally intensive analyses. This study highlights the importance of understanding the strengths and limitations of each shell element type to make informed decisions in structural analysis and design.

Figure 2 illustrates the finite element models of the RHS, including loading and boundary conditions, as well as mesh configurations: Figure 2a presents the model for axial compression, while Figure 2b and Figure 2c depict the models for major axis bending and minor axis bending, respectively. Three distinct finite element models were developed for these loading cases. Reference points were established at the midpoints of both ends of the RHS and connected to the sections using kinematic couplings for axial compression and rigid body-pin constraints for major and minor axis bending, as per the methodologies described in [38, 48]. Separate simulations were conducted for each loading scenario to ensure accurate representation and validation of the finite element analysis. Kinematic couplings were used for axial compression because they allow the load to be uniformly distributed across the cross-section, ensuring a realistic simulation of axial load transmission. They are particularly useful for transmitting forces and moments to a structure without inducing artificial constraints that could alter the structural response [19]. On the other side of the coin, in major axis bending and minor axis bending simulations, rigid body constraints with pin nodes were deployed to enforce a rigid connection between the reference node and the nodes on the surface, allowing for rotational and translational movements relative to a specified point. This setup is beneficial for bending simulations because it accurately represents the boundary conditions where moments are applied, ensuring the load is correctly transmitted to induce bending about the desired [19].

For axial compression, a unit load was applied and transmitted to the RHS. In the cases of major axis and minor axis bending, a unit moment was applied to achieve the desired deformation. This setup ensures a comprehensive evaluation of the local buckling behavior under different loading conditions, thereby validating the accuracy and reliability of the finite element analysis. The detailed configurations and application of loads and constraints in the

models allow for precise simulation and insightful comparisons of the performance of various shell element types in Abaqus.

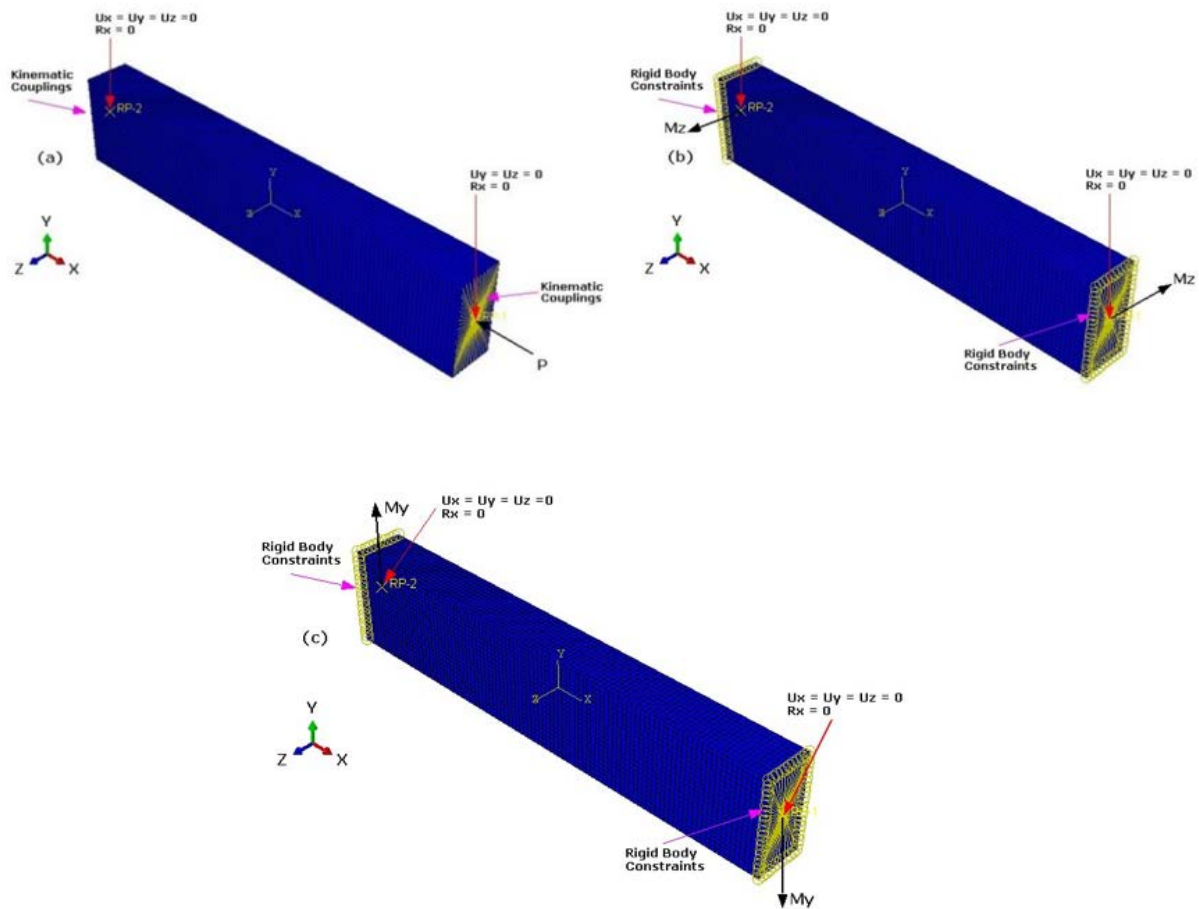


Figure 2. The finite element model of RHS under various loads, (a) Axial compression (P), (b) Major axis bending (M_z), and (c) Minor axis bending (M_y)

The elastic material properties, including the elastic modulus and Poisson's ratio documented in Table 2, were utilized in the simulations. The subspace iteration eigen-solver method was employed, with the number of vectors per iteration set to five. To ensure the accuracy and reliability of the finite element procedure, a mesh convergence analysis was conducted on the RHS under axial compression. The mesh was progressively refined until the results stabilized, demonstrating the model's consistency. As shown in Figure 3, convergence was achieved when the element size was reduced below 5 mm. Consequently, a mesh size of 2 mm was chosen for the entire RHS based on the mesh convergence study results. A total of 600 elements and 6060 nodes were used in the simulations, with each element meshed into a square shape (aspect ratio of 1) to enhance accuracy [2]. The choice of mesh size is crucial in buckling simulations as it directly impacts the accuracy and precision of the predicted buckling behavior [49-54].

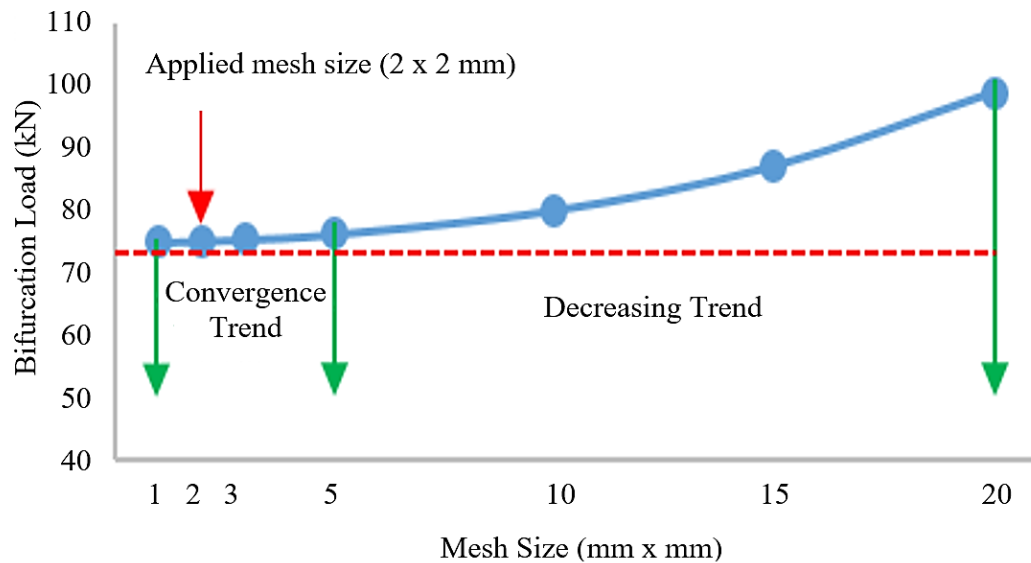


Figure 3. Results of the mesh convergence study

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

The local buckling modes and corresponding bifurcation loads of the axially compressed RHS, extracted from the linear elastic eigenvalue buckling analyses, are depicted in Figure 4. The local elastic buckling mode shapes estimated for the RHS under axial compression, as shown in Figure 4, are consistent with those reported in the relevant literature [2, 38, 39]. While the mode shapes are largely unaffected by the element type employed in the analysis, the critical local elastic buckling loads exhibit varying degrees of sensitivity to the element type. These discrepancies are particularly notable when compared to theoretical results, as reported in Table 6 and graphically illustrated in Figure 5. This sensitivity underscores the importance of selecting the appropriate element type in finite element analyses to ensure accurate predictions of buckling loads. Different element formulations can influence the precision of the computed buckling loads, highlighting the need for careful consideration in element selection to achieve reliable and accurate structural analysis outcomes.

Table 6. Comparison of element types for critical local elastic buckling load of RHS under axial compression

Element Type	Bifurcation Load P_{cr} (kN)		Wall-clock Time (Sec)	Error %
	FEM	Theory		
S4	74.88	70.08	24	6.971
S4R	74.918	70.08	21	7.025
S4R5	75.067	70.08	27	7.238
S8R	74.688	70.08	90	6.697
S8R5	74.408	70.08	116	6.297

Drawing from the findings in Figure 5 and Table 6, the evaluation of various element types for estimating the critical local elastic buckling load of an RHS under axial compression yields insightful conclusions. The S4 element achieves a bifurcation load of 74.88 kN with an error of 6.971%, balancing accuracy and computational efficiency with a wall-clock time of only 24 seconds. The S4R element, slightly less accurate with an error of 7.025%, offers enhanced efficiency, completing the analysis in 21 seconds. In contrast, the S4R5 element, with

five degrees of freedom per node, exhibits the highest error among the 4-node elements at 7.238%, requiring 27 seconds of computation.

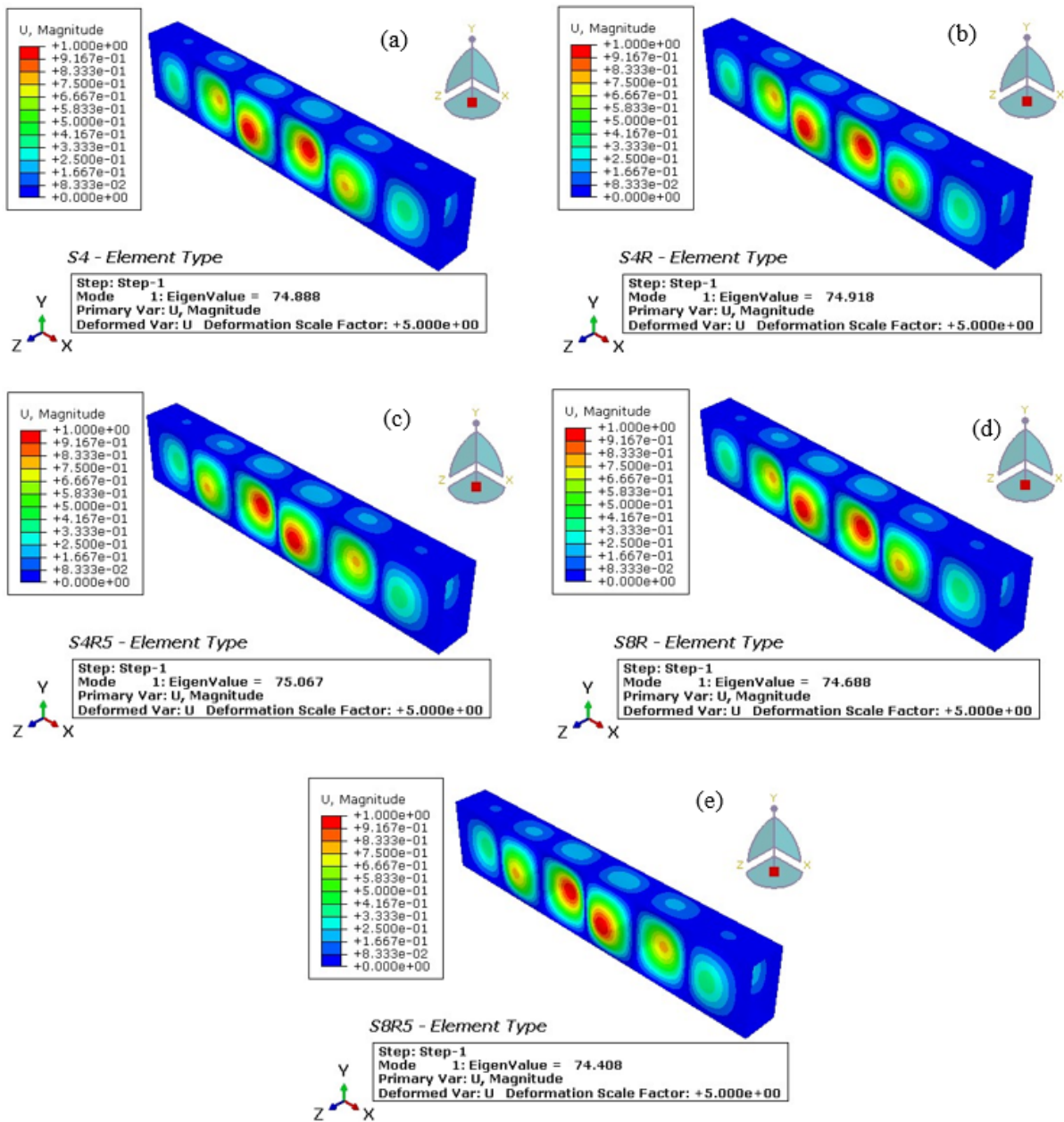


Figure 4. Local elastic buckling modes and corresponding bifurcation loads predicted for the axially compressed RHS by using various element types, (a) S4, (b) S4R, (c) S4R5, (d) S8R, and (e) S8R5

The S8R element yields the second-lowest error at 6.697% but demands significantly more computational time at 90 seconds, making it suitable for accuracy-critical applications. The S8R5 element, despite providing the highest accuracy with an error of 6.297%, incurs the greatest computational expense at 116 seconds, positioning it as the preferred choice for precise analyses. Overall, the S4R element is recommended for routine applications where computational efficiency is paramount, whereas the S8R5 element is ideal for high-precision tasks, despite its increased computational demands.

The discrepancies observed between element types can be attributed to their respective formulations and integration schemes. For instance, the reduced integration in S4R, S4R5, S8R, and S8R5 elements enhances computational efficiency but can introduce numerical inaccuracies, especially in complex buckling scenarios. Conversely, the full integration used in S4 elements improves accuracy but at the cost of higher computational resources. This analysis underscores the essential trade-off between computational efficiency and accuracy, enabling informed selection of element types based on specific analysis requirements and resource constraints.

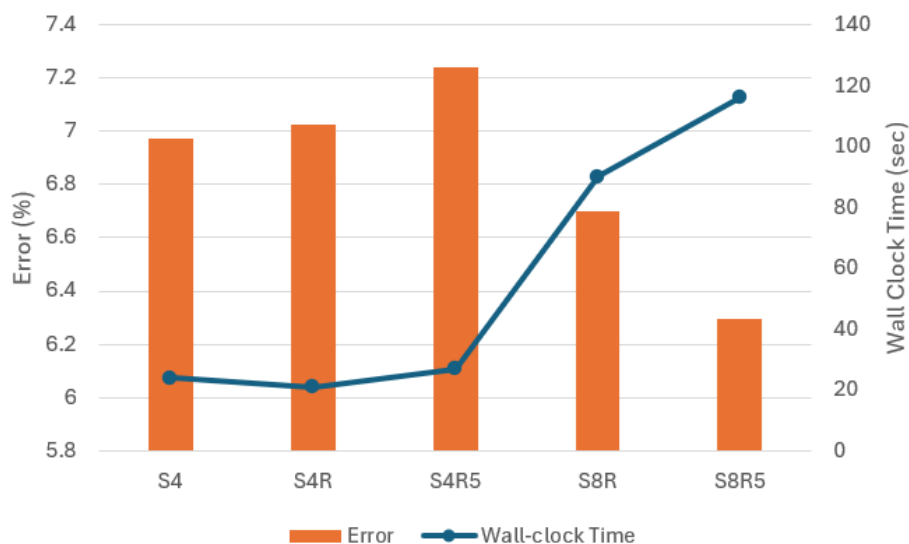


Figure 5. Error and analysis time comparison of element types for critical local elastic buckling load of RHS under axial compression

In this case, since the structure is considered thin (with thickness less than about 1/15 of a characteristic length on the surface of the shell), the S4, S4R, S4R5, S8R, and S8R5 elements are evaluated accordingly. The S4 and S4R elements are 4-node quadrilateral shell elements. S4 employs full integration for high accuracy but at a higher computational cost, while S4R uses reduced integration for enhanced efficiency but with potential numerical issues. The S4R5 element, also using reduced integration with five degrees of freedom per node, is optimized for thin shells but can compromise accuracy in some scenarios.

The S8R element, designed for thick shells, is less suitable here despite its second-lowest error due to its higher computational demands. The S8R5 element, however, provides high accuracy for thin shells with its five degrees of freedom per node and reduced integration, making it the best choice for precision despite its computational expense.

In conclusion, for thin structures, the S4R element offers a good balance of efficiency and accuracy for routine applications, while the S8R5 element is recommended for tasks requiring high precision, despite the increased computational requirements.

The local elastic buckling mode shapes identified for the RHS under major axis bending, as illustrated in Figure 6, were found to be consistent with those reported in the relevant literature [2, 38, 39]. Although the mode shapes were basically unaffected by the choice of element type in the analysis, the critical local elastic buckling loads

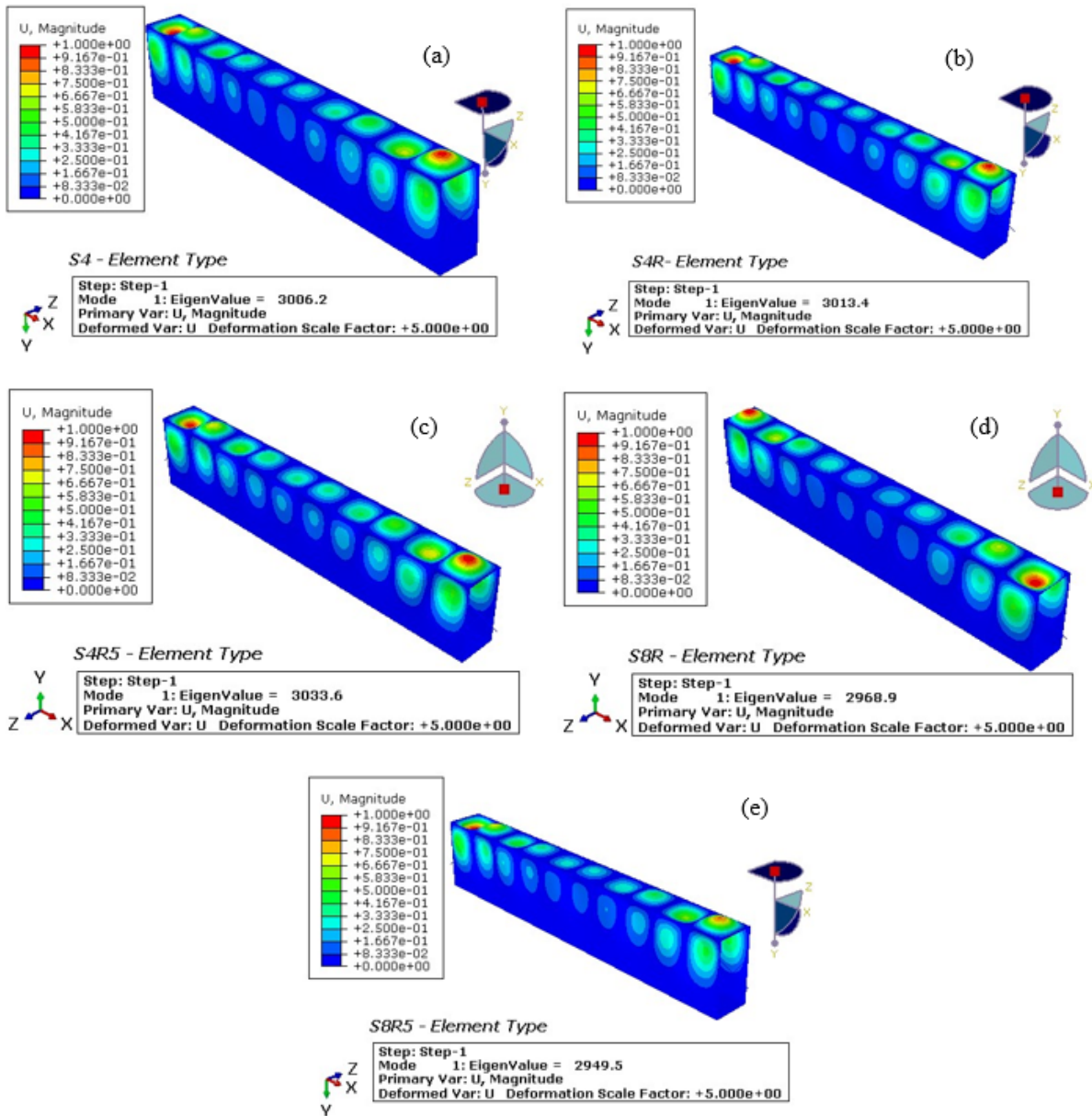


Figure 6. Local elastic buckling modes and corresponding bifurcation moments predicted for the RHS under major axis bending by using various element types, (a) S4, (b) S4R, (c) S4R5, (d) S8R, and (e) S8R5

exhibited varying sensitivities to the element types, reflecting differences when compared to the theoretical results, as documented in Table 7 and shown in Figure 7. The results of major axis bending reported in Table 7 and Figure 7 indicate that the error ratios are generally lower compared to those observed in axial compression, highlighting the superior accuracy of the analyzed element types in this loading condition. Specifically, the S8R5 element demonstrates the highest accuracy with an error of 2.644%, followed closely by S8R at 3.319%, reflecting their effective formulation for capturing thin shell behavior due to reduced integration techniques. In contrast, while the S4R5 and S4R elements exhibit slightly higher error rates of 5.571% and 4.868%, respectively, they maintain competitive computational times, emphasizing their balance between efficiency and accuracy. Notably, the wall-clock times for major axis bending are significantly higher, with S8R5 taking 870 seconds, compared to axial compression simulations. This can be attributed to the increased complexity in capturing the bending responses

and deformation patterns, which necessitate more extensive computational resources. Overall, these findings suggest that while the element formulations effectively capture local buckling phenomena, the choice of element type significantly influences both the accuracy and computational demands, underscoring the importance of selecting appropriate models based on the specific loading conditions and structural behavior.

Table 7. Comparison of element types for critical local elastic buckling moment of RHS under major axis bending

Element Type	Bifurcation Moment M_{cr_major} (kN.mm)		Wall-clock Time (Sec)	Error %
	FEM	Theory		
S4	3006.2	2873.5	155	4.618
S4R	3013.4	2873.5	151	4.868
S4R5	3033.6	2873.5	140	5.571
S8R	2968.9	2873.5	447	3.319
S8R5	2949.5	2873.5	870	2.644

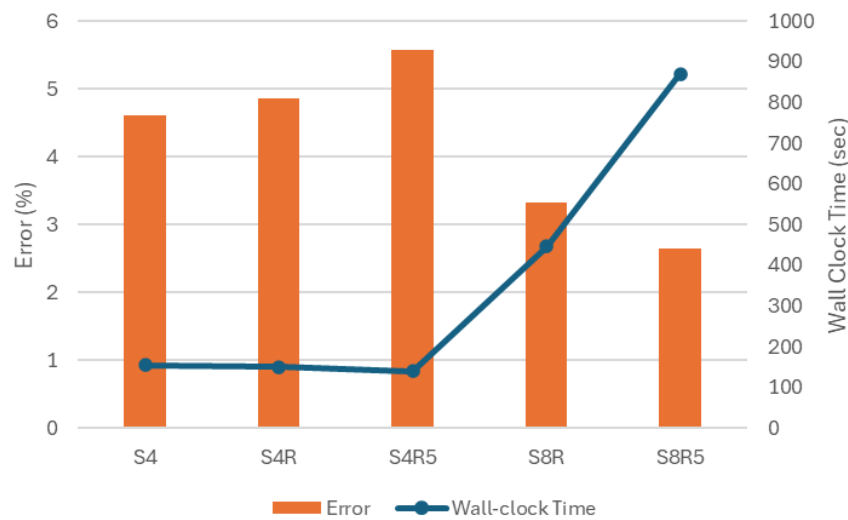


Figure 7. Error and analysis time comparison of element types for critical local elastic buckling load of RHS under major axis bending

The error ratios between the element types indicate negligible differences, with the S4 and S4R elements exhibiting an error difference of only 0.25% (4.618% for S4 vs. 4.868% for S4R), making them practically equivalent. In contrast, the S4 and S8R5 elements show a more significant error difference of 2.973% (4.618% for S4 vs. 2.644% for S8R5), highlighting the superior accuracy of the S8R5 element. Given these findings, it is recommended that for applications prioritizing computational efficiency, the S4 or S4R elements be utilized due to their reasonable accuracy and lower computational demands. Conversely, for analyses requiring high precision in major axis bending, the S8R5 element is advisable despite its increased computational time. This approach facilitates a balanced selection of element types based on the specific accuracy and efficiency needs of the project.

The local elastic buckling modes and corresponding bifurcation moments predicted for the RHS under minor axis bending using various element types are illustrated in Figure 8. The results presented in Table 8, as well as graphically presented in Figure 9, underscore the significance of evaluating different element types in determining the critical local elastic buckling moment of RHS under minor axis bending, highlighting considerations of accuracy, computational efficiency, and the inherent trade-offs among various element types. Notably, the local

elastic buckling modes identified in this study are consistent with existing literature, reinforcing the validity of the findings.

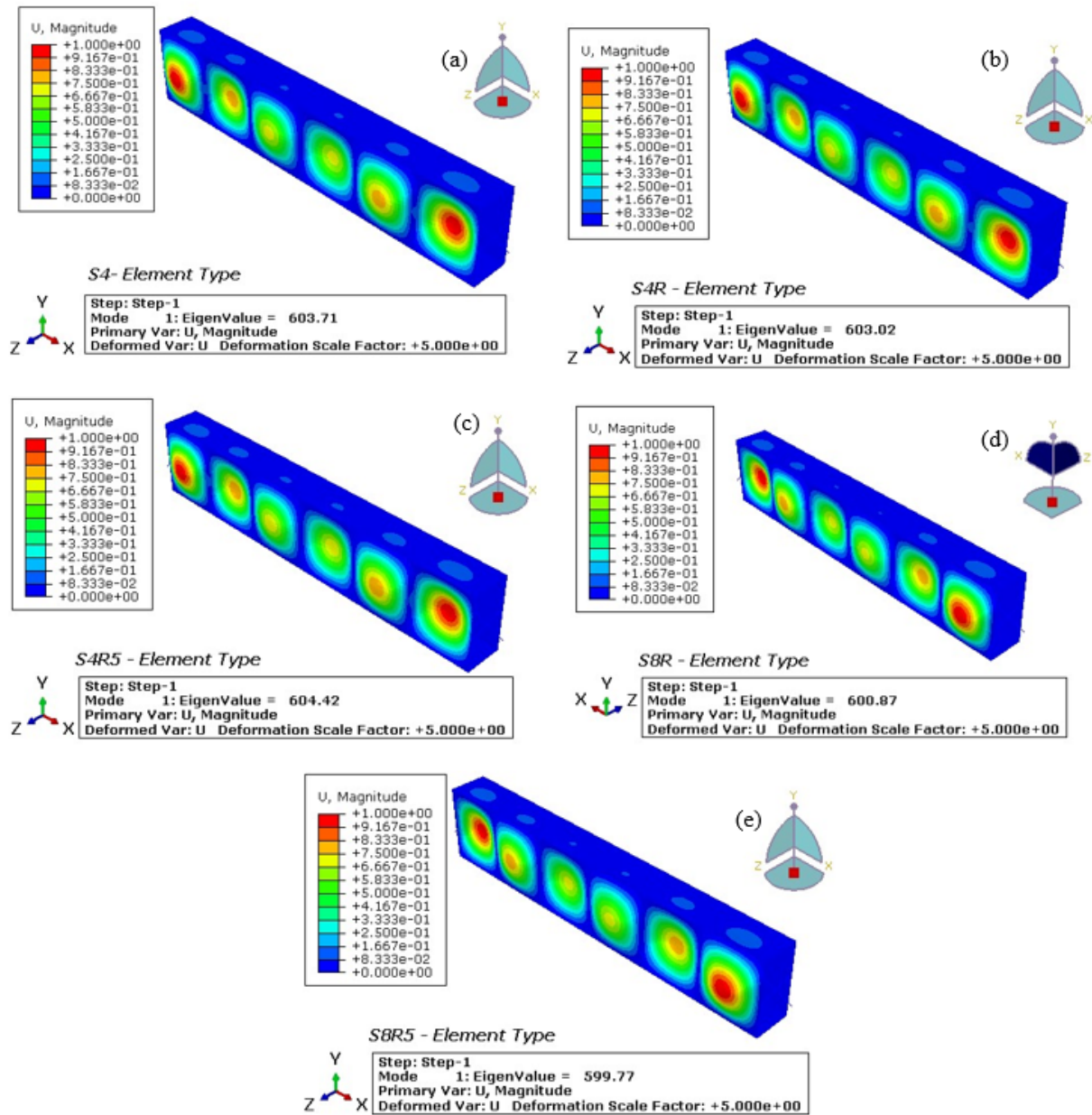


Figure 8. Local elastic buckling modes and corresponding bifurcation moments predicted for the RHS under minor axis bending by using various element types, (a) S4, (b) S4R, (c) S4R5, (d) S8R, and (e) S8R5

Table 8. Comparison of element types for critical local elastic buckling moment of RHS under minor axis bending

Element Type	Bifurcation Moment		Wall-clock Time (Sec)	Error %
	FEM	Theory		
S4	603.71	580.6	54	3.981
S4R	603.02	580.6	53	3.861
S4R5	604.42	580.6	46	4.102
S8R	600.87	580.6	221	3.491
S8R5	599.77	580.6	305	3.301

The S4 element yields a bifurcation moment of 603.71 kN.mm, accompanied by an error of 3.981%, reflecting a commendable balance between accuracy and computational efficiency, with a computation time of 54 seconds. Similarly, the S4R element achieves a moment of 603.02 kN.mm, demonstrating a marginally lower error of 3.861% and a computation duration of 53 seconds. In contrast, the S4R5 element presents a higher error of 4.102%, resulting in a moment of 604.42 kN.mm while requiring 46 seconds for analysis. Among the eight-node element types, the S8R element produces a bifurcation moment of 600.87 kN.mm with an error of 3.491%, although it demands significantly greater computational time, totaling 221 seconds. The S8R5 element, while yielding a slightly lower moment of 599.77 kN.mm, achieves the highest accuracy with an error of 3.301%, albeit with an extended computation duration of 305 seconds.

In summary, the S4 and S4R elements are recommended for scenarios prioritizing computational efficiency, whereas the S8R5 element is more suited for high-precision analyses, notwithstanding its longer computation time. The evaluations across axial compression, major axis bending, and minor axis bending reveal distinct performance characteristics among the element types. For axial compression, the S4 and S4R elements demonstrate a satisfactory balance between accuracy and computational efficiency, exhibiting errors of approximately 7% with computation times of 24 and 21 seconds, respectively. Conversely, the S8R and S8R5 elements provide higher accuracy but necessitate substantially greater computational times.

In major axis bending, the S4 and S4R elements maintain their efficiency, with errors around 4.6% and 4.8% and computation times of 155 and 151 seconds, respectively. The S8R5 element, while delivering the highest accuracy, incurs increased computation time. For minor axis bending, the S4 and S4R elements again exhibit efficient performance, with errors below 4%, while the S8R5 element offers the highest accuracy, requiring the longest computation time of 305 seconds.

Overall, the S4 and S4R elements are recommended for applications that prioritize computational efficiency, while the S8R5 element is ideal for high-precision analyses. Although the S8R and S8R5 elements demonstrate commendable accuracy -with error ratios of 6.697% and 6.297%, respectively, under axial compression, 3.319% and 2.644% under major axis bending, and 3.491% and 3.301% under minor axis bending- their reliability is not universal. The S8R element, designed for thick shells, neglects deformation in the thickness direction, which is critical for thin plates [6, 44]. Conversely, the S8R5 element, tailored for thin shells, may yield inaccuracies in buckling problems due to potential misalignment of its internally defined center node with the actual shell surface [6, 44].

Both the S4 and S4R elements exhibit comparable accuracy across all loading conditions: axial compression, major axis bending, and minor axis bending. The S4 element records slightly lower error percentages for axial compression (6.971% vs. 7.025%) and major axis bending (4.618% vs. 4.868%), while the S4R element shows a marginally lower error for minor axis bending (3.861% vs. 3.981%). In terms of computational efficiency, the S4R element consistently requires less time: 21 seconds compared to 24 seconds for axial compression, 151 seconds compared to 155 seconds for major axis bending, and 53 seconds compared to 54 seconds for minor axis bending. Based on these findings, the S4R element is recommended for applications emphasizing computational efficiency, while the S4 element remains a viable choice for scenarios where slightly higher accuracy is desired.

Nonetheless, the differences in error percentages between the S4 and S4R elements are minimal across all loading conditions. The slight increase in error associated with the S4R element is offset by its significant reduction in

computational time, establishing the S4R element as a more appropriate choice for large-scale analyses or scenarios where time efficiency is paramount. Consequently, the S4R element is advocated for its effective performance, achieving a favorable balance between computational efficiency and accuracy.



Figure 9. Error and analysis time comparison of element types for critical local elastic buckling load of RHS under minor axis bending

V. CONCLUDING REMARKS

The following conclusions can be drawn from the findings of the study.

- The S4 element achieves a balanced performance with low error percentages of 6.971% for axial compression, 4.618% for major axis bending, and 3.981% for minor axis bending, requiring moderate computational time, which makes it suitable for analyses needing a balance between accuracy and efficiency.
- The S4R element offers similar accuracy to the S4 element, with slightly higher errors of 7.025% for axial compression, 4.868% for major axis bending, and 3.861% for minor axis bending, while significantly reducing computational time, enhancing overall efficiency and making it preferable for time-sensitive studies.
- The S4R5 element shows higher errors across all loading conditions, including 7.238% for axial compression and 4.102% for minor axis bending, and requires more computational time, limiting its suitability for routine applications.
- The S8R element produces competitive results with error percentages of 6.697% for axial compression, 3.319% for major axis bending, and 3.491% for minor axis bending, but demands significantly longer computational time.
- The S8R5 element achieves the highest accuracy with errors of 2.644% in major axis bending and 3.301% in minor axis bending but incurs substantial computational time and may yield unreliable results for buckling problems due to its internal node configuration.

- The S4R element is ideal for scenarios prioritizing computational efficiency while maintaining satisfactory accuracy.
- The S8R5 element is suitable for applications requiring slightly higher precision.
- Selecting an element type should involve a careful assessment of the trade-offs between computational demand and the required accuracy for the analysis.

REFERENCES

1. Gardner L, Fieber A, Macorini L (2019) Formulae for Calculating Elastic Local Buckling Stresses of Full Structural Cross-sections. *Structures* 17:2–20. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.012>
2. Nuraliyev M, Dundar MA, Sahin DE (2022) Determination of optimal dimensions of polymer-based rectangular hollow sections based on both adequate-strength and local buckling criteria: Analytical and numerical studies. *Mech Based Des Struct Mach* 1–31. <https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2139720>
3. Singh TG, Chan T-M (2021) Effect of access openings on the buckling performance of square hollow section module stub columns. *J Constr Steel Res* 177:106438. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106438>
4. Hämäläinen O-P, Halme T, Björk T (2018) Local Buckling of Welded Box Beams Made of Ultrahigh-Strength Steels. *J Struct Eng* 144(7), 6018003.
5. Dundar MA, Nuraliyev M (2024) Parametric study on the assessment of the local buckling behavior of perforated square hollow sections with non-uniform wall thickness under axial compression TT - Düzgün olmayan duvar kalınlığına sahip delikli kare içi boş profillerin aksenal basınç alt. *J Innov Eng Nat Sci* 4(2):326–353. <https://doi.org/10.61112/jiens.1397391>
6. Shahbazian A, Wang YC (2011) Calculating the global buckling resistance of thin-walled steel members with uniform and non-uniform elevated temperatures under axial compression. *Thin-Walled Struct* 49(11):1415–1428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.07.001>
7. Shahbazian A, Wang YC (2011) Application of the Direct Strength Method to local buckling resistance of thin-walled steel members with non-uniform elevated temperatures under axial compression. *Thin-Walled Struct* 49(12):1573–1583.
8. Yang D, Hancock GJ (2006) Numerical simulation of high-strength steel box-shaped columns failing in local and overall buckling modes. *J Struct Eng* 132(4):541–549.
9. Shen J, Wadee MA, Sadowski AJ (2017) Interactive buckling in long thin-walled rectangular hollow section struts. *Int J Non Linear Mech* 89:43–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2016.11.007>
10. McCann F, Fang C, Gardner L, Silvestre N (2016) Local buckling and ultimate strength of slender elliptical hollow sections in compression. *Eng Struct* 111:104–118.
11. Thai H-T, Uy B, Khan M (2015) A modified stress-strain model accounting for the local buckling of thin-walled stub columns under axial compression. *J Constr Steel Res* 111:57–69.
12. Yu C, Schafer BW (2007) Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method. *J Constr Steel Res* 63(5):581–590.
13. Dai Y, Roy K, Fang Z, Chen B, Raftery GM, Lim JBP (2024) Buckling resistance of axially loaded cold-formed steel built-up stiffened box sections through experimental testing and finite element analysis. *Eng Struct* 302:117379. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117379>
14. DUNDAR MA, Nuraliyev M, Sahin DE (2022) Determination of Optimal Dimensions of Polymer-Based Rectangular Hollow Sections Based on Both Adequate-Strength and Local Buckling Criteria: Analytical and Numerical Study. *Mech Based Des Struct Mach*. <https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2139720>
15. Liu M, Zhang L, Wang P, Chang Y (2015) Buckling behaviors of section aluminum alloy columns under axial compression. *Eng Struct* 95:127–137.
16. Paul B, Roy K, Lim JBP, Fang Z, McCollum K, Bell D (2023) Moment-capacity of bolted side-plates for apex joint of nested tapered box beam portal frames. *J Build Eng* 76:107011. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107011>
17. Ozenc O, Dundar MA, Sahin DE (2023) Examination of compressive and flexural behaviors of acrylonitrile-butadiene-styrene filled with hemp fiber particles. *J Thermoplast Compos Mater* 37(2):743–771. <https://doi.org/10.1177/08927057231186326>
18. Gunalan S, Heva YB, Mahendran M (2015) Local buckling studies of cold-formed steel compression members at elevated temperatures. *J Constr Steel Res* 108:31–45.
19. Systèmes D (2014) ABAQUS Documentation (Dassault Systèmes, Providence, RI)

20. Hughes OF, Ghosh B, Chen Y (2004) Improved prediction of simultaneous local and overall buckling of stiffened panels. *Thin-Walled Struct* 42(6):827–856. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2004.01.003>
21. Sadowski AJ, Rotter MJ (2013) On the relationship between mesh and stress field orientations in linear stability analyses of thin plates and shells. *Finite Elem Anal Des* 73:42–54. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2013.05.004>
22. Anapayan T, Mahendran M (2012) Improved design rules for hollow flange sections subject to lateral distortional buckling. *Thin-Walled Struct* 50(1):128–140. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.09.004>
23. Elglaad S, Elghandour M, Sharaf T, Elsabbagh A (2021) Assessment of the Finite Element Analysis of Portal Steel Frames with Cold Formed Rectangular Hollow Sections Including Imperfections and Residual Stresses. *Port-Said Eng Res J* 25(2):60–79.
24. Ozyurt E, Wang YC (2018) Resistance of Axially Loaded T- and X-Joints of Elliptical Hollow Sections at Elevated Temperatures – A Finite Element Study. *Structures* 14:15–31. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.01.004>
25. Grilo LF, Fakury RH, Rodrigues FC, Daldegan VP (2018) Behavior and design of built-up compressed steel members composed of concentric hot rolled circular hollow sections. *Lat Am J Solids Struct* 15:e51.
26. Mahmoud A, Torabian S, Jay A, Myers A, Smith E, Schafer BW (2015) Modeling protocols for elastic buckling and collapse analysis of spirally welded circular hollow thin-walled sections. *Struct Stab Res Counc, AISC (American Institute of Steel Construction), Nashville, TN, USA, March 24–27, 1–16.* <https://doi.org/10.13140/2.1.4893.7763>
27. Shariati M, Saemi J, Sedighi, M, Eipakchi HR (2011) Experimental and numerical studies on buckling and post-buckling behavior of cylindrical panels subjected to compressive axial load. *Strength Mater* 43:190–200. <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9285-x>
28. Rokilan M, Mahendran M (2021) Design of cold-formed steel columns subject to local buckling at elevated temperatures. *J Constr Steel Res* 179:106539.
29. Wadee MA, Bai L (2014) Cellular buckling in I-section struts. *Thin-Walled Struct* 81:89–100.
30. Wadee MA, Farsi M (2014) Local–global mode interaction in stringer-stiffened plates. *Thin-Walled Struct* 85:419–430. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.09.012>
31. Yuan HX, Wang YQ, Gardner L, Shi YJ (2014) Local–overall interactive buckling of welded stainless steel box section compression members. *Eng Struct* 67:62–76. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.02.012>
32. Saliba N, Gardner L (2013) Experimental study of the shear response of lean duplex stainless steel plate girders. *Eng Struct* 46:375–391.
33. Zhou F, Young B (2013) Web crippling behaviour of cold-formed duplex stainless steel tubular sections at elevated temperatures. *Eng Struct* 57:51–62.
34. Hassanein MF (2010) Imperfection analysis of austenitic stainless steel plate girders failing by shear. *Eng Struct* 32(3):704–713.
35. Siahhaan R, Keerthan P, Mahendran M (2016) Finite element modeling of rivet fastened rectangular hollow flange channel beams subject to local buckling. *Eng Struct* 126:311–327.
36. Becque J, Rasmussen KJR (2008) Numerical investigation and design methods for stainless steel columns failing by interaction of local and overall buckling, Research Report R888, School of Civil Engineering, University of Sydney.
37. Killpack M, Abed-Meraim F (2011) Limit-point buckling analyses using solid, shell and solid-shell elements. *J Mech Sci Technol* 25:1105–1117.
38. Nuraliyev M, Dundar MA, Akyildiz HK (2024) A novel analytical method for local buckling check of box sections with unequal wall thicknesses subjected to bending. *Mech Adv Mater Struct* 1–24. <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2369262>
39. Vieira L (2018) On the local buckling of RHS members under axial force and biaxial bending. *Thin-Walled Struct* 129:10–19. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.03.022>
40. Seif M, Schafer BW (2010) Local buckling of structural steel shapes. *J Constr Steel Res* 66(10):1232–1247. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.03.015>
41. Kroll WD, Fisher GP, Heimerl GJ (1943) Charts for calculation of the critical stress for local instability of columns with I-, Z-, channel, and rectangular-tube section. National Advisory Committee for Aeronautics. Report Number: NACA-WR-L-429
42. Radwan M, Kövesdi B (2021) Local plate buckling type imperfections for NSS and HSS welded box-section columns. *Structures* 34:2628–2643. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.011>
43. Möcker T, Linde P, Kraschin S, Goetz F, Marsolek J, Wohlers W (2008) Abaqus FEM Analysis of The Post Buckling Behaviour of Composite Shell Structures. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/267218447>
44. Dassault Systèmes (2012) Abaqus Analysis User’s Manual 6.12. <http://orpheus.nhc.org.tw:2080/v6.12/>. Accessed 02 Jan. 2025.

45. Ranawaka T, Mahendran M (2006) Finite element analyses of cold-formed steel columns subject to distortional buckling under simulated fire conditions. In: Proceedings of the International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures. Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal. pp 747–755.
46. Chandra KSS, Rao KV, Rajanna T (2020) Effect of Varying In-Plane Loads and Cutout Size on Buckling Behavior of Laminated Panels. In: Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICAME 2020. Springer, pp 671–678.
47. El Bahaoui J, El Bakkali L, Khamlichi A (2012) Buckling strength of axially compressed thin axisymmetric shells as affected by localized initial geometric imperfections. *Int Rev Appl Sci Eng* 3(1):1–14.
48. Bin Kamarudin MN, Mohamed Ali JS, Aabid A, Ibrahim YE (2022) Buckling analysis of a thin-walled structure using finite element method and design of experiments. *Aerospace* 9(10):541:1-31. <https://doi.org/10.3390/aerospace9100541>
49. Lu W, Liu H, Waqas A, Long L (2023) Study on buckling behavior of multilayer pyramid lattice structures. *Mech Adv Mater Struct* 31(28):10059–10069. <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2284271>
50. Duarte APC, Pereira GB, Silvestre N (2021) Numerical study of the influence of the stringers cross-section geometry on the mechanical behavior of compressed curved stiffened composite panels. *Mech Adv Mater Struct* 28(5):516–529. <https://doi.org/10.1080/15376494.2019.1578009>
51. Ragheb WF (2010) Hybridization Effectiveness in Improving Local Buckling Capacity of Pultruded I-Beams. *Mech Adv Mater Struct* 17(6):448–457. <https://doi.org/10.1080/15376494.2010.483328>
52. Zhu J, Li L-Y (2019) Effect of shear stress on distortional buckling of CFS beams subjected to uniformly distributed transverse loading. *Mech Adv Mater Struct* 26(17):1423–1429. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1432798>
53. Masood SN, Gaddikeri KM, Viswamurthy SR (2021) Experimental and finite element numerical studies on the post-buckling behavior of composite stiffened panels. *Mech Adv Mater Struct* 28(16):1677–1690. <https://doi.org/10.1080/15376494.2019.1701151>
54. Zhao W, Xie Z, Wang X, Li X, Hao J (2019) Buckling behavior of stiffened composite panels with variable thickness skin under compression. *Mech Adv Mater Struct* 26(3):215–223. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1495795>



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çeliklerin fırında sert lehimleme prosesinde kullanılan koruyucu gaz karışımlarının yorulma performansına etkisi

Tanya A. Başer^a

^aCoskunöz CKM Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 13 Ağustos 2024

Düzeltilme 27 Kasım 2024

Kabul 11 Aralık 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Fırında sert lehimleme

Koruyucu gaz

Yorulma davranışı

Mikroyapı

ÖZET

Fırında sert lehimleme, enerji teknolojisi, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisi alanlarında teknik gelişim için öncü rol oynayan, düşük maliyetli bir birleştirme teknolojisidir. Sert lehimleme işleminin fırın içerisinde vakumlu ortamda değil, koruyucu gaz ve karışımlarının kullanılması durumunda, gaz kompozisyonunun birleştirilmiş parçanın yorulma performansını etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada, X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çelik malzemelerin Au18Ni alaşımı ara bağlayıcı tabaka kullanılarak iki farklı koruyucu gaz ortamında (%93 Ar - %7 H₂ ve %100 H₂) fırında sert lehimleme özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada fırında sert lehimleme prosesi sırasında kullanılan farklı koruyucu gazların birleştirilmiş bölgenin yorulma dayanımı ile mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca mikroyapı ve kırılma yüzeyleri üzerinden yapılan karakterizasyon çalışmaları, yorulma testi sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yorulma testleri sonucunda %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında 20.000 çevrimde $\sigma_{nom,max}$ değeri 250 MPa iken, %100 H₂ koruyucu gazı kullanıldığında bu değer 450 MPa'ya yükseldiği belirlenmiştir.

The effect of shielding gas mixtures in furnace brazing process on fatigue performance of X3CrNiMo13-4 martensitic stainless steels

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 Aug 2024

Received in revised form 27 Nov 2024

Accepted 11 Dec 2024

Available online

Keywords:

Furnace brazing

Shielding gas

Fatigue behavior

Microstructure

ABSTRACT

Furnace brazing is a low-cost joining technology that plays a leading role in technical development in the fields of energy technology, aerospace and automotive industries. It is known that the gas composition affects the fatigue performance of the joined part if the brazing process is not carried out in a vacuum in a furnace, but using shielding gases and mixtures. In this study, the furnace brazing properties of X3CrNiMo13-4 martensitic stainless-steel materials were investigated in two different shielding gas environments (93% Ar - 7% H₂ and 100% H₂) using the Au18Ni alloy interlayer. In the study, the effects of different shielding gases used during the furnace brazing process on the fatigue strength, microstructure and hardness properties of the joined zone were examined. In addition, characterization studies on microstructure and fracture surfaces were evaluated by comparing them with fatigue test results. As a result of fatigue tests, it was determined that while the $\sigma_{nom,max}$ value was 250 MPa in 20,000 cycles under 93% Ar - 7% H₂ protective gas, this value increased to 450 MPa when 100% H₂ shielding gas was used.

I. GİRİŞ

Günümüzde ileri birleştirme teknolojileri, çelik ve alüminyum gibi benzemez malzemelerin ya da farklı kalınlıklardaki alaşımların birleştirilmesini mümkün kılarak hibrit ve çoklu malzemeli parça üretimlerini

*Sorumlu yazar. Tel.: +90-5316403601; e-mail: tbaser@coskunoz.com.tr

sağlamıştır [1]. Böylelikle başta otomotiv endüstrisi olmak üzere, ağırlık azaltma çalışmalarında önemli başarılar sağlanmıştır. Otomotiv endüstrisinde ürünleri oluşturan detay parçalar çeşitli teknikler kullanılarak birleştirilirler. Bu amaçla yaygın olarak mekanik birleştirmeler, yapıştırma yöntemleri, kaynaklı birleştirmeler ve sert lehimleme yöntemleri kullanılmaktadır [2]. İleri birleştirme teknolojileri arasında hibrit ve çoklu malzeme üretimi için vakum lehimleme önem taşımaktadır. Günümüzde, vakum lehimleme veya koruyucu gaz lehimleme gibi gelişmiş fırın lehimleme teknikleri enerji üretimindeki bileşenler, havacılık, uzay uygulamaları ve otomotiv endüstrisi gibi ufuk açıcı uygulamalar için birleştirme teknolojisi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Kaynak gibi diğer birleştirme teknolojileriyle kıyaslandığında sert lehimleme, çok çeşitli malzemelerin (örneğin farklı metallerin veya seramiklerin) nispeten düşük sıcaklıklarda ve hızlı işlem sürelerinde birleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca sert lehimleme, küçük ve karmaşık bağlantı geometrilerinin birleştirilmesini, tek bir adımda ve çok sayıda sert lehimin işlenmesine konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre avantaj sunmaktadır [1, 3-5]. Sert lehimleme yöntemleri arasında fırında sert lehimleme karmaşık geometri parçaların birleştirilmesinde yoğunlukla tercih edilmektedir.

Fırında sert lehimleme, 900 °C'nin üzerinde sıvılaştırma sıcaklığına sahip sert lehim alaşımlarıyla vakum veya inert gaz ortamında, dekapan kullanılmadan yapılan bir birleştirme işlemidir [6]. Fırında gerçekleştirilen sert lehimleme prosesi havacılık ve enerji üretiminde, örneğin kompresör pervaneleri veya türbin parçaları gibi alanlarda tercih edilmektedir. Güçlü sert lehimlenmiş bağlantılar üretmek için hızlı ve düşük maliyetli bir yöntemdir [7]. Mekanik bir yük altında, dolgu metalinin ve ana malzemenin farklı elastik-plastik özellikleri ve ana malzemenin kısıtlayıcı etkisi nedeniyle sert lehimlenmiş bölgede karmaşık üç eksenli gerilmeler meydana gelmektedir. Bu yüksek gerilimli üç eksenlilik, bağlantı mukavemetinin kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Sert lehimleme sırasında tamamlanmamış boşluklar, gözenekler veya çatlaklar gibi sert lehimleme hataları oluşabilmektedir. Bu hatalar sert lehimleme bölgesinde gerilme konsantrasyon bölgeleri olarak hareket edebilir. Yorulma çatlakları bu bölgelerden başlayarak döngüsel mekanik yüklemeye altında kendiliğinden bozulmaya yol açabilmektedir [8].

Ergitmeli kaynak işlemlerinin koruyucu gaz altında gerçekleştirildiği durumlarda ergimiş metalin atmosferik kirlenmeye karşı korunması büyük önem taşımaktadır [9]. Özellikle ark kaynağında koruyucu gazların ark plazmasının oluşumu ve yapısı üzerinde belirgin bir etkisi vardır. İyonize gaz, ergimiş metaller, cürufur, buharlar ve gaz halindeki atomlar ve moleküllerden oluşan plazma, uygun koruyucu gaz uygulaması ile kontrol edilmektedir [10]. Fırında sert lehimleme prosesinde de fırın içerisindeki koruyucu gaz ve karışımı büyük önem taşımaktadır. Sert lehimlemede argon gazına hidrojen gazı ilavesi ana malzeme yüzeyindeki oksit filmini parçalayarak dolgu metalinin ıslatılmasını sağlamaktadır [11]. Bu nedenle sert lehimleme kalitesini iyileştirmek için koruyucu gaz seçimi büyük önem taşımaktadır. Açık literatür araştırmalarında fırında sert lehimleme ile paslanmaz çeliklerin birleştirildiği bazı çalışmalar bulunmaktadır. Friedrich-Wilhelm Bach ve ark. [12] paslanmaz çeliğin sert lehimlenmesi için bor ve fosfor içermeyen nikel bazlı dolgu metalleri kullanarak fırında sert lehimleme, Bach, Friedrich-Wilhelm ve ark. [13] paslanmaz çeliklerin sert lehimleme işlemi esnasındaki ıslatma yüzey aktivasyonunu ve vakumlu fırın sert lehimleme ve koruyucu gaz altında indüksiyon lehimleme ve Lugscheider [14] ve ark. ise dispersiyonla güçlendirilmiş alüminyum malzemeleri vakumlu fırın lehimleme ve koruyucu gaz altında indüksiyon lehimleme yöntemi ile birleştirmişlerdir. Benzer şekilde ülkemiz açık literatüründe yapılan araştırmalarda ise titanyum ve bakır çifti [15] ile titanyum ve düşük karbonlu çelik malzemelerin gümüş ara bağlayıcı [16] kullanılarak indirgeyici ortamda fırında sert lehimleme ile birleştirildiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle lehimli malzeme dayanımları kesme-makaslama testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır.

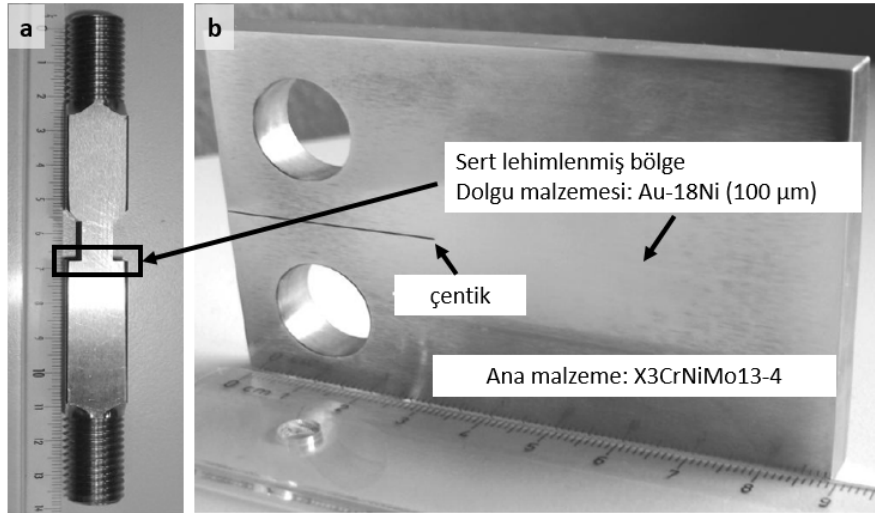
Paslanmaz çeliklerin fırında sert lehimleme ile farklı koruyucu gaz ortamlarında birleştirildiği ve bağlantı dayanımlarının yorulma testleri ile belirlendiği çalışmalara az rastlanması bu çalışmanın başlatılma gerekçesi olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada gelişmiş ülkelerde sıklıkla kullanılan ancak ülkemiz endüstrisinde istenilen yeri alamayan ve büyük bir öneme sahip fırında sert lehimleme yöntemi ile paslanmaz çelik malzemelerin birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, fırında sert lehimleme prosesinde kullanılan farklı koruyucu gazların birleştirilmiş bölgenin yorulma dayanımı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışma için endüstride kullanılan ve ağır yük altında çalışan, karmaşık geometrisi nedeni ile konvansiyonel kaynak yöntemlerinin uygulanmadığı X3CrNiMo13-4 martenzitik çelikten üretilmiş kompresör çarkı seçilmiştir. İki farklı koruyucu gaz koruması altında sert lehimleme prosesi ile birleştirilen numunelerin yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri sonucu elde edilen veriler mikroyapı ve kırılma yüzeyleri üzerinden yapılan karakterizasyon çalışmaları ile değerlendirilmiştir.

II. DENEYSEL METOT

Bu çalışmada fırında sert lehimleme prosesi için kompresör çarkı üretiminde kullanılan X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çelik ana malzeme olarak kullanılmıştır. Sert lehimleme dolgu malzemesi olarak ise 100 µm kalınlığında Au-18 Ni folyo seçilmiştir. Bu seçim X3CrNiMo13-4 ana malzeme ile Au-18 Ni folyonun metalurjik olarak uygunluğu değerlendirilerek yapılmıştır. X3CrNiMo13-4 martenzitik çelik plakalar 300x100x25 mm boyutlarında kesilerek sert lehimleme prosesi için hazırlanmıştır. SOLO Profitherm 600 marka endüstriyel gaz fırınında 1020 °C'de 20 dakika beklenerek sert lehimleme işlemi tamamlanmıştır. Sert lehimleme prosesinde %93 Ar - %7 H₂ ve %100 H₂ olacak şekilde iki farklı koruyucu gaz kullanılmıştır. Sert lehimlemeden sonra, numuneler azot atmosferinde 520 °C'de 5,5 saat süreyle temperlenmiştir.

Farklı koruyucu gazların etkilerini incelemek için T geometrili numuneler (Şekil 1a) üzerinde yorulma testleri ve DCB geometrili (Şekil 1b) numuneler üzerinde yorulma çatlak ilerleme testleri Rumul Type 8601 model standart elektro-mekanik servohidrolik test makinasında yapılmıştır. Minimum ve maksimum gerilmelerin oranı olarak tanımlanan R-değeri çalışmada 0,1 olarak seçilmiştir. Yorulma testleri için her bir T birleştirmesinden 6 adet, DCB geometrili parçalardan ise 4 adet sert lehimleme numunesi gerçekleştirilmiştir. Çatlak uzunluğunu doğru bir şekilde ölçmek için numunelerin her iki yüzeyi de dikkatlice parlatılmıştır. Çatlak uzunluğu, DCB numunesinin her iki tarafında iki gezici ışık mikroskobu kullanılarak periyodik olarak ölçülmüştür. Numunelerin iki yan yüzeyinde ölçülen çatlak uzunluğundaki farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğu unutulmamalıdır.

Fraktografik (kırılmanın modunu belirlemek için yüzeyin mikroskobik incelemesi) makro incelemeler Leica M420 stereo mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Sert lehimleme bölgesi için yapılan mikro yapı karakterizasyonu ise Philips-FEG XL30 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sert lehimleme ile birleştirilmiş numunelerin birleşme bölgeleri sertlik testleri ile karakterize edilmeye çalışılmıştır. Ölçümlerde HV sertlik ölçme metodu ve 500 g yük kullanılmıştır.



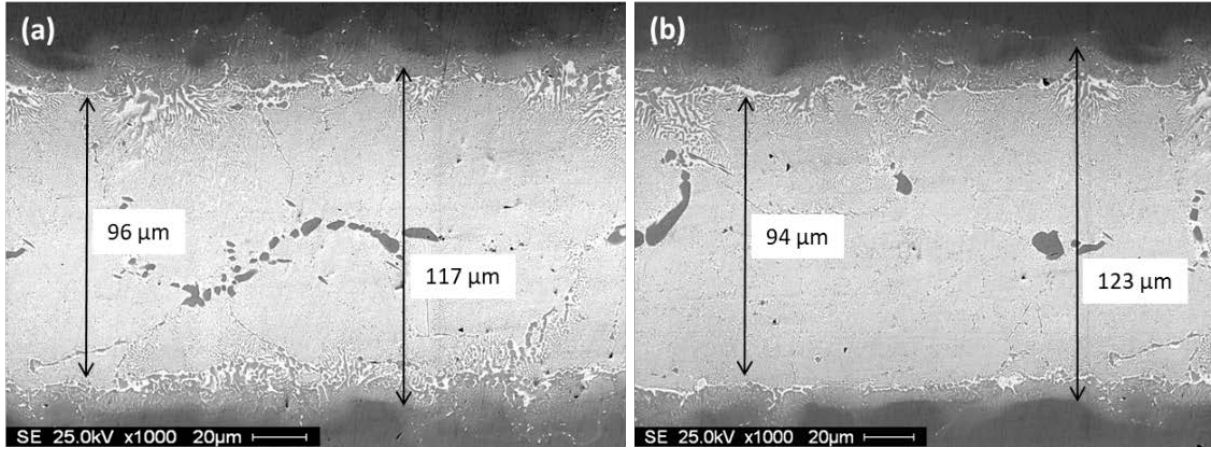
Şekil 1. Farklı koruyucu gazların etkilerini incelemek için gerçekleştirilen yorulma testlerinde kullanılan T geometrili (a) ve DCB geometrili (b) numuneler

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 2'de sert lehimleme sonrası %93 Ar - %7 H₂ (Şekil 2a) ve %100 H₂ (Şekil 2b) koruyucu gaz ortamlarında elde edilen bağlantı bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 2a incelendiğinde, %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz ortamlarında sert lehimleme öncesi iki malzeme arasına konulan 100 µm kalınlığındaki Au alaşımı folyonun yaklaşık %4 ana malzemelere difüzyon olmasıyla 96 µm kalınlığa düştüğü net bir biçimde görülmektedir. Şekil 2b ise %100 H₂ koruyucu gaz ortamında Au alaşımı folyonun yaklaşık %6 ana malzemelere difüzyon olmasıyla 94 µm kalınlığa düştüğü gösterilmiştir. Bunun nedeni, sert lehimleme esnasında fırına gönderilen koruyucu gazın etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Burada H gazının ana malzeme yüzeyindeki oksit filminin kolaylıkla yırtılmasına ve temizlenmesine katkı sağladığı, dolayısıyla Au alaşımli folyonun malzeme yüzeyine daha kolay difüzyon olduğunu göstermektedir. Leinenbach ve arkadaşları, sert lehimleme işlemi esnasında koruyucu gaz olan Ar gazına H ilavesi yaparak, ana malzemenin yüzeyindeki oksit filminin ilave edilen H gazı sayesinde kolaylıkla giderildiğini, bu durumun da Au alaşımı folyonun ıslatılması için oldukça önemli olduğunu rapor etmişlerdir [17]. Fırında sert lehimleme esnasında H₂ kullanımı, Au folyonun akışkanlık özelliğini artırmak için önemlidir. H₂ ana malzemenin yüzeyindeki oksitleri kolaylıkla parçalayarak, Au folyo alaşımının daha etkili bir biçimde yayılmasını, böylelikle de daha sağlam bir arayüzey bağlantısının elde edilmesine olanak sağladığı tespit edilmiştir. Şekil 2'de Au folyonun ana malzemeye difüzyonun artması bu sonucu doğrulamaktadır. Bu nedenle, arayüzey reaksiyonu %100 H₂ atmosferi altında daha iyi gerçekleşmiştir.

Ayrıca görüntüler üzerinde sert lehimleme esnasında sıcaklık ve sürenin etkisi ile Au arabağlayıcı folyodan ayrılarak ana malzemelere göç olan kısımda oluşan difüzyon bölgeleri de net olarak görülebilmektedir. Burada, folyo kalınlığındaki azalmanın difüzyon bölgesinin genişleme miktarına göre daha az olduğu gözlemlenmektedir. Bir başka ifade ile, %93 Ar - %7 H₂ ve %100 H₂ koruyucu gaz ortamlarında gerçekleştirilen sert lehimleme sonrasında, Au folyonun sırasıyla %4 ve %6 oranında azaldığı, buna karşın difüzyon bölgelerinin toplam genişliklerinin sırasıyla 117 µm ve 123 µm'ye ulaştığı tespit edilmiştir. Burada difüzyon bölgesinin azalan folyo kalınlığından daha fazla olmasının sebebi Au alaşımı folyonun ergime sıcaklığının daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler sabit sıcaklıkta daha hızlı difüze

olmaktadırlar. Ayrıca difüzyonu etkileyen en önemli parametre, difüz eden elementlerin aktivasyon enerjileridir. Literatürde birleştirilen paslanmaz çelik ana malzemedeki alaşım elementlerinden östenit içerisinde çözünen Fe'nin aktivasyon enerjisi 269, Cr'nin 405, Ni'nin ise 280 kJ/mol olarak [18], ara tabaka olarak kullanılan altın'ın Ag ve Au içerisinde çözünürlüğü ise sırasıyla 190 ve 168 kJ/mol olarak verilmektedir [19]. Dolayısıyla bu iki etken ara bağlayıcı folyonun ana malzemeye difüzyonun daha fazla olmasının sebebi olarak gösterilir. Bir başka ifade ile aktivasyon enerjisi düşük olan elementin difüzyonunun kolay olduğu söylenebilir. Aydın ve ark. [20] titanyum ve bakır malzemeleri difüzyon kaynak yöntem ile birleştirmişler ve aktivasyon enerjisi düşük olan elementin difüzyon yoğunluğunun yüksek olduğunu rapor etmişlerdir.

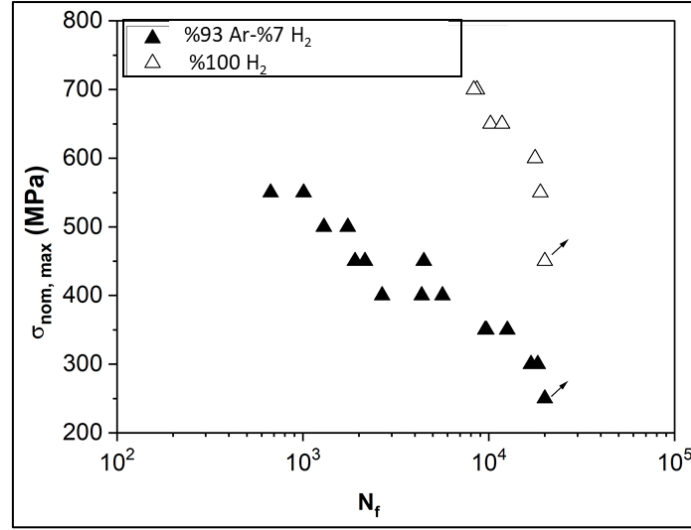


Şekil 2. Sert lehimleme sonrası %93 Ar - %7 H₂ (a) ve %100 H₂ (b) bağlantı bölgelerinin SEM görüntüleri

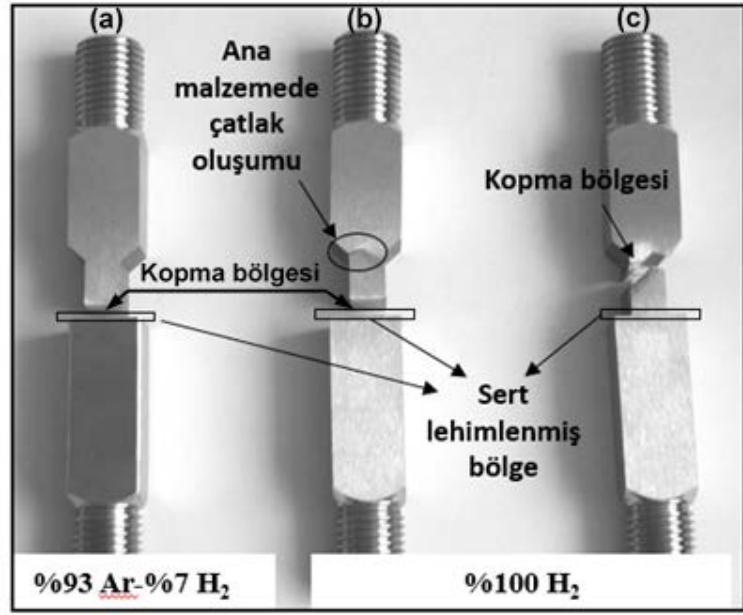
Sert lehimlemede kullanılan koruyucu gazın bağlantıların mekanik özelliklere etkisini anlayabilmek düşük çevrimli yorulma (LCF) testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testi sonuçları Şekil 3'deki grafikte gösterilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde her iki yorulma testi arasındaki tek fark, birleştirme işlemlerinde farklı koruyucu gaz kullanılmasıdır. %93 Ar - %7H₂ koruyucu gaz altında 20 000 çevrimde $\sigma_{nom,max}$ değeri 250 MPa iken, %100 H₂ koruyucu gazı kullanıldığında bu değer 450 MPa'a yükselmiştir. %100 H₂ atmosferinde sert lehimlenmiş numunelerin kalitesinin dikkate değer miktarda iyileştiği tespit edilmiştir. Sert lehimleme prosesinde koruyucu gaza H₂ eklenmesi, dolgu metalinin ıslatılması için büyük ölçüde önemlidir. Ar gazına H₂ gazı ilavesi veya sadece H₂ gazı kullanılması X3CrNiMo13-4 paslanmaz çelik yüzeyindeki oksit filmi tabakası parçalanarak giderilmesi sağlanır [1]. Bu nedenle %100 H₂ atmosferi kullanıldığında yüzeydeki oksit tamamen giderildiği için Au folyonun ana malzemeye difüzyonun artmış olup, yüksek kalitede sert lehimleme bağlantıları elde edilmiştir.

Şekil 4'te yorulma testi sonrası sert lehimleme ile birleştirilmiş numunelerin kopma bölgesi makro görüntüleri verilmiştir. Burada (a) %93 Ar - %7H₂ koruyucu gaz ortamında birleştirilmiş numuneyi, (b ve c) ise %100 H₂ koruyucu gaz ortamında birleştirilmiş numuneleri temsil etmektedir. Yapılan testler sonucunda %93 Ar - %7H₂ koruyucu gaz ortamında sert lehimleme prosesi ile birleştirilmiş numunelerin tamamında kırılma kaynak arayüzeyinden gerçekleşmiştir. %100 H₂ koruyucu gaz ortamında birleştirilen numunelerde ise kırılma genellikle kaynak bölgesinden (4 adet) gerçekleşmiştir. Bazı numunelerde (2 adet) ise kırılma arayüzeyde olmasına rağmen bu numunelerde ana malzeme ciddi deformasyona uğramış ve $\sigma_{nom,max}$ değeri ana malzemeye çok yakın

bulunmuştur. Bir başka ifade ile bu numunelerde kopma tamamen sert lehimleme bölgesinde gerçekleşse dahi, ana malzemede yorulma testi sonrası çatlak oluşumu gözlenmiştir.



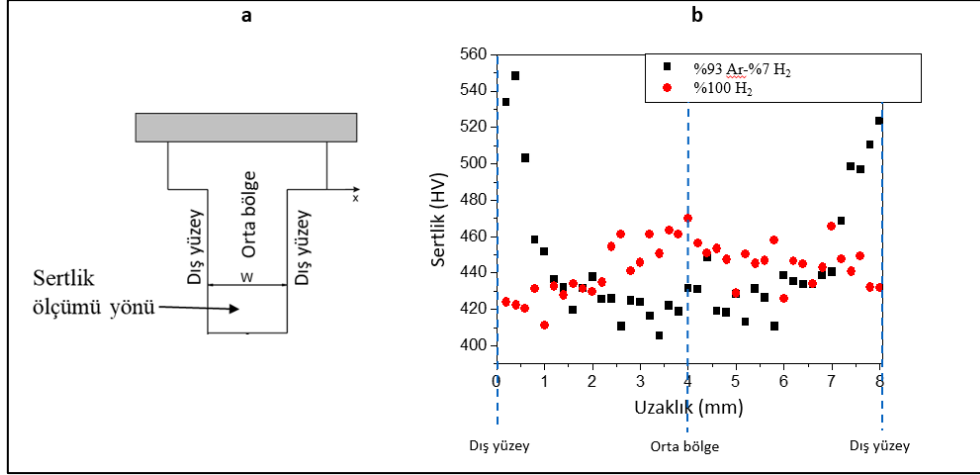
Şekil 3. %93 Ar - %7H₂ ve %100 H₂ koruyucu atmosferlerde yapılan sert lehimlenmiş numunelerin yorulma testi sonuçları



Şekil 4. Farklı koruyucu gaz atmosferinde sert lehimlenen numunelerin yorulma testi sonrası numune görselleri

İki farklı gaz koruması altında sert lehimleme ile birleştirilen numunelerde koruyucu gazın %100 H₂ atmosferi olması durumu hidrojen gevrekliği oluşumu durumunu düşündürmüştür. Bu nedenle farklı atmosferde sert lehimlenmiş numunelerin dış yüzeyden iç yüzeye doğru sertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5a'da sertlik ölçümünün numune üzerinden nasıl yapıldığı şematik bir gösterimle ifade edilmiştir. Numunelerin dış yüzeylerine herhangi bir zımparalama ya da parlatma işlemi yapılmamıştır. Şekil 5b'de farklı atmosferde sert lehimlenmiş

numunelerin sertlik değerleri dağılımı karşılaştırılmıştır. Sertlik değerleri karşılaştırıldığında farklı atmosferde lehimlenmiş numunelerinde merkezi ve civarındaki sertlik değerlerinin birbirlerine yakın (410-460 HV) olduğu ancak numunelerin dış bölgelerinde sertlik değerlerinin oldukça farklı olduğu (410-540 HV) gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, farklı koruyucu gaz atmosferinde sert lehimlenen numunelerin dış yüzeylerindeki sertlik değişimini anlamak amacı ile mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

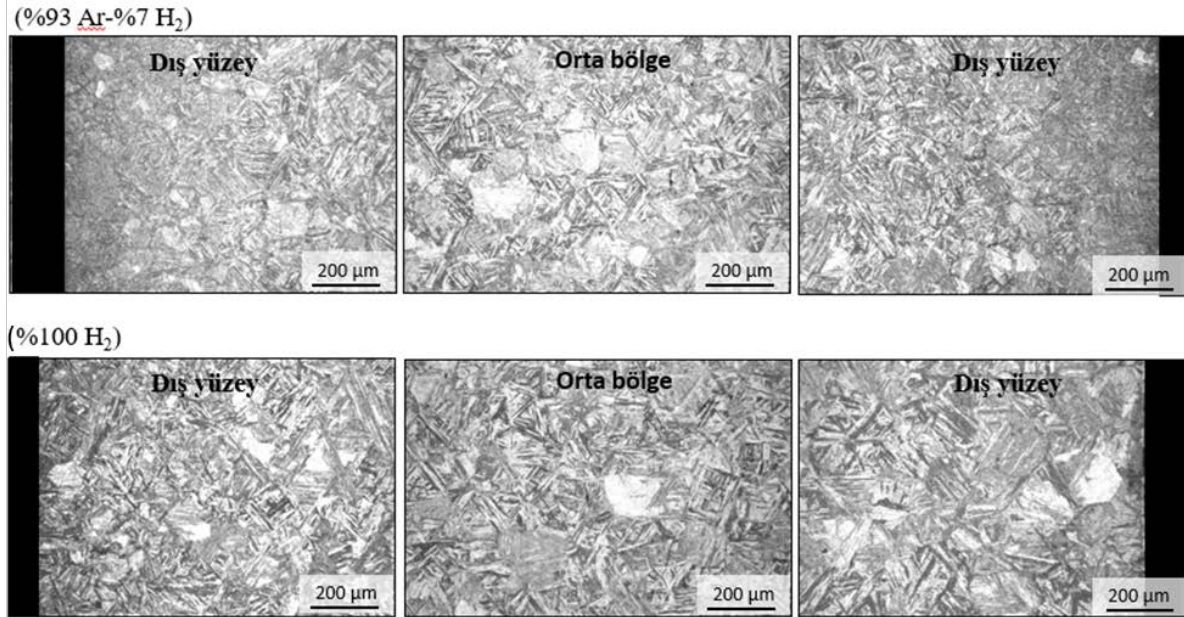


Şekil 5. Sert lehimlenmiş numunelerin sertlik ölçümü; (a) tanımlaması (b) sertlik grafiği

Sert lehimleme yöntemi ile iki farklı koruyucu gaz ortamında difüzyon sertlehimleme yöntemi ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinde meydana gelen değişimler optik mikroskop ile görüntülenerek mikroyapıları değerlendirilmiştir. Şekil 6'da farklı atmosferde sert lehimlenmiş numunelerin mikroyapıları karşılaştırılmıştır. Şekil 6 incelendiğinde, %93 Ar - %7H₂ koruyucu gaz ile sert lehimlenmiş numunenin dış yüzeylerinde orta bölgesine göre daha ince mikroyapı gözlemlenmiştir. %100 H₂ atmosferi koruyucu gaz ile sert lehimlenmiş numunede ise dış yüzey ve orta bölgelerde oldukça benzer mikroyapılar gözlemlenmiştir. Dış yüzey mikroyapılardaki bu farklılığın, farklı atmosferlerin sağladığı farklı ısınma/soğuma hızlarıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla H₂ gazının Ar gazına göre yüksek ısı iletkenliğe sahip olması (argon 0.016 ve H₂ 0.18 (W/(m K)) bu durumun ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir.

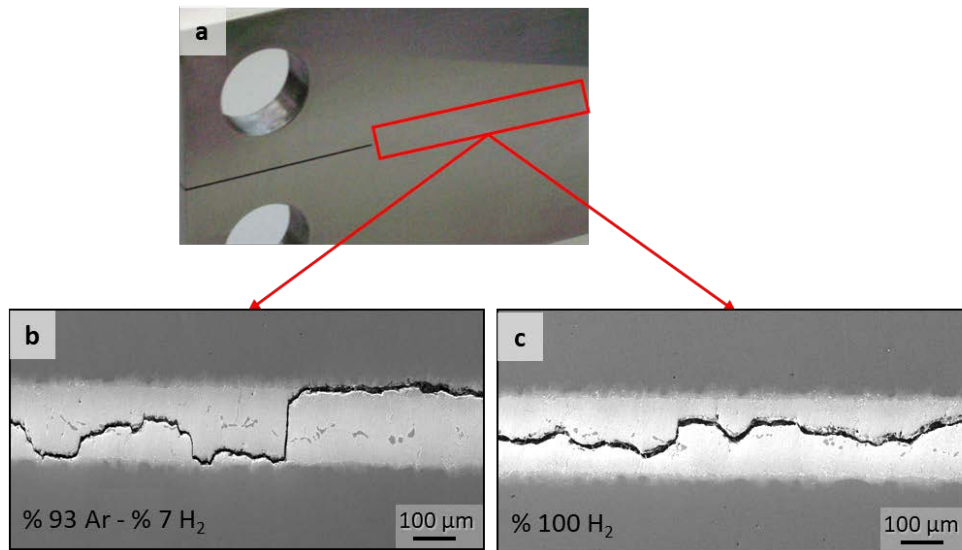
Sert lehimleme işlemi ile farklı koruyucu gaz ortamında birleştirilen numunelerin yorulma çatlakları ilerleme davranışını karakterize etmek için, DCB geometrili numuneler, yorulma testi durdurulup, makineden çıkarılarak yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Kırılma ilerlemesini gözlemlemek için farklı koruyucu gaz ile sert lehimlenmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme testleri sonrasında, numune yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 7'de gösterilmiştir. %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede kırılma ilerlemesi difüzyon bölgesinde basamak şeklinde oluşmuş ve homojen olmayan bir davranış sergilemiştir (Şekil 7a). %100 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede ise kırılma ilerlemesinin sert lehimlenmiş bölgedeki dolgu metalinin merkez hattı doğrultusunda ilerlediği görülmektedir (Şekil 7b). Difüzyonla ara bağlayıcı kullanılarak yapılan birleştirmelerde hem adezyon kuvveti (ana malzeme ile folyo arasında kalan ara yüzey) hem de kohezyon kuvveti (folyonun kendi içindeki dayanımı) meydana gelmektedir. Gerek adezyon gerekse kohezyon olayı yüzeyin serbest enerjisinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, bu tür ara bağlayıcı birleştirmelerde kohezyon türü kopma

tercih edilmektedir. %100 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede kohezyon türü kopma gözlemlenmiş olması yorulma dayanımındaki artış ile uyum sağlamaktadır.



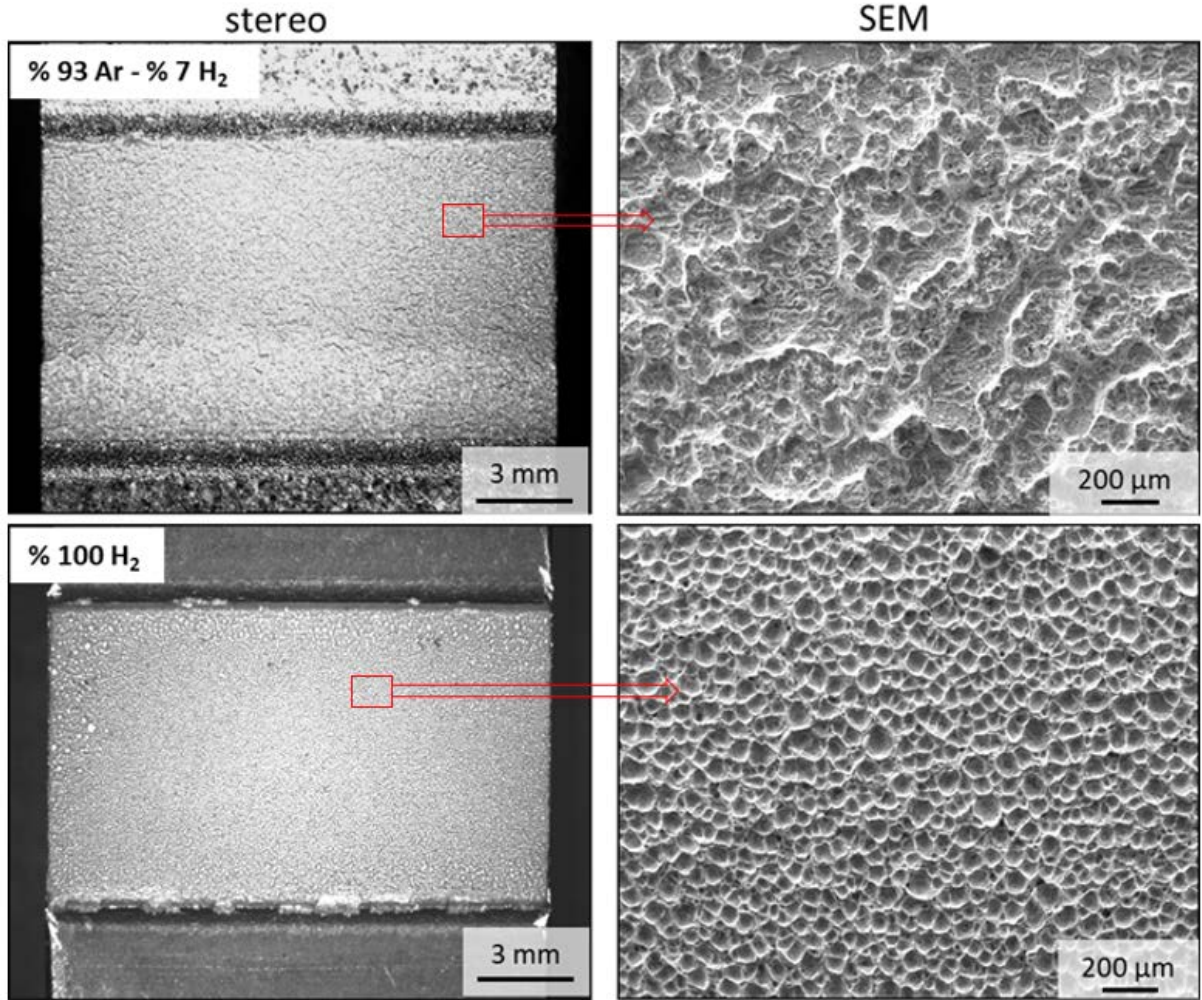
Şekil 6. Farklı atmosferde sert lehimlenmiş numunelerin mikroyapılarının karşılaştırılması

Yapılan kırılma yüzeyi incelemelerinde (Şekil 7), sert lehimlenmiş bölgede (Şekil 7a), %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede (Şekil 7b) basamaklı ve daha büyük genlikli bir alanda kırılma ilerlemesi gözlemlenmiştir. %100 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede ise (Şekil 7c) daha dar genlikli ve sinüzoidal (dalga) şekilli (dolayısıyla kırılma yolu mesafesi fazla) kırılma ilerlemesi görülmüştür.



Şekil 7. Sert lehimlenmiş bölge (a) %93 Ar - %7 H₂ (b) ve %100 H₂ (c) atmosferleri altında sert lehimlenmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme testleri sonrasında, numune yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri

Şekil 8'de fırında sert lehimleme yöntemi ile iki farklı koruyucu gaz ortamında birleştirilmiş numunelerin kırık yüzeylerinden elde edilen stereo ve SEM görüntüleri verilmiştir. Burada %93 Ar - %7 H₂ ortamında birleştirilmiş numune yüzeyi yarı sünek lifli bir klivajlı kırılma davranışı sergilemiş iken %100 H₂ ortamında birleştirilmiş numune kırılma yüzeyinde gözlenen petekli kırılma yüzeyi özelliği, daha güçlü bir bağlantı eldesini ve daha iyi ara yüzey reaksiyonu oluştuğunun kanıtı olarak değerlendirilebilir. Doğan ve Gündüz [21] farklı ısıl işleme maruz bırakılmış çelik malzemelerin kırık yüzeylerinde yaptıkları SEM incelemeleri sonucunda klivaj tipi kırılmaların yarı gevrek, petekli yapıların ise sünek karakterde olduklarını rapor etmişlerdir.



Şekil 8. Yorulma testi sonrası lehimlenmiş numunelerin kırılma yüzeylerinin karşılaştırılması

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı koruyucu gaz atmosferinde fırında sert lehimlenen X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çeliklerin malzemelerin yorulma özellikleri ile mikroyapı ve sertlik özellikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

1. Farklı koruyucu gaz atmosferi kullanılarak sert lehimleme yöntemi ile elde edilen numunelerin, yorulma test sonuçları karşılaştırıldığında sert lehimleme kalitesi %100 H₂ atmosferi altında önemli ölçüde artmış

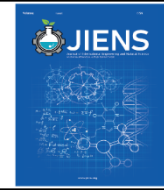
olup, %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında 20.000 çevrimde $\sigma_{nom,max}$ değeri 250 MPa iken, bu değer %100 H₂ koruyucu gazı kullanıldığında yaklaşık %75 artışa 450 MPa'a yükselmiştir. 100 H₂ koruyucu gaz altında daha güçlü bağlanma elde edilmiş ve daha iyi arayüzey reaksiyonu oluşmuştur.

2. Sertlik değerleri karşılaştırıldığında farklı atmosferde lehimlenmiş numunelerinde sertlik değerlerinin birleşme arayüzeyi ve civarında benzer olduğu ancak numunelerin dış bölgelerinde sertlik değerlerinin oldukça farklı olduğu gözlemlenmiştir.
3. Farklı koruyucu gazlar altında fırında sert lehimlenen numunelerin merkez ve etrafında benzer, dış yüzeylerinde ise farklı mikroyapılar gözlenmiştir. Bu durumun, farklı atmosferlerde oluşan farklı soğuma hızlarıyla ilişkili olabileceği düşünülmüştür.
4. %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında fırında sert lehimlenmiş numunede kırılma ilerlemesi geniş bir genlikte basamak şeklinde ilerlemiş olup homojen olmayan bir davranış göstermiştir. %100 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede ise kırılma ilerlemesinin sert lehimlenmiş bölgedeki dolgu metalinin merkez hattı doğrultusunda ve dar bir genlikte ilerlediği görülmüştür.
5. Farklı koruyucu gaz ortamlarında fırında sert lehimleme yöntemi ile birleştirilen X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çeliklerin SEM ile yapılan kırık yüzey incelemelerinde %93 Ar - %7 H₂ ortamında birleştirilmiş numune yüzeyi yarı sünek lifli bir klivajlı kırılma davranışı gözlemlenmiş iken, %100 H₂ ortamında birleştirilmiş numune kırılma yüzeyinde ise peteksü sünek bir yapı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Başer T (2016) Microstructural and fractographic investigations of brazed martensitic stainless steel joints under cyclic loading. 18. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi IMMC'2016, 261.
2. Uzun H (2002) Sert lehimleme prensipleri. Değişim Yayınları, İstanbul, 18-21:236- 237.
3. Messler RW (1995) The challenges for joining to keep pace with advancing materials and design. *Materials and Design* 16(5):261–269, [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(96\)00004-0](https://doi.org/10.1016/0261-3069(96)00004-0)
4. Boretius M (2006) The potential of vacuum brazing – state of the art and developments from the perspective of a service contractor. *Adv Eng Mater* 8(3):158–161. <https://doi.org/10.1002/adem.200500247>
5. Sanchez L, Sarrillo D, Rodriguez E, Aragon F, Sotelo J, Toral F (2011) Development of high precision joints in particle accelerator components performed by vacuum brazing. *Journal of Materials Processing Technology* 211(8):1379-1385. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.009>
6. Zhang J, Wang T, Liu C, He Y, (2014) Effect of brazing temperature on microstructure and mechanical properties of graphite/copper joints. *Materials Science And Engineering* 594(31):26-31. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.059>
7. Nowacki J, Swider P, (2003) Producibility of brazed high-dimension centrifugal compressor impellers. *J Mater Process Technol* 133(1-2):174–80. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00228-5)
8. Kassner ME, Kennedy TC, Schrems KK (1998) The mechanism of ductile fracture in constrained thin silver films. *Acta Mater* 46(18):6445-6457. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00299-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00299-7)
9. Kah P, Martikainen J (2013) Influence of shielding gases in the welding of metals. *Int J Adv Manuf Technol* 64:1411–1421. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>
10. Chern TS, Tseng KH, Tsai HL (2011) Study of the characteristics of duplex stainless steel activated tungsten inert gas welds. *Materials and Design* 32(1):255–263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.056>
11. Tolle MC, Kassner ME, Cerri E, Rosen RS (1995) Mechanical behaviour and microstructure of Au–Ni braze. *Metallurgical and Materials Transactions* 26A:941–948. <https://doi.org/10.1007/BF02649090>
12. Wilhelm BF, Kai M, Ulrich H, Jörg S, Andre L, Christian R (2011) Boron and phosphorous free nickel-based filler metals for brazing stainless steel in shielding gas furnaces. *International Journal of Materials Research* 102(8):964-971. <https://doi.org/10.3139/146.110549>
13. Bach FW, Möhwald K, Holländer U (2010) Physico-chemical aspects of surface activation during fluxless brazing in shielding-gas furnaces. *Key Engineering Materials* 438:73-80. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.438.73>

14. Lugscheider E, Burger W, Broich U (1997) Development and characterization of joining techniques for dispersion-strengthened alümina. *Welding Research Supplement* 76(9):349-355.
15. Kahraman N (2003) Titanyum ve bakır çiftinin ara bağlayıcı difüzyon sert lehimlemesi ile fırında birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 16(3):611-618.
16. Gülenç B (2003) Difüzyon sert lehimlemesi ile titanyum ve düşük karbonlu çelik malzemelerin birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi* 5(1):22-28.
17. Leinenbach C, Schindler H., Başer TA, Rüttimann N (2010) Quasistatic fracture behaviour and defect assessment of brazed soft martensitic stainless steel joints. *Engineering Failure Analysis* 17:672-682. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.05.002>
18. Gündüz S (2019) *Metalurjide Faz Diyagramları*. 4. Güncellenmiş Baskı, Seçkin Akademik ve Mesleki Yayınları, Ankara, pp 177-179.
19. Donald RA (1996) *The science and engineering of materials*. Third S. I. Edition, Chapman Hall, London, pp 115-117.
20. Aydın K, Kaya Y, Kahraman N, (2012) Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper. *Materials and Design* 37:356-368. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.026>
21. Doğan T Gündüz S (2019) Effect of different grain sizes on the static strain aging behavior of bake hardening steel. *Materials Testing* 61(7):674-680. <https://doi.org/10.3139/120.111370>



New approaches to numerical differentiation for second and third order

 Çiğdem Dinçkal^a

^aFaculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Medipol University, Ankara and 06570, Turkey.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 October 2024

Received in revised form 17 December 2024

Accepted 6 January 2025

Available online

Keywords:

Central finite difference method

Forward finite difference method

Backward finite difference method

Improved forward finite difference method

Improved backward finite difference method

ABSTRACT

In this article, new numerical methods for calculation of second and third order derivatives are designed by using basic finite difference methods; forward, central and backward finite difference approaches. Those approaches are originally derived from the well-known Taylor series. Main advantage of new numerical formulas (named as Improved Backward Finite Difference Method, Improved Forward Finite Difference Method) is that they produce more accurate numerical results with smaller step size than the well-known backward and forward finite difference methods. For this purpose, some numerical examples are given to compare these new formulas with the traditional finite difference methods; backward and forward. The performance of the new methods in terms of error analysis and elapsed time for both second and third order derivative computations is also presented.

I. INTRODUCTION

Numerical differentiation is one of the most significant concepts in calculus, which has been everywhere in many fields of applied mathematics and engineering.

There are several methods to treat the numerical differentiation issue. The most widely and commonly preferred method for solving numerical differentiation problems is finite difference method. Since numerical differentiation is an ill-posed problem by means of Hadamard [1-3]. For this reason, Tikhonov regularization method [3] and mollification method [4] have been proposed. Besides, Hanke and Scherzer [5] and Wang et al. [6, 7] have proposed techniques for many ill-posed problems. Nevertheless, most results in literature are sure about $f'(x)$ (first order derivative).

Furthermore, traditional finite difference methods [7-9] are widely used but often face challenges, particularly with ill-posed problems. To address this, the article introduces "Improved Forward Finite Difference" (FFD_improved) and "Improved Backward Finite Difference" (BFD_improved) techniques, which are derived from Taylor series expansions to provide more precise results than standard methods. This is one of the novel sides. There are also some works which employed interpolation methods to compute numerical differentiations [10-13]. Jianping L used Vandermonde determinant for computation of differentiation [14]. Numerical differentiation was performed by use of noisy data in mechanical engineering [15-19]. Yang et al also achieved differentiation by use of higher order spatial discretization method [20].

* Corresponding author. Tel.: 4442010; e-mail: cigdem.dinckal@ankaramedipol.edu.tr

Instead of all these methods in literature, this study presents more straightforward and precise methods with use of basic finite difference methods for second and third order derivative calculations of any functions. The proposed methods for second and third order derivatives are the combinations of Backward with Central Finite Difference and Forward with Central Finite Difference methods.

The article is organized as follows: theoretical background is given in section 2. Proposed methods are given in section 3. Numerical results are presented for comparison purposes in section 4. Finally, results are discussed.

II. EXPERIMENTAL METHOD / TEORETICAL METHOD

The originating idea of finite difference techniques is based on the well-known Taylor series. The form of the Taylor series by defining a step size $h = x_{i+1} - x_i$ and expressing as [7]

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)h + \frac{f''(x_i)}{2!}h^2 + \frac{f^{(3)}(x_i)}{3!}h^3 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_i)}{n!}h^n + R_n. \quad (1)$$

Where the remainder term is defined as

$$R_n = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}h^{n+1}. \quad (2)$$

The term in eq (2) corresponds to $O((x_{i+1} - x_i)^{n+1})$ which is $O(h^{n+1})$ called as error. For backward form, Taylor series in eq (1) can be rewritten as

$$f(x_{i-1}) = f(x_i) - f'(x_i)h + \frac{f''(x_i)}{2!}h^2 - \frac{f^{(3)}(x_i)}{3!}h^3 + \dots \quad (3)$$

One of the ways to approximate the first derivative is to subtract eq (3) from the Taylor series expansion in eq (1) to obtain:

$$f(x_{i+1}) = f(x_{i-1}) + 2f'(x_i)h + \frac{2f^{(3)}(x_i)}{3!}h^3 + \dots \quad (4)$$

This can be solved for

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2h} - \frac{f^{(3)}(x_i)}{3!}h^2 - \dots \quad (5)$$

Eq (5) can be also expressed as

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2h} + O(h^2). \quad (6)$$

Error is of the order of h^2 , even though the forward and backward approximations that are of the order of h . Therefore, Taylor series approximations yield the practical information that the centered difference is the most accurate representation of the derivative.

Level of accuracy depends on both decreasing the step size and the number of terms of the Taylor series.

By substituting first order derivative in eq (6) into eq (1), centered finite difference (CFD) representation of the second order derivative based on error $O(h^2)$ can be found as

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i+2}) - 2f(x_i) + f(x_{i-2}))}{h^2}. \quad (7)$$

Third order derivative based on error $O(h^2)$:

$$f^{(3)}(x_i) = \frac{f(x_{i+3}) - 3f(x_{i+1}) + 3f(x_{i-1}) - f(x_{i-3}))}{2h^3}. \quad (8)$$

With similar way, first derivative by Forward Finite Difference (FFD) based on $O(h)$ is

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} + O(h). \quad (9)$$

Second order derivative by FFD based on $O(h)$ can be written as

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i+2}) - 2f(x_{i+1}) + f(x_i)}{h^2}. \quad (10)$$

Third order derivative by FFD based on $O(h)$ can be written as

$$f^{(3)}(x_i) = \frac{f(x_{i+3}) - 3f(x_{i+2}) + 3f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h^3}. \quad (11)$$

Similarly, the first derivative by Backward Finite Difference (BFD) based on $O(h)$ is

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1}))}{h} + O(h). \quad (12)$$

Second order derivative by BFD based on $O(h)$ can be written as

$$f''(x_i) = \frac{f(x_i) - 2f(x_{i-1}) + f(x_{i-2}))}{h^2}. \quad (13)$$

Third order derivative by BFD based on $O(h)$ can be written as

$$f^{(3)}(x_i) = \frac{f(x_i) - 3f(x_{i-1}) + 3f(x_{i-2}) - f(x_{i-3}))}{h^3}. \quad (14)$$

By employing eq (6) and combining with eq (12), Improved Backward Finite Difference (BFD_improved) for second order derivative computation is

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}) - f(x_i) + f(x_{i-2h}))}{2h^2}. \quad (15)$$

For third order derivative calculation, with combination of eq (6) and eq (13) the formulation by BFD_improved is

$$f^{(3)}(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + 2f(x_{i-2}) - f(x_{i-3}))}{2h^3}. \quad (16)$$

Similarly, by using eq (6) and eq (9), Improved Forward Finite Difference (FFD_improved) for second order derivative computation is

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i+2}) - f(x_{i+1}) - f(x_i) + f(x_{i-h}))}{2h^2}. \quad (17)$$

For third order derivative calculation, with the combination of eq (6) and eq (10), the formulation by FFD_improved is

$$f^{(3)}(x_i) = \frac{f(x_{i+3}) - 2f(x_{i+2}) + 2f(x_i) - f(x_{i-1}))}{2h^3}. \quad (18)$$

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

A general algorithm with use of various step sizes is generated for application of the proposed methods in Matlab R2022a. Function list for numerical analyses is presented in Table 1. Corresponding numerical results for these functions are displayed in Figures 1-5.

Table 1. Examples for several functions

Example	Function
1	$x^2 \cos(x)$
2	15^{2x}
3	$x^2 e^{-\frac{x^2}{2}}$
4	$12x^4 + 10x^3 + 5x^2 + 3x + 2$
5	$\cos(x) e^{(x^2+5x+3)}$

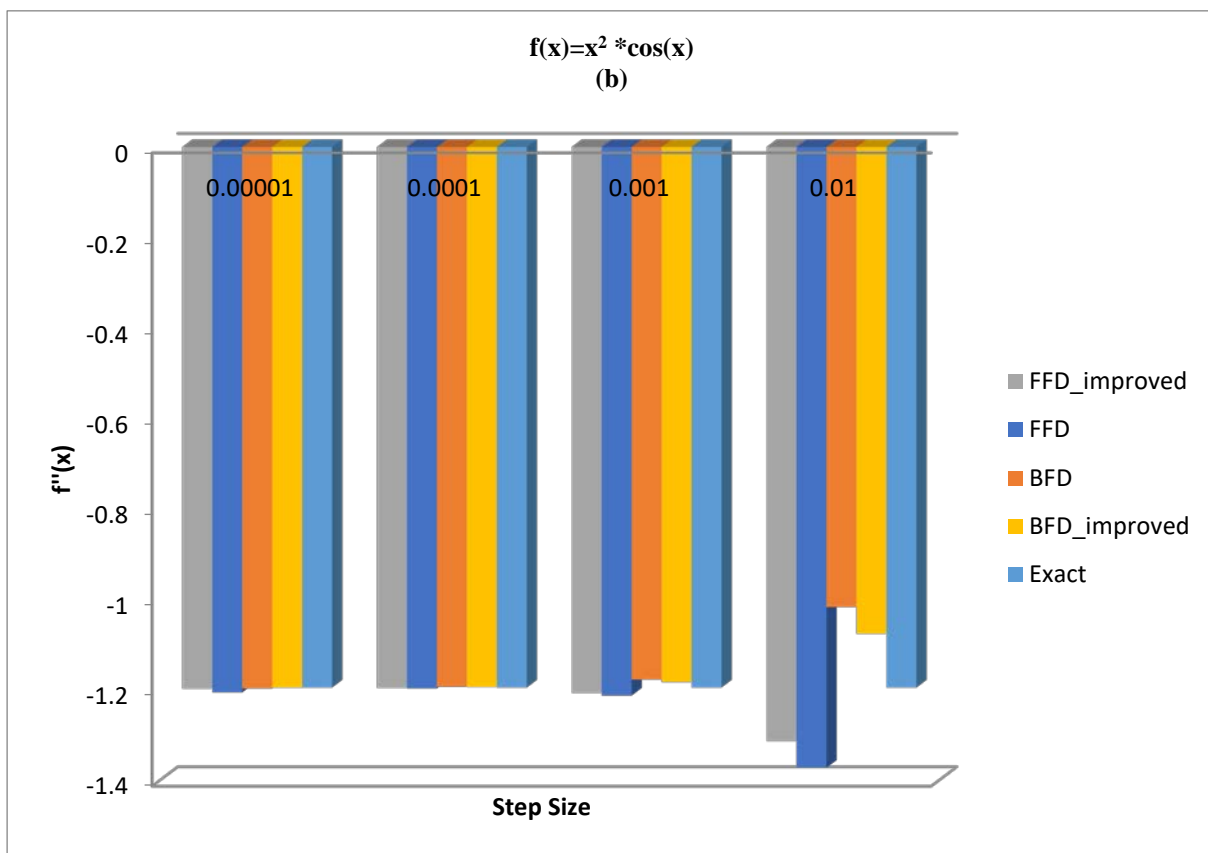
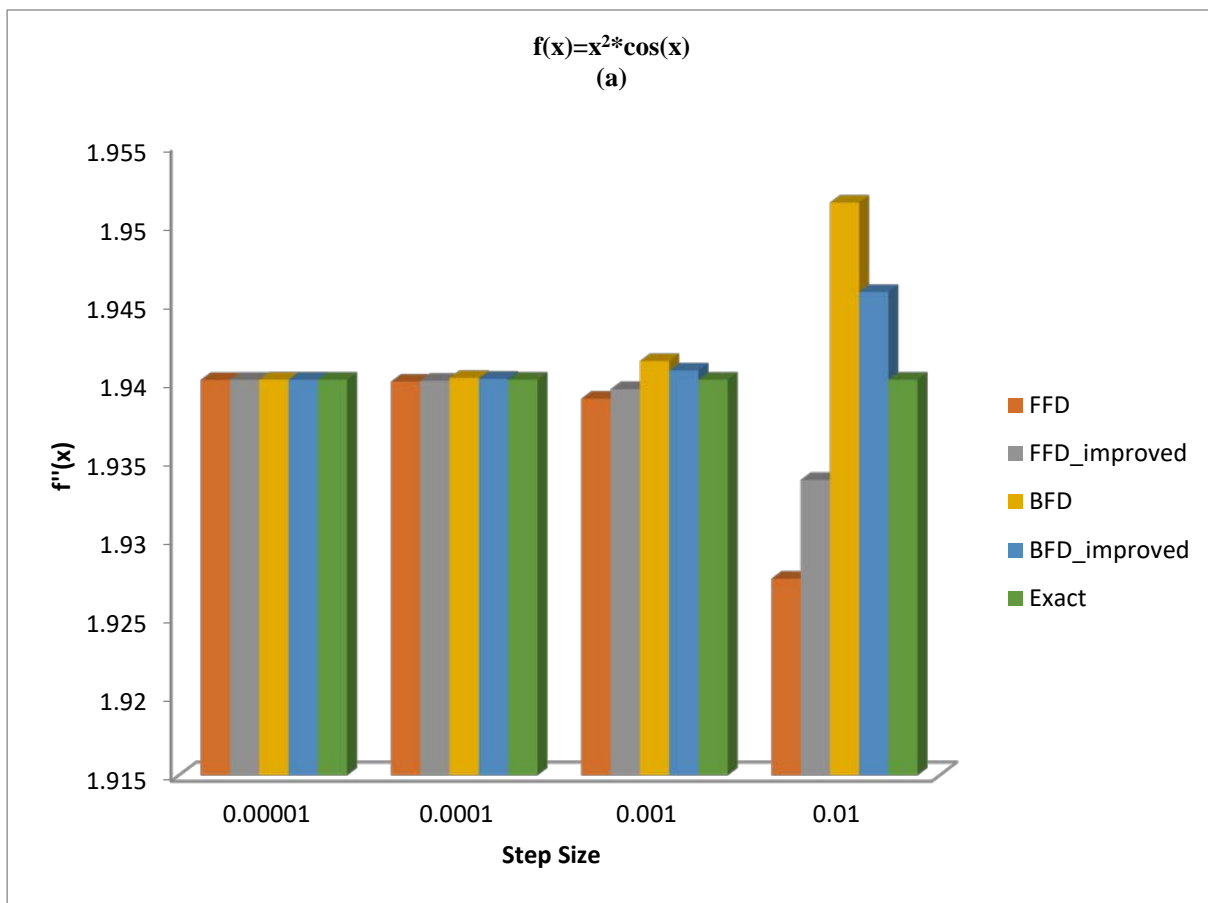


Figure 1. Numerical results for (a) second order derivative of $f(x)=x^2\cos(x)$ (b) third order derivative of $f(x)=x^2\cos(x)$

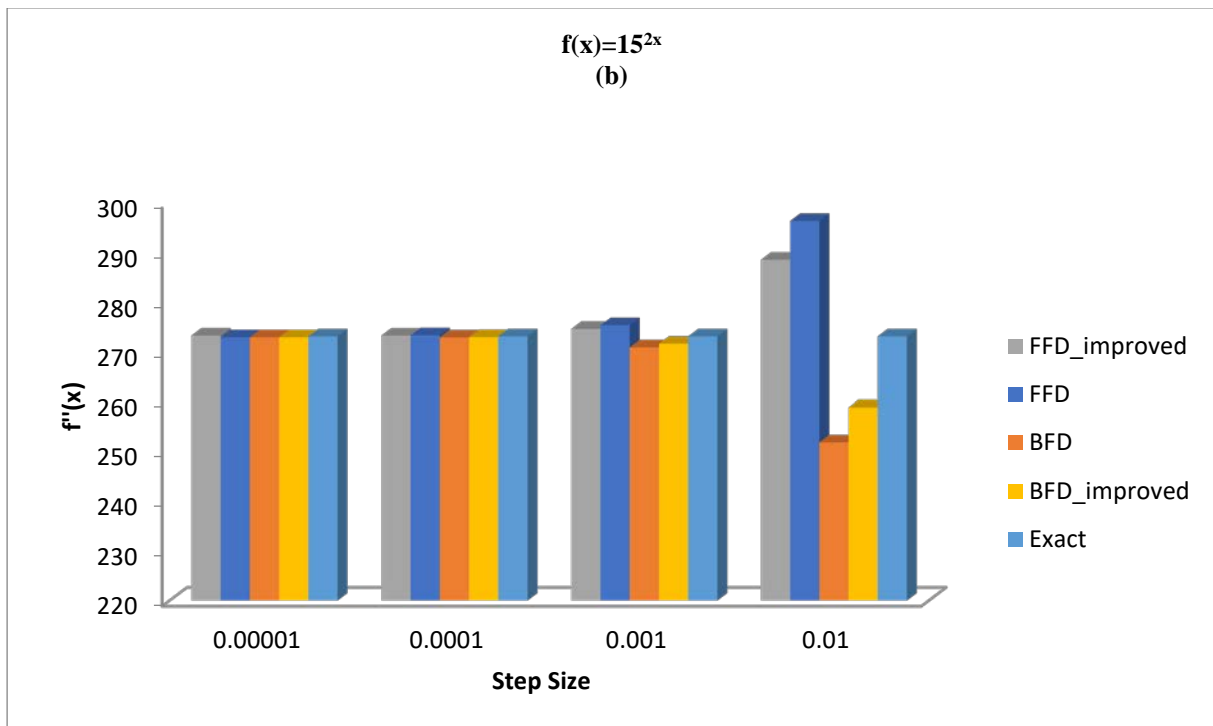
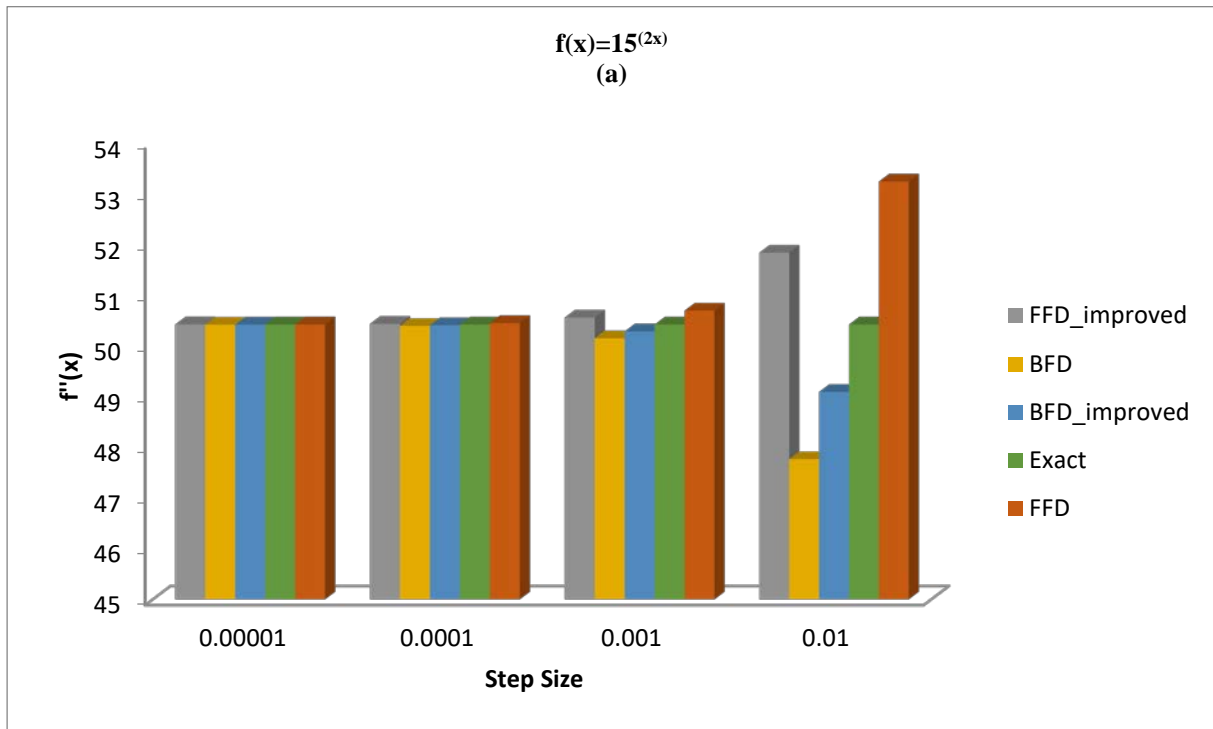


Figure 2. Numerical results for (a) second order derivative of $f(x)= 15^{2x}$ (b) third order derivative of $f(x)= 15^{2x}$

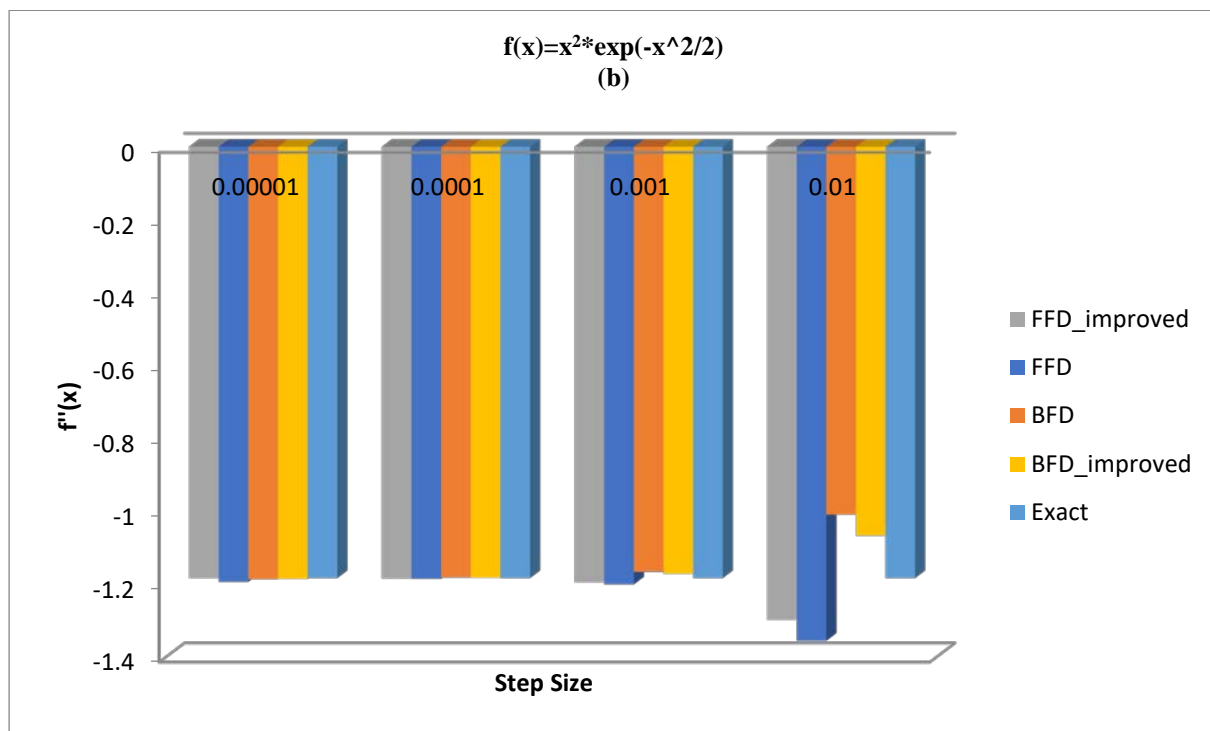
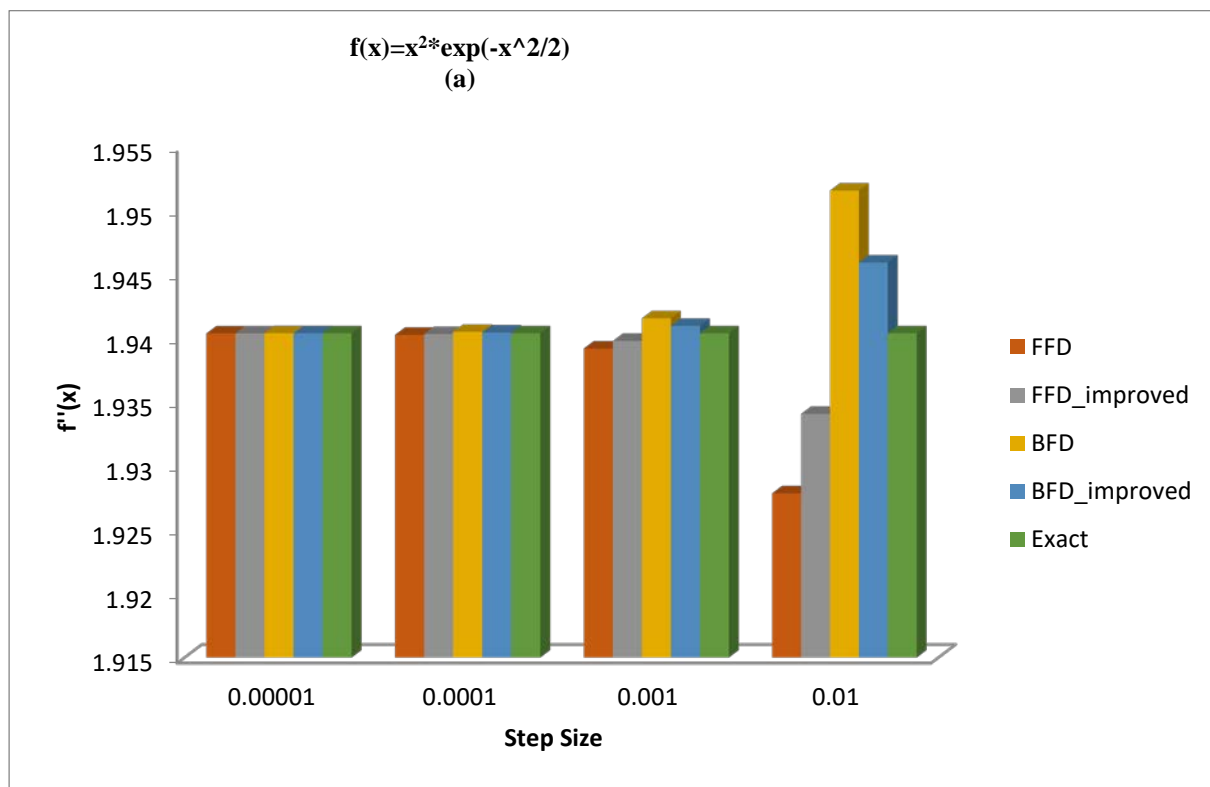


Figure 3. Numerical results for **(a)** second order derivative of $f(x)=x^2e^{-\frac{x^2}{2}}$ **(b)** third order derivative of $f(x)=x^2e^{-\frac{x^2}{2}}$

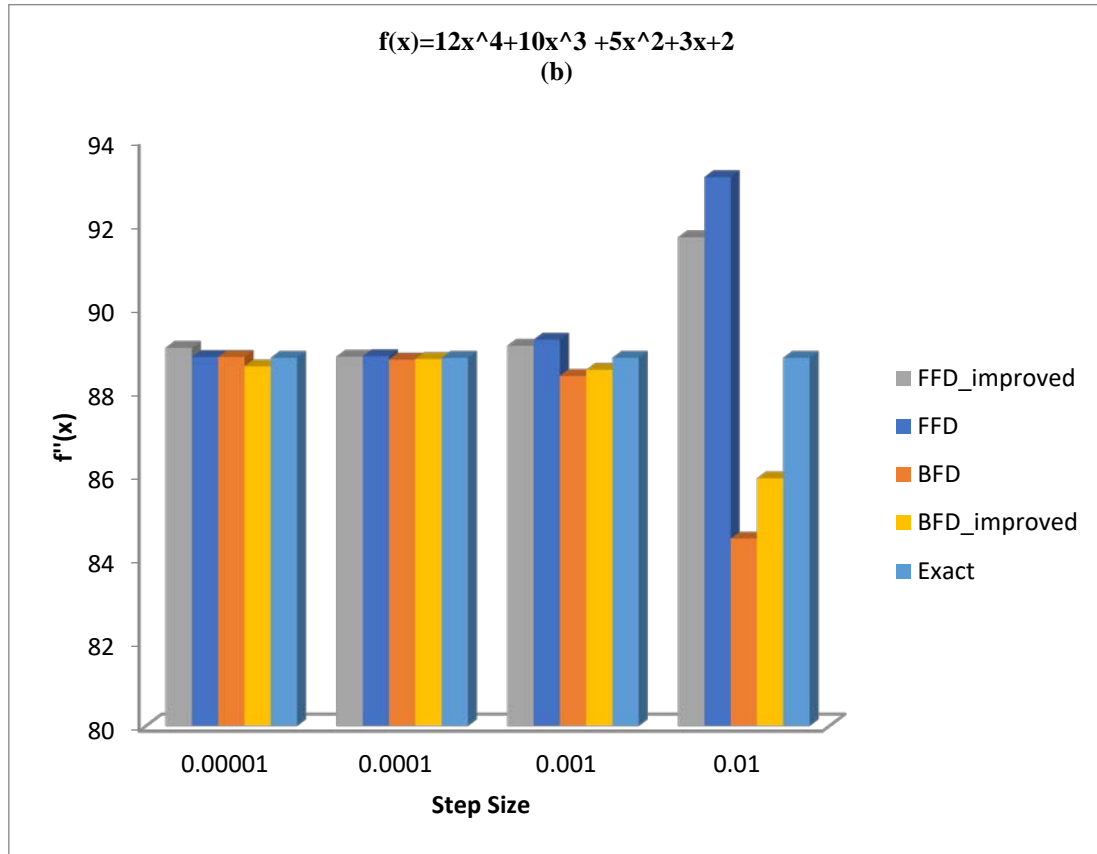
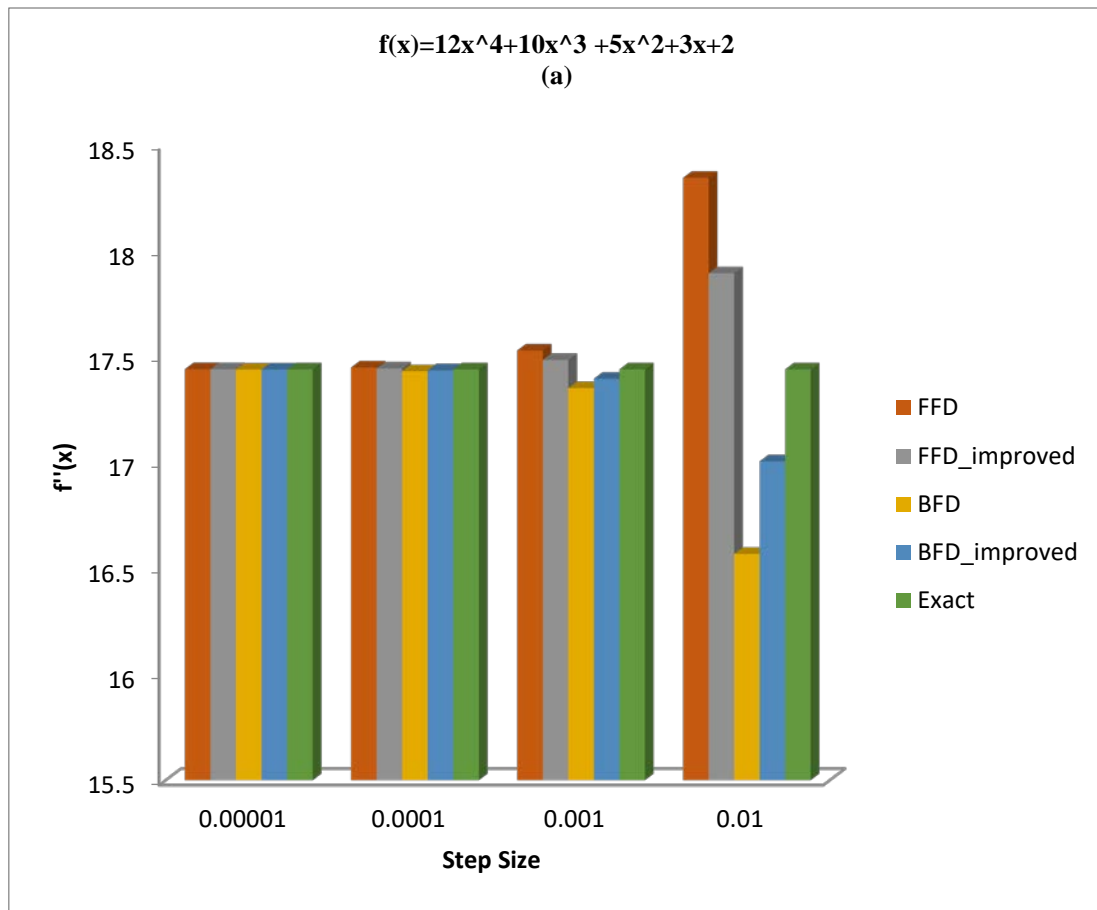


Figure 4. Numerical results for (a) second order derivative of $f(x)=12x^4+10x^3+5x^2+3x+2$ (b) third order derivative of $f(x)=12x^4+10x^3+5x^2+3x+2$

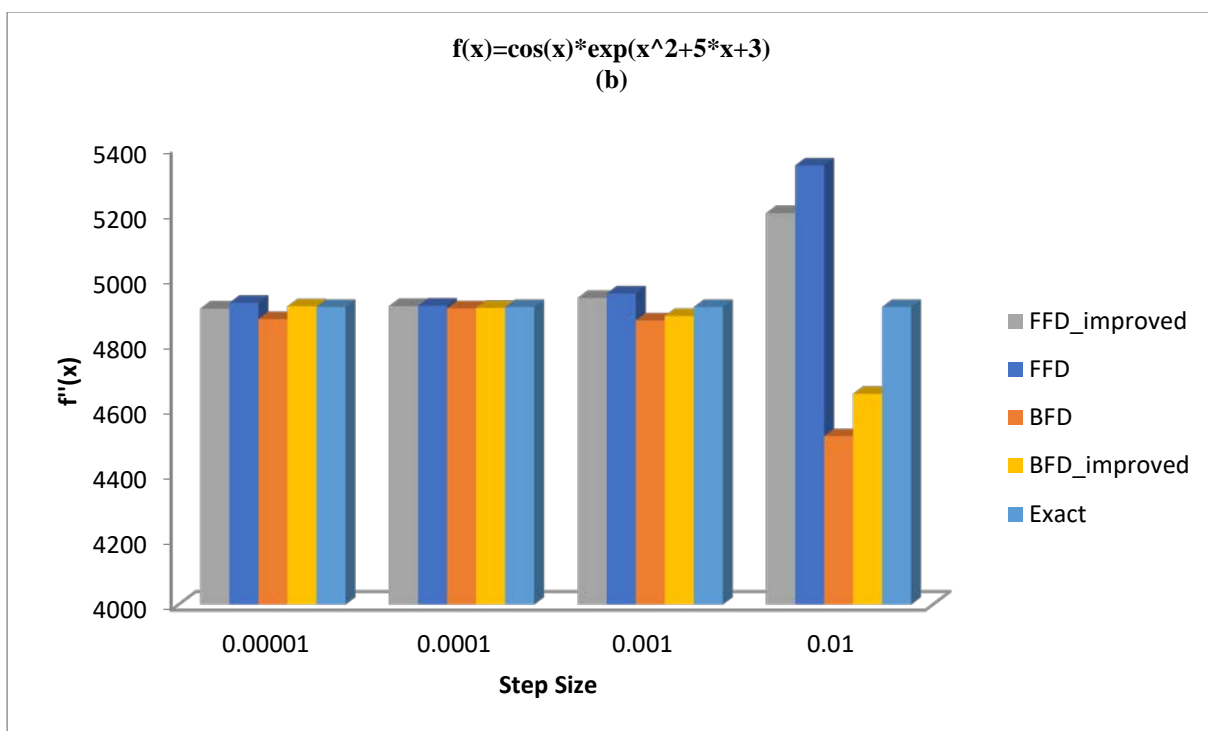
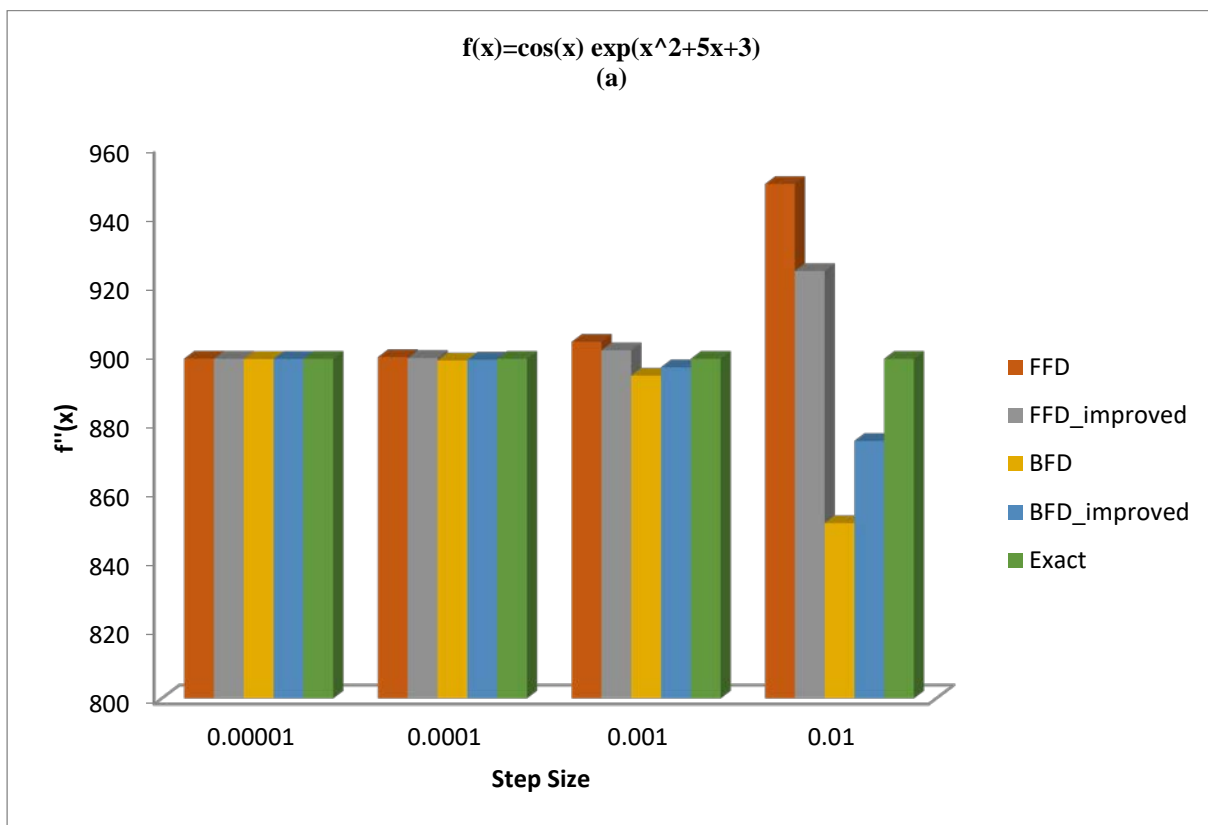


Figure 5. Numerical results for (a) second order derivative of $f(x) = \cos(x)e^{(x^2+5x+3)}$ (b) third order derivative of $f(x) = \cos(x)e^{(x^2+5x+3)}$

It is evident from Figures 1-5 that decreasing the step size increases the accuracy for both second and third order differentiations. When, step size is 0.00001, an almost exact solution is achieved.

3.1 Performance Analyses of New Algorithm

The performance analyses are conducted using both error and elapsed time computations. The results of the error computations for the example functions are presented in Figures 6-10.

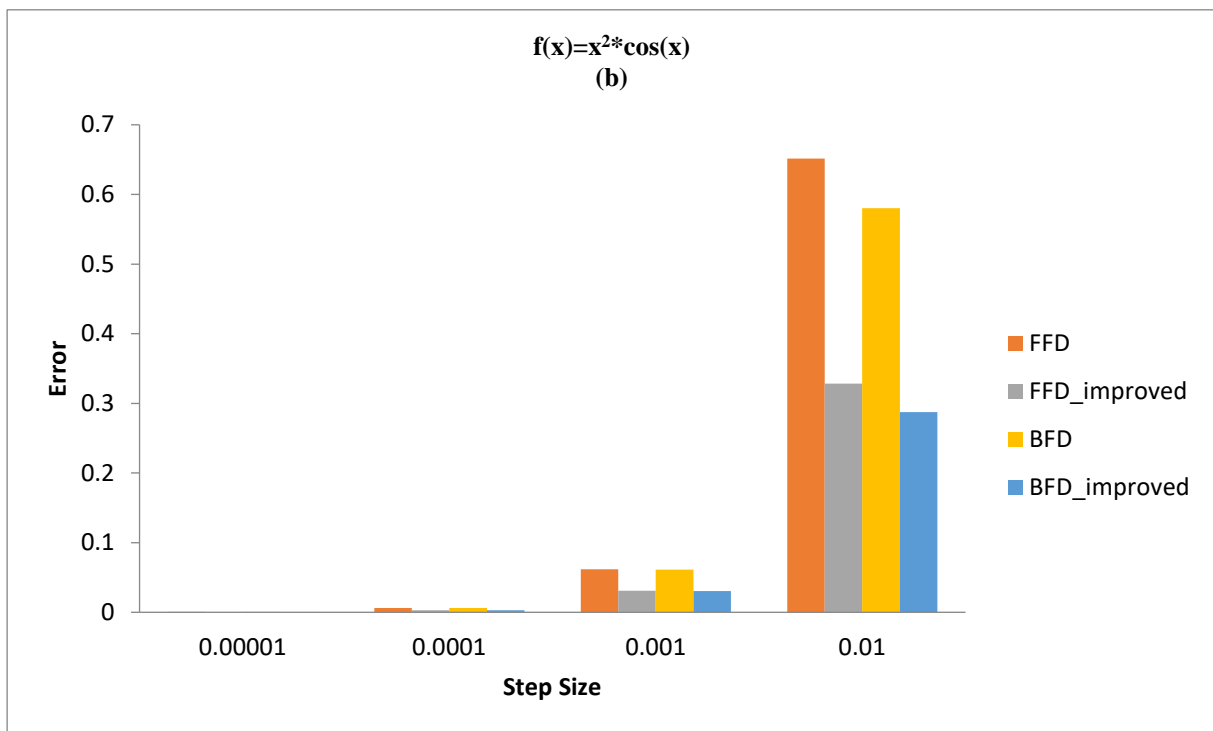
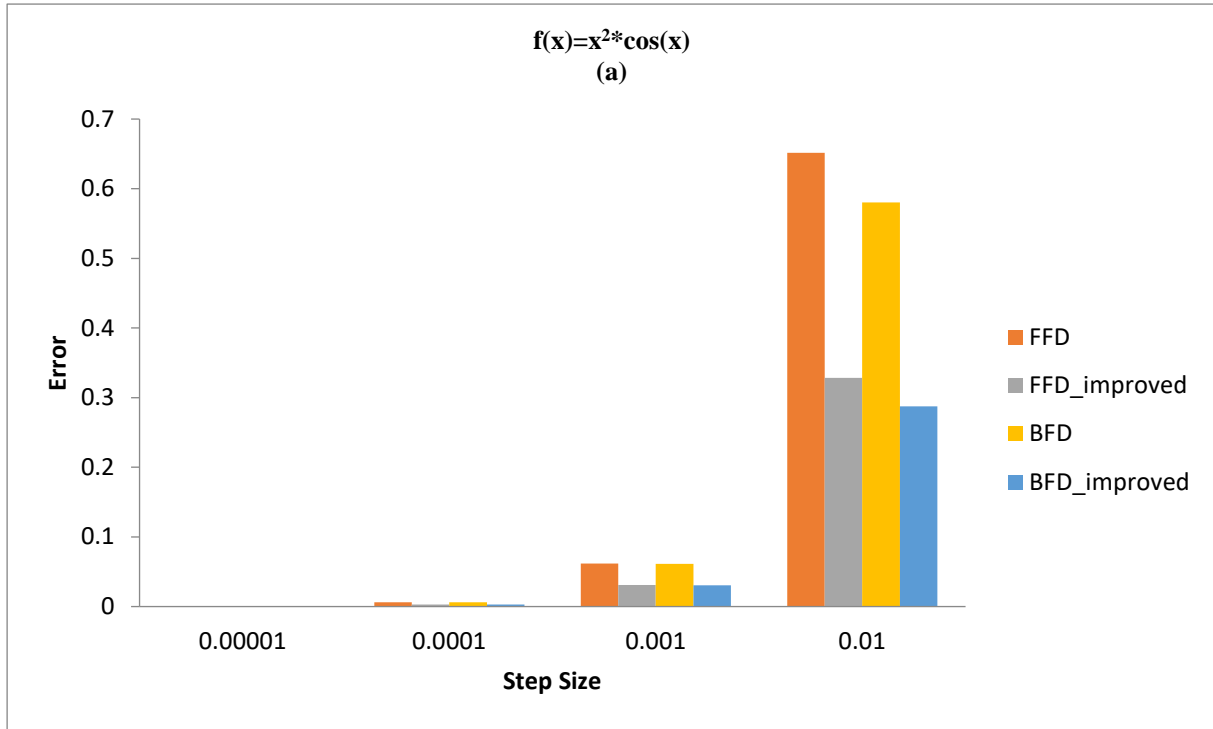


Figure 6. Numerical results for (a) second order derivative of $f(x)= x^2\cos(x)$ (b) third order derivative of $f(x)= x^2\cos(x)$

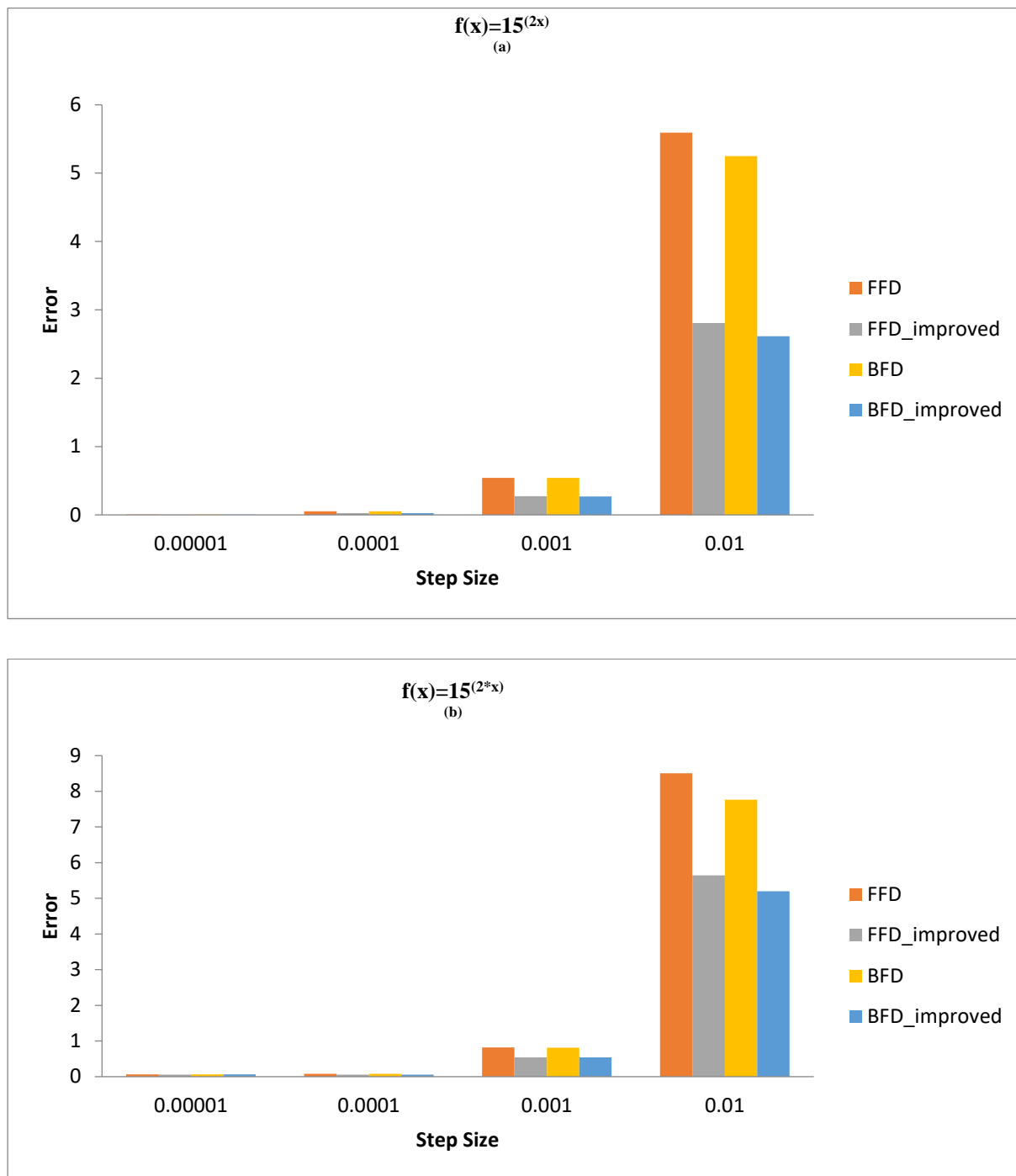


Figure 7. Numerical results for (a) second order derivative of $f(x)=15^{2x}$ (b) third order derivative of $f(x)=15^{2x}$

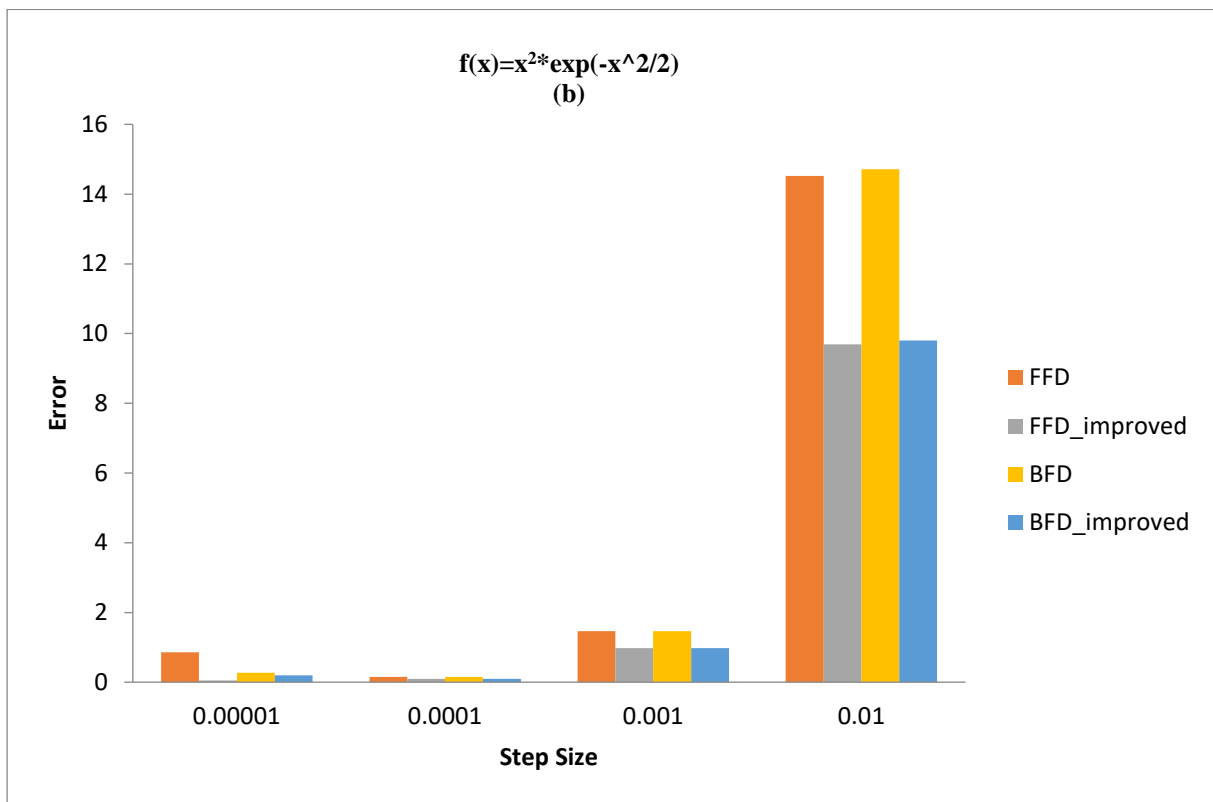
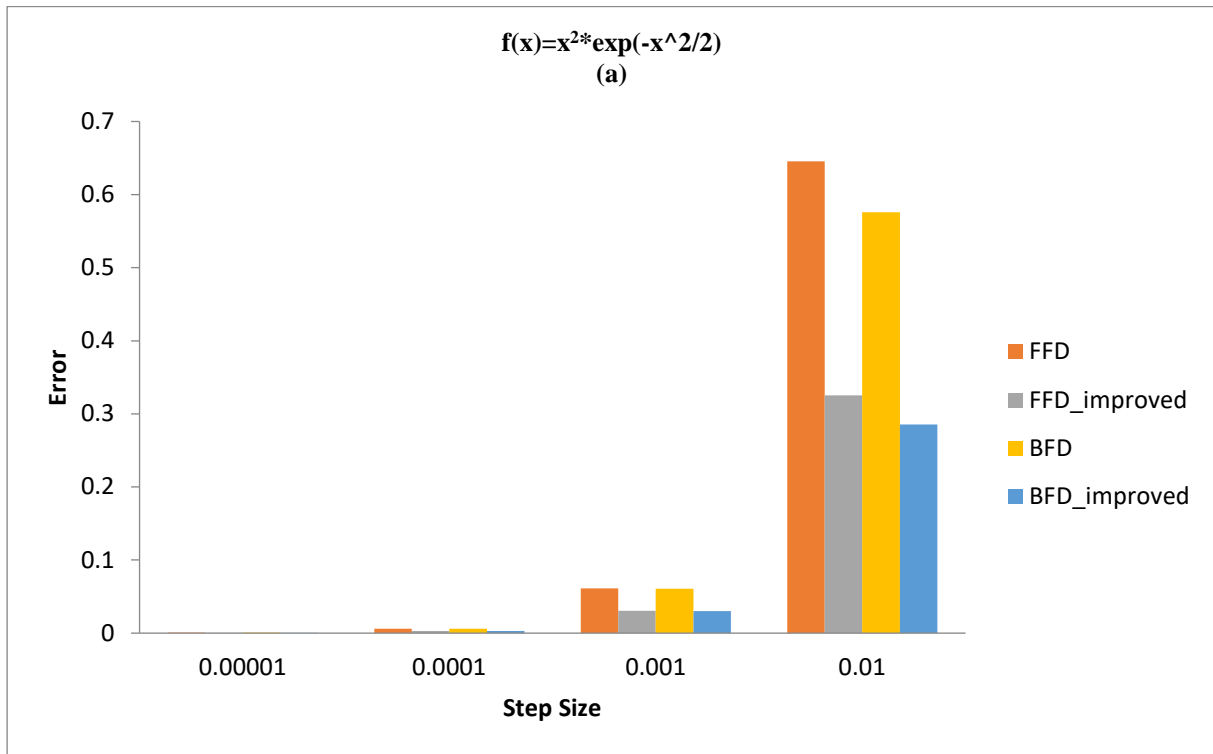


Figure 8. Numerical results for (a) second order derivative of $f(x) = x^2 e^{-\frac{x^2}{2}}$ (b) third order derivative of $f(x) = x^2 e^{-\frac{x^2}{2}}$

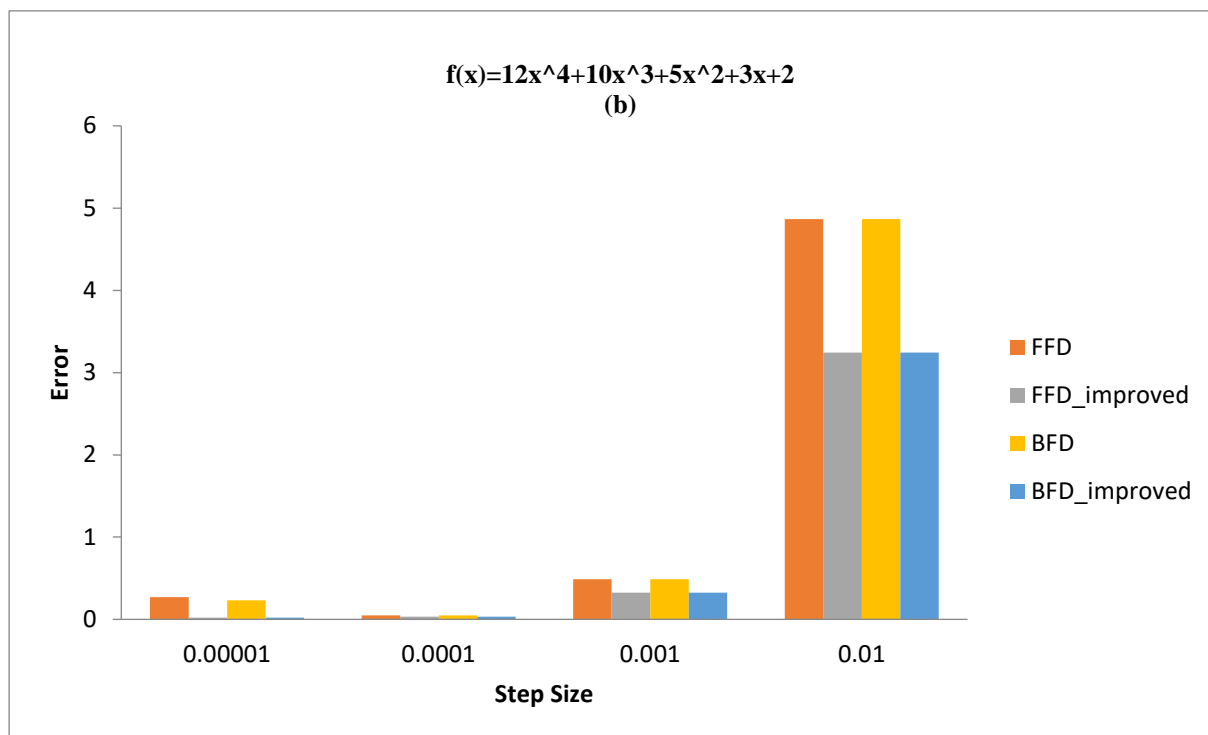
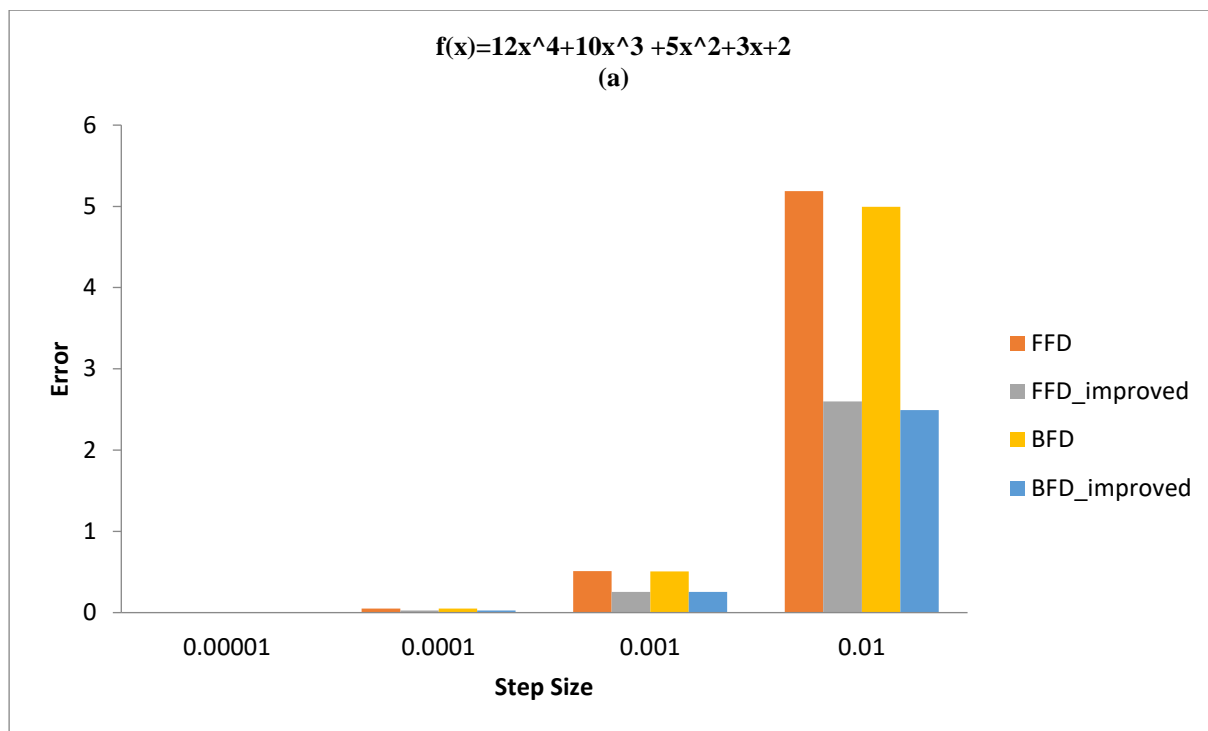


Figure 9. Numerical results for **(a)** second order derivative of $f(x)=12x^4+10x^3+5x^2+3x+2$ **(b)** third order derivative of $f(x)=12x^4+10x^3+5x^2+3x+2$

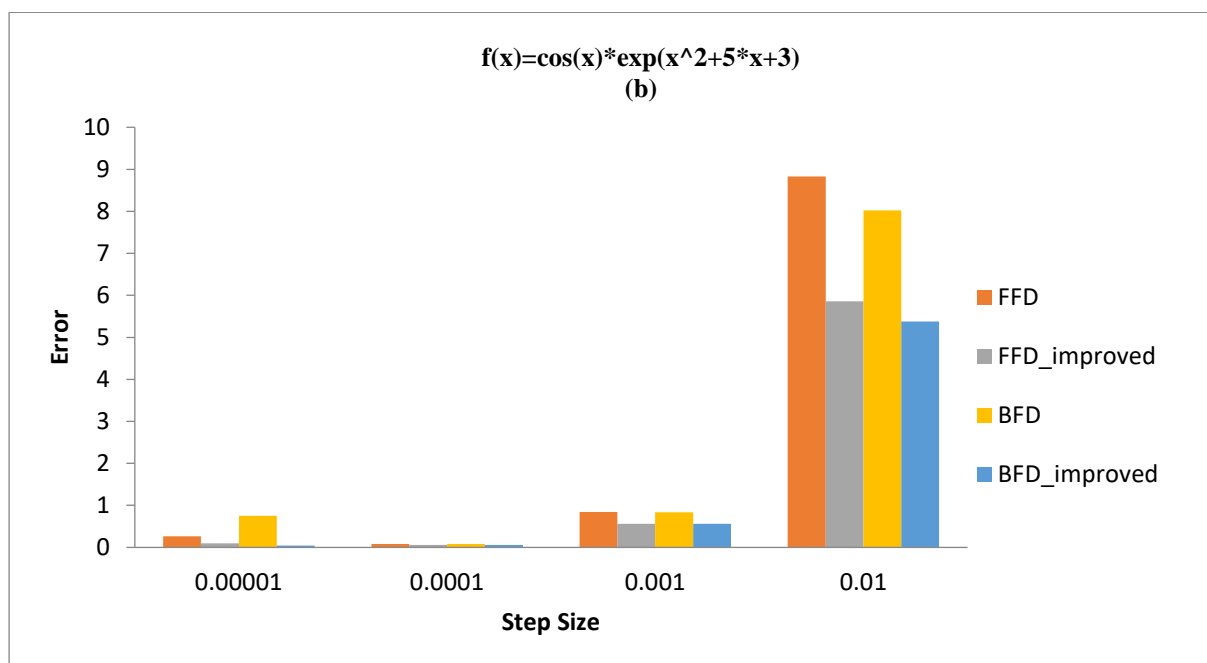
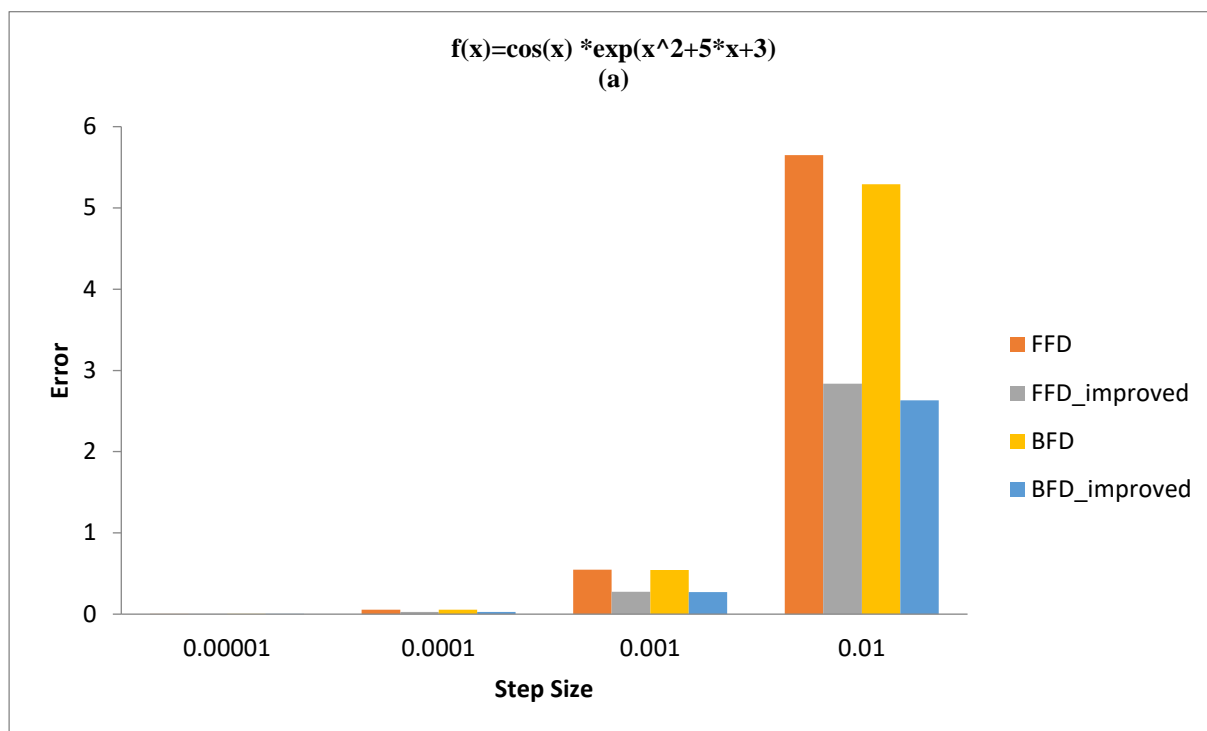


Figure 10. Numerical results for (a) second order derivative of $f(x) = \cos(x)e^{(x^2+5x+3)}$ (b) third order derivative of $f(x) = \cos(x)e^{(x^2+5x+3)}$

It is proved that error approaches zero for both second and third order computations in Figures 6-10. Exact results can be obtained by improved methods when step size gets the value: 0.00001.

Elapsed time of the new algorithm is displayed in Figures 11-15 for each function.

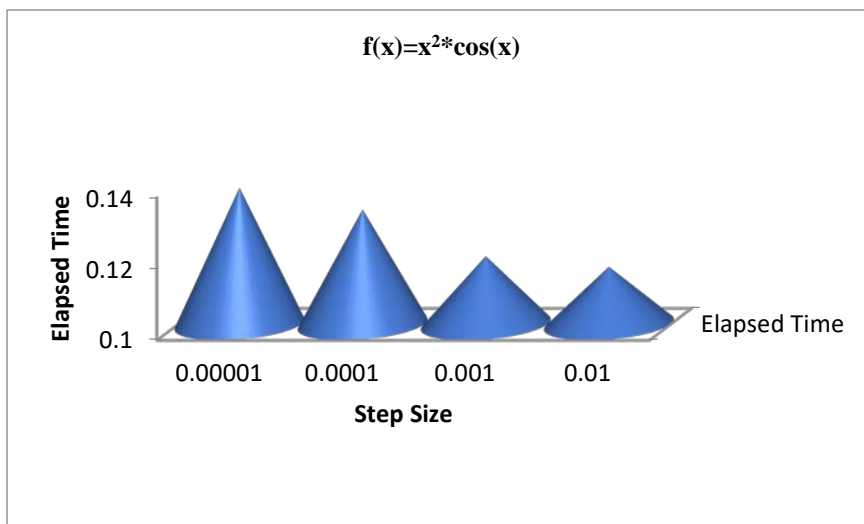


Figure 11. For $f(x)=x^2\cos(x)$

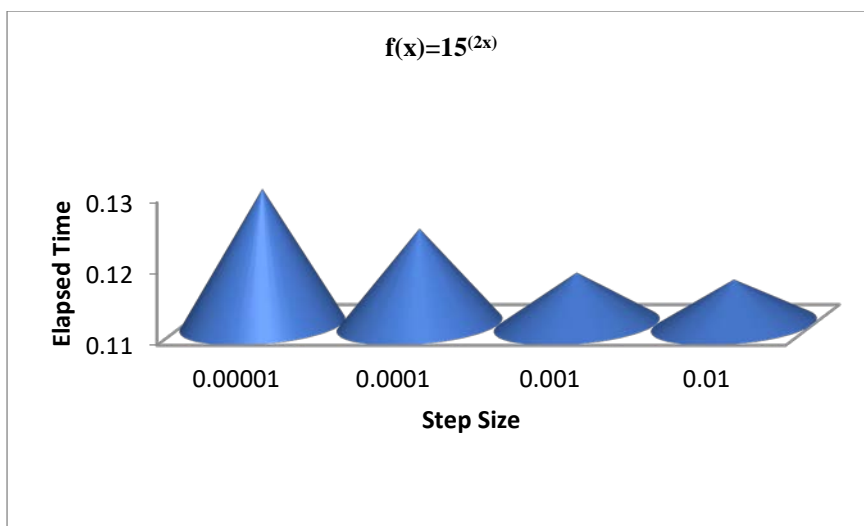


Figure 12. For $f(x)=15^{(2x)}$

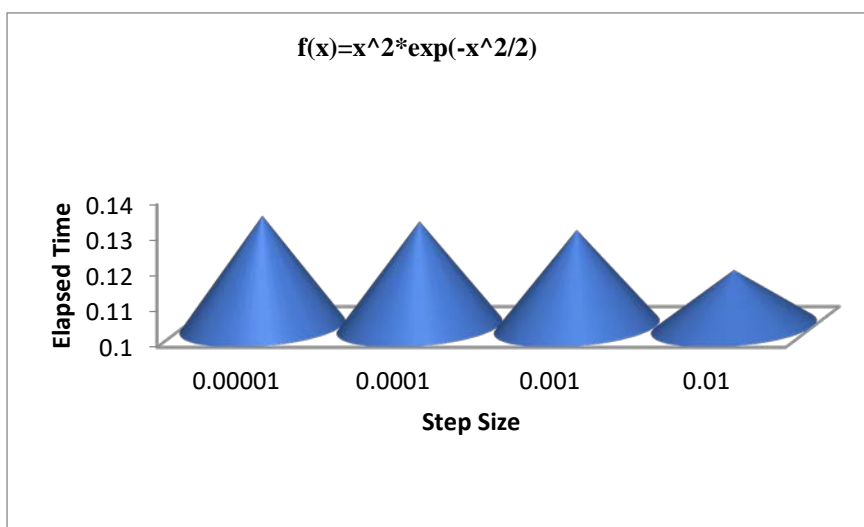


Figure 13. For $f(x)=x^2e^{\left(\frac{-x^2}{2}\right)}$

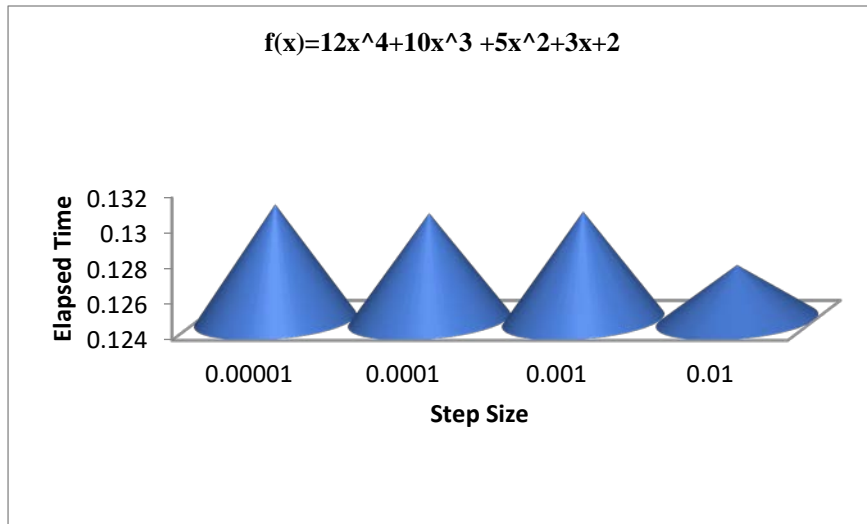


Figure 14. For $f(x)=12x^4+10x^3+5x^2+3x+2$

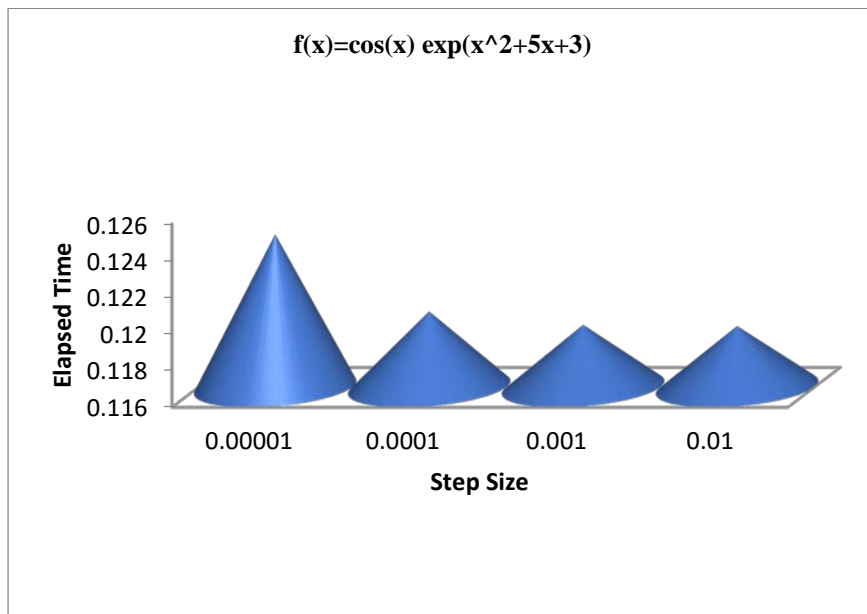


Figure 15. For $f(x)=\cos(x)e^{(x^2+5x+3)}$

Smallest step size leads to a little increase in computation duration for each function. This situation is demonstrated in Figures 11-15.

IV. CONCLUSIONS

This paper presents alternative methods with use of CFD, BFD, FFD for second and third order derivative calculations. Exact solutions are obtained. So, there is no need to use extra terms for higher accuracy in second and third order differentiations. It is the first time in the literature that finite difference techniques are employed in new forms for numerical differentiation of second and third order.

It is also shown that new methods composing of CFD, BFD and FFD can be conveniently employed with any step size. BFD_improved and FFD_improved can be used confidently instead of BFD and FFD.

For comparison purposes, various numerical examples have been selected and presented in Table 1. Within this context, a general algorithm has been designed, enabling simultaneous computations for both second and third order numerical differentiations, along with error and elapsed time calculations. This is another novel aspect of the paper.

The findings presented in Figures 1-5 demonstrate that the improved methods achieve highly accurate derivative approximations with small step sizes for both second and third order differentiations, particularly when the step size is 0.00001.

This observation is further validated in Figures 6-10, which show the error computations for both second and third order differentiations.

Although the smallest step size leads to an increase in elapsed computation time for each example, as illustrated in Figures 11-15, employing the smallest step size remains the most convenient and accurate approach for calculations.

The highest accuracy is achieved with a step size of 0.00001. The proposed methods in this paper can be effectively used by instructors and students in calculus courses for a wide range of functions. Additionally, these methods have potential applications in solving both Ordinary Differential Equations (ODEs) and Partial Differential Equations (PDEs).

Consequently, these methods are valuable for both academic and practical applications in calculus, enhancing the accuracy and efficiency of numerical differentiation.

REFERENCES

1. Groetsch CW (1984) The theory of Tikhonov regularization for Fredholm equations of the first kind. Research Notes in Mathematics, Pitman, Vol. 105 (Boston, Mass.–London: Advanced Publishing Program)
2. Hanke M. and Scherzer O (2001) Inverse problems light: numerical differentiation. American Mathematical Monthly, 108(6):512–521.
3. Tikhonov AN and Arsenin VY (1977) Solutions of Ill-posed Problems (Washington: Winston & Sons).
4. Murio DA (1993) The Mollification Method and the Numerical Solution of Ill-posed Problems (New York: A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc.).
5. Wang YB Jia XZ and Cheng J (2000) A numerical differentiation method and its application to reconstruction of discontinuity. Inverse Problems 18:1461–1476.
6. Jia XZ Wang YB and Cheng J (2003) The numerical differentiation of scattered data and its error estimate. Mathematics, A Journal of Chinese Universities 25:81–90.
7. Chapra SC and Canale RP (2010) Numerical methods for engineers, Sixth Edition. McGraw Hill, New York.
8. Turner PR (1994). Numerical Differentiation. In: Numerical Analysis. Macmillan College Work Out Series. Palgrave, London.
9. Zhang Y Jin L Guo D Yin Y and Chou Y (2015) Taylor-type 1-step-ahead numerical differentiation rule for first-order derivative approximation and ZNN discretization. Journal of Computational and Applied Mathematics 273(1):29-40.
10. Qu R (1996) A new approach to numerical differentiation and integration. Mathematical and Computer Modelling 24(10):55-68.
11. Khan IR and Ohba R (2000) New finite difference formulas for numerical differentiation. Journal of Computational and Applied Mathematics 126(1-2):269-276.

12. Abdul-Hassan NY Ali HA and Park C (2021) A new fifth-order iterative method free from second derivative for solving nonlinear equations. *Journal of Applied Mathematics and Computing* 68(1):2877-2886.
13. Hyman JM Larroutou (1982) The numerical differentiation of discrete functions using polynomial interpolation methods. *Applied Mathematics and Computation* 10(11):487-506.
14. Jianping L (2005) General explicit difference formulas for numerical differentiation. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 183(1):29-52.
15. Zhang X Xiong C Ding Y and Ding H (2016) Prediction of chatter stability in high speed milling using the numerical differentiation method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89(1):2535–2544.
16. Zhou Z Meng Z and He G (2009) A new approach to numerical differentiation. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 232(2):227-239.
17. Xu H and Liu J (2010) Stable numerical differentiation for the second order derivatives. *Advances in Computational Mathematics* 33(1):431-447.
18. Ekaterinaris JA (2005) High-order accurate, low numerical diffusion methods for aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences* 41(3-4):192-300.
19. Leonetti L and Mukhametzhano MS (2022) Novel first and second order numerical differentiation techniques and their application to nonlinear analysis of Kirchhoff–Love shells. *Computational Mechanics* 70:29-47
20. Yang HQ Chen ZJ Przekwas A and Dudley J (2015) A high-order CFD method using successive differentiation. *Journal of Computational Physics* 281:690-707.



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Determination of insecticides in honey samples collected from Gümüşhane-Turkiye; Box-Behnken design evaluation of experimental parameters

Erol Erçağ^{a,*}, Berrin Saygı Yalçın^{b,*}, Murat Şahin^c and Jülide Hızal^b

^aIstanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Chemistry, 34750, Istanbul, Turkey.

^bYalova University, Engineering Faculty, Chemical Engineering Department, 77100 Yalova, Turkey.

^cTekirdağ Namık Kemal University, Institute of Graduate Studies, Chemistry Division, 59030 Tekirdağ, Turkey.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 October 2024

Received in revised form 6 December 2024

Accepted 2 January 2025

Available online

Keywords:

Malathion

Cypermethrin

Deltamethrin

Cyfluthrin

Box-Behnken

ABSTRACT

This study deals with the investigation of cyfluthrin, cypermethrin, deltamethrin, and malathion residues in local honey samples from Gümüşhane, Turkey. The determination was performed with GC/MS-MS method with HP-5MS column under certain conditions: 120 °C oven temperature, 250 °C injection temperature, 121.9 kPa pressure and 1.2-1.8 mL/min flow rates. The samples were picked from eighteen stations of Gümüşhane. Standard addition method was employed in chromatographic determination. No pesticide detected in samples of fifteen stations, nevertheless, subjected pesticides were determined in samples collected from other three stations. The residue levels varied from 0.18 mg/kg to 9.50 mg/kg at 1.5 mL/min flow rate. The results were also evaluated with Box-Behnken Design (BBD) optimization. Multivariate experimental design (flow rate and station, pesticide type) was employed for constructing quadratic models. Regression analysis showed that the experimental results and the predictive values yielded by model are quite close to each other with determination coefficient (R^2) of 0.985.

I. INTRODUCTION

Pesticides are widely used around the world to eliminate harmful organisms. They are utilized for destroying and/or preventing insects, rodents, weeds, microorganisms *etc.* Many chemicals such as organochlorines, organonitrogens, organophosphates and pyrethroid class have been employed for this purpose. It has been known that pesticides have mutagenic and carcinogenic effects besides their toxic properties [1]. It is known that pyrethroids have been widely used in agricultural purposes due to having high efficiency and low residue besides their lower toxicity and biodegradability in plants [2]. The mobilization of pesticides in environmental systems must be monitored. When used, it can be drifted by wind or migrate beyond soil sheets and leak into surface waters or accumulate in another organism. Because pesticides are stable chemicals and have long-term effects on the organism [3], consequently, it may join the food chain and be consumed by humans.

As you know, honey is a natural product fabricated by honey bees from nectar of flowering plants [4]. It is widely used for nourishment (as direct food or a component of manufactured foods) and medicinal purposes [5]. Besides its health-promoting and immunity-enhancing properties, it has antibacterial, antifungal, antimicrobial, antioxidant, antiviral and antimutagenic effects [6, 7]. Jakkielska, et al. defined honey as a bioindicator of environmental pollution [6]. The determination and extraction of pesticides from honey is significant in the context of food safety, as it enables the detection of harmful residues in food matrices. Therefore, analyses of many pollutants such as arsenic, organonitrogens organochlorines, polyaromatic hydrocarbons, tetracyclines *etc.* were

*Corresponding author. Tel.: +90-212-473-7070; e-mail: erol.ercag@iuc.edu.tr and e-mail: berrin.yalcin@yalova.edu.tr

studied by many researchers using various analytical and instrumental method [4, 6, 8-11]. El-Osmani et al., optimized solid phase extraction (SPE) method using modified styrene-based polymer for sensitive detection of organonitrogen and organochlorine pesticides. They determined fifteen pesticides by GC-MS following by solid phase extraction at optimized flow rate, pH, and elution speed, conditions [4]. To investigate pesticide exposure in honey bees, Ostiguv et al. analyzed pesticide residues in samples collected from stationary apiaries in six U.S. states. As result, they detected 79 different pesticides and declared that detected pesticides were more than fungicides or herbicides [12].

A popular technique for modeling and optimizing process variables that reduces the number of trials in an economical and timely way is the Box-Bhenken design (BBD) [13]. Box-Bhenken design, a surface response methodology, is an approach utilized to evaluate the effects of three or more three-level factors on the response by minimizing the number of experimental runs. Using Design Expert (DOE) version 11.0.5.0 software (stat-Ease Inc., USA), BBD was used in this study to examine the impact of process variables and the relationship between these variables on the answer. In recent years, this method has been increasingly employed to detect components in complex matrix structures, such as honey, and to optimize these processes. Through this approach, researchers can obtain more data in less time and with reduced experimental work compared to traditional methods [14]. In this context, there is a paucity of studies in literature, particularly regarding the optimization of pesticide extraction from honey. While most of these studies have focused on enhancing extraction efficiency, they have generally concentrated on parameters such as solvent quantity, pesticide type, and extraction duration [13, 15, 16]. Although many acaricides (*i.e.* amitraz, cymiazole, flumethrin, imidacloprid and fipronil) prevail in honey due to protect the hive from *Varroa jacobsoni* and *Ascosphaera apis*, other pesticides used in agriculture also exist in honey [17]. It is known that the most used pesticides in Gümüşhane region are cyfluthrin, cypermethrin, deltamethrin and malathion. Therefore, in this study, the determination of those pesticides in honey samples collected from the assigned locations of Gümüşhane was studied to introduce the pollution around the city. For this purpose, after samples picked from eighteen stations (shown in Figure 1) were extracted, extracts were passed through florisil cartridge, then the extracts were analyzed with GC/MS-MS using certain analysis conditions at different flow rates. Also, Box–Behnken Model was employed to design the experiments. The amount of pesticide was employed as a response, while the process variables were stations, flow rate, and pesticide kind. The novelty of this study lies in its analysis of different stations and flow velocities using an experimental design method, which has not been previously reported in the literature.



Figure 1. Sample collection points

II. EXPERIMENTAL METHOD

2.1. Materials and Preparation Techniques

Cyfluthrin, cypermethrin, deltamethrin and malathion (all are Supelco) were purchased from Sigma-Alrich, while methanol was provided from Merck. Honey samples were collected from various points in Gümüşhane (Figure 1). The samples picked were kept in capped vessels at room temperature until treatment.

A SHIMADZU GC-MS TQ8040 system equipped with a triple quadrupole mass spectrometry detector and an electron ionization (EI) source was used in the experiments. The capillary column (HP-5MS) is 30 m x 25 mm x 0.25 mm dimension. Helium with 99.9% purity was used as carrier gas at different flow rates. Oven and injection temperatures are 120 °C and 250 °C, respectively. The pressure is 121.9 kPa, total flow 19.5 mL/min and purge flow 3.0 mL/ min. The accuracy of the applied method was controlled by using reference material. As the equipment includes the SPME unit (Smart SPME Arrow), further solid phase extraction pretreatment was not required in this study.

2.2. Chromatographic analysis

2 grams of honey samples were dissolved in 50 mL methanol: distilled water (1:1) mixture on a magnetic stirrer for 1 h at room temperature. The sample solutions were filtered through Whatman No. 1 filter paper. The standard addition method was used to determine very low concentrations in a complex matrix. Five samples for each station were prepared for chromatographic analysis. 1 mL of filtered sample (in vial) was spiked with volume of pesticide standard solution to last concentration will be between 0.1 and 0.9 mg/L. Then, the last volume was completed to 1.5 mL with methanol. All tests are performed in triplicate.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

The regression equations, determination coefficients, LOD and LOQ values were given in Table 1. As understood from the table, the lowest LOD and LOQ values were obtained for Cyfluthrin. The capillary column HP-5MS, 5% diphenyl/95% dimethyl siloxane crosslinked polymer, is between moderately polar and non-polar character (Figure 2). The pyrethroid pesticides have halogen groups on the tail of the aliphatic chain. Cypermethrin and cyfluthrin contain chloro-groups, while deltamethrin has bromo- groups. Additionally, cyfluthrin has fluoro groups on one of its aromatic rings.

According to Briggs et al., the pyrethroids are highly lipophilic compound [18]. Although cypermethrin and deltamethrin are classified as non-polar pesticides [19], a slight difference in polarity between these molecules is expected due to the presence of halogens with differing electronegativity. Cyfluthrin might have a higher polarity than the rest. Malathion should also possess a slight polar character.

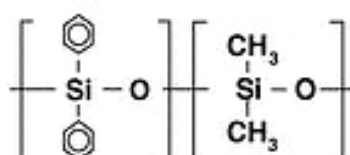
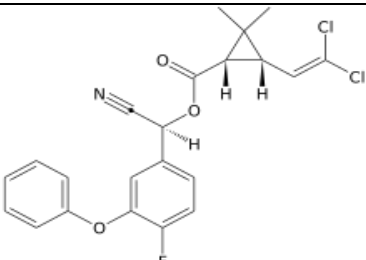
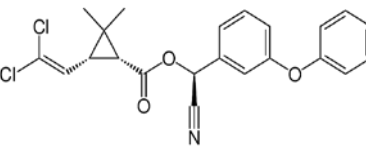
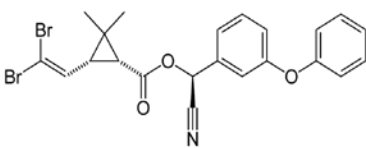
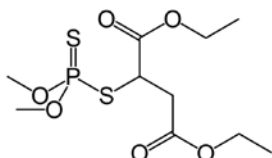


Figure 2. The chemical structure of HP-5MS column

Table 1. Regression equations, determination coefficients, LOD and LOQ values

Analyte	Chemical Structure	Regression Equation	R ²	LOD (µg/L)	LOQ (µg/L)
Cyfluthrin		$y=406386x + 2775$	0.999	21	70
Cypermethrin		$y=498583x + 3175$	0.999	29	98
Deltamethrin		$y=83706x - 173$	0.999	55	182
Malathion		$y=2000000x + 16091$	0.998	24	79

The pesticide retention on column material diphenyl, dimethyl siloxane polymer can be explained by the formation of the π - π interaction and interaction via slightly polar structures. Considering the earliest obtained peak belongs to malathion (8.53), it is said that malathion has the lowest affinity to material of stationary phase, followed by cyfluthrin (11.9), cypermethrin (12.18), and deltamethrin (13.9), respectively. So, deltamethrin must be the molecule whose affinity to column material is the highest. The existence of aromatic rings in pyrethroid pesticides also supports the contribution of π - π interactions. The lowest detection limit of cyfluthrin is most probably sourced from SPE stage.

No pesticide detected in samples except collected from Stations 1, 6, and 18. Furthermore, cyfluthrin was detected in any sample of each station. The detected pesticides levels obtained at three different flow rates were introduced in Table 2.

The Acceptable Daily Intake (ADI) for cypermethrin, deltamethrin, and malathion are reported by Lu et al. as 0.05, 0.01, and 0.02 mg/kg per day, respectively [20]. According to EPA reports, the oral LD₅₀ values of cypermethrin for male and female rats are 187-326 mg/kg and 150-500 mg/kg, respectively [21]. Similarly, it is reported that this value for deltamethrin varies between 30 and over 5000 mg/kg for rats according to by which vehicle it is taken with aqueous or an oily way [22].

Malathion is also reported as being a low-toxicity pesticide considering the LD₅₀ values varying between 5400 mg/kg and 5700 mg/kg up to generation of rats. [23]. Considering the limitations mentioned, it is said that the obtained data indicates a minimal risk associated with exposure via oral consumption of honey collected from Stations 1, 6, and 18. But even so, they are legible so that the detected pesticide residues in samples are rather

below the limited values. Nahhal et al. inspected insecticide residues in 2020 honey samples picked from 27 countries all over the world. As result of their research, they declared that fifty-two different insecticides were encountered in any country, even at least one pesticide. They also reported that the most encountered class of pesticide is organophosphorus insecticides, followed by pyrethroids as cypermethrin and permethrin [24].

Table 2. The pesticides levels obtained at three different flow rates

Station	Flow rate mL/min	Cypermethrin mg/kg	Deltamethrin mg/kg	Malathion mg/kg
1	1.2	0.33 ± 0.05	2.80 ± 0.65	0.46 ± 0.06
	1.5	0.51 ± 0.03	3.95 ± 0.60	0.65 ± 0.08
	1.8	0.09 ± 0.01	nd	nd
6	1.2	0.55 ± 0.01	3.37 ± 0.85	0.46 ± 0.05
	1.5	0.32 ± 0.02	9.50 ± 0.20	nd
	1.8	0.54 ± 0.05	0.25 ± 0.08	0.18 ± 0.02
18	1.2	0.28 ± 0.06	0.61 ± 0.02	0.18 ± 0.05
	1.5	0.20 ± 0.07	3.12 ± 0.20	0.28 ± 0.02
	1.8	0.20 ± 0.03	nd	nd

3.1. Modeling the determination of pesticide amount in honey using Box-Behnken design

Table 3 displays the experimental design matrix for coded and real process variables as well as response. There are a total of 17 runs in the experimental design, which includes three independent process variables with three levels and five central points, as shown in Table 3. The location (A) (Stations 1, 6, 18), pesticide type (B) (deltamethrin, cypermethrin, and malathion), and flow rate (C) (1.2, 1.5, and 1.8 mL/min) are the independent process factors.

Table 3. Independent process variables (coded and actual) and experimental design matrix for determination of pesticide amount.

Run	Coded Factors			Actual Factors		Response (Amount of Pesticide mg/kg)		
	A	B	C	Station	Pesticide	Flow rate (mL/min)	Actual Value	Predicted Value
1	-1	-1	0	18	Deltamethrin	1.5	3.12	3.1100
2	1	-1	0	1	Deltamethrin	1.5	3.95	3.7300
3	-1	1	0	18	Malathion	1.5	0.28	0.4956
4	1	1	0	1	Malathion	1.5	0.65	0.6619
5	-1	0	-1	18	Cypermethrin	1.2	0.28	0.3388
6	1	0	-1	1	Cypermethrin	1.2	0.33	0.5875
7	-1	0	1	18	Cypermethrin	1.8	0.20	0
8	1	0	1	1	Cypermethrin	1.8	0.54	0.4813
9	0	-1	-1	6	Deltamethrin	1.2	3.37	3.3200
10	0	1	-1	6	Malathion	1.2	0.46	0.1856
11	0	-1	1	6	Deltamethrin	1.8	2.50	2.7700
12	0	1	1	6	Malathion	1.8	0.18	0.2269
13	0	0	0	6	Cypermethrin	1.5	0.32	0.3240
14	0	0	0	6	Cypermethrin	1.5	0.35	0.3240
15	0	0	0	6	Cypermethrin	1.5	0.32	0.3240
16	0	0	0	6	Cypermethrin	1.5	0.29	0.3240
17	0	0	0	6	Cypermethrin	1.5	0.34	0.3240

Experiments were carried out in triplicate in accordance with the BBD experimental design matrix, and the pesticide quantity was ascertained by utilizing the mean experimental data. From the results in Table 3, the amount of pesticide varies between 3.95 and 0.18 mg/kg depending on the experimental conditions. Based on the results, the highest pesticide rate was found at Station 1. It was determined that the pesticide with the highest concentration at this station was deltamethrin and its amount was 3.95 mg/kg. The lowest pesticide amount was determined at Station 6. It was observed that the pesticide with the lowest concentration at this station was malathion and its amount was 0.18 mg/kg. Furthermore, in addition to these findings, the highest pesticide concentration (9.5 mg/kg) was observed at Station 6 at a flow rate of 1.5 mL/min in preliminary experiments conducted outside this experimental design. In this study, four mathematical models—quadratic, cubic, two-factor interactions (2FI), and linear—were assessed for their suitability in describing the pesticide amount.

Additionally, the experimental data were subjected to two separate tests: the model summary statistics and the sequential model sum of squares (SMSS). The examination of the data, which are shown in Table 4, showed that the quadratic model for pesticide quantity had a reduced standard deviation and a higher determination coefficient (R^2) value. When compared to other models, the model showed statistical significance overall.

Table 4. Regression statics for pesticide amount

Source	Standard	R2	R2adj	R2pre	Press	
	Deviation					
AC/CS-PVA:3.0						
Linear	0.8843	0.6202	0.5326	0.2944	18.89	
Interactive (2FI)	1.00	0.6263	0.4020	-0.5487	41.46	
Quadratic	0.2376	0.9852	0.9663	0.7650	6.29	Suggested
Cubic	0.0230	0.9997	0.9907		Not defined	Aliased

These findings imply that the connection between the response variables and the independent factors is well described by the quadratic model. The amount of pesticides have the R^2 of 0.985 and a standard deviation of 0.238. With the pesticide amount model accounting for 98.5% of the total variance, the models were statistically significant, as evidenced by the high R^2 value. The high values of the adjusted and predicted R^2 values, which show a respectable degree of proximity to one another, further support the validity of the model. The discrepancy between the adjusted R^2 and the predicted R^2 value should not be greater than 0.2, according to a well-established criterion [25]. As evident from Table 4, the quadratic model most effectively satisfies this condition. Although the R^2_{adj} and R^2 values were approximately equivalent, the cubic model was determined to be aliased. This determination was based on the press and R^2 values, which were deemed unsuitable for selecting this model. Figure 3 shows the actual and predicted value of the response given in Table 3. The actual and predicted values of the response for pesticide amount was very close to each other. This result supported a strong relationship between the actual and predicted value of the responses and strengthens the accuracy of the determined model.

To determine the best independent factors for the pesticide quantity and the most effective parameters among the process variables, analysis of variance (ANOVA) was used. Thus, evaluation of the regression model's applicability at a 95% confidence level was performed. Also, it is understood from the ANOVA whether the means of the experimental results differed significantly from one another.

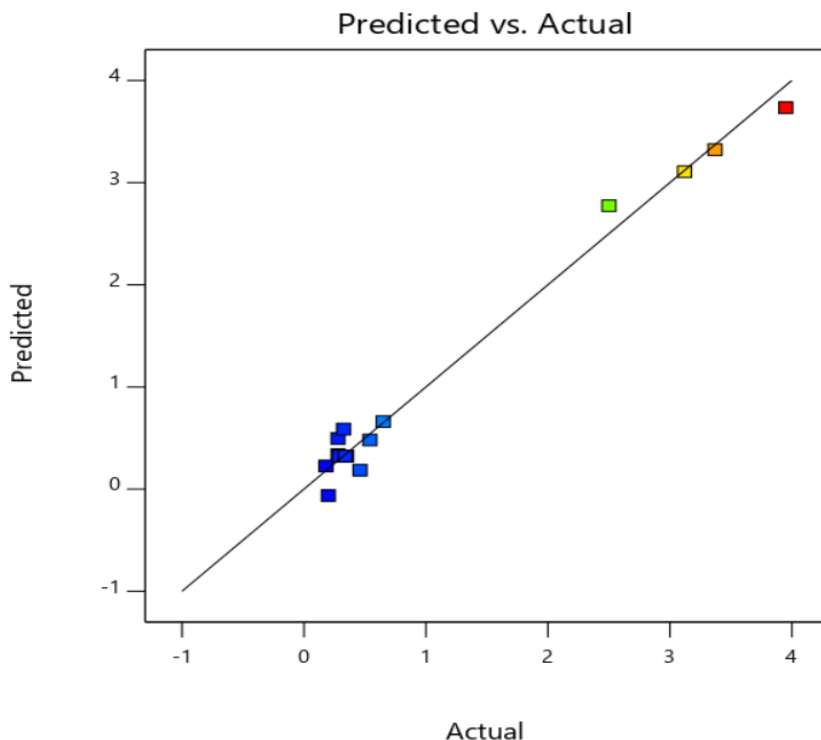


Figure 3. Actual and predicted value of pesticide amount

To enhance the reliability of the experimental results, the model for pesticide quantification was refined based on F-value, p-value, and R-squared, as evaluated through ANOVA. A p-value below 0.05 indicates statistical significance for the model, dependent, and independent variables. Additionally, the F-value and R-square values must be sufficiently high for the model to be deemed statistically significant. Table 5 provided an overview of the pesticide amount ANOVA results. As shown in Table 5, A, B, and C correspond to the type of pesticide, the station, and the flow rate, respectively. The model terms AB, AC, and BC represent the interaction between two independent variables. For example, the interaction between the type of pesticide and the station is indicated by the term AB. The quadratic impacts of the independent variables are represented by the additional model terms A^2 , B^2 , and C^2 . As understood from the inspection of Table 5, the quadratic model has the lowest p-value (<0.0001), demonstrating the model's significance. Furthermore, the model's F-value was determined to be 51.92. The quadratic model demonstrated a strong correlation between the independent variables and response, as evidenced by the comparatively high F-value and very low p-value in the pesticide quantity model.

In other respects, the model-independent parameter exhibiting the lowest p-value (<0.05) and highest F-value was determined to be the most effective parameter for the response. According to first-order independent variables (A, B, C), Table 5 indicated that the p-values of the pesticide type demonstrated lowest value. Consequently, the pesticide type was identified as the most influential parameter for pesticide amount. The station had the highest F-value after the pesticide type for amount of pesticide, suggesting that the station exerted a greater influence on the pesticide amount compared to the flow rate. Moreover, considering all the variables, it can be clearly seen from Table 3, the model parameters B, B^2 , A, A^2 , (<0.0001 , <0.0001 , 0.0504) had significant p-value (<0.05). If the F-values are analyzed for significant model parameters, it can be said that the most effective parameters are $B > B^2 >$

A> A²> C²>C>BC>AB (286.33> 164.22> 5.56> 2.76> 2.42> 2.28>1.54>0.9373) for pesticide amount respectively.

Table 5. ANOVA analysis for pesticide amount.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	26.37	9	2.93	51.92	< 0.0001	significant
A-station	0.3140	1	0.3140	5.56	0.0504	
B-Pesticide type	16.16	1	16.16	286.33	< 0.0001	
C-Flow rate	0.1288	1	0.1288	2.28	0.1747	
AB	0.0529	1	0.0529	0.9373	0.3652	
AC	0.0218	1	0.0218	0.3855	0.5543	
BC	0.0870	1	0.0870	1.54	0.2543	
A ²	0.1558	1	0.1558	2.76	0.1405	
B ²	9.27	1	9.27	164.22	< 0.0001	
C ²	0.1366	1	0.1366	2.42	0.1637	
Residual	0.3951	7	0.0564			
Pure Error	0.0021	4	0.0005			
Lack of Fit	0.4006	3	0.1335			
Cor Total	26.77	16				

3.2. Response surface analysis

In the current study, 3D surfaces plots produced by a response surface model created with Design Expert software were used to investigate the impacts of independent factors on response. Figure 4 shows the 3D surface graphs for pesticide quantity that were produced using the quadratic model. Three response 3D surfaces were produced since the regression model included three independent variables and one constant factor at the center levels. Figure 4 (a), (b) and (c) represent 3D response surface plots for the combined effect of station-pesticide type, flow rate-station, and pesticide type-flow rate independent variables on pesticide amount, respectively. From the graphs, it is clearly seen that the pesticide amount varied according to the station and pesticide type, and the amount of pesticide does not significantly alter as the experimental flow rate is changed. The pesticide concentration was increased from 0.28 to 0.65 mg/kg, respectively, when the station changes from Station 18 to 1 at constant flow rate (1.5 mL/min) and pesticide type (Malathion). Thus, the 3-fold increase in the amount of pesticides indicates that there can be significant differences in the amount of pesticides, even between different stations in the same region.

The Malathion and Deltamethrin concentrations were found to be 0.28 and 3.12 mg/kg, respectively, for Station 18 and at constant flow rate (1.5 mL/min) was kept constant, and approximately 1188.57% increase in the amount of pesticide was observed. This situation may be associated with the use of agricultural chemicals with different pesticide contents and concentrations in the region. The pesticide concentrations of the samples picked from Station 18 were 0.28 and 0.2 mg/kg at flow rate of 1.2 and 1.8 mL/min, respectively, whereas the Station 18 and pesticide type (cypermethrin) were constant, and no significant change was observed in the amount of pesticide.

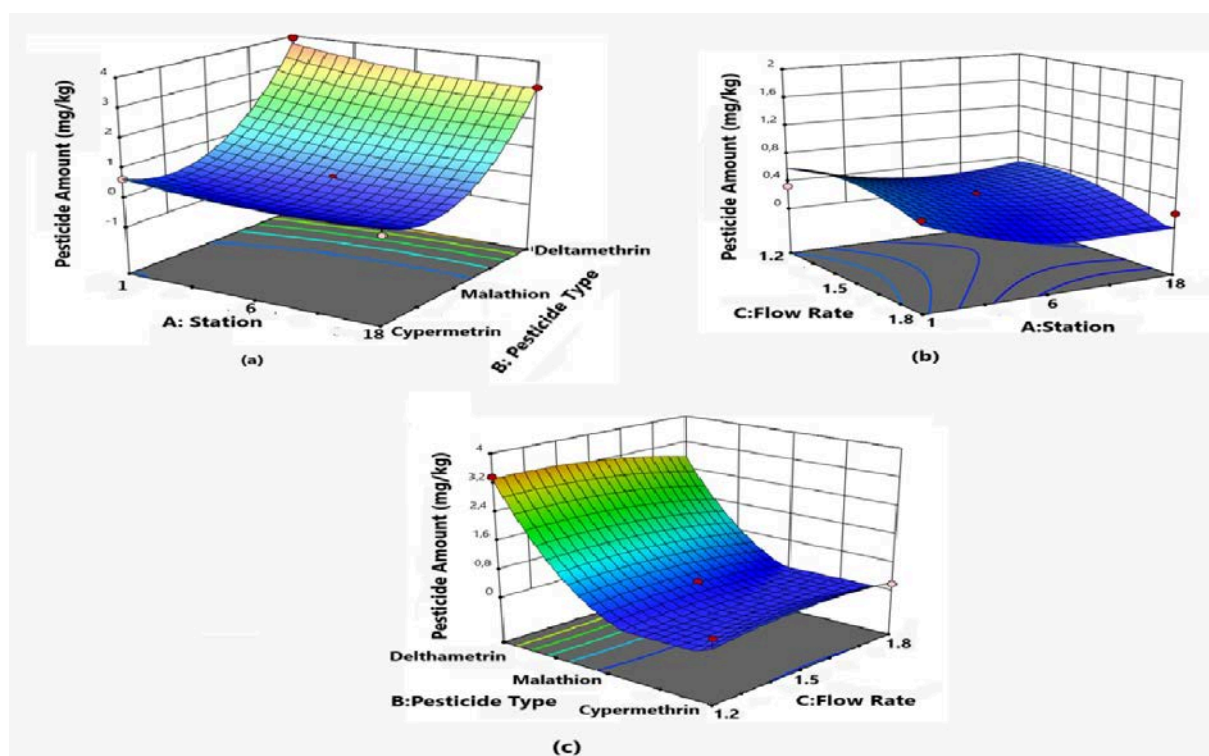


Figure 4. 3D response surface plots for pesticide amount presenting the effect of (a) station and pesticide type (b) flow rate and station (c) pesticide type and flow rate

IV. CONCLUSIONS

It is possible to encounter pesticide residues in honey due to extensive flight times and distance, as well as contact with several plants; even the producer makes tiny distinctions. That's why it is assumed that honey is an excellent indicator for environmental pollution. The investigation of cyfluthrin, cypermethrin, deltamethrin, and malathion residues in local honey samples collected from 18 stations was performed with GC-MS/MS. Cypermethrin, deltamethrin, and malathion were detected in the samples from three stations. The residue levels varied from 0.18 mg/kg to 9.50 mg/kg at 1.5 mL/min flow rate. Although the determined values are rather below the limits of LD_{50} for rats via oral intake, these pesticides were detected in the samples of some stations. 3D response surface plots showed that the station and pesticide type are decisive for the pesticide amount, and that changes in the experimental flow rate had little effect on the amount of pesticide. The results are significant in terms of enabling that further precautions should be taken and that additional monitoring studies should be carried out.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank Sevim Razak from Ekoteks Laboratuvar ve Gözetim Hizmetleri A.Ş. for their supporting this study and allowing their laboratory opportunities.

Authorship Contribution Statement

Erol Erçağ: Supervision, Conceptualization, Methodology, Writing – original draft, review & editing. Berrin

Sayı: Data curation, Writing – original draft, review & editing. Murat Şahin: Investigation. Jülide Hızal: Data curation.

Declaration of Competing Interest:

The authors declare that there is no financial or personal conflicting interest that could influence the work reported in this paper.

REFERENCES

1. Saleh MA (1980) Mutagenic and carcinogenic effects of pesticides. *Journal of Environmental Science and Health Part B* 15(6):907–927. <https://doi.org/10.1080/03601238009372222>
2. Mukherjee I (2009). Determination of Pesticide Residues in Honey Samples. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 83 (6): 818–821. <https://doi.org/10.1007/s00128-009-9772-y>
3. Zhang L, Zhao M, Xiao M, Im M-H, Abd El-Aty AM et al (2022) Recent Advances in the Recognition Elements of Sensors to Detect Pyrethroids in Food: A Review. *Biosensors*, 12:402. <https://doi.org/10.3390/bios12060402>
4. El-Osmani R, Net S, Dumoulin D, Bigan M, Ouddane B et al (2014) An experimental design approach to the optimisation of pesticide extraction from water. *Anal Methods* 6(16):6514-6521. <https://doi.org/10.1039/c4ay00610k>
5. Ndungu NN, Kegode TM, Kurgat JK, Baleba SBS, Cheseto X et al (2024) Bio-functional properties and phytochemical composition of selected Apis mellifera honey from Africa. *Heliyon* 10:e30839. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30839>
6. Jakielska D, Frankowski M, Ziola-Frankowska A (2024) Speciation analysis of arsenic in honey using HPLC-ICP-MS and health risk assessment of water-soluble arsenic. *Journal of Hazardous Materials* 471:134364. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134364>
7. Sabater C, Calvete I, Vázquez X, Ruiz L, Margolles A (2024) Tracing the origin and authenticity of Spanish PDO honey using metagenomics and machine learning. *International Journal of Food Microbiology* 421:110789. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110789>
8. Ek-Huchim JP, Rodríguez-Cab EM, López-Torres E, Dzul-Caamal R, Canepa-Pérez IM et al (2024) Pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons in honey and Apis mellifera from the Yucatán Peninsula, Mexico. *Journal of Food Composition and Analysis* 132:106293. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106293>
9. Wang X, Dong Y, Luan Y, Tian S, Li C et al (2024) Integrated assessment of the spatial distribution, sources, degradation, and human risk of tetracyclines in honey in China. *Journal of Hazardous Materials* 473:134681. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134681>
10. Demir E, Recai I (2018) Voltammetric determination of phenmedipham herbicide using a multiwalled carbon nanotube paste electrode. *Turkish Journal of Chemistry* 42:4. <https://doi.org/10.3906/kim-1709-41>
11. Saqaf JM, Soylak M (2021) Supramolecular solvents: a review of a modern innovation in liquid-phase microextraction technique. *Turkish Journal of Chemistry* 45:6. <https://doi.org/10.3906/kim-2110-15>
12. Ostiguy N, Drummond FA, Aronstein K, Eitzer B, Ellis JD et al (2019) Honey Bee Exposure to Pesticides: A Four-Year Nationwide Study. *Insects* 10:13. <https://doi.org/10.3390/insects10010013>
13. Jovanov P, Guzsvány V, Franko M, Lazić S, Sakač M et al (2013) Multi-residue method for determination of selected neonicotinoid insecticides in honey using optimized dispersive liquid–liquid microextraction combined with liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Talanta* 111:125-133. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.02.059>
14. Tolcha T, Gemechu T, Al-Hamimi S, Megersa N, Turner C (2020) High density supercritical carbon dioxide for the extraction of pesticide residues in onion with multivariate response surface methodology. *Molecules* 25(4):1012. <https://doi.org/10.3390/molecules25041012>
15. Amvrazi EG, Martini MA, Tsiropoulos NG. (2012). Headspace single-drop microextraction of common pesticide contaminants in honey–method development and comparison with other extraction methods. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 92(4):450-465. <https://doi.org/10.1080/03067319.2011.585716>

16. Nemati M, Altunay N, Tuzen M, Farajzadeh MA, Afshar Mogaddam MR (2022) In-situ sorbent formation for the extraction of pesticides from honey. *Journal of Separation Science* 45(14):2652-2662. <https://doi.org/10.1002/jssc.202100963>
17. Tette PAS, Guidi LR, Abreu Glória MB, Fernandes C (2016) Pesticides in honey: A review on chromatographic analytical methods. *Talanta* 149:124-141. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.11.045>
18. Briggs GG, Elliott M, Farnham AW, Janes NF, Needham PH et al (1976) Insecticidal activity of the pyrethrins and related compounds VIII. Relation of polarity with activity in pyrethroids. *Pesticide Science* 7(3):236–240. <https://doi.org/10.1002/ps.2780070305>
19. Hamadamin AY, Hassan KI (2020) Gas chromatography-mass spectrometry based sensitive analytical approach to detect and quantify non-polar pesticides accumulated in the fat tissues of domestic animals. *Saudi J Biol Sci* 27(3):887-893. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.12.029>
20. Lu, FC (1995) A Review of the Acceptable Daily Intakes of Pesticides Assessed by WHO. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 21(3):352-364. <https://doi.org/10.1006/rtph.1995.1049>
21. U.S. Environmental Protection Agency. Pesticide Fact Sheet Number 199: Cypermethrin. Office of Pesticides and Toxic Substances, Washington, DC, 1989.2-9.
22. Pesticide Residues in Food 2000 - Deltamethrin; International Programme on Chemical Safety, Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2001; pp 79-110.
23. Revised Reregistration Eligibility Decision (RED) for Malathion; EPA 738-R-06-030; U.S Environmental Protection Agency, Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, Office of Pesticide Programs, U.S. Government Printing Office: Washington, DC, 2009.
24. El-Nahhal Y (2020) Pesticide residues in honey and their potential reproductive toxicity. *Science of The Total Environment* 741:139953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139953>
25. Tolcha T, Gemechu T, Al-Hamimi S, Megersa N, Turner C (2021) Multivariate optimization of a combined static and dynamic supercritical fluid extraction method for trace analysis of pesticides pollutants in organic honey. *Journal of Separation Science* 44(8):1716-1726. <https://doi.org/10.1002/jssc.202100047>



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Removal of non-cellulosic materials from hemp fiber under ultrasonication conditions and cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC) catalyst

 Hatice Seçinti-Klopf^{a,*}^aDepartment of Basic Sciences and Health, Hemp Research Institute, Yozgat Bozok University, 66100, Yozgat/Turkey.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 August 2024

Received in revised form 17 November 2024

Accepted 6 January 2025

Available online

Keywords:

Hemp fiber

Ultrasonication

Pretreatment

Lignocelluloses

Cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC)

ABSTRACT

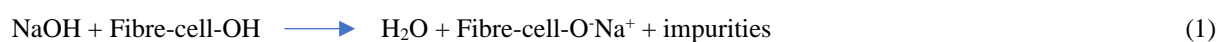
Recently, due to rising worries about global warming, pollution, and the sustainability of fossil resources, there has been a heightened interest in renewable and sustainable natural materials across different industries. Consequently, the use of renewable and sustainable natural fibers such as hemp instead of synthetic ones, such as glass and carbon has become more popular in certain composite material applications. A drawback of natural fibers including hemp is that their polar nature often leads to incompatibility at the fiber/matrix interface with nonpolar and hydrophobic matrices. This leads to weak adhesion between the fiber and matrix, resulting in reduced mechanical properties of the final composites. To enhance the performance of natural fiber composites, it is essential to modify the fibers. Non-cellulosic substances such as lignin, waxes, hemicelluloses and pectin present in the hemp fiber structure also affect the mechanical performance of composites due to poor fiber/matrix adhesion. In this study quaternary ammonium hydroxide was used in an ultrasonic-assisted pretreatment to increase the degradation rate of non-cellulosic substances in hemp fiber. Cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC) concentrations ranging between 1 and 8% w/w were used with a constant (10% w/w) NaOH concentration. Hemp fiber surfaces were analyzed using a scanning electron microscope (SEM). The findings revealed that ultrasonication-assisted alkali treatment effectively removed non-cellulosic substances from the fiber surface. This removal was further validated by TGA and FT-IR analysis.

I. INTRODUCTION

In recent years, alongside environmental challenges like global warming and pollution, growing concerns about the sustainability of fossil resources have led to a heightened interest in renewable and sustainable natural materials across various sectors. As a result, the use of natural fibers instead of synthetic ones like glass and carbon in composite materials has gained popularity [1]. Specifically, natural bast fibers such as jute, hemp, and flax have become increasingly favored for composite reinforcement due to high specific strength (strength/density) and specific modulus of elasticity (modulus/density) of their composites. In addition to the advantages mentioned above, certain disadvantages of natural fibers, including hemp, hinder their widespread use. The properties of natural fibers, such as length, thickness, and strength, vary depending on the fiber's chemical composition and morphology, plant species, growing region, cultivation conditions, and other factors. This variation leads to difficulties in producing raw materials with consistent properties from these fibers. Additionally, due to the hydrophilic nature of hemp fibers, composites made from these fibers tend to absorb water and moisture. Another disadvantage of natural fibers is that, because these fibers are polar, they often exhibit fiber/matrix interface incompatibility with nonpolar and hydrophobic matrices, resulting in poor adherence between the fiber and matrix and consequently lower composite mechanical strength. Therefore, to enhance the performance of natural fiber composites, modification of the fibers is often necessary [2].

*Corresponding author. Tel.: +90-553-170-2602; e-mail: hatice.secinti@bozok.edu.tr

Hemp fibers are exceptionally stiff and strong compared to other natural fibers, making them particularly suitable for composite applications. Similar to other natural fibers, hemp fibers are hydrophilic owing to hydroxyl (-OH) groups [3]. These fibers contain 20-35% non-cellulosic materials, mainly pectin, lignin, and hemicellulose [4]. The presence of pectin and waxy substances on the fiber surfaces hinders the interaction of hydroxyl groups with polymer matrices, leading to poor bonding and potential issues like weak interfaces and voids in composites. Chemical pretreatments, such as alkalization, are effective in removing non-cellulosic components from cellulose fibers, improving bonding and introducing functional groups into polymer composites. Alkaline treatment can also modify the crystal structure of cellulose and enhance the tensile properties of the fibers [5-7]. Alkali (NaOH) treatments reduce the hydrophilic nature of the fibers by reacting with the hydroxyl groups, as described in the following reaction mechanism:



This pretreatment also removes a portion of the hemicellulose and lignin from the fiber surface, resulting in an increased number of potential reaction regions for cellulose to bond with the matrix [8-9]. Numerous studies have investigated the effects of alkalization on the properties and performance of both fibers and composites. Oushabi et al. examined the impact of alkali treatment on palm fibers using different NaOH concentrations for one hour at 25 °C. Their findings revealed an increase in the tensile strength of alkali-treated palm fibers compared to untreated fibers [10]. Mishra et al. reported that a one-hour alkali treatment (30°C, 5 wt% NaOH) led to an improved strength for sisal/glass fiber composites [11]. Sunny et al. conducted high-temperature alkaline treatment of hemp fibers (120°C, 5 wt% NaOH and 2 wt% Na₂SO₃). They observed that this process enhanced the tensile strength and Young's modulus of the treated fibers up to 51% and 62%, respectively, in comparison to untreated hemp fibers [12]. Alao et al. investigated the effect of alkali and silane treatment on hemp/PLA composites. FT-IR, TGA, and SEM investigations highlighted structural alterations in the fibers and removal of noncellulosic substances [13]. Wang et al. explored the influence of alkali and acetylation fiber treatments on hemp composites. They found that the treatments remove the impurities and lignin, increasing the cellulose content of the hemp fibers [14].

Surfactants are surface-active agents that feature both hydrophobic (tail) and hydrophilic (head) groups. Consequently, a surfactant molecule has components that are both water-insoluble and water-soluble. Most surfactants have hydrocarbon chains as their hydrophobic tails [15]. When surfactant concentration exceeds the critical micelle concentration (CMC), these molecules aggregate to form micelles [16]. These micelles, which self-organize, can alter the rate of chemical reactions. This effect is attributed to the electrostatic and hydrophobic interactions between the micelles and the reactants [17].

In this study, ultrasonication-assisted alkali treatment method was applied to hemp fibers with increasing CTAC concentration as an effective method in removing non-cellulosic materials from hemp fiber. To test this hypothesis, different concentrations of CTAC ranging from 1 to 8 wt% were used along with a constant (10% w/w) NaOH concentration. The ultrasonication process was also used as a means to ensure effective removal of non-cellulosic substances during the alkali treatment of hemp fibers. A series of analysis methods, including FT-IR, SEM, and TGA, were performed to determine the effect of CTAC addition on hemp fiber properties.

II. EXPERIMENTAL METHOD

2.1 Materials

Water-retted hemp fibers from the Samsun region of Turkey were used in this study. After harvesting, the hemp stalks were soaked in the pool for seven days. The fibers were then stripped from the stem by hand and carefully combed using nailed boards. After carding, the fiber bundles were cut into 1 m lengths. These bundles were then used in sonication-assisted alkaline pretreatments. NaOH and cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC) were purchased from Sigma Aldrich and Fluorochem, respectively.

2.2 Method

2.2.1. Fiber Treatment

Hemp fiber material was subjected to alkali treatment in an ultrasonic bath using 10 wt% NaOH solution. The alkali concentration was selected based on our previous study [18]. A liquid/fiber ratio of 45 ml/g was used for the treatments. Ultrasonication and CTAC catalysis were used to ensure effective removal of non-cellulosic fiber components during the NaOH process. Ultrasonication-assisted alkali treatment was carried out at 50 Hz frequency and 330 W power at 40 °C for 2 hours. CTAC was used as a surfactant in the range of 1–8 wt%. A hemp fiber sample sonicated using only distilled water without the use of alkali was prepared as a control sample. Following treatment, the fibers were washed using distilled water until all NaOH and CTAC catalysis were removed and the pH was equaled to 7. The hemp fibers were then dried and conditioned at 70 °C for 12 h. The samples were coded such that HFU represents the sample treated without alkalization and catalyst. HFA-S1, HFA-S2, HFA-S4, HFA-S8 denote hemp fibers treated with ultrasonication and alkali in the presence of 1, 2, 4 and 8% surfactant respectively.

2.3. Characterization of materials

2.3.1 FT-IR Analysis

FT-IR analysis was performed to identify the types of bonds and chemical groups present on the fiber surface both before and after chemical treatments. This analysis was conducted on untreated and surface-treated hemp fibers using a Perkin Elmer Spectrum 400 FT-IR Spectrometer in ATR mode. The spectral range was 400-4000 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1} at room temperature. Each spectrum was averaged from 40 scans.

2.3.2 TGA

TGA was conducted to ascertain the thermal properties of the hemp fibers. The analyses were conducted using Hitachi STA 7300 Thermal Analysis System. Samples having a weight of 5 mg were used for the tests. The temperature range for TGA was kept at 20–600 °C with 10 °C/min heating rate in nitrogen atmosphere.

2.3.3 SEM Analysis

SEM images of the chemically treated and untreated fibers were taken using a FEI Quanta FEG 450 electron microscope. The sample surfaces were gold- sputtered before being observed. The accelerating voltage was 10 kV.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. FTIR Results

Figure 1 shows the FTIR results of the untreated and alkali treated hemp fibers. After the treatments, the peak intensities at 1000 and 3300 cm^{-1} increased indicating that the number of hydroxyl groups on the fiber surface increased with the treatment. The removal of the peak at 1241 cm^{-1} (C-O and C = O stretching of G ring in lignin) indicate that the treatment removed a good amount of lignin and hemicellulose. The peak at 1728 cm^{-1} originating from the carboxylic ester (C = O) in waxes, pectin and hemicellulose partly disappeared after the treatments suggesting that the treatment removed these substituents. The peak intensity at 2919 cm^{-1} , representative of the C-H bond stretching in hemicellulose reduced after the alkali treatment suggesting the removal of hemicelluloses. FT-IR analysis demonstrated the removal of non-cellulosic substances. Islam et al. reported similar FT-IR results regarding noncellulosic material removal from hemp fibers. They found that alkali treatment led to a reduction in size of sharp peak at 1735 cm^{-1} (C = O stretching vibration of carboxylic acid and ester groups in hemicellulose) which indicates the removal of hemicellulose for alkali treated fibers They also demonstrated that peak intensity at 2921 cm^{-1} (C-H stretching vibration in hemicellulose) reduced after alkali treatment which is another sign of hemicellulose removal with the treatment [19]. Sepe et al. also showed that alkali treatments results in a reduction of the weak at 1734 cm^{-1} which was ascribed to the removal of hemicellulose after alkali treatment [20]. Karaduman et al. reported that FT-IR results of ultrasonication-assisted alkali treated hemp fibers indicated the removal of noncellulosic materials after the treatments. [18].

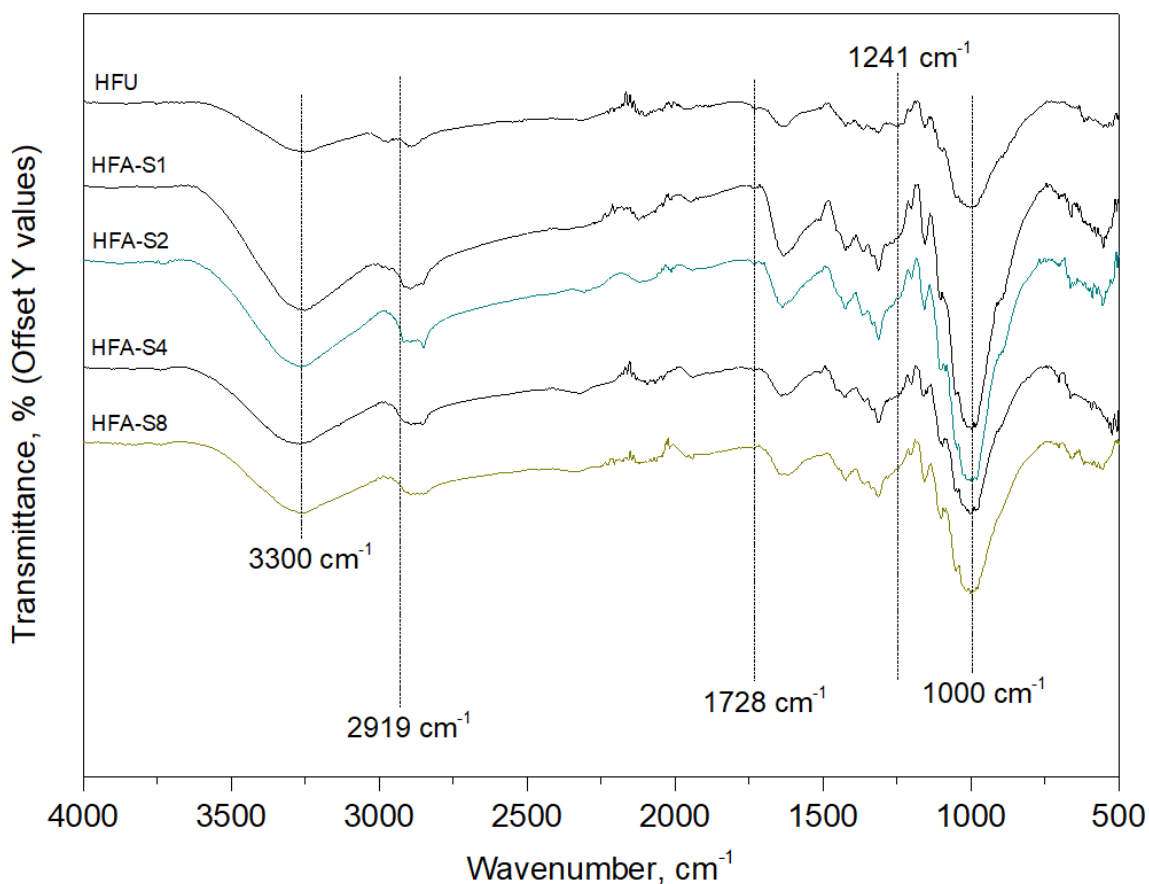


Figure 1. FTIR results of the untreated and alkali treated fibers

3.2. SEM Study

Figure 2 shows the SEM photomicrographs of the untreated and alkali treated hemp fibers. The SEM pictures highlighted that untreated fibers (HFU) are mostly in bundle form without fiber separation. Pectin and waxy substances are visible on fiber surfaces. Alkali treatment with 1 % surfactant (HFA-S1) partly removed the waxy substances and pectin but there are still impurities on fiber surfaces. The parenchyma cells were mostly broken down but cell residues are still visible. Surfactant addition resulted in cleaner fiber surfaces when compared to untreated fibers. Surfactant concentrations of 2 and 4 removed most of the noncellulosic substances but still there are impurities visible on the fiber surface. A surfactant concentration of 8 % w/w completely removed the surface wax and pectin layer and yielded to fiber separation. Treatment with higher surfactant concentrations resulted in clean and well-separated fibers with almost no impurities. SEM micrographs clearly demonstrate that surfactant addition has a positive impact on treatment of fibers. Surfactant is thought to reduce the interfacial tension (IFT) between alkali solution and waxy layer on fiber surfaces, thus enhancing the wettability of the fibers and facilitating the access of hydroxide ions into the fiber structure. This most probably resulted in more effective elimination of hemicelluloses, pectin and lignin from fiber structure. Several studies in the literature [18-22] have reported similar findings where alkali treatment removes noncellulosic substances from hemp fibers and results in a cleaner, rougher and more separated fiber surfaces.

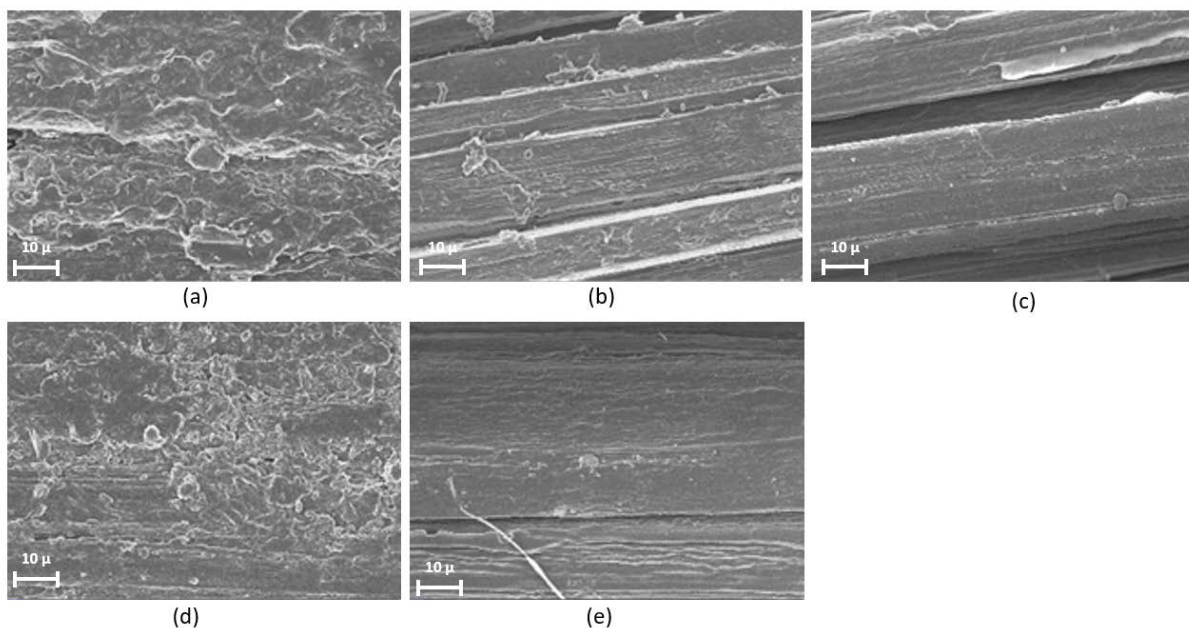


Figure 2. SEM pictures of the untreated and alkali treated fibers at a magnification of 1500 x. (a) HFU (b) HFA-S1 (c) HFA-S2 (d) HFA-S4 (e) HFA-S8

Mechanical treatment was used together with catalysis to remove lignocellulosic materials. In this way, a more effective method was created by combining mechanical-chemical pretreatment with both destruction of the outer surface and internal fragmentation of lignocelluloses. A proposed mechanism of action for CTAC-catalyzed alkali treatment of hemp fibers is shown in Figure 3. In the first step of the mechanism, CTAC catalysis and NaOH dissolve ionically in water. Damage occurs on hemp fiber surfaces through hydroxide ions in the alkaline

environment. As hydroxyl ions begin to perform external damage on the hemp fiber surface, the speed of access to the inner regions will begin to increase. Ultrasonic waves produce microbubble cavitation that transfers energy to the hemp fiber surface, causing mechanical breakdown of its outer structure and allowing ions to penetrate deeper. Concurrently, the improved mixing and ion transport driven by acoustic flow enhance interactions between ions (e.g., CTA⁺ and OH⁻) and the internal cellulosic tissues. The ions disrupt intermolecular hydrogen bonds within the cellulose chains and alter the interaction between cellulose and hemicelluloses, thereby aiding in the removal of non-cellulosic substances from the hemp fiber surface.

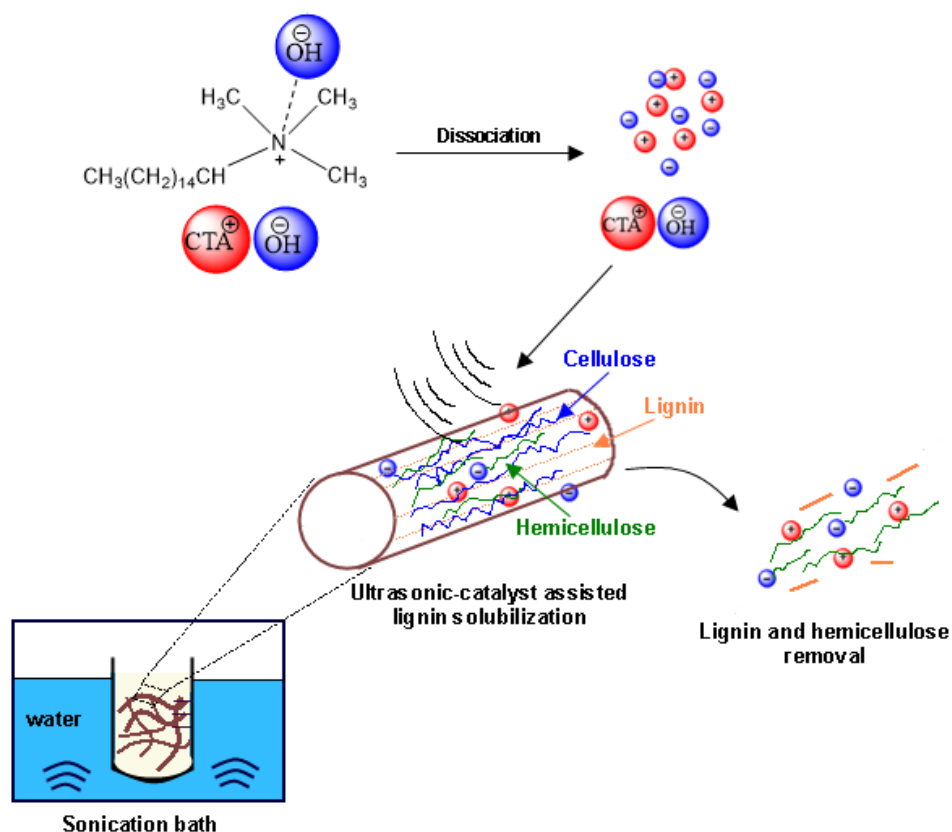


Figure 3. Mechanism of the CTAC-catalyzed alkali treatment of hemp fibers

3.3. TGA Results

TGA curves presented in Figure 4 show three distinct stages of weight loss of hemp fibers as a function of temperature. The first stage can be spotted between 30 and 140 °C corresponding to moisture removal from fibers. The second stage that took place at 220-320 °C temperature range is related to hemicelluloses degradation. The last stage of weight loss between 320-380 °C corresponds mainly to degradation of cellulose and lignin. It can be noticed from TG curves that untreated fibers experienced an abrupt decrease in the range of cellulose and lignin degradation. This can be ascribed to the elimination of lignin constituents since lignin degrades in a slow and steadier manner. Islam et al. reported similar results with alkali treated hemp fibers where the temperature at which percentage weight losses have occurred was higher for alkali treated fibers compared to untreated fibers [19]. Kabir et al. showed that the degradation temperature of hemp increases after alkali treatment suggesting a higher thermal stability of the fiber. They attributed this to the reduced lignin and hemicelluloses content by the alkali treatment

[21]. Thermal degradation of alkali treated samples did not show any other noticeable fashion in terms of thermal behavior.

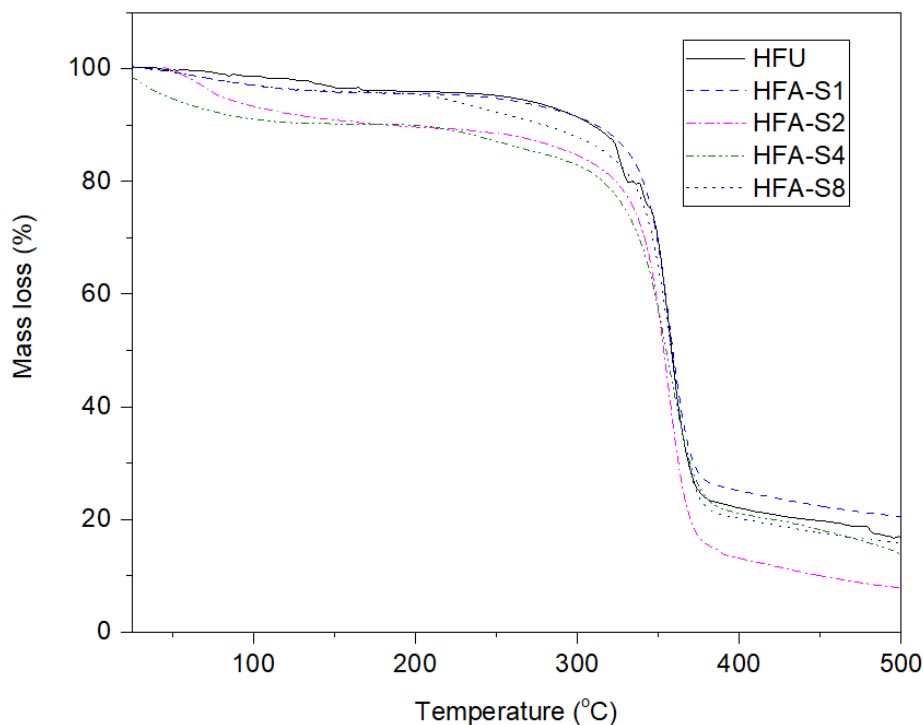


Figure 4. TGA results of the untreated and alkali treated fibers

IV. CONCLUSIONS

This study investigated the effect of ultrasonication assisted alkali treatment of hemp fibers in the presence of cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC) surfactant with values ranging between 1 and 8% w/w. The following conclusions can be drawn from this study:

- FT-IR studies on untreated and alkali-treated hemp fibers indicated that the number of hydroxyl groups on the fiber surface increased following treatment. The results also showed that the treatment effectively removed significant amounts of lignin, hemicellulose, waxes, and pectin. Overall, FT-IR analysis confirmed the removal of non-cellulosic substances from the fiber structure.
- SEM results indicated that untreated fibers are mostly in bundle form without fiber separation with pectin and waxy substances on fiber surfaces. Alkali treatment with a surfactant concentration of 8 % w/w completely removed the surface wax and pectin layer and yielded to fiber separation. Treatment with higher surfactant concentrations resulted in clean and well-separated fibers with almost no impurities. SEM micrographs clearly demonstrate that surfactant addition has a positive impact on treatment of fibers. This was attributed to the fact that the surfactant reduces the interfacial tension between alkali solution and waxy layer on fiber surfaces, thus enhancing the wettability of the fibers and facilitating the access of hydroxide ions into the fiber structure, leading to more effective elimination of hemicelluloses, pectin and lignin from fibers.

- The TGA study revealed that untreated fibers exhibited a sharp decline during the cellulose and lignin degradation phase. This was attributed to the removal of lignin components, as lignin tends to degrade more gradually and steadily. In contrast, the thermal degradation of alkali-treated samples did not display any significant pattern in thermal behavior when compared to untreated fibers.

Future studies will focus on the effect of ultrasonication-assisted alkali treatment and the effect of cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC) surfactant on the properties of hemp fiber composites.

ACKNOWLEDGMENT

*This study was presented as an oral presentation at the 14th International Fiber and Polymer Symposium (14th ULPAS) in Bursa/Turkey on 24-25 May 2024.

This work was supported by Yozgat Bozok University Scientific Research Projects Coordination Unit, Turkey (grant number FHD-2023-1294).

REFERENCES

1. Gholampour A, Ozbakkaloğlu T (2020) A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science* 55:829–892.
2. Joshi SV, Drzal LT, Mohanty AK, Arora S (2004) Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35:371-376.
3. Sawpan MA, Pickering KL, Fernyhough A (2011) Effect of various chemical treatments on the fibre structure and tensile properties of industrial hemp fibres. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 42(8):888-895.
4. Kapoor M, Beg QK, Bhushan B, Singh K, Dadhich KS, Hoondal GS (2001) Application of an alkaline and thermostable polygalacturonase from bacillus sp. mg-cp-2 in degumming of ramie (*boehmeria nivea*) and sun hemp (*crotalaria juncea*) bast fibres. *Process Biochemistry* 36:803-807.
5. Ray D, Sarkar BK (2001) Characterization of alkali-treated jute fibers for physical and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science* 80:1013-1020.
6. Mwaikambo LY, Ansell MP (2006) Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials I. Hemp fibres. *Journal of Materials Science* 41:2483-2496.
7. Sinha E, Rout S (2008) Influence of fibre-surface treatment on structural, thermal and mechanical properties of jute. *Journal of Materials Science* 43:2590-2601.
8. Das M, Chakrabarty D (2008) Thermogravimetric analysis and weathering study by water immersion of alkali treated bamboo fibres. *BioResources* 3(4):1051-1062.
9. John MJ, Anandjiwala RD (2008) Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites* 29(2):187–207.
10. Oushabi A, Sair S, Hassani FO, Abboud Y, Tanane O, El Bouari A (2017) The effect of alkali treatment on mechanical, morphological and thermal properties of date palm fibres (DPFs): Study of the interface of DPF Polyurethane composite. *South African Journal of Chemical Engineering* 23:116-123.
11. Mishra S, Mohanty AK, Drzal LT, Misra M, Parija S, Nayak SK, Tripathy SS (2003) Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites. *Composites Science and Technology* 63:1377-1385.
12. Sunny T, Pickering KL, Lim SH (2020) Alkali treatment of hemp fibres for the production of aligned hemp fibre mats for composite reinforcement. *Cellulose* 27:2569-2582.
13. Alao PF, Marrot L, Burnard MD, Lavric G, Saarna M, Kers J (2021) Impact of alkali and silane treatment on hemp/PLA composites' performance: From micro to macro scale. *Polymers* 13(6), 851.
14. Wang H, Kabir MM, Lau KT (2014) Hemp reinforced composites with alkalization and acetylation fibre treatments. *Polymers & Polymer Composites* 22:247-252.
15. Myers D (2006) *Surfactant Science and Technology*. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, USA.
16. Rosen MJ (2004) *Surfactants and Interfacial Phenomena*. Third ed., Wiley-Interscience, New Jersey.
17. Al-Lohedan HA (1995) Quantitative treatment of micellar effects upon nucleophilic substitution. *J Chem Soc Perkin Trans*, 2:1707–1713.

18. Karaduman Y, Secinti-Klopf H, Sahbaz Karaduman N (2024) Ultrasonication-assisted alkali treatment of hemp fibers to improve the fiber/matrix interface of hemp/epoxy composites: The influence of sodium dodecyl sulfate surfactant. *Polymer Composites* 45:8187-8201.
19. Islam MS, Pickering KL, Foreman NJ (2011) Influence of alkali fiber treatment and fiber processing on the mechanical properties of hemp/epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science* 119:3696–3707.
20. Sepe R, Bollino F, Boccarusso L, Caputo F (2018) Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering* 133:210-217.
21. Kabir MM, Wang H, Lau KT, Cardona F, Aravinthan T (2012) Mechanical properties of chemically-treated hemp fibre reinforced sandwich composites. *Composites Part B: Engineering* 43:159-169.
22. Beckermann GW, Pickering KL (2008) Engineering and evaluation of hemp fibre reinforced polypropylene composites:Fibre treatment and matrix modification. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39:979-988.



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering
and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Manyetik ve fotokatalitik polimer tanecikleri ile atık suların renksizleştirilmesi ve yeniden kullanım denemeleri

Şeyma Yalçın Turan^a, Ali Kara^b, Gizem Bayaçalı Uygun^a ve İrem Özyurt^a^aKaresi Polyester, Ar-Ge Merkezi, Bursa 16580, Türkiye^bBursa Uludağ Üniversitesi, Bursa 16059, Türkiye

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 13 Ağustos 2024

Düzeltilme 20 Ekim 2024

Kabul 6 Kasım 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Polimer partikül

Tekstil atık suyu

Adsorpsiyon

Heterojen fotokataliz

ÖZET

Tekstil endüstrisi, yüksek istihdam potansiyeli ve sürekli yenilik ve gelişim fırsatlarıyla birçok ülke için kritik bir sektördür. Ancak, bu sektör aynı zamanda su tüketimi açısından da en büyük tüketicilerden biridir. Bu çalışmada, tekstil endüstrisinde oluşan renkli atık suyun renksizleştirilmesi için manyetik ve fotokatalitik özelliklere sahip polimer tanecikler sentezlendi ve atık su arıtma deneyleri gerçekleştirildi. Polimer tanecikler, süspansiyon polimerizasyon yöntemiyle sentezlendi ve SEM, FTIR, BET ve ESR ile karakterize edildi. Bu tanecikler, Karesi polyester şirketinden alınan atık suyun renksizleştirilmesinde adsorpsiyon ve heterojen fotokataliz yöntemleri bir arada kullanıldı. Deneyler üç döngü boyunca tekrarlandı. İşlemlerin ardından, renksizleştirilmiş sularla boyama deneyleri yapıldı. Sonuçlar, %99,68'e kadar uzanan giderim verimliliklerini gösterdi. Bu, polimer taneciklerin su arıtımı için etkili, çevre dostu ve yenilikçi bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Experiments on decolorization and reuse of wastewater using magnetic and photocatalytic polymer particles

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 August 2024

Received in revised form 20 October 2024

Accepted 6 November 2024

Available online

Keywords:

Polymer particle

Textile wastewater

Adsorption

Heterogeneous photocatalysis

ABSTRACT

The textile industry is an important sector for many countries due to its high employment potential and continuous opportunities for innovation and development. However, this sector is also one of the largest consumers of water. In this study, polymer particles with magnetic and photocatalytic properties were synthesized for the decolorization of colored wastewater generated in the textile industry, and wastewater treatment experiments were conducted. The polymer particles were synthesized using the suspension polymerization method and characterized by SEM, FTIR, BET and ESR. These particles were used for the decolorization of wastewater from Karesi Polyester Company, employing both adsorption and heterogeneous photocatalysis methods simultaneously. The experiments were repeated over three cycles. Following the treatments, dyeing experiments were conducted with the decolorized waters. The results demonstrated removal efficiencies of up to 99.68%. This indicates that polymer particles can be effectively utilized as an environmentally friendly and innovative method for water treatment.

I. GİRİŞ

Tekstil endüstrisi, hem ekonomik büyüklüğü hem de çevresel etkileri nedeniyle dikkat çeken bir sektördür. Üretim süreçlerinde kullanılan su miktarı ve bu suların gerektiği şekilde arıtılmadan doğaya salınması, ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Özellikle boyama işlemleri, tekstil üretiminde en fazla su tüketilen aşamalardan biridir [1]. Literatürde, bir kilogram tekstil ürününün boyanması için yaklaşık 100 ila 150 litre su kullanıldığı belirtilmektedir [2]. Bu aşamada kullanılan su, boyaların çözülmesini ve kumaşın homojen bir şekilde

renklenmesini sağlarken, zararlı kimyasal maddelerle yüklü atık su oluşumuna da yol açar. Yıkama, durulama ve diğer ön işlem basamakları da bu yüksek su tüketimine eklenerek, atık suyun çevreye olan zararını daha da artırır. Tekstil boyama işlemlerinden kaynaklanan atık sular, yüksek renk konsantrasyonu, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toksik bileşikler içermesi nedeniyle arıtımı zor sular olarak sınıflandırılır [3]. Bu bağlamda, çevreye olan olumsuz etkileri en aza indirmek için ileri su arıtım teknolojilerinin kullanılması zorunluluk haline gelmiştir. Özellikle azo boyarmaddeler, tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve iki azot atomu arasındaki çift bağ içeren azo (-N=N-) grubuna ve aril gruplarına sahip organik bileşiklerdir [4]. Bu boyarmaddeler boyama işlemlerinde sıkça kullanılmakta ve kontrolsüz deşarjı çevre için büyük bir kirlilik potansiyeli yaratmaktadır. Azo boyarmaddeler sucül ekosistemlerde güneş ışığının suya nüfuz etmesini engelleyerek fotosentezi sınırlar ve su yaşamını tehdit eder [5]. Ayrıca, biyolojik arıtma yöntemlerine karşı dirençli olmaları nedeniyle, geleneksel yöntemlerle uzaklaştırılmaları zor ve maliyetli olabilmektedir. Bu durum, azo boyarmaddelerin arıtılmasını tekstil atık sularının yönetiminde kritik bir sorun haline getirmektedir. Tekstil endüstrisinde azo boyarmaddelerin çevresel etkilerini en aza indirmek amacıyla çeşitli fiziksel ve kimyasal arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Fiziksel yöntemler arasında çöktürme, filtrasyon ve aktif karbon adsorpsiyonu gibi teknikler yer alır [6]. Ancak, bu yöntemlerin dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin, çöktürme ve filtrasyon süreçleri, ikincil kirlilik yaratabilecek atıklar üretebilir ve bu atıkların bertarafı ek maliyetler doğurabilir. Kimyasal yöntemler ise pıhtılaşma-çöktürme, oksidasyon ve ileri oksidasyon süreçleri gibi tekniklerle boyar maddelerin kimyasal yapısını bozarak onları daha az zararlı bileşiklere dönüştürmeyi hedefler [7]. Ancak, kimyasal arıtma yöntemlerinden bazıları yüksek kimyasal tüketimine yol açabilir ve bu da ekolojik ve ekonomik açıdan bazı sorunlar yaratabilir. Dolayısıyla, sürdürülebilir ve çevre dostu arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Literatürde, heterojen fotokataliz kullanılarak gerçekleştirilen birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların büyük bir kısmı, belirli bir boyarmaddenin giderilmesine odaklanmıştır. Örneğin, Daneshvar ve ark., asidik kırmızı 14 boyasının fotokatalitik degradasyonunu incelemişler ve UV/TiO₂ süspansiyonu kullanarak 3,5 saat içinde boyarmaddenin tamamen giderildiğini tespit etmişlerdir [8]. Chen, hidrolize edilmiş reaktif turuncu 16'nın TiO₂ ile arıtımını araştırmış ve 80. dakikada boyarmadde çözeltisinde %100 dekolizasyon elde etmiştir [9]. Muruganandham ve Swaminathan ise güneş ışığı altında reaktif turuncu 4 boyasının fotokatalitik dekolizasyonunu TiO₂ kullanarak gerçekleştirmişlerdir [10]. Dalal ve ark., çinko sülfür gömülü indirgenmiş grafen oksit kullanarak Kongo Kırmızısı'nın fotokatalitik degradasyonunu ele almışlardır [11]. Khan ve ekibi ise azot katkılı TiO₂ kullanarak reaktif siyah 5 boyasının fotokatalitik dekolizasyonundaki etkinliğini değerlendirmiştir [12].

Bu çalışmada ise literatürde yaygın olarak kullanılan boyarmadde çözeltileri yerine, Karesi Polyester firmasının atık su arıtım ünitesinden alınan, membran filtrasyon ve ters ozmoz işlemlerinden geçirilmiş gerçek endüstriyel atık sular kullanılmıştır. Membran filtrasyon ve ters ozmoz işlemleri, dispers boyalar ve katı maddelerin uzaklaştırılmasında etkili olsa da azo boyarmaddeler gibi suda iyi çözünen kirlenmeler hâlâ atık sularda kalmaktadır. İşletmede bu boyarmaddelerin giderimi genellikle kimyasal çöktürme yöntemiyle sağlanmaktadır. Ancak bu süreç ikincil kirlilik yaratabilmektedir. Çalışmanın temel amacı, polimer partiküller aracılığıyla adsorpsiyon ve heterojen fotokataliz yöntemlerini birleştirerek bu atık suların etkin bir şekilde arıtılması ve kimyasal çöktürmenin yarattığı olumsuz etkilerden kaçınılmasıdır. Ayrıca, kullanılan polimerlerin manyetik özelliği sayesinde, harici bir mıknatıs yardımıyla polimer partiküller sulu çözeltiden kolaylıkla uzaklaştırılabilmektedir. Gerçek endüstriyel atık su örnekleri, laboratuvar ortamında kullanılan boyarmadde

çözeltilerine kıyasla birçok boyarmaddenin kombinasyonunu içeren çok daha karmaşık bir yapıya sahip olduğundan, adsorpsiyon ve heterojen fotokataliz yöntemlerini birlikte kullanan bu polimerlerin bu karmaşık karışımlar üzerindeki etkinliğinin değerlendirilmesi önemlidir. Çalışmanın bir diğer amacı, arıtılmış suyun boyama süreçlerinde kullanılabilirliğini değerlendirmek için geri kazanılan suyla yapılan boyama testleri sonucunda boyama performansını incelemektir.

II. DENEYSEL METOT / TEORİK METOD

2.1 Materyal

Polimer tanecikler, Bursa Uludağ Üniversitesi Polimer Araştırma Laboratuvarı'nda sentezlenmiştir. Divinil benzen, polivinil alkol, benzoil peroksit, 4-vinil piridin, toluen, baryum ferrit ve anataz TiO₂ Sigma-Aldrich'ten temin edilmiştir. Hidroklorik asit (%37) ve sodyum hidroksit ise Merck'ten temin edilmiştir. Çalışmada kullanılacak atık su, Karesi Polyester ve Petrokimya Sanayi A.Ş.'den sağlanmıştır.

2.2 Polimer partiküllerin sentezi

Çalışmada kullanılan manyetik ve fotokatalitik çapraz bağlı polimer partiküller, Bursa Uludağ Üniversitesi Polimer Araştırma Laboratuvarı'nda özel olarak tasarlanmış bir Pyrex cam reaktörde süspansiyon polimerizasyon yöntemiyle sentezlenmiştir. Dispersiyon fazı, polivinil alkol ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Organik faz, çapraz bağlayıcı olarak divinil benzen, gözenek yapıcı olarak toluen, monomer olarak 4-vinil piridin ve termal başlatıcı olarak benzoil peroksit kullanılarak oluşturulmuştur. Manyetik özellik sağlamak amacıyla baryum ferrit ve fotokatalizör olarak TiO₂ eklenmiştir. Reaksiyon, 65 °C sıcaklıkta ve 800 rpm karıştırma hızında 7 saat boyunca devam etmiştir. Reaksiyonun ardından, dispersiyon fazı dekant edilerek tanecikler ayrılmış ve vakumlu bir fırında 70 °C sıcaklıkta 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Kurutulmuş polimer tanecikleri, parçacık boyutlarına göre ayırmak amacıyla bir elek kullanılarak eleme işlemine tabi tutulmuştur.

2.3 Karakterizasyon

Kullanılan polimer taneciklerin yüzey görüntüleri, Carl Zeiss Evo 40 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak elde edilmiştir. Polimer partiküllerinin yapısındaki bağlar, Bruker Alpha marka Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) cihazıyla 400-4000 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında incelenmiştir. Polimerik yapının yüzey özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Quantachrome Corporation Autosorb-6 marka cihaz kullanılarak BET (Brunauer-Emmett-Teller) analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, manyetik alana duyarlılığını kanıtlamak için Bruker ELEXSYS E580 marka Elektron Spin Rezonansı (ESR) spektroskopisi kullanılmıştır.

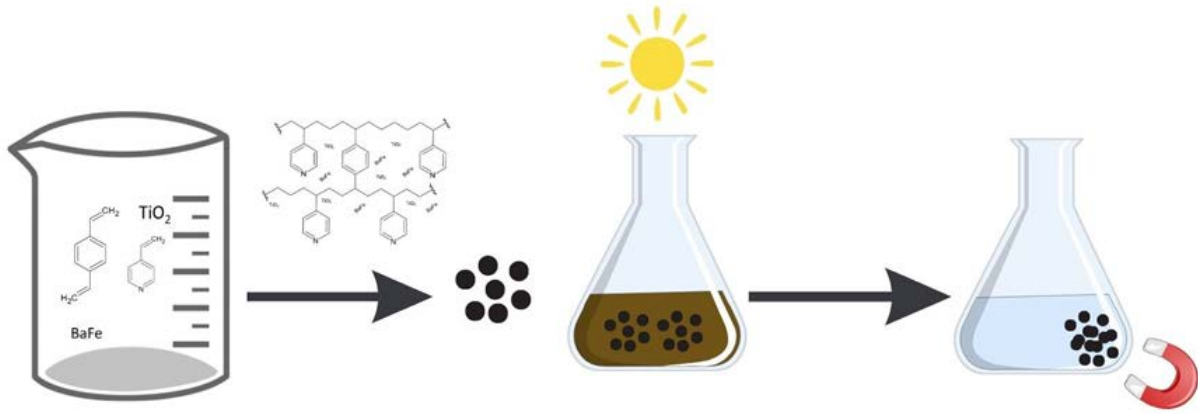
2.4 Atık su renksizleştirme çalışmaları

Bu çalışmada, Karesi Polyester ve Petrokimya Şirketi'nin atık su arıtım bölümünden alınan numuneler kullanılmıştır. İşletmede gerçekleşen prosesler sonucunda oluşan atık sular, atık su arıtma birimine yönlendirilir ve burada ters ozmoz ile membran filtrasyon gibi çeşitli arıtma prosesleri uygulanır. Bu prosesler sonucunda,

tekstil atık sularında bulunan dispers boyarmaddeler, katı maddeler gibi birçok kirletici uzaklaştırılır. Ancak azo boyarmaddeler, suda yüksek çözünürlük sağladıkları için bu işlemler sonrasında su içerisinde kalabilir.

Çalışma kapsamında, arıtma süreçlerinin ardından içerisinde azo boyarmaddelerin bulunduğu ve kimyasal çöktürme işlemine girmeden önceki atık su üzerinde deneyler yapılmıştır. Kimyasal çöktürme gibi ek kirlilik oluşturabilecek proselere alternatif bir yaklaşım benimsenmiştir. Alınan atık sular, polimer partikülleri ile arıtılmıştır. Arıtım işlemi, her 1 litre atık suya 1 gram polimer eklenerek ve 24 saat karanlık ortamda ve 4 saat boyunca güneş ışığı altında bekletilerek gerçekleştirilmiştir.

Polimerin tekrar kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla bazı deneyler yapılmıştır. Polimerler, arıtım işleminden sonra sudan ayrıştırılmış ve herhangi bir rejenerasyon işlemine tabi tutulmaksızın, atık suların arıtımı için tekrar kullanılmıştır. Bu işlem, üç döngü boyunca tekrarlanmıştır. Her bir denemeden sonra atık su numunesi alınmış ve KOİ testleri gerçekleştirilmiştir. KOİ testleri Karesi Polyester firmasında bulunan atık su arıtım laboratuvarında Hach marka hazır KOİ test kitleleri kullanılarak yapılmıştır. Arıtılmış atık suların tekrar kumaş boyama prosesinde kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla, bu sular ile işletmede endüstriyel amaçlarla üretilen rastgele renklerle kumaş boyama işlemleri gerçekleştirilmiştir.



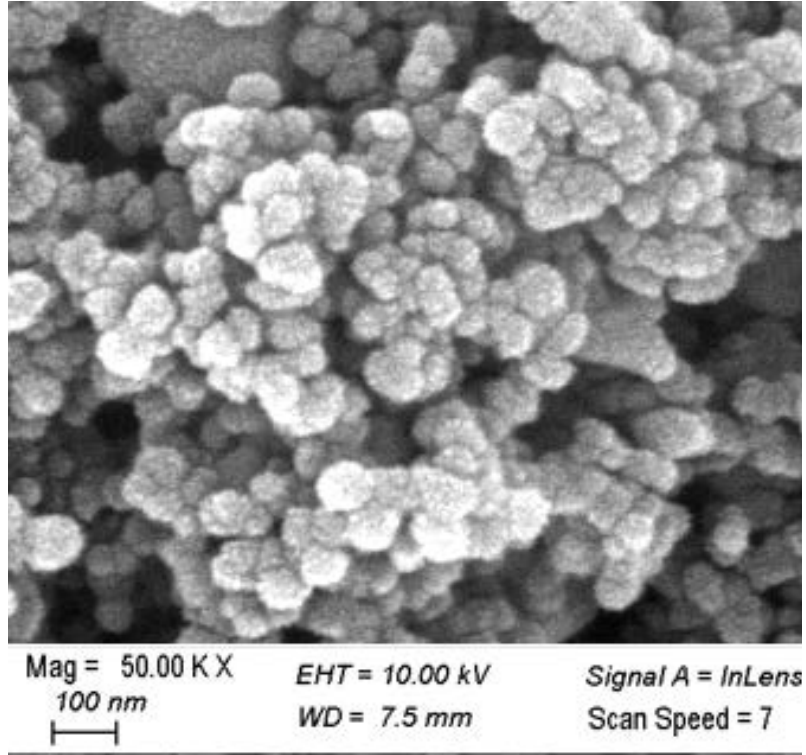
Şekil 1. Atık suyun renksizleştirilmesi şematik gösterimi

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Karakterizasyon

3.1.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

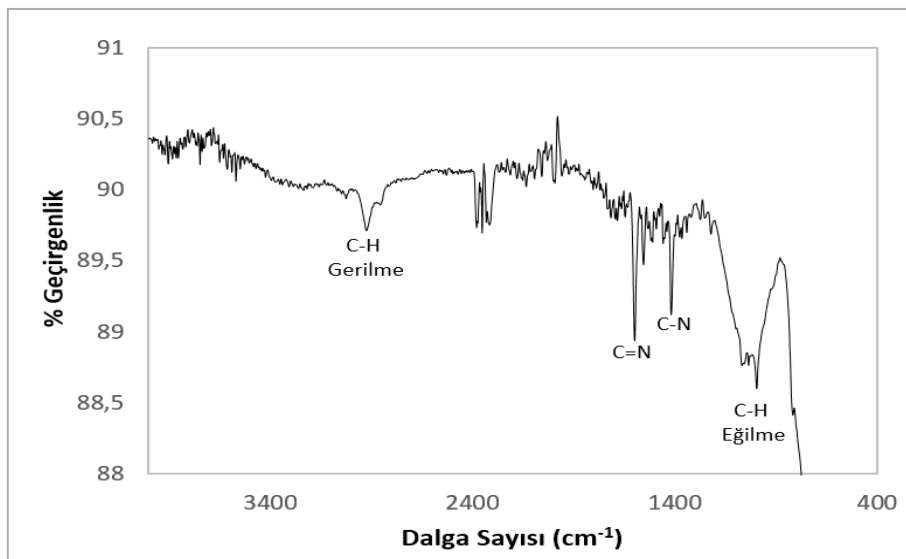
Polimerlerin SEM ile elde edilen görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Polimerler, iç içe geçmiş küresel forma yakın tanecikler olarak görünmektedir.



Şekil 2. Polimer partiküllerin SEM görüntüsü

3.1.2 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

Polimer partiküllerinin FTIR spektrumu Şekil 3'te sunulmuştur. Spektrumda, 1595 cm^{-1} ve 1412 cm^{-1} dalga sayılarında gözlemlenen pikler, sırasıyla piridin halkasında bulunan C=N ve C-N bağlarının varlığını işaret etmektedir [13]. Yaklaşık 3000 cm^{-1} bölgesindeki pikler, moleküler yapı içindeki C-H bağlarının gerilme titreşimlerini yansıtırken, $1000\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki pikler ise C-H eğilme titreşimlerine karşılık gelmektedir.



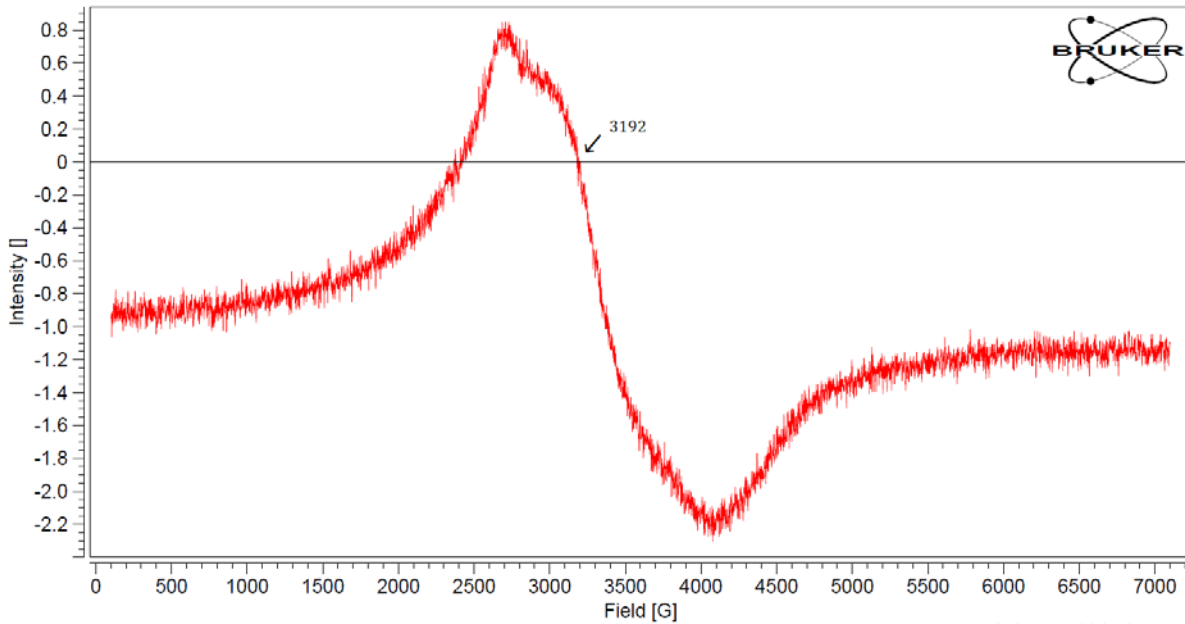
Şekil 3. Polimer partiküllerin FTIR spektrumu

3.1.3 Brunauer-Emmet Teller (BET) Analizi

Polimer partiküller, boyarmaddeleri heterojen fotokataliz prosesi öncesinde adsorbe ederler. Bu nedenle, polimerlerin yüzey gözenekliliklerini karakterize etmek amacıyla BET analizi gerçekleştirilmiştir. BET analizinin sonucuna göre, DH (Dollimore-Heal) metoduna göre malzemenin spesifik yüzey alanı $47,9 \text{ m}^2/\text{g}$, toplam gözenek hacmi $0,1972 \text{ cm}^3/\text{g}$ ve gözenek çapı $2,807 \text{ nm}$ olarak belirlenmiştir. Gözenek çapının $2,807 \text{ nm}$ olması, malzemenin mezogözenekli malzeme olarak sınıflandırılmasına olanak tanır [14].

3.1.4 Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi

Polimer yapının manyetik alana duyarlılığını incelemek amacıyla Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisi kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. ESR spektroskopisi, malzemelerin manyetik özelliklerini anlamak için başvurulan bir tekniktir. Bu çalışma kapsamında, polimerin manyetik özelliklerini belirlemek için g faktörü hesaplanmıştır. Manyetik özellik gösteren malzemeler, manyetik bir alan uygulandığında mıknatıslanma eğiliminde olur ve g faktörü, malzemedeki spin hareketlerinin bu mıknatıslanma üzerindeki etkisini tanımlayan bir parametredir. Polimer için hesaplanan $2,107$ g faktörü, literatürde baryum ferrit için belirtilen $2,23$ g faktörüne oldukça yakındır. Bu durum, polimer yapısında baryum ferritin varlığını doğrulamakta ve polimerin manyetik alana olan hassasiyetini bu bileşenin etkisiyle açıklamaktadır. [15].



Şekil 4. Polimer partiküllerin ESR spektrumu

3.2 Atık su renksizleştirme çalışmaları

Aritma işlemleri, her bir litre atık suya 1 gram polimer uygulanarak gerçekleştirildi. Hem atık su hem de polimer tanecikleri, başlangıçta adsorpsiyon işlemi için ışısız bir ortamda 24 saat bekletildi. Daha sonra, karanlıktan

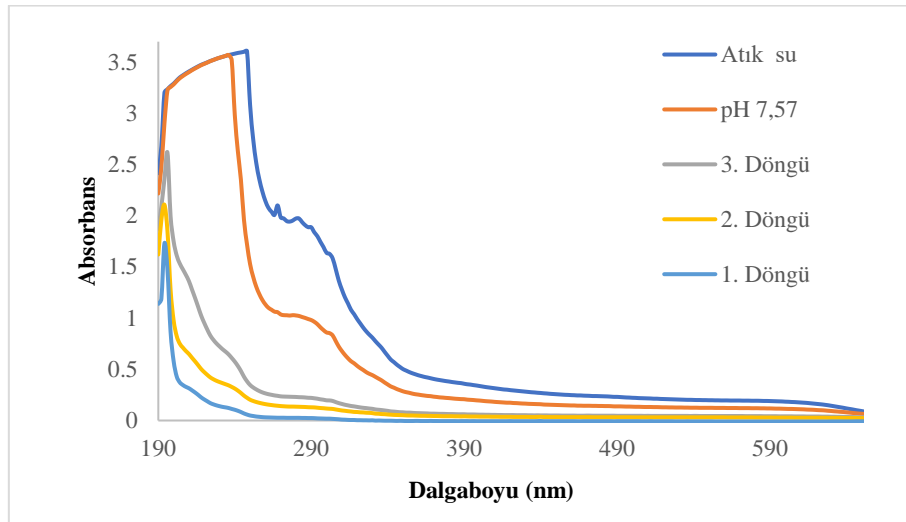
çıkarılarak güneş altında 4 saat boyunca bir renksizleştirme işlemine tabi tutuldular. Arıtma, atık suyun doğrudan kullanımıyla birlikte ve atık suyun pH'ı 3'e ayarlanarak yapıldı.

Arıtma işleminde elde edilen su başlangıçta doğrudan kullanılmış, ancak istenilen verim elde edilememiştir. Bunun üzerine literatürdeki çalışmalar incelenerek, daha etkili bir arıtım sağlamak amacıyla suyun pH seviyesinin 3'e düşürülmesine karar verilmiştir. Bu kararın temel nedeni, monomer yapısında yer alan piridin halkasındaki azot atomunun düşük pH seviyelerinde protonlanmasıdır. Protonlanma, sulu çözeltilerde genellikle anyonik formda bulunan azo boyarmaddeleriyle güçlü elektrostatik etkileşimlere olanak sağlayarak, daha yüksek verimli bir arıtım sürecini mümkün kılmaktadır [16-17]. Arıtma işlemi iki aşamalı bir mekanizma üzerinden gerçekleşmektedir: İlk olarak, polimer partikülleri adsorban olarak görev yapar ve fiziksel adsorpsiyon süreci devreye girer. Bu aşamada boyar maddeler, zayıf van der Waals kuvvetleri aracılığıyla yüzeye fiziksel olarak bağlanır. Kimyasal bağlar oluşmadan, moleküller yüzeyde tutulur. Sonrasında, yüzeye tutunan maddeler TiO₂ kullanılarak fotokatalitik süreç ile parçalanır. TiO₂ ışıkla uyarıldığında elektron-delik çiftleri oluşturur ve bu süreç, sudaki azo boyarmaddelerin reaktif oksijen türleri yardımıyla parçalanmasına yol açar.

pH 3'te yapılan deneyler verimli sonuçlar verdiği için, polimer taneciklerinin tesis suyundaki yeniden kullanılabilirliğini değerlendirmek için denemelere 3 döngü boyunca devam edildi. Polimer tanecikleri ile işlenmiş atık suyun spektrum verileri Şekil 5'te gösterilirken, KOİ ve giderim değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Renksizleştirilmiş suların % giderim ve KOİ değerleri

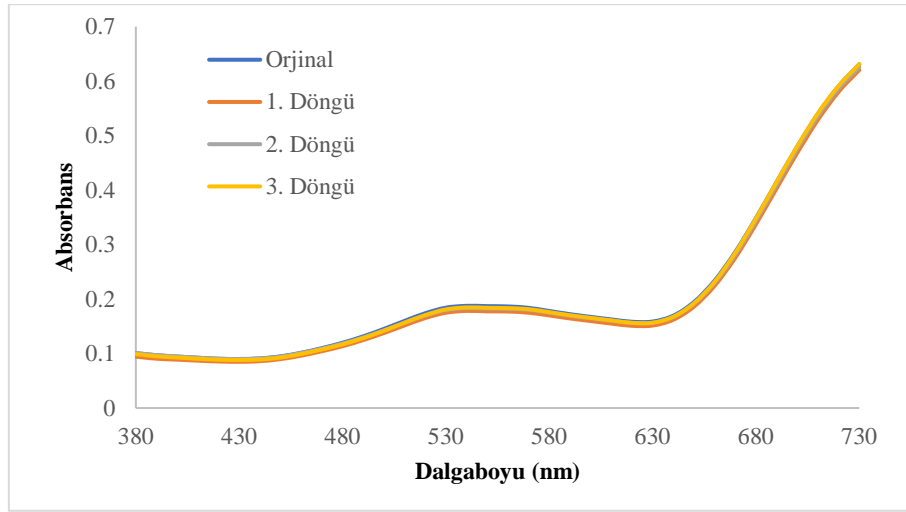
Atık su	KOİ	% Giderim
pH 7,57	396	47,99
pH 3 (1. Döngü)	93	99,68
pH 3 (2. Döngü)	107	93,15
pH 3 (3. Döngü)	321	88,34



Şekil 5. Renksizleştirilmiş suyun dalga boyu spektrumu

KOİ ve % Boya Giderimi değerlerinin incelenmesi sonucunda, pH ayarlanmadan polimerlerin atık su arıtımında etkin bir şekilde kullanılamayacağı belirlendi. Ancak, pH değeri 3'e ayarlanmış atık su için, etkili bir renksizleştirme 2 döngü boyunca başarılabildi.

Polimer partiküllerin yeniden kullanılabilirliğini değerlendirmek için yapılan deneylerde elde edilen suların, kumaş boyama işlemlerinde kullanılabilirliği test edildi. Kumaşların boyanmasında, Karesi Polyester ve Petrokimya Sanayi A.Ş. tarafından endüstriyel amaçlarla üretilen renklerden rastgele seçilen reçeteler kullanıldı. Boyama işlemi için endüstriyel su kullanılarak elde edilen sonuçlar referans alındı. Üç farklı döngüde elde edilen su ile boyanan her bir kumaş, endüstriyel su ile boyanan referans kumaşla karşılaştırıldı. Elde edilen veriler Tablo 2'de, spektrum değerleri ise Şekil 6'da gösterilmiştir. Tablo 2 ve 3'de verilen ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔC^* , ΔH^* ve ΔE^* değerleri sırasıyla, numune ile standart renkler arasındaki açıklık farkını, kırmızı-yeşillik farkını, mavi-sarılık farkını, doygunluk farkını, renk tonu farkını ve toplam renk farkını ifade eder [18]. Toplam renk farkını ifade eden ΔE^* değerinin 1 den küçük olması referans alınan kumaşla boyanmış kumaşın renk farkının kabul edilir sınırdan olduğunu ifade eder [19]. Sonuçlar, üç döngü boyunca elde edilen suyla boyanmış kumaşların ΔE^* değerinin 1'den küçük olduğunu ve bu suyun endüstriyel koşullarda kullanılabilir nitelikte kumaş çıktılarını sağladığını göstermektedir.



Şekil 6. Renksizleştirilmiş su ile boyanmış kumaşların renk spektrumları

Tablo 2. Renksizleştirilmiş su ile boyanmış kumaşların renk değerleri

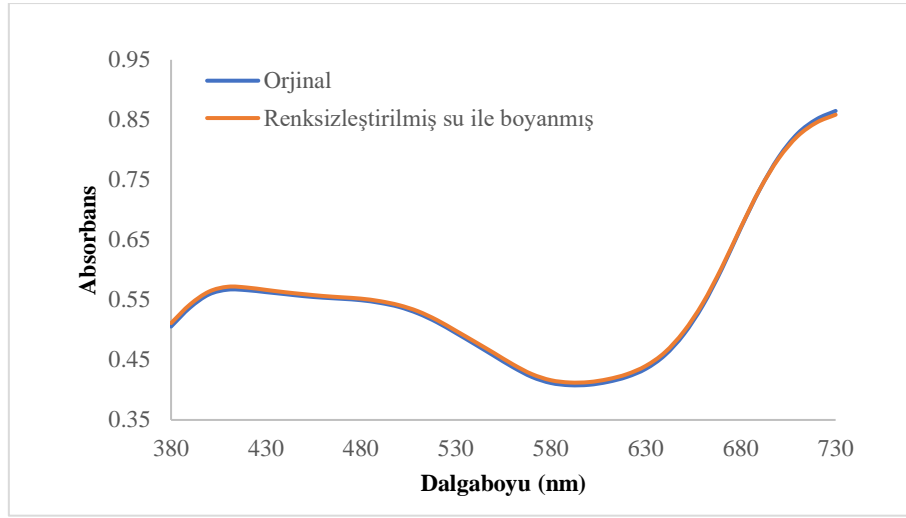
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*	P/F ΔE^*
1. Döngü	-1,07	0,21	-0,13	-0,18	-0,17	0,54	Geçer
2. Döngü	-0,42	0,34	-0,54	-0,6	-0,19	0,47	Geçer
3. Döngü	-0,34	0,21	0,1	0,05	-0,23	0,27	Geçer

Tablo 3. Renksizleştirilmiş su ile boyanmış kumaşların renk değerleri

	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*	P/F ΔE^*
Renksizleştirilmiş su	0,27	0,06	0,14	-0,15	0,02	0,16	Geçer

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, doğrudan alıcılara yapılan deşarjlarda KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) değerinin 300 mg/L ve pH değerinin ise 6-9 arasında olmasını zorunlu kılmaktadır [20]. Bu düzenleme, KOİ değerlerinin belirtilen sınırlar dahilinde olmasına rağmen pH değerlerinin bu aralık dışında kalmıştır. Bu bağlamda, polyester boyama işlemleri sırasında suyun pH değerinin yaklaşık 4 civarında olması gerektiği ve direkt olarak bu suyun pH ayarlamasına gerek kalmadan kullanılabileceği önerilmiştir. Bu varsayımı test etmek amacıyla, işletmede rastgele seçilen bir polyester

boyama işlemi bu su kullanılarak ve ekstra asit ile pH ayarı yapılmadan denenmiştir. Deneme sonucunda elde edilen renk, işletmenin orijinal boyası ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, Tablo 3 ve Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Renksizleştirilmiş su ile boyanmış kumaşların renk spektrumları

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, asit kullanımıyla pH ayarlaması yapmaya gerek kalmadan, renksizleştirilmiş suyun polyester boyama işleminde doğrudan kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma, tekstil endüstrisinde üretilen renkli atık suların arıtımında yenilikçi ve çevre dostu bir yöntem olarak, manyetik ve fotokatalitik özelliklere sahip polimer partiküllerinin kullanım potansiyelini başarıyla göstermiştir. Süspansiyon polimerizasyon yöntemi ile sentezlenen bu partiküller, atık sular üzerinde adsorpsiyon ve heterojen fotokataliz yoluyla test edilmiştir. pH 3'e ayarlanmış atık suyun kullanımıyla gerçekleştirilen arıtma işlemleri, polimer partiküllerin renk gideriminde %99,68'e varan etkinlik gösterdiğini ve bu işlem sırasında KOİ değerlerinin de büyük oranda düşürüldüğünü ortaya koymuştur. Üç döngü boyunca polimer üzerinde herhangi bir rejenerasyon yapmadan sürdürülen arıtma ve boyama deneyleri, polimer partiküllerin 2 döngü boyunca yeniden kullanılabilirliğini ve arıtılmış suların endüstriyel polyester boyama işlemlerinde başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlar, tekstil endüstrisinde sürdürülebilir su yönetimi pratiklerine önemli katkılar sağlayabilecek yenilikçi bir arıtma yönteminin potansiyelini vurgulamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Karesi Polyester ve Petrokimya Sanayi A.Ş. ile Bursa Uludağ Üniversitesi arasındaki üniversite-sanayi işbirliği kapsamında gerçekleştirilmiştir. Karesi Polyester ve Petrokimya Sanayi AŞ'ye, bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasına katkıda bulunan değerli desteği için teşekkür etmek isteriz.

KAYNAKLAR

1. Kant R (2012) Textile dyeing industry: An environmental hazard. *Natural Science*,4(1):22-26.
2. Odabaşoğlu HY, Avinç OO, Yavaş A (2013) Susuz boyama. *Tekstil ve Mühendis* 20(90):63-79.
3. Liang J, Ning XA, Sun J, Song J, Lu J, Cai H, Hong Y (2018) Toxicity evaluation of textile dyeing effluent and its possible relationship with chemical oxygen demand. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 166: 56-62.
4. Ganjoo R, Verma C, Kumar A, Quraishi MA (2023) Colloidal and interface aqueous chemistry of dyes: Past, present and future scenarios in corrosion mitigation. *Advances in Colloid and Interface Science* 311, 102832.
5. Berradi M, Hsissou R, Khudhair M, Assouag M, Cherkaoui O, El Bachiri A, El Harfi A (2019) Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs. *Heliyon*, 5(11).
6. Katheresan V, Kansedo J, Lau SY (2018) Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of environmental chemical engineering* 6(4):4676-4697.
7. Ahmad A, Mohd-Setapar SH, Chuong CS, Khatoon A, Wani WA, Kumar R, Rafatullah M (2015) Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater. *RSC advances* 5(39):30801-30818.
8. Daneshvar N, Salari D, Khataee AR (2003) Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water: investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 157(1):111-116.
9. Chen CY (2009) Photocatalytic degradation of azo dye reactive orange 16 by TiO₂. *Water, Air, and Soil Pollution* 202(1):335-342.
10. Muruganandham M, Swaminathan M (2004). Solar photocatalytic degradation of a reactive azo dye in TiO₂-suspension. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 81(4):439-457.
11. Dalal C, Garg AK, Jain N, Naziruddin AR, Prajapati RK, Choudhary SK, Sonkar SK (2023) Sunlight-assisted photocatalytic degradation of azo-dye using zinc-sulfide embedded reduced graphene oxide. *Solar Energy* 251:315-324.
12. Khan MS, Riaz N, Rehman S, Chenhui L, Shaikh AJ, Arfan M, Zeb I, Arshad M, Hafeez F, Bilal M (2023) Improved photocatalytic decolorization of reactive black 5 dye through synthesis of graphene quantum dots–nitrogen-doped TiO₂. *Environmental Science and Pollution Research* 30(60):124992-125005.
13. Arslan M, Günay K (2019) Application of 4-VP-g-PET fibers and its N-oxide derivative as an adsorbent for removal of cationic dye. *Polymer Bulletin* 76:953-965.
14. Kara A, Demirbel E, Tekin N, Osman B, Beşirli N (2015) Magnetic vinylphenyl boronic acid microparticles for Cr (VI) adsorption: kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Journal of Hazardous Materials* 286:612-623.
15. Peksöz A, Akay SK (2016) Electron Spin Resonance Response Of Bafel2o19 Nanoparticle Embedded Polydivinylbenzene Magnetic Film. *Anadolu University of Sciences & Technology A: Applied Sciences & Engineering* 17(4).
16. Arslan, M, Yiğitoğlu M (2008) Adsorption behavior of Congo red from an aqueous solution on 4-vinyl pyridine grafted poly (ethylene terephthalate) fibers. *Journal of applied polymer science* 107(5):2846-2853.
17. Yalçın Turan Ş, Kara A, Tekin N (2024) Removal of acid violet 7 from aqueous solution with polymer matrix composite particles by adsorption and photocatalytic decolorization methods: isotherms, kinetics, and thermodynamic studies. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 1-26.
18. Samanta P (2022) Basic principles of colour measurement and colour matching of textiles and apparels. In *Colorimetry* (pp. Ch-5). Rijeka, Croatia: IntechOpen.
19. Eren S, Bayaçlı G, Özyurt İ, Deren D, Öztürk M, Özenç AA, Eren HA (2023) Tekstil Terbiye İşletmesi Dispers Boyanmış Polyester Üretim Örneklerinin Ozonla Temizlenmesinin İncelenmesi. *Uluslararası Bilim Teknoloji ve Tasarım Dergisi* 4(1):46-55
20. Mevzuat Bilgi Sistemi. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7221&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>. Erişim 23 Ekim 2024



Original Paper

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Increasing energy efficiency in classroom lighting at a university in Türkiye

Abdil Karakan^{a,*}, Selami Kesler^b and Yüksel Oğuz^c

^aDepartment of Electricity, Dazkırı Vocational School, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, 03200, Türkiye.

^bElectrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Pamukkale University, Denizli, 20160, Türkiye.

^cElectrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, 03200, Türkiye.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 August 2024

Received in revised form 5 October 2024

Accepted 10 November 2024

Available online

Keywords:

Lighting automation

Microcontroller

C#

Energy efficiency

Panel Types

ABSTRACT

In the study, three objectives were achieved. The first purpose; To ensure minimum energy consumption in lighting a classroom at Afyon Kocatepe University Dazkırı Vocational School. The illumination levels of ten different points in the classroom and the outside environment were measured. The most ideal illumination level for learning in the classroom was set. For this purpose, algorithm design and implementation were carried out in order to benefit from ambient lighting as much as possible. Second purpose; It is a comparison of the energy production of Monocrystalline, Polycrystalline and Thin film solar panels at the location where the work is carried out. It is to determine the most suitable solar panel type. The final purpose: In the energy production system consisting of Monocrystalline, Polycrystalline, Thin-film solar panels, battery and grid, the best use of the produced energy is ensured by providing energy flow control. Different algorithms have been used to control the energy flow. A control card was designed to implement algorithms. With the designed control card, the current, voltage, and power produced by each of three different PV modules were measured. In addition, the current, voltage, and power used by the lighting system were also measured. PIC18F4550 microcontroller was used to provide USB connection to the computer on the control card. Thus, all data in the system is sent to the computer via a USB port. An interface was designed with C# to evaluate and instantly monitor this data. With the designed interface, all data is displayed instantly and saved to the Access database at 10-second intervals. The system can be controlled manually with the designed interface. When the records in the database were examined, 83% of energy savings were achieved with the lighting algorithm and energy flow control algorithms. With the work done, optimal lighting was provided in the classroom. In this way, many effects that would hinder education, especially visual headaches, are prevented. The effect of training is increased by increasing visual comfort.

I. INTRODUCTION

The importance of renewable energy sources is increasing day by day. The most important of these sources is the systems that generate electrical energy from solar energy (photovoltaic). With the development of technology, there has been a decrease in the production costs of photovoltaic systems. Thus, its usage area and variety has increased [1-3]. Major studies on photovoltaic systems; In the study conducted by Park et al., the Powell optimization method was used to obtain high speed and more uniform accuracy of the five parameters of the solar panel in a single diode model. The open circuit current and voltage curve of the solar panel have been extracted [4]. Sadeghi worked on the number of solar panels in his work, environmental, economic, and safety. In this study, he took various solar panels from 150kW to 1500kW as a mathematical analysis. He explained the results of this in detail [5]. Ferrari et al. conducted a simulation to calculate the Maximum Power Point (MPP) point of the solar panel in their study. To achieve this, Fuzzy C-Means, Radial Basis Function Networks, k-nearest Neighbor, and Feed-forward Neural Networks included the current, voltage, and temperature of the solar panel in their calculations [6]. Demenkova et al. worked on solar tracking algorithms and control systems to maximize the production of solar panels. They did these studies on MATLAB. It has been used in the Verilog algorithm in

*Corresponding author. Tel.: +90-507-118-1248; e-mail: akarakan@aku.edu.tr

studies [7]. Ma et al. made a mathematical model of the solar panel. He worked on the effect of the temperature increase of the solar panels on energy production. Each degree of temperature increase results in a 0.4-0.65% decrease in the energy production of the solar panel [8]. Zhong and his friends tried to get the highest energy from solar panels installed on the roof of a house. They worked on panel layouts to achieve this. They compared the amount of energy produced by placing the panels in different layouts. Energy increased by up to 6% with flexible panel alignment [9]. Gardashov and his friends have worked on increasing the energy production of the solar panels in the plateau. This study is based on simulation. It is aimed to increase energy production by changing the direction of the solar panel. They used different equations for this. As a result of the simulation, it was determined that energy production will increase with the change in the direction of the solar panel [10]. Fiances and his colleagues have studied the efficiency of three different solar panels in Peru. In this study, monocrystalline, polycrystalline, and thin film solar panels are used. Each solar panel has a power of 3.3 kW. As a result of the work done, the monocrystalline solar panel produced the highest energy generation. The polycrystalline solar panel produces an energy close to that of a monocrystalline solar panel. Ibce elephant solar panels produced 50% less energy than other panels [11].

There are studies on the energy production of solar panels from different angles [12-16]. In the study performed by Gaglia et al in Athina, solar panel parameter calculations between 0 and 100 degrees were made. These calculations are only on a single solar panel, and the mathematical equivalent of the solar panel is extracted and made on it [17]. Guenounou et al., On the other hand, produced their annual energy production using four different solar panels. In this study, it was studied at a fixed angle, and energy production in other aspects was not included [18]. In the studies of Elibol et al., Annual energy production at a single angle was calculated using three different solar panels [19]. Fathabadi has used a sensorless dual-axis solar tracking system in photovoltaic systems. He worked experimentally on this system. As a result, it increased between 28.8 and 43 percent [20]. Zhu and her colleagues have worked on the uniaxial solar tracking system. The simulation results show that it has significant advantages over the existing single-axis tracking structures at almost all latitudes [21]. Awasthi has worked on photovoltaic systems and solar tracking systems. They have conducted biaxial solar tracking system design and performance analysis [22]. Jamroen et al. designed a low-cost dual-axis solar tracking system. With this design, there was an increase of 44.89% [23]. Munanga worked on a single-axis solar tracking system. In these studies, they used an LDR sensor for solar medicine. As a result of the study, they achieved a 25% increase in productivity [24-31].

The primary purpose of this study was to make use of the external environment as much as possible in class lighting. For this, 10 different points were identified in the classroom. The algorithm is designed so that the light intensity at these points is not less than 300 lux. While designing the algorithm, light intensities of each point in 20 different brightness intensities were measured. In these measurements, it was determined that at least how many lamps or lamps should be lit if it is below 300 lux. Lux meters were used in these measurements. In the external environment, one light sensor is used. Thus, the lighting algorithm which the lamps or lamps should be lit according to the outdoor light intensity was prepared. Secondly, monocrystalline, polycrystalline, and thin film solar panels with 100Wp power are used to meet the energy required by the system. A control card is designed for these lighting automation and energy flow algorithms. PIC18F4550 microcontroller was preferred for the control card to be computer-connected. The designed control card has achieved optimal illumination based on the data from the outdoor light sensor and the written algorithm. With the control card, current, voltage, power, outdoor,

and indoor temperature and light intensities of each solar panel and lighting system were measured. All data from the sensors are sent to the computer via USB. An interface with the C # program has been prepared on the computer. With this interface, all data from the sensors are displayed and recorded in the access database at 10-second intervals. The system can be controlled manually with the interface.

Lighting conditions are not taken into account in classroom lighting. There is high or low lighting. There are negative effects on education due to lighting levels. At the same time, energy consumption is high. The lighting level is adjusted with the work done. In this way, it has a positive effect on education. At the same time, energy efficiency is increased.

II. EXPERIMENTAL METHOD

In the realized system, two objectives were achieved. The first goal is to create an algorithm that will benefit the most from the external environment for classroom lighting. The second goal is the optimal use of the energy produced by controlling energy flow in the hybrid power generation system. For these purposes, the most used monocrystalline, polycrystalline and thin film solar modules are used in the market. Each solar module has a power of 100 Wp. All energies produced in three different solar modules are collected in the battery with a single busbar. Current, and voltage sensors are added to each solar panel to measure the energy generated. In addition, the automation system's current, voltage, and power, as well as indoor and outdoor temperature and light intensities were measured with sensors. In this study, a control board consisting of a PIC18F4550 microcontroller was used. With this card, analog data from the sensors are converted into digital data and sent to the computer. The system realized in Figure 1 is shown. Figure 2 shows the flow chart of the system.

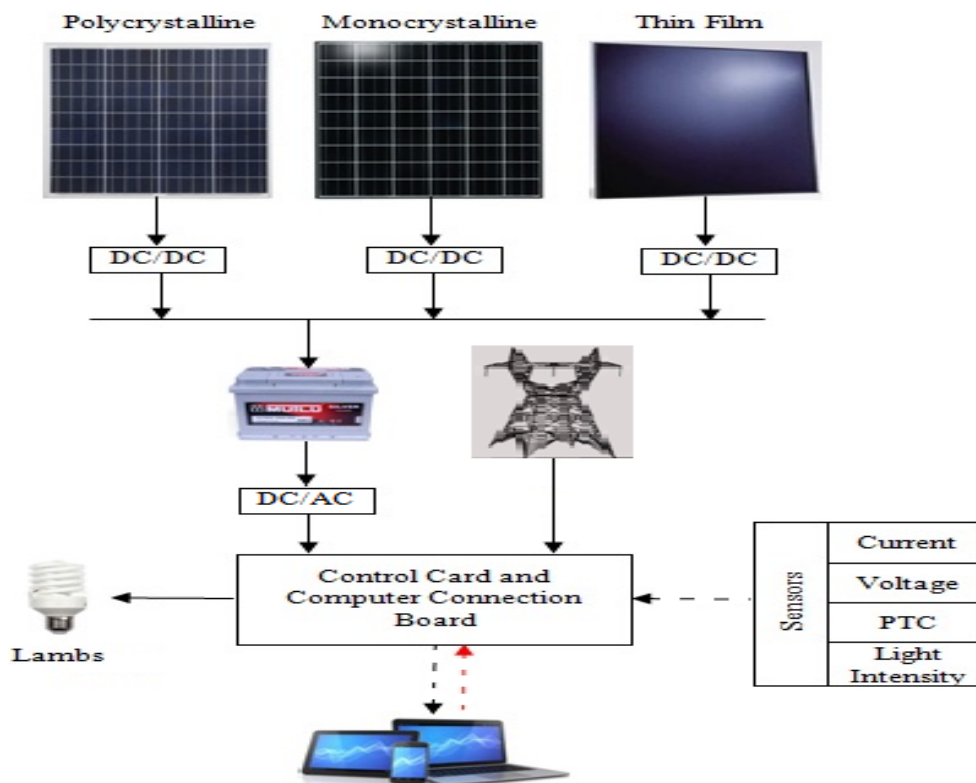


Figure 1. Materials used in the system



Figure 2. The flow chart of the system

2.1 PV Modules

In this study, monocrystalline, polycrystalline, and thin-film solar panels made of three different materials are used. Technical characteristics belonging to solar panels are shown in Table 1. The installation of monocrystalline, polycrystalline, and thin film solar panels used in the system is shown in Figure 3.

Table 1. Technical properties of solar panels

Technical Specification	Monocrystalline	Polycrystalline)	Thin Film
Maximum Power Voltage	18,06	23,92	45,30
Maximum Power Current (Im)	5,59	4,18	1,16
Open Circuit Voltage (Voc)	22,45	29,50	63
Short Circuit Current (Isc)	5,84	4,52	1,35

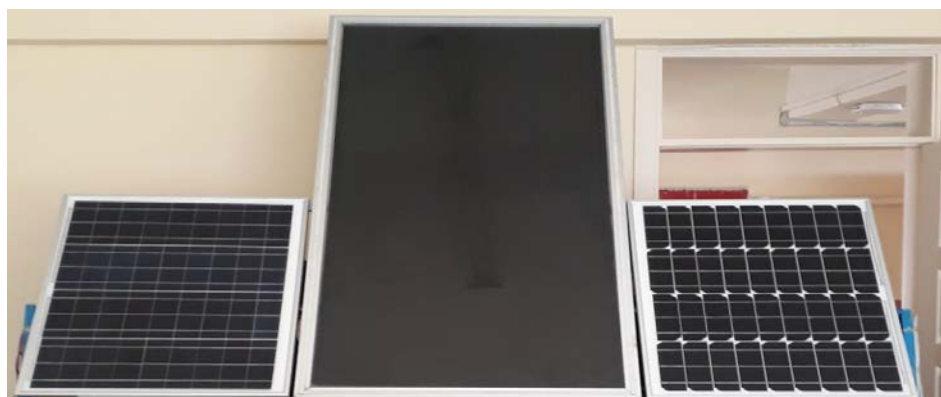


Figure 3. Representation of polycrystalline, thin film, and monocrystalline solar modules used in the system

2.2 Control Cards

In the system, the control card consisting of a PIC18F4550 microcontroller is used to convert analog data from sensors to digital data and send this data to the computer. While selecting the microcontroller to be used in the control card, PIC18F4550 with a USB connectivity is preferred. Thus, the control card converts analog data from the sensors to digital and sends them to the computer with USB connection at the same time.

2.3 Current and Voltage Cards

Current and voltage sensors are added to the output of each solar panel and lighting automation system to measure the forces produced and consumed in the system. AC712-20A is used as the current sensor. To increase the

sensitivity of the current sensor, selection was made according to the current produced in the system. The current sensors used for the system are shown in Figure 4.

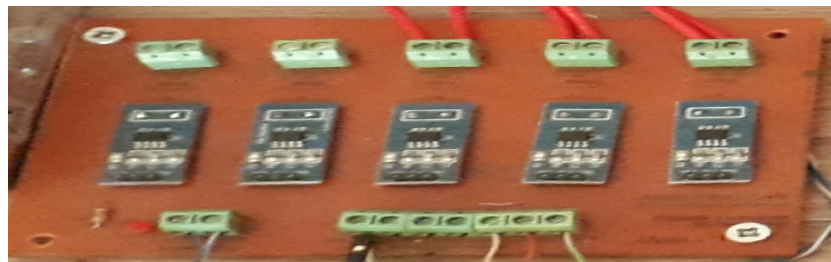


Figure 4. The current sensor card is used in the system.

2.4 Interface Software

An interface prepared in the C # program is used to show the digital data coming from the microcontroller on the computer screen and to save all the data to the access database. The current, voltage, and power produced by three different solar panels are shown with this interface program. The current, voltage and power used by the lighting automation system are shown. In addition, there are outdoor and indoor temperatures, and brightness levels. Manual control is provided with the interface and desired lamp, or lamp groups can be controlled. In addition to the automatic recording of all data at 10-second intervals in the interface, the manual recording feature has also been added. The data recorded in the Access data tab are processed and graphics are drawn. Figure 5 shows the interface designed for the system.

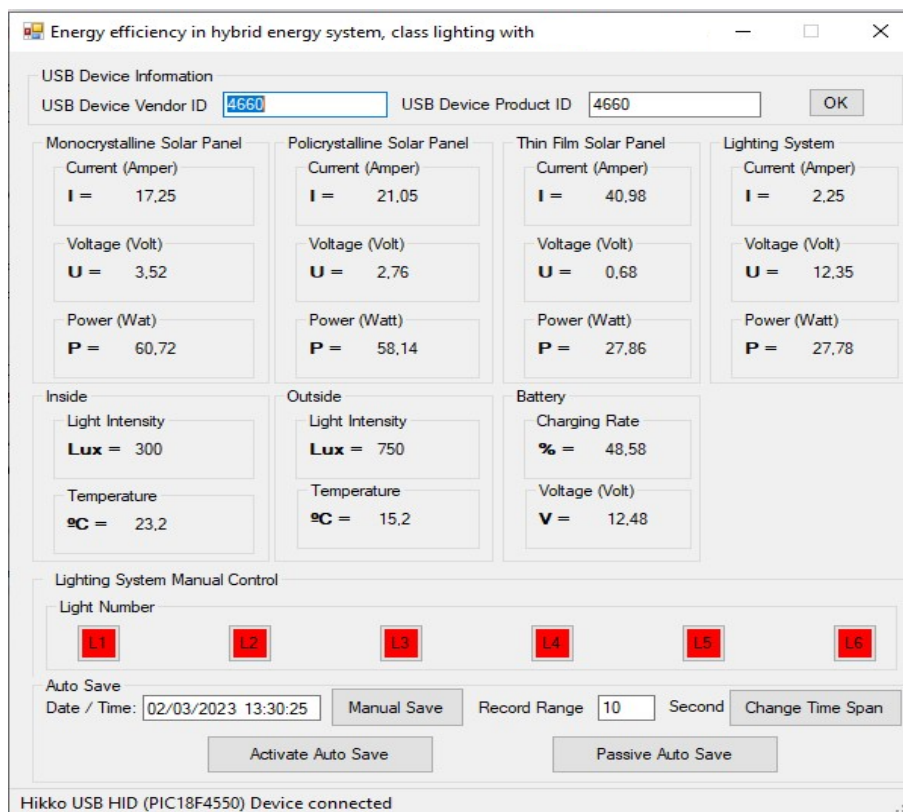


Figure 5. Interface designed for the system

2.4 Lighting Algorithm

In energy efficiency, minimum energy consumption is required besides energy production. Outdoor lighting is optimally utilized to minimize energy consumption. In this, both outdoor and indoor light intensities should be known. MS6610 lux meter was used for outdoor and indoor light level measurements. Figure 6 shows the MS6610 lux meter used for light intensity measurement. MS6610 lux meter accuracy is $\pm 5\%$.



Figure 6. Luxmeter

Outdoor lighting intensity and classroom lighting are not sufficient. For this purpose, lighting inside the classroom is required. This lighting is done manually. In this way of lighting, the light level is very high in some places. To determine this, measurements were made from 10 different points in the classroom. In these measurements, it was measured how much illumination that area received. Measurements were made at 10 different points in the classroom environment shown in Figure 7a. 6 groups of lighting are used in classroom lighting. There are 3 groups on the right and 3 on the left. The types of lamps used in lighting are changing. However, the lighting positions in the classroom remain the same. Figure 7b shows the locations of the lighting groups used in the classroom.

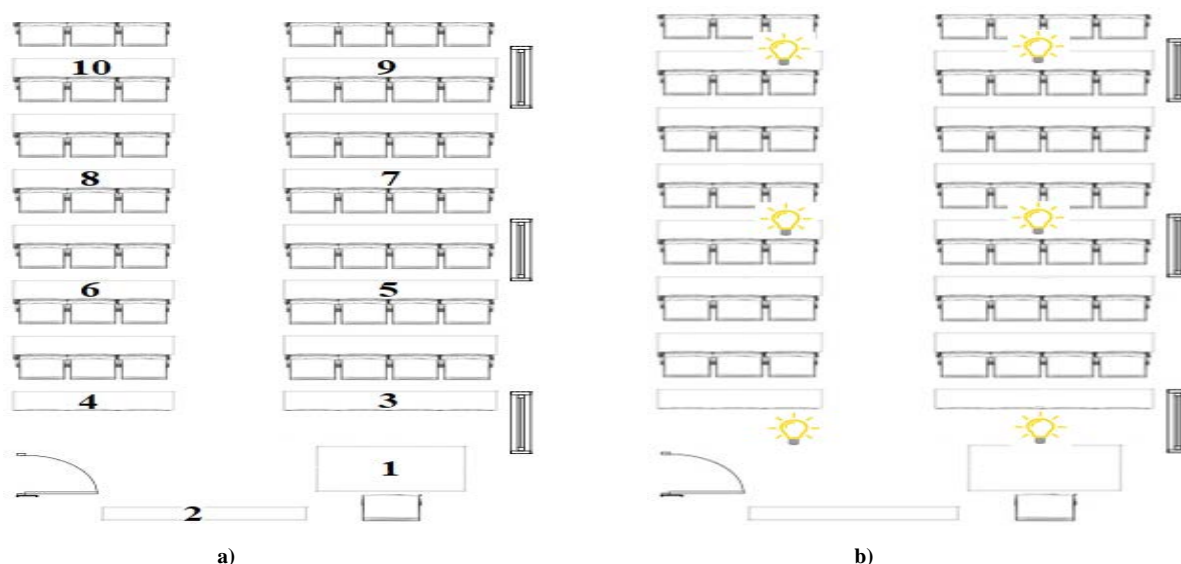


Figure 7a. In-class measurement locations, b) Locations of lamp groups used in classroom lighting.

The study was carried out in Dazkırı Vocational School in Dazkırı District of Afyonkarahisar Province. The classroom lighting of the existing classroom on the third floor of the school was adjusted. The classroom is located

in the east-west direction. The classroom can receive education for 49 students at the same time. Figure 8a shows the exterior view of the school, Figure 8b shows the interior view of the classroom, and Figure 8c shows the light and temperature sensor used in the study.

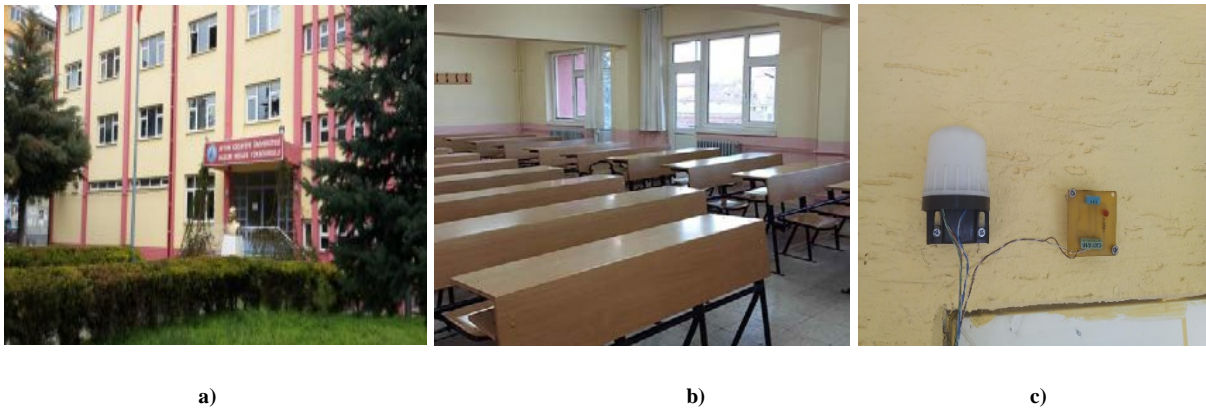


Figure 8a. The external appearance of the school, **b)** Interior view of the classroom, **c)** Light and temperature sensor

The best lighting in the class is at 300 lux [32, 33]. Outdoor lighting cannot provide this continuously. As a result of the measurements made at 10 different points, the lighting was at a high level near the window, while the other side had a low level of illumination. Light intensities at each point between 8:30 and 17:30 in January are shown in Figure 9a.

There are windows on only one side of the classroom. The area where the window is located naturally receives daylight. Other parties do not benefit from enough daylight. Light intensities were measured from places in the classroom with and without natural light. Since these measurements were made throughout the day, they constantly changed. Light intensity is higher in places with daylight. It is low in places where there is no sunlight. Light intensity measurement results vary depending on the sun condition. It is low at first sunrise and sunset. It reaches its highest level at noon, when the sun is most effective. Lesson times remain between 8:30 and 17:30 while sunrise and sunset change. Therefore, brightness levels change in the classroom. Figure 9b shows the monthly light intensity change at point 1.

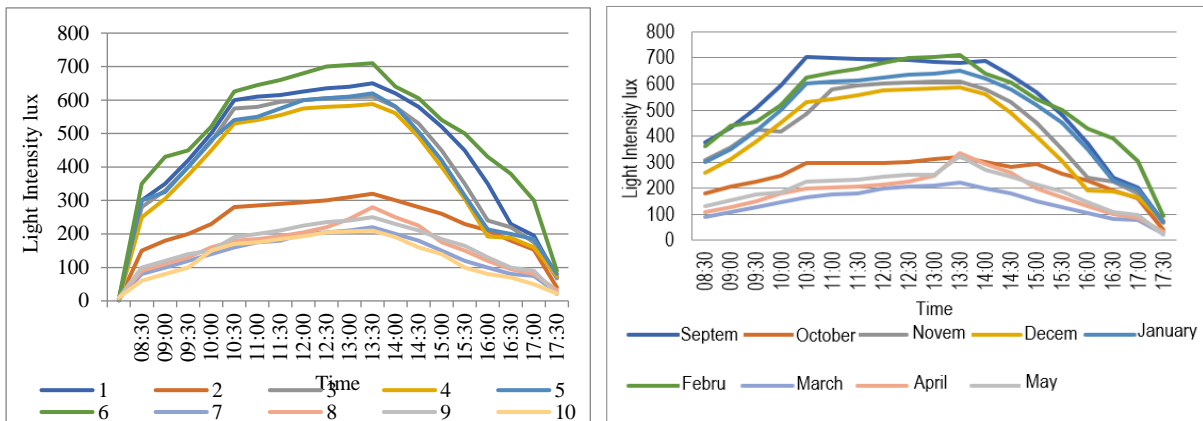


Figure 9a. Light intensities at each measured point, **9b,** Monthly light intensity changes at point 1

2.5 Window Reflection and Refraction

The change in direction of light as it passes from one transparent medium to another is called refraction. The refractive index is a coefficient that shows how much slower light traveling in any material x travels compared to light traveling in a vacuum. Figure 10 shows the refraction of light.

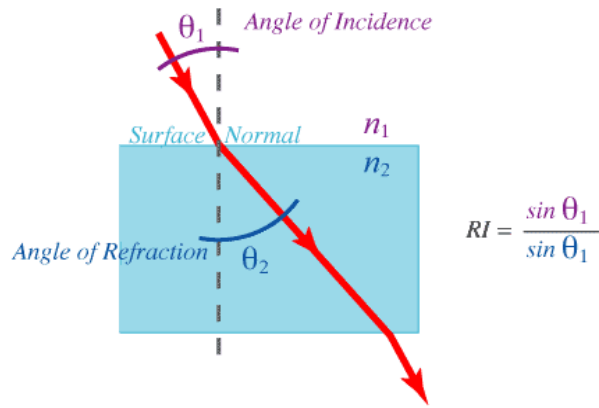


Figure 10. Refraction of light

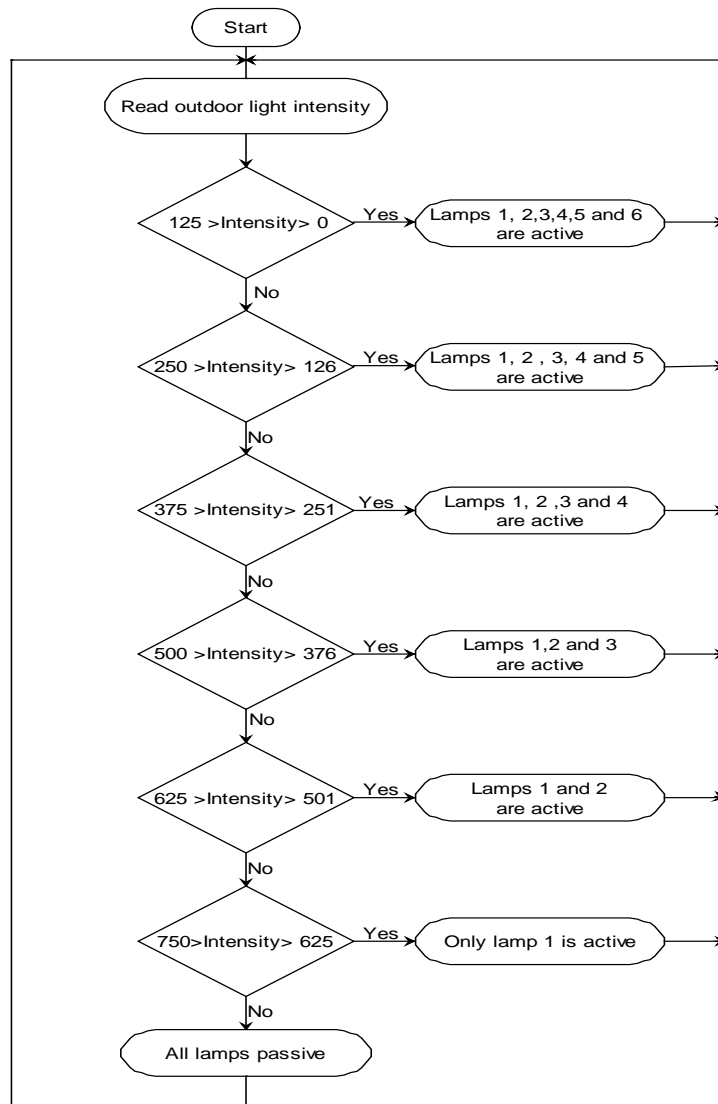


Figure 11. Lighting algorithm

The speed of light in a transparent medium depends on the density of that medium. As the density increases, the speed of light decreases. This means that the smaller of these numbers can be considered as a low-refractive medium, and the larger as a high-refractive medium. If the rays come from a very dense medium to a less dense medium with an angle greater than the boundary angle, they cannot pass to the other medium. In this case, the incident ray is reflected in the same medium with an angle equal to the angle of incidence. This is called total reflection. The refractive coefficient of the glass used in windows has been calculated as 1.51714.

Figure 11 shows the algorithm made in such a way that it makes optimal use of outdoor light intensity. Studying covers an academic period. Sun rays change every month depending on the shape and rotation of the earth. While the classroom receives higher levels of light in some months, it receives lower levels of light in other months. Especially in the summer months, the sun rises early and sets late. For this reason, more daylight is used.

2.6 Energy Requirement

In the system, energy needs are met by solar panels. Energy production of solar panels varies depending on the sun. The energy requirement of the system is independent of the sun. Therefore, the battery was used to store energy. For the capacity selection of the battery, the energy need of the system must be known. Table II shows a one-week lesson program in the classroom.

Table 2. Week lesson

Class Hours	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
08:30 – 09:20	X				X
09:30 – 10:20	X				X
10:30 – 11:20	X	X			X
11:30 – 12:20	X	X			X
13:30 – 14:20		X	X	X	
14:30 – 15:20		X	X	X	
15:30 – 16:20		X		X	
16:30 – 17:20		X		X	

$$\text{Total Power} = \text{Total number of lamps} \times \text{lamp power}$$

$$\text{Total Power} = 12 \times 32 = 384 \text{ Waat}$$

While calculating the weekly energy consumption, the class hours in the class should be taken into consideration. There are 20 hours of lecture per week in the classroom.

$$\text{Weekly energy consumption} = \text{Weekly lesson hours} \times \text{hourly energy consumption of lamps}$$

$$\text{Weekly energy consumption} = 20 \times 384 = 7680 \text{ Waat}$$

2.7 System Overview

The external and internal view of the system realized in Figure 12 is shown. The system can be controlled in three different ways. Firstly, the system can be manually controlled and controlled with the buttons under the tablet. There is a control button for each lamp. Secondly, the system can be automated and used. In automatic control, manual buttons become passive. In automatic control, control is provided according to the most efficient algorithm installed in the system. In automatic control, all data are displayed on the LCD screen and recorded in the Access

database. The lamps can also be controlled manually with the control buttons on the bottom of the computer, if desired.



Figure 12. Internal and external view of the system

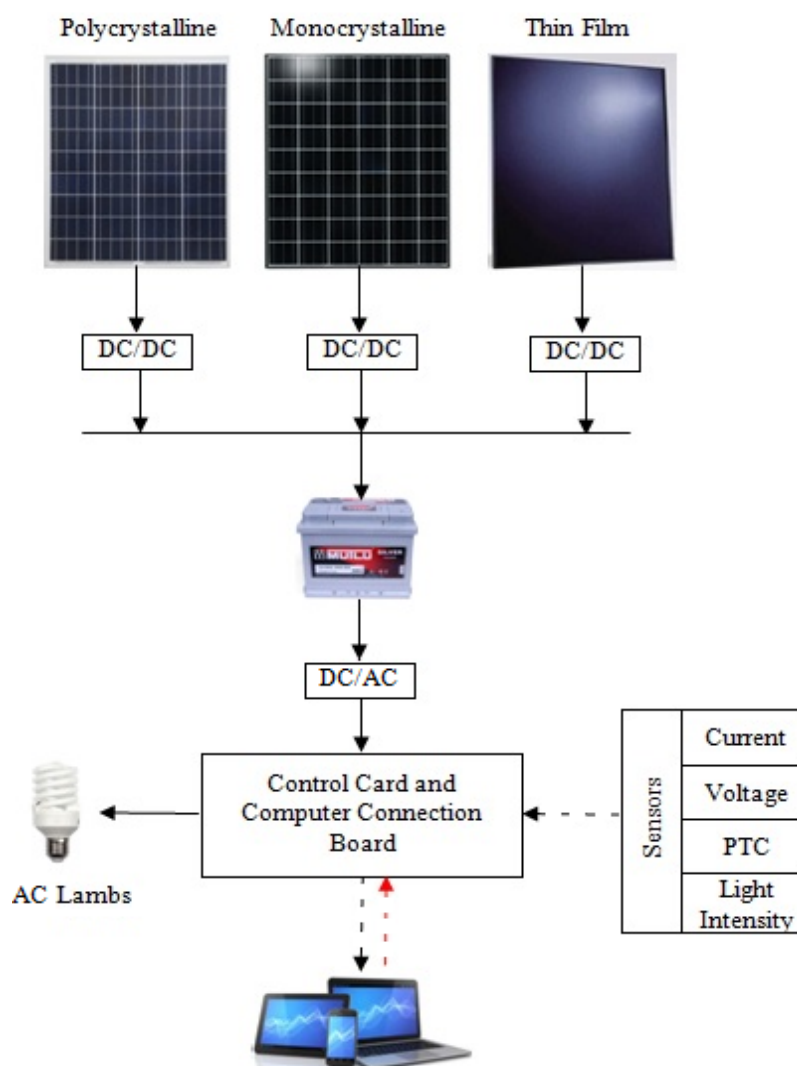


Figure 13. General representation

2.8 Energy Flow Algorithm I

In the first algorithm implemented, the AC lamps used in classroom lighting were not changed. Solar panels are used as an energy source. Solar panels also produce DC energy. For the lighting system to work, the DC energy produced must be converted into AC energy. DC/AC inverter was used for this. Table 3 shows the technical specifications of the inverter used in the system.

Table 3. The technical specifications of the inverter used in the system

Name	Explanation
Power	1000 Watt
Input Voltage	12 Volt
Output Voltage	220 Volt
Wave Type	Modified Sine Wave
Productivity	%90
Frequency	50 Hz

In this algorithm, only solar panels are used as energy sources. The electrical energy produced in solar panels is connected to the battery in a single busbar by passing through DC / DC converters. The battery is charged with the electrical energy produced by monocrystalline, polycrystalline, and thin-film solar panels. The electrical energy required by the consumer is also supplied by the battery. The general representation is shown in Figure 13 and the algorithm I is shown in Figure 14.

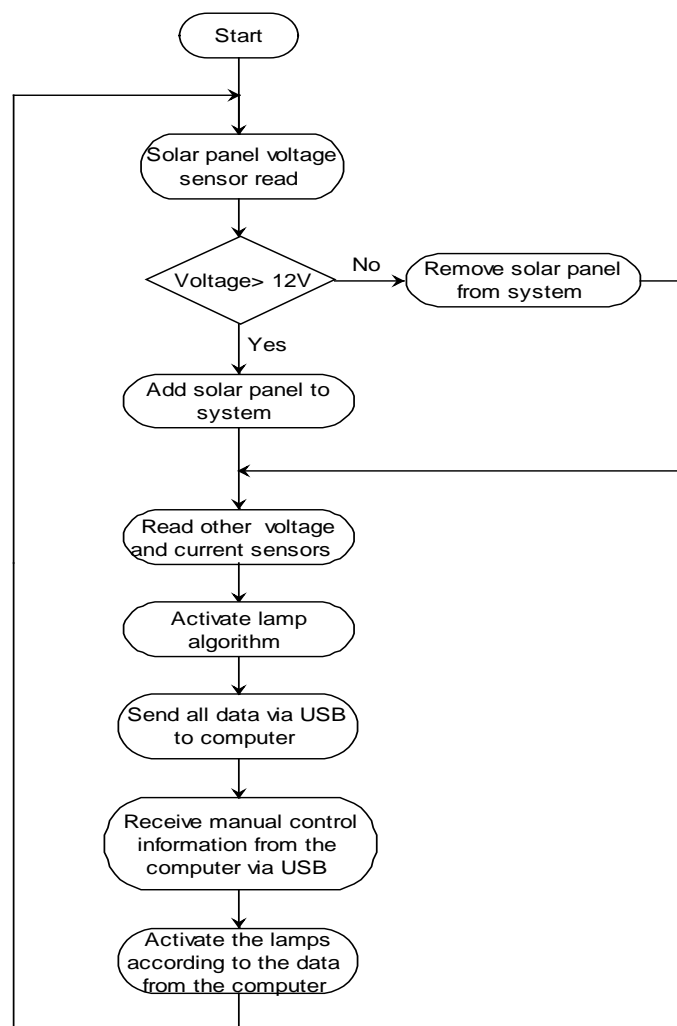


Figure 14. Algorithm I

2.9 Energy Flow Algorithm II

In this algorithm, besides three different solar panels, the network is used as an energy source. While solar panels produce enough energy in summer, they cannot meet the energy required by the system in winter. Since the energy stored in the battery is low in winter, it cannot be used much. The network was used to meet the energy needed by the system. Algorithm II is shown in Figure 15, and the general diagram is shown in Figure 16.

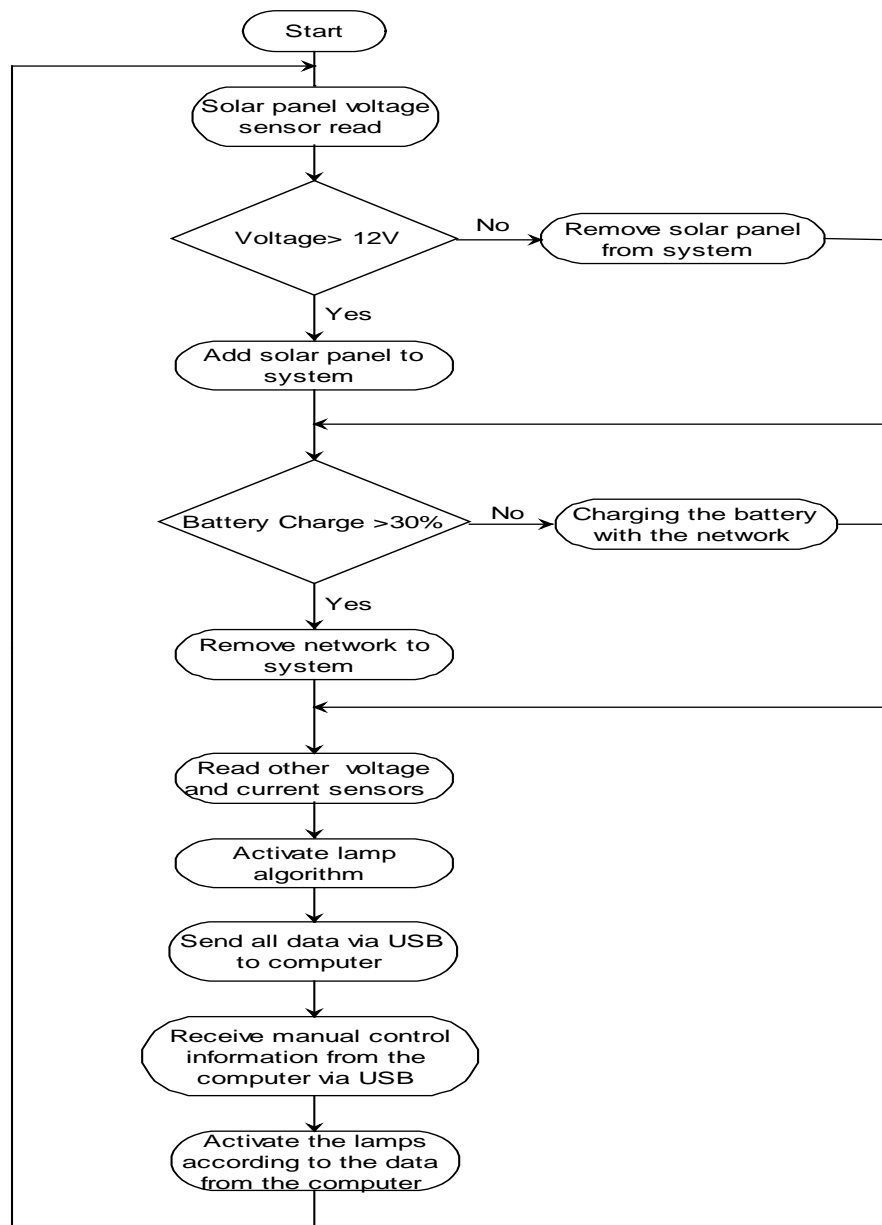


Figure 15. Algorithm II

2.10 Energy Flow Algorithm III

In this algorithm, a DC lamp is used instead of an AC lamp to increase energy saving. An energy saving of 23W per lamp was achieved by using a 9W DC lamp instead of a 32W AC lamp. In addition, the losses in converters have been saved. Figure 17 shows the general form of algorithm III.

2.11 Uncertainty Analysis

A sensitive method called uncertainty analysis is used for error analysis of experimental findings. According to this method, the quantity to be measured in the system is R, and the n independent variables affecting this quantity are shown as x1, x2, x3,, xn. The uncertainty analysis formula is shown in Equation 1. In the study, the light sensors are shown as x. Since measurements were made from 11 different points in the study, there are 11 x. The uncertainty analysis calculation of the study is shown in Equation 2.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} W_3 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_4} W_4 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_{n11}} W_{n11} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{1}$$

$$W_R = \left[\left(\frac{0.05}{300} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{300} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{300} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{300} \right)^2 + \dots + \left(\frac{0.05}{300} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{2}$$

$$W_R = 5.52 \tag{3}$$

As a result of the calculations, the uncertainty analysis of the system was calculated as 5.52%.

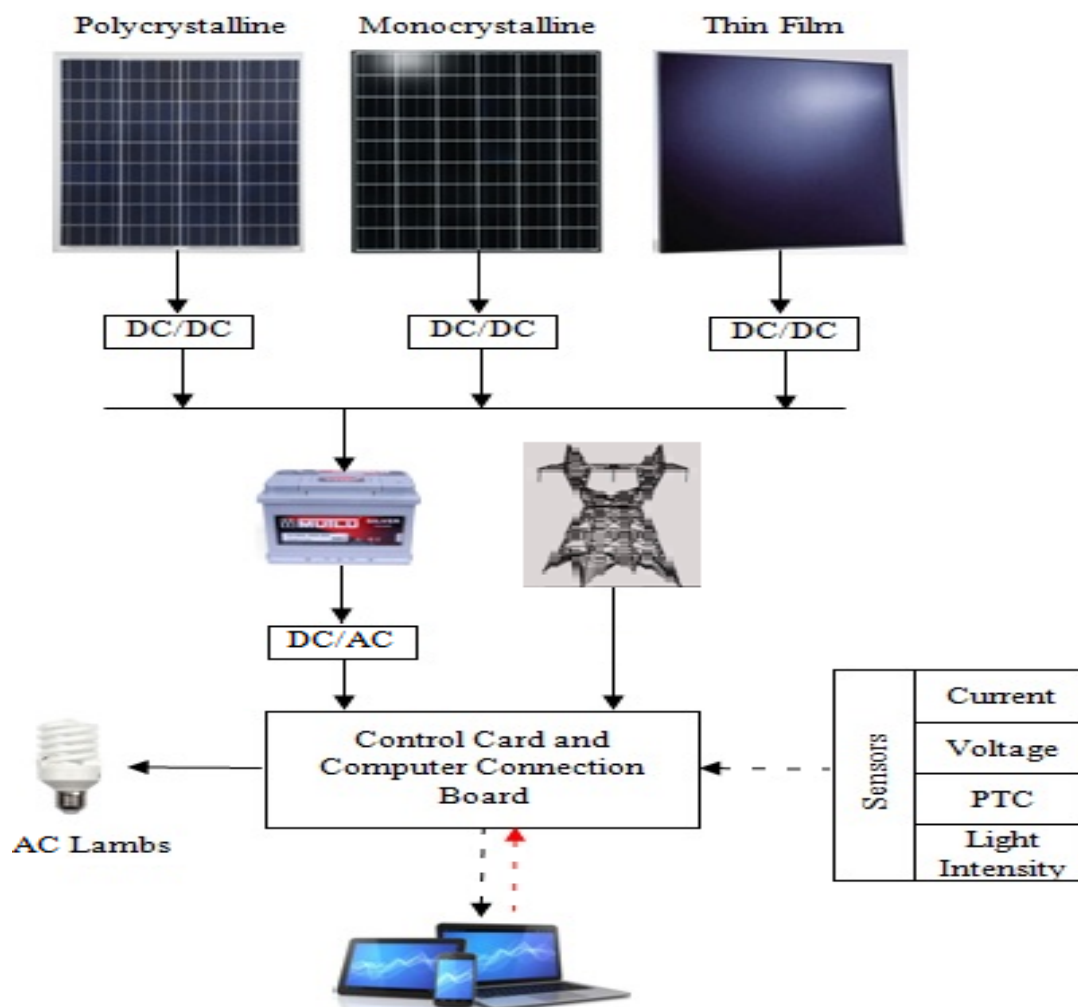


Figure 16. General representation

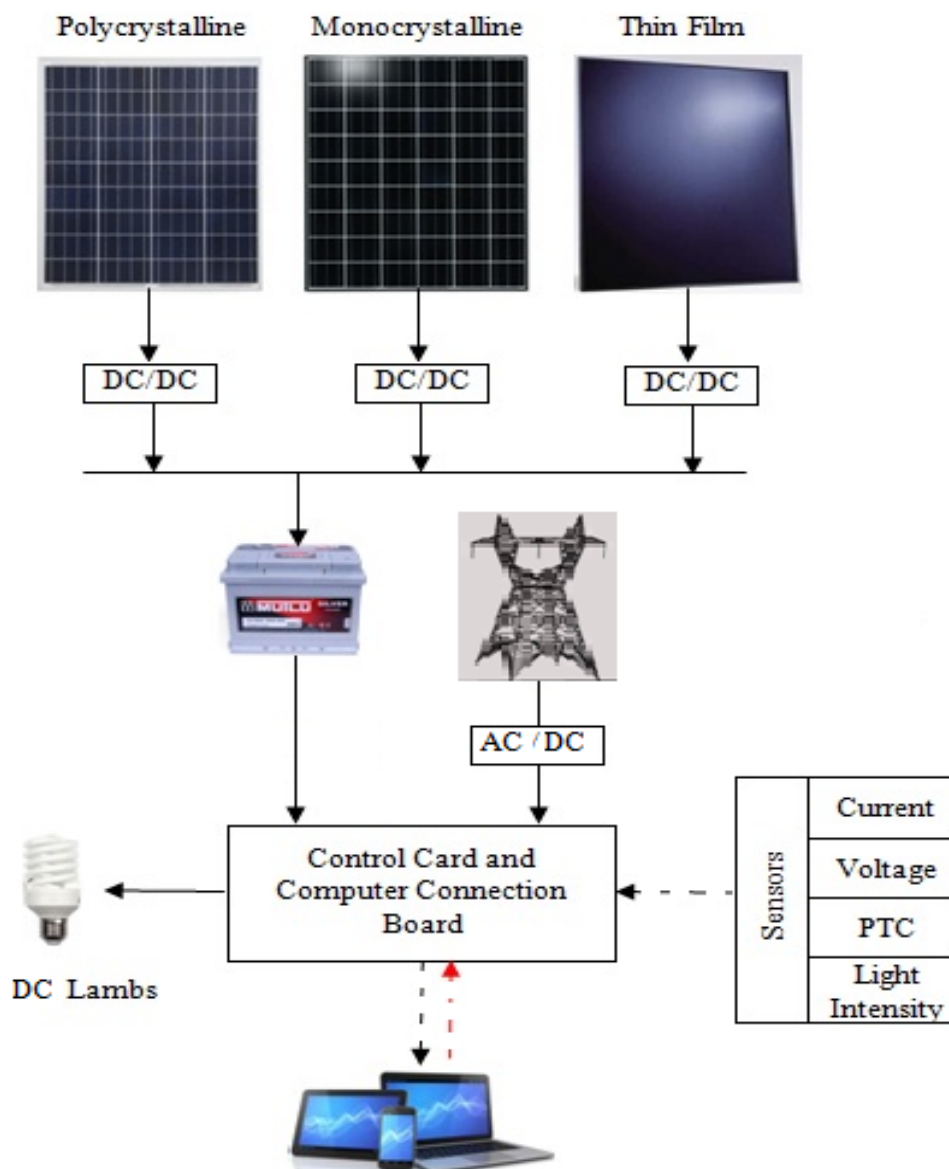


Figure 17. General representation.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

This study achieved three aims. The first goal in classroom lighting is to make the most of outdoor lighting. Second objective: Comparing the energy production of three different solar panel types. The final aim is; It is the best use of the energy produced by controlling the energy flow in the energy production system. To do this, three different algorithms were applied for a single energy flow in classroom interior lighting. Figure 18 compares the energy production of three different solar panels.

When the energy production of monocrystalline, polycrystalline and thin film solar panels is compared, there are differences between the energy productions. The monocrystalline solar panel produces 41% of the total energy. Polycrystalline solar panels produce 40% of the total energy. Thin film solar panels produce 19% of the energy. When looking at the costs of solar panels, the thin film solar panel is the costliest solar panel. Monocrystalline solar panels come second in terms of cost. The cheapest solar panel type is the polycrystalline solar panel. Polycrystalline solar panels are the most suitable type of solar panel when comparing cost and energy production.

In the study carried out, the energy demand is completely independent of the energy produced. While the energy produced in the summer is at the highest level, the energy demand is at the lowest. In winter, energy demand increases while energy production decreases. In the realized system, energy efficiency increase has been realized by using three different algorithms for energy flow. Figure 19 shows three different algorithms and energy demands of normal operation every month.

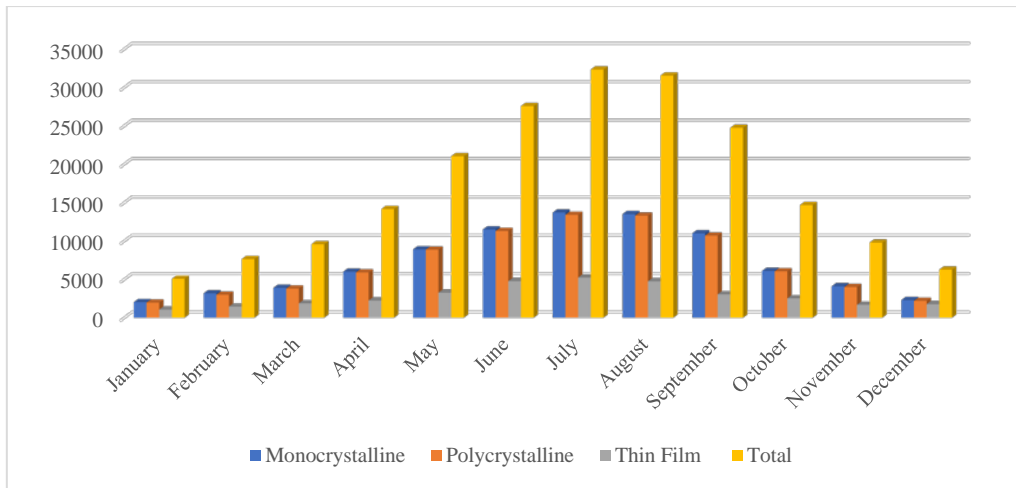


Figure 18. Compare the energy production of three different solar panels

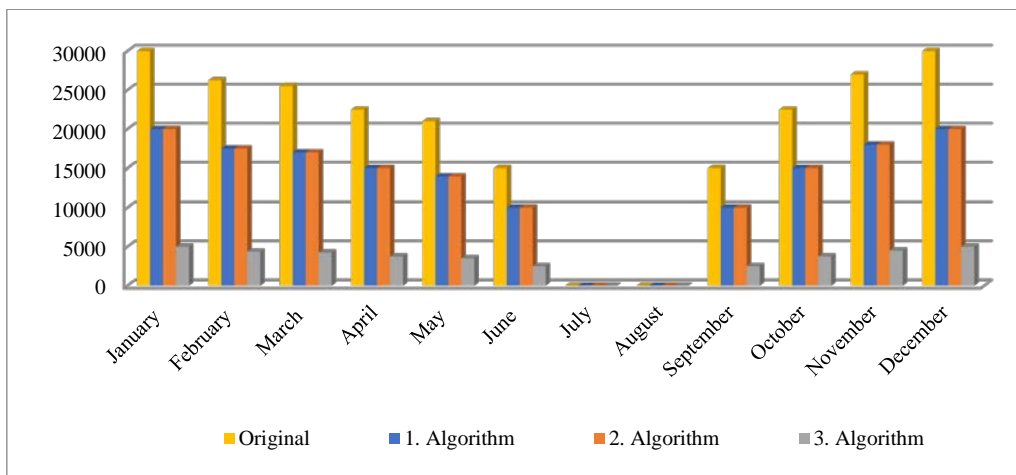


Figure 19. Monthly energy demands

There is a very high energy requirement in normal lighting. The main reason why the energy is so high is that all of its lamps light up at the same time. External lighting is not used in any way. Some areas have very high illumination, while some areas have low illumination. Energy demand appears to be the same for the first and second algorithms. The difference between these algorithms is the amount of energy produced that meets the demand. The difference between the second algorithms from the first algorithm is that the network is added as an energy source. Energy demand cannot be met due to low energy production in winter and no energy production on some days. To meet the energy demand continuously, the network has been added to the second algorithm as

an energy source. Thus, the energy demanded by the consumer is constantly met. Figure 20 shows the energy and energy demands generated in each algorithm. The lowest energy demand occurred in the last algorithm. The main reason for this is the use of DC lamps with low energy consumption.

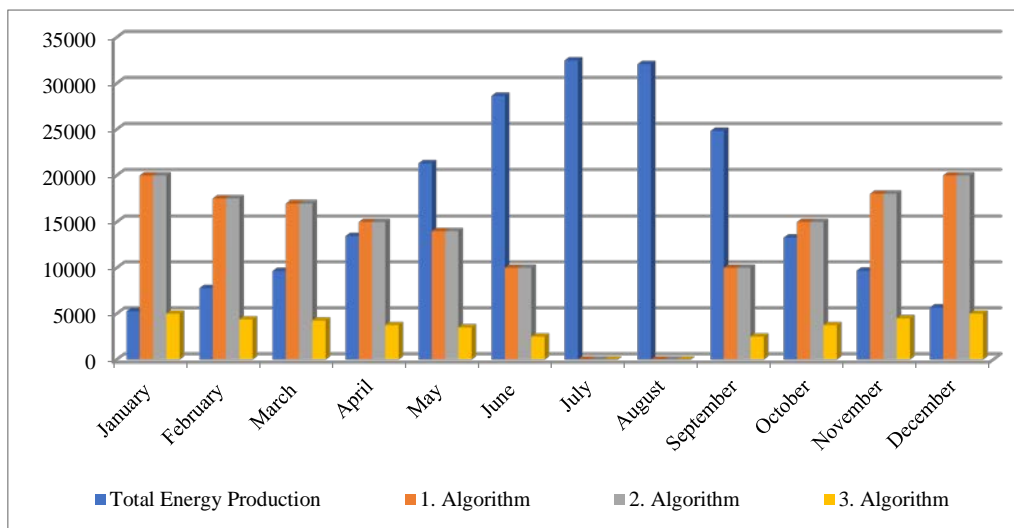


Figure 20. Monthly energy production and demands

Fluorescent lamps used in classroom lighting have many side effects on students. Since fluorescent lamps emit vibrations above 100 Hz, they cause students to experience headaches and poor performance. In a study conducted in England, the average lighting level in classrooms was Due to excessive daylight and artificial lighting sources, 88% of the classrooms are above the recommended lighting level. In 84% of the classrooms, lighting levels are above levels that impair visual comfort [33]. The effect of lighting levels on students is effective not only in primary schools but also in universities [34-36]. In their study, Dang and his colleagues proved that there is a direct relationship between the quality of the classroom lighting environment and visual fatigue. A change in the quality of lighting in the classroom causes visual fatigue in students. Students have difficulty expressing themselves due to visual fatigue [37]. Gentile stated in his study that LED lighting is much more economical than classical lighting. It has been proven that especially the lighting level of 300 lux in the classroom has a positive effect on learning [38]. Castilla conducted a survey for students at the university. The survey asked about the direct benefits of improving the quality of indoor lighting in educational environments in increasing the productivity and alertness of students and teachers. According to the survey results, it was concluded that LED lighting is more efficient instead of fluorescent indoor lighting [39]. Kong conducted a survey of university students about lighting. 333 participants participated in the survey. He examined the effects of different lighting methods used in laboratories. According to the survey results, it is understood that electrically illuminated classrooms offer more homogeneous lighting environments [40]. In order for students to receive a good education even in classrooms, the lighting level must be adjusted very well. In the study, illumination levels between 100 lux and 600 lux were examined. It has been determined that the best lighting level for education is 300 lux. Modeling was done in a kindergarten classroom to make better use of daylight. In modeling, daylight is used at different rates within the classroom on an annual basis. With the simulation, full use of daylight and lighting techniques were used. As a result of the

study, a savings of 6.7% was achieved [41]. According to literature studies, it is understood that the best indoor classroom lighting is 300 lux. It has also been determined that daylight illumination is not sufficient and excessive illumination negatively affects education. A real application was made with the study. Maximum benefit was made from daylight. The illumination level of 300 lux required for training was used at the optimum level with the algorithms. It has been calculated how much energy will be saved by using LED lamps instead of fluorescent lamps. A solar energy system was used to save energy. The energy production of solar panel types existing in the solar energy system was compared. The most suitable solar panel type has been determined.

IV. CONCLUSIONS

In the study, energy efficiency in classroom lighting was increased. For this, external lighting was used at the highest level. In addition, classroom lighting was set at 300 lux, which is the best level for education. In this way, energy efficiency was provided and at the same time, a positive effect on education was provided. Three arc solar panels and three different algorithms were used in the study. In the study, firstly, the most effective solar panel type in the application area was determined. In the study, monocrystalline solar panels provided 41% of energy production. The polycrystalline solar panel achieved 40% and the thin film solar panel achieved 19%. The monocrystalline solar panel produced the highest energy. Despite this, when the prices of polycrystalline solar panels are more affordable, they are used more in the field. The energy produced in energy efficiency should be consumed most optimally. In the study, outdoor environment lighting was used at the highest level for classroom lighting. For this, one lighting algorithm, and three energy flow algorithms were used. While normal lighting energy consumption was the highest at 30000kWh, it was 20000 kWh in 1st Algorithm, 19800kWh in 2 Algorithms and 5000kWh in 3rd Algorithm. As a result of the fact that there is no control in normal lighting and all of the lamps are lit together, a very high energy consumption has occurred. Energy consumption was reduced by 33.33% in the first, and second algorithms. With the third algorithm, this consumption decreases by 83.33%. With this algorithm, energy production-consumption is profitable in December and January when the energy production is the lowest and the energy consumption is the highest. In other months, while energy production increases, energy consumption decreases.

It is considered to add deep learning to the work carried out in future studies. By adding deep learning, person detection will be performed in the classroom. Only the area where the people are located will be illuminated. At the same time, when there is no detection in the classroom, the system will turn off all the lights and increase energy efficiency.

REFERENCES

1. Kartik S, Vennila I (2020) Energy Management Strategy Using ANFIS Approach for Hybrid Power System. *Tehnički vjesnik* 27:567-575. <https://doi.org/10.17559/TV-20190722152008>
2. İner G, Çağlarer E (2018) Two countries at same parallel in solar energy productions: USA and Turkey. *International Advanced Researches and Engineering Journal* 02(03):325-329.
3. Yüksel AN, Türkboyları EY (2018) Use of solar panels in greenhouse soil disinfection, *International Advanced Researches and Engineering Journal* 02(02):195-199, 201.

4. Park Y, Choi S (2017) A novel simulation model for PV panels-based parameter tuning. *Solar Energy* 145:90-98. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.003>
5. Sadeghi S (2018) Study using the flow battery in combination with solar panels and solid oxide fuel cell for power generation. *Solar Energy* 170:732-740. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.091>
6. Ferrari S, Massimo L, Piuri V, Salma A, Cristaldi L, Faifer M, Toscani S (2018) Solar panel modelling through computational intelligence techniques. *Measurement* 93:572-580. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.032>
7. Demenkova TA, Korzhova OA, Phinenko AA (2017) Modelling of algorithms for solar panels control system. *Procedia Computer Science* 103:589-596. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.07>
8. Munaga P, Chinguwa S, Nyemba W (2020) Design for manufacture and assembly of an intelligent single axis solar system. *Procedia* 91:571-576. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.109>
9. Zhong Q, Tong D (2020) Spatial layout optimization for solar photovoltaic (PV) panel installation. *Renewable Energy* 150:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.099>
10. Awasthi A, Shukla A, Manohar M, Dondoriye C, Shukla K, Porwal D, Richhariya G (2020) Review on sun tracking technology in solar PV system. *Energy Reports* 6:392-405. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.004>
11. Gardshov R, Eminov M, Kara G, Kara E, Mammadov T, Huseynova T (2020) The optimum daily direction of solar panels in the highlands, derived by an analytical method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109668>
12. Tirmikci CA, Yavuz C (2018) Establishing new regression equations for obtaining the diffuse solar radiation in Sakarya (Turkey). *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette* 25:503-510. <https://doi.org/10.17559/TV-20170202131249>
13. Aziz S, Hassan S (2017) On improving the efficiency of a solar panel tracking system. *Procedia Manufacturing* 7:218-224. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.053>
14. Stanislaw C, Seweryn S, Adam T, Agata S (2019) Effect of Solar Radiation on Current-Carrying Capacity of PVC-insulated Power Cables – the Numerical Point of View. *Tehnicki Vjesnik* 26(6):1821-1826. <https://doi.org/10.17559/TV-20181029214825>
15. Alomar OR, Ali OM, Ali BM, Qader VS, Ali OM (2023) Energy, exergy, economical and environmental analysis of photovoltaic solar panel for fixed, single and dual axis tracking systems: An experimental and theoretical study. *Case Studies in Thermal Engineering* 53:103635. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103635>
16. Huang X, He J, Hing Y, Cai Y, Wang W, Zhao F (2023) Numerical analysis of solar ventilated façade integrated thermoelectric energy harvesting panel for simultaneous building thermal insulation and power generation. *Journal of Building Engineering* 76:107304. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107304>
17. Khan F, Karami NM, Khan O (2023) Exploring the scalability and commercial viability of biosynthesized nano particles for cooling panels with the help of Artificial Intelligence and solar energy systems. *Green Technologies and Sustainability* 1:100036. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2023.100036>
18. Gaglia AG, Lykoudis S, Arfiriou AA, Balaras CA, Dailnas E (2017) Energy efficiency of PV panels under real outdoor condition – An experimental assessment in Athens, Greece. *Renewable Energy* 101:236-243. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.051>
19. Guenounou A, Malek A, Aillerie M (2016) Comparative performance of PV panels of different technologies over one year of exposure: Application to a coastal Mediterranean region of Algeria. *Energy Conversion and Management* 114:356-363. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.044>
20. Hassan F (2016) Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic system. *Applied Energy* 173:448-459. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.109>
21. Fiances I, Ceron E, Paredes R, Nofuente G, Casa J (2019) Analysis of the Performance of Various PV Module Technologies in Peru. *Energies* 12:1-19. <https://doi.org/10.3390/en12010186>
22. Zhu Y, Lui J, Yang X (2021) Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection. *Applied Energy* 264:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114647>
23. Elibol E, Özmen ÖT, Tutkun N, Köysal O (2017) Outdoor performance analysis of different PV panels types. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67:651-661. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.051>
24. Jamroen C, Komkum P, Koshri S, Himananto W, Panupintu S, Unkat S (2021) A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 37:100618-100632. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100618>
25. Awasthi A, Shukla A, Manohar M, Dondoriye C, Shukla K, Porwal D, Richhariya G (2022) Review on sun tracking technology in solar PV system. *Energy Reports* 6:392-405. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.004>

26. Katepelli A, Wang Y, Shii D (2023) Solar harvesting through multiple semi-transparent cadmium telluride solar panels for collective energy generation. *Solar Energy* 264:112047. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112047>
27. Majewski P, Dias PR (2023) Product stewardship scheme for solar photovoltaic panels. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 44:100859. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100859>
28. Terashima K, Sato H, Ikaga T (2023) PV/T solar panel for supplying residential demands of heating/cooling and hot water with a lower environmental thermal load. *Energy & Buildings* 297:13408. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113408>
29. Erdoğan İ, Bilen K, Kıvrak S (2022) Experimental investigation of the efficiency of solar panel over which water film flows. *Journal of Polytechnic* 26:1-9. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1163785>
30. Duman S, Alçı M (2022) Investigation of the parameters affecting the total efficiency of solar energy panels designed with half and full photovoltaic cells. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences* 11:593-600. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1073976>
31. Kerem A, Atik M, Bayram A (2020) Experimental Investigation of The Effect of Surface Cooling on Photovoltaic (PV) Panel System for Electricity Production. *International Journal of Engineering Research and Development* 22:565- 578. <https://doi.org/10.29137/umagd.659347>
32. Winterbottom M, Wilkins A (2009) Lighting and discomfort in the classroom. *Journal of Environmental Psychology* 29:63-75. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2008.11.007>
33. Yulianti I (2022) Quality of Lighting in Regular and Fullday Class Tsanawiyah Miftuhul Huda Tayu Pati. *Physics Communication* 6(1):25-29.
34. Ricciardi P, Buratti C (2018) Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. *Building and Environment* 12:23–36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.030>
35. Dang R, Liu Y, Chang S (2023) The impact patterns of classroom lighting parameters on visual fatigue and a mathematical model. *Building and Environment* 234:110193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110193>
36. Samiou R, Doulos S, Zerefos S (2022) Daylighting and artificial lighting criteria that promote performance and optical comfort in preschool classrooms. *Energy & Buildings* 258:111819. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111819>
37. Gentile N (2022) Improving lighting energy efficiency through user response. *Energy & Buildings* 263: 112022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112022>
38. Nuria C, Carmen L, Fabio B, Vicente B (2018) Emotional evaluation of lighting in university classrooms: A preliminary study. *Frontiers of Architectural Research* 7:600-609. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2018.07.002>
39. Zhe K, Alstan J (2021) Instantaneous lighting quality within higher educational classrooms in Singapore. *Frontiers of Architectural Research* 7:787-802. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.05.001>
40. Yang W, Joen JY (2023) Effects of lighting and sound factors on environmental sensation, perception, and cognitive performance in a classroom. *Journal of Building Engineering* 76:107063. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107063>
41. Nuria C, Higuera-Trujillo J, Carmen L (2024) Virtual reality-based study assessing the impact of lighting on attention in university classrooms. *Journal of Building Engineering* 86:108902. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108902>



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Optimization of drilling parameters for minimizing delamination factor in biocomposites using multiple nonlinear neuro-regression and stochastic methods

Melih Savran^{a,*}, Mücahit Osman Türkan^a, Mustafa Öncül^a, Levent Aydın^a

^a*İzmir Katip Çelebi University, Department of Mechanical Engineering, İzmir-Türkiye.*

ARTICLE INFO

Article history:

Received

Received in revised form

Accepted

Available online

Keywords:

Biocomposites

Drilling

Delamination factor

Neuro-regression

Stochastic optimization

ABSTRACT

In this study, a novel design optimization strategy is proposed to enhance the drilling performance of HDPE/Washingtonia fiber biocomposites, considering operational parameters such as drill diameter (d), feed rate (f), and spindle speed (N). A detailed investigation utilizing multiple nonlinear neuro-regression analyses is conducted to predict the delamination factor (F_d), based on a dataset obtained from a literature study. 14 candidate mathematical functions are suggested for modelling, and their accuracy is assessed through R^2_{training} , R^2_{testing} , and $R^2_{\text{validation}}$ metrics, and boundedness check. The identified effective models are subsequently employed in optimization using modified version of four methods: Nelder-Mead (NM), Simulated Annealing (SA), Random Search (RS), and Differential Evaluation (DE). The optimum values for parameters f , N and d were determined to be 50 mm/min, 355 rev/min, and 5.00 mm respectively, resulting with the minimum F_d values as 1.11615.

I. INTRODUCTION

In recent years, there has been a growing interest in utilizing biofibers as reinforcement or filler materials in polymer matrix composites. This shift towards the incorporation of biofibers is largely driven by the increasing prevalence of environmental regulations and the growing consumer demand for eco-friendly materials. This has prompted manufacturers to seek sustainable alternatives to conventional materials [1]. The utilization of biocomposites, which harness local and renewable resources, offers considerable advantages in terms of sustainability. The development of such materials is informed by the principles of industrial ecology, eco-efficiency, and green chemistry, which shape future material innovations, products, and processes [2]. Furthermore, biocomposites have attracted attention due to their cost-effectiveness and biocompatibility in comparison to synthetic fiber-based composites [3]. However, the manufacturing processes for biocomposites frequently encounter difficulties associated with the natural fiber content, resulting in inconsistency and inadequate control. This highlights the necessity for comprehensive scientific investigation to enhance comprehension of the behavior, characteristics, and performance of these materials [4].

Drilling represents a fundamental machining process within the manufacturing industry. However, it is often subject to a number of issues, with delamination representing a particularly significant concern. Reducing delamination is crucial to improve the overall quality of the manufacturing process, as it significantly affects the

*Corresponding author. Tel.: +90-232-329-3535; e-mail: mlhsvm@gmail.com

structural integrity, surface finish, working life and aesthetic quality of composite materials. Delamination compromises mechanical properties such as tensile strength and impact resistance, leading to potential failure under stress, which is critical in industries such as aerospace and automotive. It also affects the precision of machined surfaces, causing problems in assembly and alignment. In addition, delaminated components have a shorter lifetime due to crack propagation, increasing maintenance and replacement costs. Addressing delamination through rework can increase production costs, so optimizing drilling parameters such as spindle speed, feed rate and tool geometry, and using special techniques help prevent damage and improve production efficiency [5]. The optimization of delamination necessitates the careful selection of drilling parameters, including feed rate (f), drill diameter (d), and spindle speed (N) [6]. Figure 1 provides a schematic representation of the delamination process in composite materials.

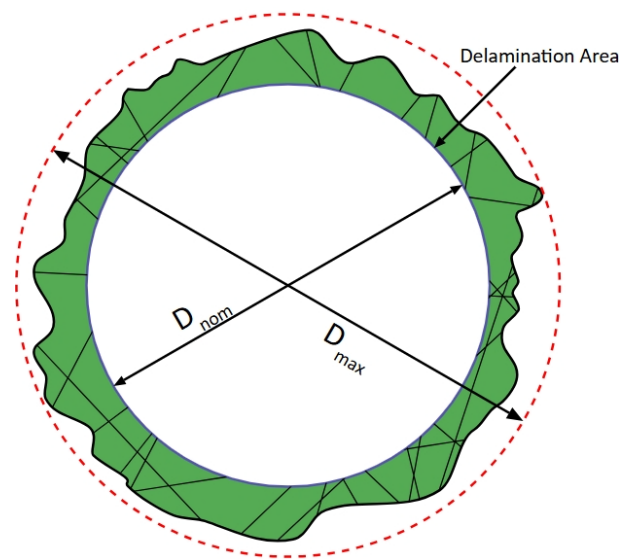


Figure 1. Schematic representations of delamination in a drilled hole

The delamination factor is defined as the ratio of the maximum diameter of the delaminated region surrounding the hole to the diameter of the hole itself. This is expressed by the following equation [7]:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (1)$$

In a study conducted by Adda et al. [8], the optimization of delamination factors in the drilling of jute fiber-reinforced polymer biocomposites were investigated. In this study, experimental data was obtained by using Taguchi Method, and response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN) were applied to predict experimental results. The authors concluded that the optimal drilling conditions (feed rate = 50 mm/min, spindle speed = 1085.89 rev/min, and drill diameter = 5.00 mm) resulted in minimal delamination. In a recent study by AL-Oqla [7], the manufacturing process and delamination factor of cellulosic paper/epoxy composites, composed of 12, 25, and 50 paper layers, were examined. The results indicated that the optimal delamination factor

was achieved in the composite with 25 paper layers, using both 6 mm and 10 mm drill diameters at a spindle speed of 1500 rpm. This finding underscores the importance of selecting appropriate drilling parameters to enhance the structural performance of paper/epoxy composites. Belaadi et al. [4] employed an evaluation of the mechanical properties and the influence of drilling parameters on the delamination factor in jute fabric-reinforced epoxy matrix biocomposites. The study systematically varied spindle speed (355, 710, and 1400 rev/min), feed rate (50, 108, and 190 mm/min), and tool diameter (5, 7, and 10 mm) to assess their effects on the cutting process. Their findings revealed a significant relationship between these drilling parameters and the delamination factor, highlighting the critical role of precise parameter control in optimizing the structural integrity of drilled biocomposites. Design of experiments was developed by the application analysis of variance (ANOVA), and RSM and ANN methods were applied to predict the experimental results. The authors concluded that the ANN model showed better results as compared to RSM model. The Fd factor reached its optimal conditions with a feed rate of 51 mm/min, a spindle speed of 1160 rev/min, and a drilling diameter of 5 mm. In another work developed by Belaadi et al. [9], the drilling performance of HDPE/Washingtonia fiber biocomposites investigated. Full factorial method was used for design of experiments. Optimum drilling parameters were determined to be 50.13 mm/s feed rate, 806.00 rev/min spindle speed, and a drilling diameter of 5 mm. Tsao & Hocheng [10] examined the prediction and evaluation of the delamination factor when utilizing twist drills, candlestick drills, and saw drills. The aim of the research was to establish correlations between feed rate, spindle speed, and drill diameter, employing Taguchi's method and ANOVA. Ameer et al. [11] made an experimental investigation on the performances of thrust force, torque, exit delamination, and cylindricity error. They varied spindle speeds and feed rates, employing drills made of diverse materials. The study utilized RSM to establish correlations between cutting parameters and output responses across various drills. Optimal values for cutting parameters and the preferred tool material were determined through the desirability function approach.

The summary of the essential studies, their methodologies, and findings, providing a comprehensive overview of the current state of research on drilling performance and delamination in composite materials is given in Table 1.

Approaches such as RSM, ANN, and regression are easy to implement; however, they do not consider multiple objective criteria, and the ultimate optimal solution is highly responsive to the chosen dimensionality reduction techniques [12].

The present study proposes a new approach to address deficiencies in the design, modeling, and optimization of the drilling process. Multiple nonlinear neuro regression analysis includes the collaboration of ANN, regression analysis, and stochastic optimization methods to obtain suitable designs that satisfy the desired requirements. This method can offer a wide range of alternative mathematical models without limiting to specific polynomial forms or sigmoid, unit step, hyperbolic tangent activation functions. Additionally, model evaluation can incorporate both the R^2 value and the boundedness check criterion, offering a more comprehensive assessment. The boundedness check is essential for reliable mathematical model development. Since all engineering parameters are finite, realistic modeling in engineering systems requires boundedness. Thus, before optimization, verifying whether the models are bounded within the specified engineering parameter intervals is crucial. Unlike modeling approaches based on artificial neural networks (ANN), this method eliminates the need to fine-tune parameters such as the number of neurons and hidden layers, which are typically adjusted to optimize ANN-based models. With these

aspects, the proposed method substantially contributes to the modeling efforts related to the drilling process within literature.

Table 1. Summary of the studies on drilling performance and delamination in composites – methodologies and findings

Reference	Design Parameters	Research Focus	Modeling Methods	Key Findings
Adda et al. [8]	Spindle speed, feed rate, drill diameter	Optimization of delamination in jute fiber-reinforced polymer biocomposites	Taguchi Method, RSM, ANN	Optimal conditions: $f = 50$ mm/min, $N = 1085.89$ rev/min, $d = 5.00$ mm minimized delamination.
AL-Oqla [7]	Number of papers, spindle speed, drill diameter	Delamination in cellulosic paper/epoxy composites	Not specified	Optimal delamination factor achieved with 25 paper layers, using 6 mm and 10 mm drill diameters at 1500 rpm spindle speed.
Belaadi et al. [4]	Spindle speed, feed rate, drill diameter	Mechanical properties and delamination in jute fabric-reinforced epoxy biocomposites	RSM, ANN, ANOVA	Optimal conditions: $f = 51$ mm/min, $N = 1160$ rev/min, $d = 5$ mm. ANN model outperformed RSM.
Belaadi et al. [9]	Spindle speed, feed rate, drill diameter	Drilling performance in HDPE/Washingtonia fiber biocomposites	Full Factorial Method	Optimal parameters: $f = 50.13$ mm/s, $N = 806.00$ rev/min, $d = 5$ mm.
Tsao & Hocheng [10]	Spindle speed, feed rate, drill diameter	Prediction and evaluation of delamination factors with different drills	Taguchi's Method, ANOVA	Established correlations between f , N , and d for different drill types.
Ameur et al. [11]	Spindle speed, feed rate, tool material	Thrust force, torque, exit delamination, and cylindricity error	RSM	Optimal cutting parameters and tool material identified; correlations established using RSM.
Wang & Jia [12]	Spindle speed, feed rate	Comparison of modelling methods for delamination	RSM, ANN, Regression	Highlighted limitations of RSM, ANN, and regression in multi-objective optimization.
Başar et al. [13]	Multi-wall carbon nanotube content, cutting speed, feed rate	Modeling and optimization of thrust force in drilling glass fiber-reinforced polymer composites	Box-Behnken design, Desirability Function Analysis	Feed rate identified as the most influential factor affecting thrust force
Fedai et al. [14]	Multi-wall carbon nanotube weight percentage, cutting speed, feed rate	Optimization of thrust force and delamination factor in GFRP drilling	Grey Relational Analysis, ANOVA	Feed rate was confirmed as the most significant parameter affecting both thrust force and delamination factor
Der et al. [15]	Cutting power, cutting speed	Multi-criteria analysis for precise cutting of thermoplastics for thermal management systems	SWARA method, various multi-criteria decision-making methods	Optimal parameters for cutting polypropylene were found to be 90 W power and 15 mm/s cutting speed
Kaushik & Singh [16]	Drill point geometry, spindle speed, feed rate	Modeling and optimization of thrust force and delamination factor in drilling flax fiber-reinforced polymer composites	Teaching learning-based optimization, Genetic algorithm, Particle swarm	Drill point geometry was the most significant parameter affecting the thrust force, whereas spindle speed had the most negligible impact. Furthermore, the lowest and maximum thrust force and delamination factor were recorded for the U-shape drill bit.

The modeling and optimization methodology in paper is organized as follows: First, 14 candidate functional structures were proposed for modeling the drilling process using experimental data from the research by Belaadi et al. [9], and their accuracy is assessed based on R^2 training, R^2 testing, and R^2 validation values. Secondly, the boundedness of the candidate models has been checked. Lastly, the selected models utilized as objective function and delamination factor were optimized through four distinct methods: Nelder-Mead, Simulated Annealing, Random Search, and Differential Evaluation.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1 Experimental Process

In the reference study [9], the researchers used *Washingtonia filifera* (WF) fibers obtained from desert palms grown locally in the Guelma region of Algeria. As matrix material, they used high-density polyethylene (HDPE) of 95% purity supplied by SABIC Petrochemicals. They produced the biocomposite material using two Thermotron-C.W. Brabender rollers to ensure complete blending and processing.

The researchers carried out the drilling tests using a high-performance MOMAC universal milling machine that supports feed rates from 4.6 to 1040 mm/rev and spindle speeds up to 1400 rpm. The dimensions of the biocomposite samples were 250 × 90 × 4 mm. They used high-speed steel drills with titanium nitride (HSS-TiN) coating and diameters of 5 mm, 7 mm and 10 mm. The feed rates of 50, 108 and 190 mm/min and spindle speeds of 355, 710 and 1400 rpm were adjusted for the delamination process. Damage assessment was carried out using the delamination factor (Fd) defined by the formula $F_d = D_{max}/D$, where D_{max} is the maximum diameter of the damaged area and D is the nominal diameter of the hole.

The present study carried out the mathematical modeling and optimization process using the experimental data set in the reference study [9].

2.2 Modeling

In the modelling phase, a hybrid method called Neuro-Regression which the synergy between regression analysis and ANN methodologies to enhance prediction accuracy. In this approach, the experimental data is first divided randomly into three datasets as 80%, 15%, and 5% of the given data; named as training dataset, testing dataset and validation dataset respectively.

First, 14 different mathematical models given in Table 2 alongside the training dataset were used for model fitting. Secondly, the $R^2_{training}$ values of these models were investigated to evaluate how good the models are at explaining the large portion of the variability in the training data. After the training step, these models were used to predict the results of the testing dataset to assess the performance of the models. $R^2_{testing}$ values were used in this part to see how good these models were at predicting a new, unseen dataset. Then, the $R^2_{validation}$ values, derived from the original and predicted values of the validation dataset, were investigated to see if there were any overfitting during the training phase, and for making fine tuning and adjustments on the candidate models [17, 18].

Table 2. Multiple regression model types include linear, quadratic, trigonometric, logarithmic, and their rational forms

Model Name	Nomenclature	Model
Multiple Linear	L	$a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$
Multiple Linear Rational	LR	$(a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3)/(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3)$
Second Order Multiple Nonlinear	SON	$a_0 + 2a_1x_1 + a_2x_1^2 + 2a_3x_2 + 2a_4x_1x_2 + a_5x_2^2 + 2a_6x_3 + 2a_7x_1x_3 + 2a_8x_2x_3 + a_9x_3^2$
Second Order Multiple Nonlinear Rational	SONR	$(a_0 + 2x_1a_1 + x_1^2a_2 + 2x_2a_3 + x_2^2a_5 + 2x_3a_6 + 2x_1x_3a_7 + 2x_2x_3a_8 + x_3^2a_9)/(b_0 + 2x_1b_1 + x_1^2b_2 + 2x_2b_3 + x_2^2b_5 + 2x_3b_6 + 2x_1x_3b_7 + 2x_2x_3b_8 + x_3^2b_9)$

Table 2 (Continued). Multiple regression model types include linear, quadratic, trigonometric, logarithmic, and their rational form

Third Order Multiple Nonlinear	TON	$a_0 + 3x_1a_1 + 3x_1^2a_2 + x_1^3a_3 + 3x_2a_4 + 6x_1x_2a_5 + 3x_1^2x_2a_6 + 3x_2^2a_7 + 3x_1x_2^2a_8 + x_2^3a_9 + 3x_3a_{10} + 6x_1x_3a_{11} + 3x_1^2x_3a_{12} + 6x_2x_3a_{13} + 6x_1x_2x_3a_{14} + 3x_2^2x_3a_{15} + 3x_3^2a_{16} + 3x_1x_3^2a_{17} + 3x_2x_3^2a_{18} + x_3^3a_{19}$
Fourth Order Multiple Nonlinear	FON	$a_0 + 4x_1a_1 + 6x_1^2a_2 + 4x_1^3a_3 + x_1^4a_4 + 4x_2a_5 + 12x_1x_2a_6 + 12x_1^2x_2a_7 + 4x_1^3x_2a_8 + 6x_2^2a_9 + 12x_1x_2^2a_{10} + 6x_1^2x_2^2a_{11} + 4x_2^3a_{12} + 4x_1x_2^3a_{13} + x_2^4a_{14} + 4x_3a_{15} + 12x_1x_3a_{16} + 12x_1^2x_3a_{17} + 4x_1^3x_3a_{18} + 12x_2x_3a_{19} + 24x_1x_2x_3a_{20} + 12x_1^2x_2x_3a_{21} + 12x_2^2x_3a_{22} + 12x_1x_2^2x_3a_{23} + 4x_2^3x_3a_{24} + 6x_3^2a_{25} + 12x_1x_3^2a_{26} + 6x_1^2x_3^2a_{27} + 12x_2x_3^2a_{28} + 12x_1x_2x_3^2a_{29} + 6x_2^2x_3^2a_{30} + 4x_3^3a_{31} + 4x_1x_3^3a_{32} + 4x_2x_3^3a_{33} + x_3^4a_{34}$
Hybrid Model	HM	$a_0 + 2x_1a_1 + x_1^2a_2 + 2x_2a_3 + 2x_1x_2a_4 + x_2^2a_5 + 2x_3a_6 + 2x_1x_3a_7 + 2x_2x_3a_8 + x_3^2a_9 + 2a_{10} \log(x_1) + a_{11} \log(x_1)^2 + 2a_{12} \log(x_2) + 2a_{13} \log(x_1) \log(x_2) + a_{14} \log(x_2)^2 + 2a_{15} \log(x_3) + 2a_{16} \log(x_1) \log(x_3) + 2a_{17} \log(x_2) \log(x_3) + a_{18} \log(x_3)^2$
Second Order Trigonometric Nonlinear	SOTN	$a_0 + 2a_1 \cos(x_1) + a_2 \cos(x_1)^2 + 2a_3 \cos(x_2) + 2a_4 \cos(x_1) \cos(x_2) + a_5 \cos(x_2)^2 + 2a_6 \cos(x_3) + 2a_7 \cos(x_1) \cos(x_3) + 2a_8 \cos(x_2) \cos(x_3) + a_9 \cos(x_3)^2 + 2a_{10} \sin(x_1) + 2a_{11} \cos(x_1) \sin(x_1) + 2a_{12} \cos(x_2) \sin(x_1) + 2a_{13} \cos(x_3) \sin(x_1) + a_{14} \sin(x_1)^2 + 2a_{15} \sin(x_2) + 2a_{16} \cos(x_1) \sin(x_2) + 2a_{17} \cos(x_2) \sin(x_2) + 2a_{18} \cos(x_3) \sin(x_2) + 2a_{19} \sin(x_1) \sin(x_2) + a_{20} \sin(x_2)^2 + 2a_{21} \sin(x_3) + 2a_{22} \cos(x_1) \sin(x_3) + 2a_{23} \cos(x_2) \sin(x_3) + 2a_{24} \cos(x_3) \sin(x_3) + 2a_{25} \sin(x_1) \sin(x_3) + 2a_{26} \sin(x_2) \sin(x_3) + a_{27} \sin(x_3)^2$
Second Order Trigonometric Nonlinear Rational	SOTNR	$(a_0 + 2a_1 \cos(x_1) + a_2 \cos(x_1)^2 + 2a_3 \cos(x_2) + 2a_4 \cos(x_1) \cos(x_2) + a_5 \cos(x_2)^2 + 2a_6 \cos(x_3) + 2a_7 \cos(x_1) \cos(x_3) + 2a_8 \cos(x_2) \cos(x_3) + a_9 \cos(x_3)^2 + 2a_{10} \sin(x_1) + 2a_{11} \cos(x_1) \sin(x_1) + 2a_{12} \cos(x_2) \sin(x_1) + 2a_{13} \cos(x_3) \sin(x_1) + a_{14} \sin(x_1)^2 + 2a_{15} \sin(x_2) + 2a_{16} \cos(x_1) \sin(x_2) + 2a_{17} \cos(x_2) \sin(x_2) + 2a_{18} \cos(x_3) \sin(x_2) + 2a_{19} \sin(x_1) \sin(x_2) + a_{20} \sin(x_2)^2 + 2a_{21} \sin(x_3) + 2a_{22} \cos(x_1) \sin(x_3) + 2a_{23} \cos(x_2) \sin(x_3) + 2a_{24} \cos(x_3) \sin(x_3) + 2a_{25} \sin(x_1) \sin(x_3) + 2a_{26} \sin(x_2) \sin(x_3) + a_{27} \sin(x_3)^2) / (b_0 + 2b_1 \cos(x_1) + b_2 \cos(x_1)^2 + 2b_3 \cos(x_2) + 2b_4 \cos(x_1) \cos(x_2) + b_5 \cos(x_2)^2 + 2b_6 \cos(x_3) + 2b_7 \cos(x_1) \cos(x_3) + 2b_8 \cos(x_2) \cos(x_3) + b_9 \cos(x_3)^2 + 2b_{10} \sin(x_1) + 2b_{11} \cos(x_1) \sin(x_1) + 2b_{12} \cos(x_2) \sin(x_1) + 2b_{13} \cos(x_3) \sin(x_1) + b_{14} \sin(x_1)^2 + 2b_{15} \sin(x_2) + 2b_{16} \cos(x_1) \sin(x_2) + 2b_{17} \cos(x_2) \sin(x_2) + 2b_{18} \cos(x_3) \sin(x_2) + 2b_{19} \sin(x_1) \sin(x_2) + b_{20} \sin(x_2)^2 + 2b_{21} \sin(x_3) + 2b_{22} \cos(x_1) \sin(x_3) + 2b_{23} \cos(x_2) \sin(x_3) + 2b_{24} \cos(x_3) \sin(x_3) + 2b_{25} \sin(x_1) \sin(x_3) + 2b_{26} \sin(x_2) \sin(x_3) + b_{27} \sin(x_3)^2)$
Third Order Multiple Nonlinear Rational	TONR	$(a_0 + 3x_1a_1 + 3x_1^2a_2 + x_1^3a_3 + 3x_2a_4 + 6x_1x_2a_5 + 3x_1^2x_2a_6 + 3x_2^2a_7 + 3x_1x_2^2a_8 + x_2^3a_9 + 3x_3a_{10} + 6x_1x_3a_{11} + 3x_1^2x_3a_{12} + 6x_2x_3a_{13} + 6x_1x_2x_3a_{14} + 3x_2^2x_3a_{15} + 3x_3^2a_{16} + 3x_1x_3^2a_{17} + 3x_2x_3^2a_{18} + x_3^3a_{19}) / (b_0 + 3x_1b_1 + 3x_1^2b_2 + x_1^3b_3 + 3x_2b_4 + 6x_1x_2b_5 + 3x_1^2x_2b_6 + 3x_2^2b_7 + 3x_1x_2^2b_8 + x_2^3b_9 + 3x_3b_{10} + 6x_1x_3b_{11} + 3x_1^2x_3b_{12} + 6x_2x_3b_{13} + 6x_1x_2x_3b_{14} + 3x_2^2x_3b_{15} + 3x_3^2b_{16} + 3x_1x_3^2b_{17} + 3x_2x_3^2b_{18} + x_3^3b_{19})$
First Order Logarithmic Multiple Nonlinear	FOLN	$a_0 + a_1 \log(x_1) + a_2 \log(x_2) + a_3 \log(x_3)$
First Order Logarithmic Multiple Nonlinear Rational	FOLNR	$(a_0 + a_1 \log(x_1) + a_2 \log(x_2) + a_3 \log(x_3)) / (b_0 + b_1 \log(x_1) + b_2 \log(x_2) + b_3 \log(x_3))$
Second Order Logarithmic Multiple Nonlinear	SOLN	$a_0 + 2a_1 \log(x_1) + a_2 \log(x_1)^2 + 2a_3 \log(x_2) + 2a_4 \log(x_1) \log(x_2) + a_5 \log(x_2)^2 + 2a_6 \log(x_3) + 2a_7 \log(x_1) \log(x_3) + 2a_8 \log(x_2) \log(x_3) + a_9 \log(x_3)^2$
Second Order Logarithmic Multiple Nonlinear Rational	SOLNR	$(a_0 + 2a_1 \log(x_1) + a_2 \log(x_1)^2 + 2a_3 \log(x_2) + 2a_4 \log(x_1) \log(x_2) + a_5 \log(x_2)^2 + 2a_6 \log(x_3) + 2a_7 \log(x_1) \log(x_3) + 2a_8 \log(x_2) \log(x_3) + a_9 \log(x_3)^2) / (b_0 + 2b_1 \log(x_1) + b_2 \log(x_1)^2 + 2b_3 \log(x_2) + 2b_4 \log(x_1) \log(x_2) + b_5 \log(x_2)^2 + 2b_6 \log(x_3) + 2b_7 \log(x_1) \log(x_3) + 2b_8 \log(x_2) \log(x_3) + b_9 \log(x_3)^2)$

Lastly, the boundedness check was made by examining the minimum and maximum values, derived from the differential evolution algorithm, of these candidate models in given intervals. This last process was done to see if the models were realistic or not.

2.3 Optimization

Structural optimization involves identifying the best design or a set of optimal designs by minimizing specified single or multiple objectives while ensuring that all constraints are met. Optimization methods can be categorized into traditional and non-traditional approaches. Traditional techniques, like constrained variation and Lagrange multipliers, are analytical and are only effective for continuous and differentiable functions. However, because composite design problems often involve discrete search spaces, these traditional methods are not suitable. Instead, stochastic optimization methods, such as genetic algorithms (GA) and simulated annealing (SA), are more appropriate for these scenarios [19]. In this study, the optimization problem is addressed using Modified Differential Evolution (MDE), Modified Nelder-Mead (MNM), Modified Simulated Annealing (MSA), and Modified Random Search (MRS) methods, all applied with their default settings.

The algorithms were implemented using Mathematica software. Mathematica's built-in functions, `NMinimize` and `NMaximize`, can be employed for both global and local optimization tasks. The optimization process can be performed by selecting the appropriate `Nmimize` and `Nmaximize` functions according to the desire to maximize or minimize the objective function. In addition, continuous and discrete constraints that will be included in the system can be directly added within these functions. In the present study, optimization problems were solved using the `Nminimize` solver.

2.3.1. Modified differential evolution algorithm

Differential Evolution (DE) is a population-based stochastic optimization algorithm introduced by Storn and Price in 1997. It is particularly well-suited for optimizing complex, nonlinear, and multi-modal objective functions, offering a robust alternative to traditional methods that may struggle in such scenarios. MDE operates by iteratively improving a population of candidate solutions through processes inspired by biological evolution, including mutation, crossover, and selection. In Mathematica, MDE is integrated into functions like `NMinimize` and `NMaximize`, providing a powerful tool for finding global optima in high-dimensional and complex search spaces. The algorithm's balance between exploration (searching broadly) and exploitation (refining promising areas) makes it highly effective for challenging optimization problems, offering users a reliable and efficient approach to optimize complex functions. [20].

2.3.2. Modified nelder-mead algorithm

The Nelder-Mead (NM) optimization algorithm is a straightforward direct search method that operates without the need for derivative information. It initiates the minimization process by employing a simplex. As the iteration progresses, the simplex may reach a flat configuration, signifying that the function's values are nearly identical across all vertices. The iterative steps of the Nelder-Mead algorithm involve ordering, centroid determination, and transformation [18]. While the Nelder-Mead algorithm is not designed as a global optimization method, it often works well in practice for problems with few local minima. Additionally, recent updates to the algorithm have extended its capabilities to handle constrained, discrete, and global optimization challenges [20].

2.3.3. Modified simulated annealing algorithm

Simulated Annealing (SA) is a probabilistic optimization algorithm inspired by the annealing process in metallurgy, where materials are heated and then gradually cooled to minimize energy states and reduce defects. It is particularly well-suited for global optimization in large and complex search spaces with multiple local optima. Mathematica integrates MSA into functions like NMinimize and NMaximize, allowing users to fine-tune several parameters to enhance performance.

Essential parameters influencing MSA include InitialPoints, which sets the starting location(s) in the search space. SearchPoints dictates the number of candidate solutions evaluated in each iteration. A higher number of search points ensures broader exploration but at a higher computational cost.

The RandomSeed parameter ensures the reproducibility of results by controlling the randomness in the algorithm, crucial for verifying and comparing different optimization runs. The Boltzmann Exponent determines how quickly the "temperature" decreases, affecting the likelihood of accepting suboptimal solutions during exploration. Level Iteration defines how many iterations the algorithm performs at each temperature level, controlling the depth of exploration. The effectiveness of MSA depends on carefully tuning these parameters. By adjusting these parameters, MSA can be optimized to solve a wide range of complex problems [21].

2.3.4. Modified random search algorithm

Random Search (RS) is a straightforward yet effective optimization algorithm, ideal for large, complex, or poorly defined search spaces. It differs from gradient-based methods in that it does not depend on derivative information but rather generates random candidate solutions within the search space and evaluates their performance based on the objective function. One of MRS's main strengths is its extensive exploration capability, reducing the likelihood of being trapped in local optima, a common limitation of more deterministic methods.

In Mathematica, RS is integrated into functions like NMinimize and NMaximize to search for global optima, particularly when the objective function is discontinuous, non-differentiable, or noisy. Despite its simplicity, MRS is widely applicable and can be combined with other techniques or used as a preliminary tool in complex optimization tasks.

Key parameters in MRS include InitialPoints, PenaltyFunction, SearchPoints, and PostProcess. The balance between the key parameters is critical to the success of MRS in identifying high-quality solutions [22]. The flowchart regarding mathematical modeling and optimization process is given in Figure 2 as follows.

2.4 Problem Definition

To determine design parameters effect of the drilling process on the delamination factor for HDPE/Washingtonia biocomposites, mathematical modelling and optimization studies were carried out using experimental data. The problem definition involved selecting a dataset, proposing mathematical models, and creating optimization scenarios to determine the most suitable design parameters and corresponding output for the drilling process. The dataset, taken from a reference study (Table 3), included the delamination factor output (F_d) and related design

parameters such as feed rate (f), spindle speed (N), and diameter (d) in the drilling process. Subsequently, 14 mathematical models were developed to describe the relationship between three design parameters and the output parameter based on the experimental data. The best model was chosen by evaluating R^2 training, R^2 testing, R^2 validation, and boundedness test results to represent the experimental data accurately. After selecting the appropriate model that provides boundedness criteria and gives the best R^2 values, three different optimization scenarios were defined. Modified version of stochastic optimization algorithms; MDE, NMM, MSA, MRS were utilized to solve the defined problems.

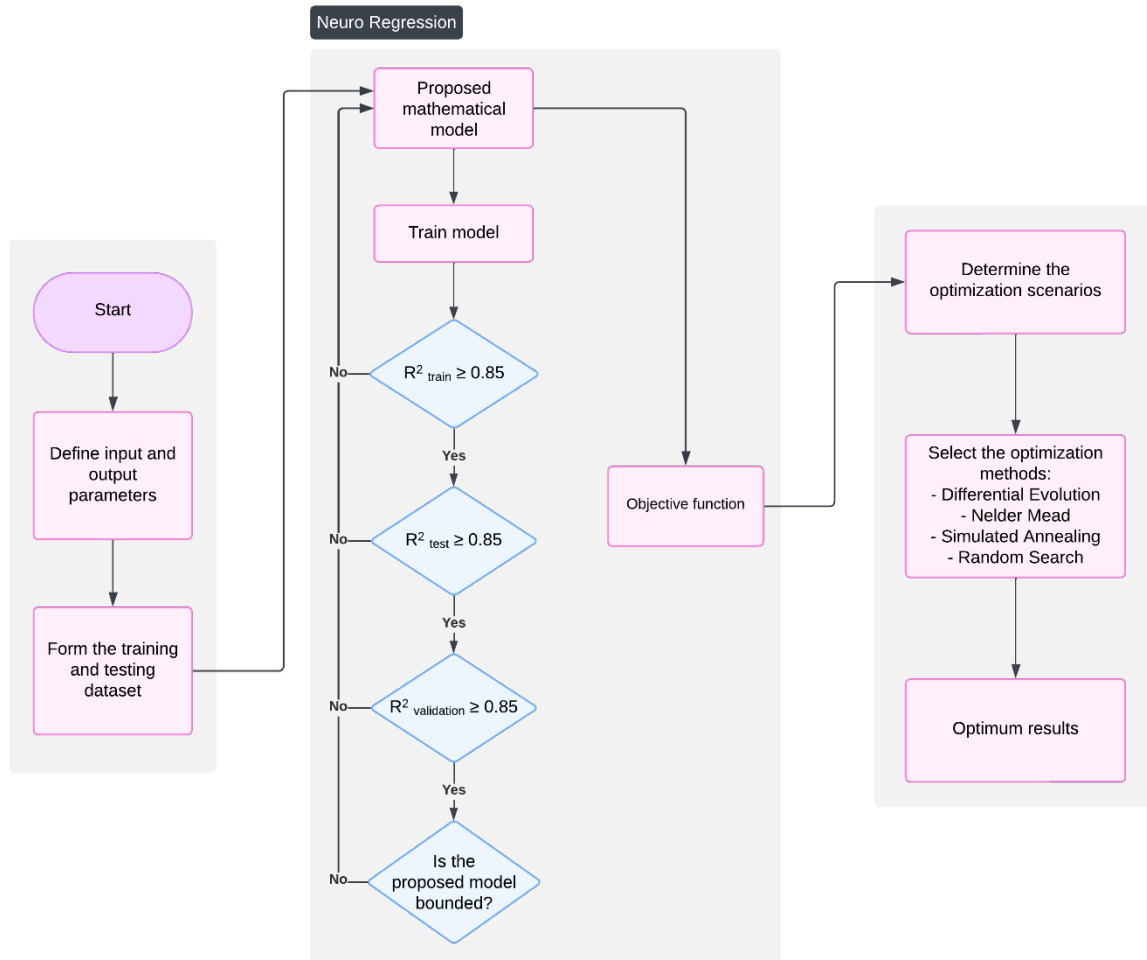


Figure 2. The flowchart regarding mathematical modeling and optimization process

2.5 Optimization Scenarios

The following scenarios were used to find the minimum delamination factor and corresponding optimum design variables. Furthermore, the effect of defined constraints in each scenario on the delamination factor was investigated.

Scenario 1. All the design variables are assumed to be real numbers within the continuous search space. The design variables range were set as follows: $50 \leq$ feed rate (f) ≤ 190 , $355 \leq$ spindle speed (N) ≤ 1400 , $5 \leq$ drill diameter (d) ≤ 10 .

Scenario 2. The integer values of the design parameters are defined as a constraint in the system. The search space for design variables were set as follows: $50 \leq \text{feed rate (f)} \leq 190$, $355 \leq \text{spindle speed (N)} \leq 1400$, $5 \leq \text{drill diameter (d)} \leq 10$.

Scenario 3. They were entered as a constraint in the system that the design parameters could only take certain specific values determined in the experimental set: feed rate (f) $\in \{50, 108, 190\}$, spindle speed (N) $\in \{355, 710, 1400\}$, drill diameter (d) $\in \{5, 7, 10\}$.

Table 3. Experimental data used in this research (Belaadi et al., 2022)[9]

f (mm/min)	N (rev/min)	d (mm)	Fd, EXP	Fd, RSM
50	355	5	1.1166	1.1176
108	355	5	1.1230	1.1223
190	355	5	1.1266	1.1267
50	710	5	1.1166	1.1167
108	710	5	1.1221	1.1212
190	710	5	1.1259	1.1253
50	1400	5	1.1176	1.1184
108	1400	5	1.1219	1.1224
190	1400	5	1.1261	1.1258
50	355	7	1.1222	1.1226
108	355	7	1.1261	1.1262
190	355	7	1.1274	1.1290
50	710	7	1.1230	1.1214
108	710	7	1.1250	1.1248
190	710	7	1.1273	1.1273
50	1400	7	1.1229	1.1225
108	1400	7	1.1261	1.1254
190	1400	7	1.1265	1.1273
50	355	10	1.1293	1.1289
108	355	10	1.1317	1.1309
190	355	10	1.1326	1.1314
50	710	10	1.1267	1.1273
108	710	10	1.1266	1.1290
190	710	10	1.1289	1.1292
50	1400	10	1.1278	1.1275
108	1400	10	1.1286	1.1288
190	1400	10	1.1289	1.1283

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

This study established a mathematical relationship between design parameters (feed rate (x1), spindle speed (x2), drill diameter (x3), and output parameter (delamination factor (F_d)). The goal was to identify the values of these design parameters that minimize the delamination factor using the most effective model. The success of the mathematical models in meeting training, testing, validation, and boundedness control criteria is presented in Table 4. Upon reviewing Table 4, it becomes evident that all models performed remarkably well during the training phase, displaying high performance prediction levels close to 1 as per the R² criterion. Namely, all models successfully passed the training phase. However, during the testing phase, models including FON and SOTNR exhibited unacceptably low prediction performance levels. A similar assessment during the validation phase revealed that models such as FON, SOTN, and SOTNR displayed very low prediction performance. When considering the boundedness control criterion, it was determined that the maximum and minimum delamination factor values revealed by the SONR, SOTN, SOTNR and SOLNR models may not be unreasonable. As a result of these evaluations, it was seen that the FON SOTNR, SOTN, SONR, SOTN and SOLNR models did not meet the R² and boundedness check evaluation criteria. Among other models, models with an R² estimation performance of 0.85 and above in the training, testing and validation stages and which produced significant results according

to the boundedness check criterion were preferred as the objective function in the optimization process. LR and SOLN were the two models that met the mentioned conditions. While LR had 0.99, 0.86, 0.92 estimation performance in the training, testing and validation stages, respectively, these values were found to be 1, 0.88, 0.87 for the SOLN model.

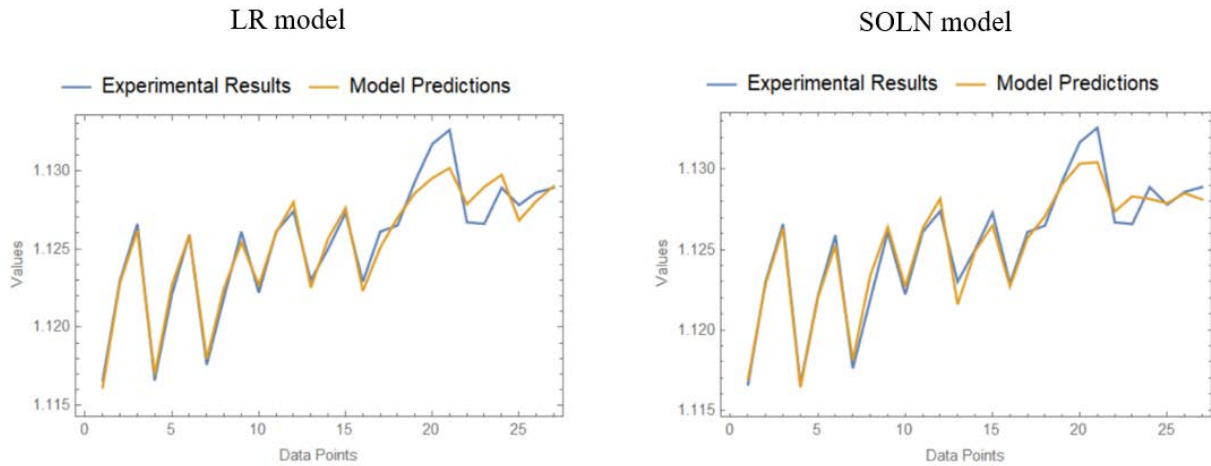


Figure 3. Comparison of LR and SOLN model prediction performance with experimental results

Figure 3 presents the experimental and predicted results for both the LR (Linear Rational) model and the SOLN (Second Order Logarithm Nonlinear) model. This figure allows a comparison between the observed and the predicted values of delamination factor for the two models. Both models produced predictions that were perfectly aligned with the experimental results up to the 18th data point. However, between the 18th and 25th data points, slight deviations between the predicted and experimental outcomes were observed. This range corresponds to the dataset that was allocated for testing and validation. Because the models attempt to predict data they have not previously encountered, these deviations are reasonable and expected.

Table 4. Proposed Mathematical models to explain inputs and output relation

Model	R ² _{training}	R ² _{testing}	R ² _{validation}	Minimum Fd	Maximum Fd
L	0.999998	0.644907	0.740797	1.11834	1.13315
LR*	0.999999	0.858051	0.923233	1.11615	1.13017
SON	0.999999	0.776201	0.965609	1.1166	1.13043
SONR	1	0.698208	0.855111	-1.1113E+11	174848
TON	1	0.784234	0.955925	1.11588	1.13187
FON	1	0.364962	0.464991	1.10921	1.13758
HM	1	0.77835	0.772345	1.11436	1.13161
SOTN	1	0.96258	0.58856	0.122134	1.2111
SOTNR	0.99596	-1951.82	-15810.6	-3934370	5735.77
TONR	0.999999	0.866178	0.778461	1.11651	1.13049
FOLN	0.999998	0.799344	0.611545	1.11793	1.13253
FOLNR	0.999999	0.878908	0.760117	1.11609	1.13037
SOLN*	1	0.876652	0.870804	1.11633	1.1305
SOLNR	1	0.772175	0.957495	-1587.15	4.08908

Full form of models was given in appendix.

Figure 4 graphically represents and compares the LR and SOLN model's behavior for design parameters d=5, 7, and 10. When the drill diameter is set to 5, an increase in spindle speed alone does not significantly affect the delamination factor in either model. However, an increase in feed rate is directly proportional to an increase in the

delamination factor. To achieve the lowest delamination factor, it is necessary to maintain both the feed rate and spindle speed parameters at their minimum levels.

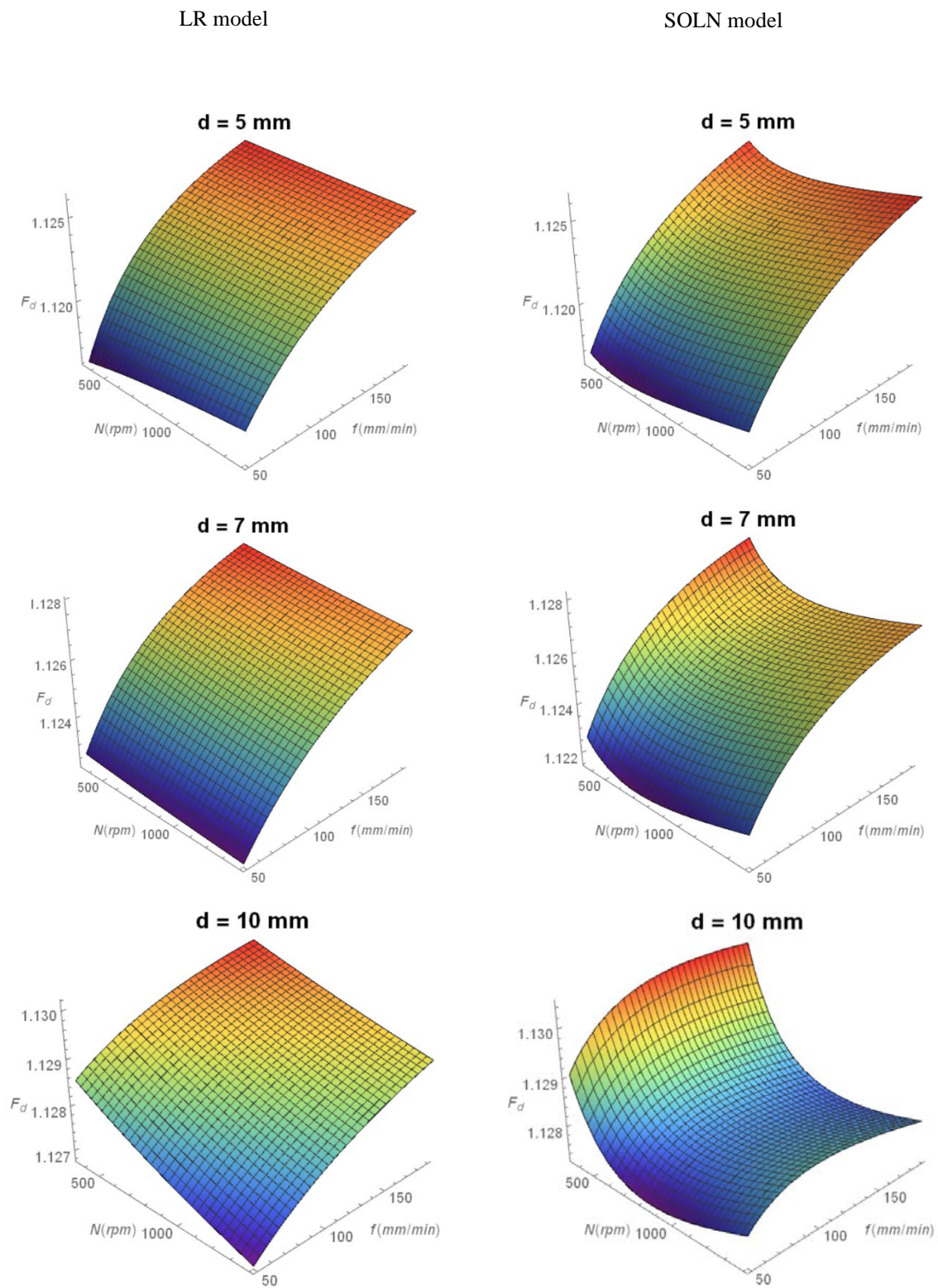


Figure 4. Comparison of LR and SOLN model regarding N, f, d design parameters and corresponding delamination factor

In contrast, when the drill diameter is set to 7, unlike the previous case ($d=5$), an increase in spindle speed in the LR model, without altering the feed rate, results in a slight decrease in the delamination factor. In the SOLN model, an initial increase in spindle speed leads to a reduction in the delamination factor, but as the spindle speed continues to rise, the delamination factor reverses its trend and begins to increase. The minimum delamination factor is observed when the feed rate is kept at its lowest, and the spindle speed is maintained at moderate levels.

Finally, when the drill diameter is adjusted to 10, the LR model predicts that the minimum delamination factor is achieved by increasing spindle speed while decreasing the feed rate. In the SOLN model, the lowest delamination factor is obtained by selecting moderate spindle speed and minimal feed rate. Notably, in the SOLN model, a decrease in spindle speed with a constant feed rate causes a sharp increase in the delamination factor, which stands out as a significant deviation compared to the other conditions.

The optimization results for the selected models using three different scenarios have been presented in Table 5. The drilling parameters f , N , and d are represented as x_1 , x_2 , and x_3 , respectively.

In the first scenario, all design parameters were set to be continuous within the search space. For the LR model, consensus was reached among the four algorithms on the values of the parameters f , N , and d , which were determined to be 50 mm/min, 355 rev/min, and 5.00 mm, respectively. Consequently, the minimum F_d value obtained was 1.11615. For the SOLN model, the optimal drilling parameters were identified as 50 mm/min, 586.4 rev/min, and 5.00 mm for f , N , and d , resulting in an F_d value of 1.11633.

In the second scenario, all design parameters were constrained to integer values within the defined search spaces. The MDE and MSA algorithms both identified an optimal F_d value of 1.11615 for the LR model, recommending drilling parameters of 50 mm/min, 355 rev/min, and 5.00 mm for f , N , and d , respectively. In contrast, the NM and RS algorithms appeared to be trapped in local minima, failing to reach the global optimum. Specifically, the NM algorithm identified the design parameters and drilling factor as $f=51$ mm/min, $N=1400$ rev/min, $d=8$ mm, with $F_d=1.12406$, while the RS algorithm determined $f=96$ mm/min, $N=1101$ rev/min, $d=5$ mm, and $F_d=1.12187$. For the SOLN model, the MDE algorithm suggested optimal drilling parameters of 50 mm/min, 586 rev/min, and 5.00 mm for f , N , and d , with an F_d value of 1.11633. The MSA algorithm provided a similar result, yielding an F_d value of 1.11634, with parameters $f=50$ mm/min, $N=617$ rev/min, and $d=5$ mm. As with the LR model, the MNM and MRS algorithms converged to local minima in the SOLN model and were unable to find the optimal solutions. In the third scenario, the design variables were chosen based on the level values established during the creation of the experimental set. As a result of the optimization using the LR model, all four optimization algorithms produced the same results as the first scenario for the design parameters f , N , d , and drilling factor F_d . In this case, the design parameters were $f = 50$ mm/min, $N = 355$ rev/min, and $d = 5$ mm, resulting in an F_d value of 1.11615. When evaluating the optimization using the SOLN model, the design parameters were found to be $f = 50$ mm/min, $N = 586.4$ rev/min, and $d = 5.00$ mm, with the corresponding delamination factor F_d found to be 1.11642 using all algorithms.

Upon evaluating all the results in Table 5, it is evident that the optimal designs obtained using the LR model are slightly superior to those obtained using the SOLN model, as anticipated. This can be attributed to the LR model's better prediction performance compared to the SOLN model. While all algorithms produce similar results to each other in scenarios 1 and 3 for LR and SOLN models, different outcomes are observed in scenario 2. Notably, MDE emerges as the most successful algorithm in this scenario.

In the referenced study [9], response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN) were used as modeling approaches, with second-order polynomial and hyperbolic tangent models identified as the most successful. However, the RSM-based model lacked essential performance evaluation stages, such as testing and validation, thereby reducing its reliability. Furthermore, neither RSM nor ANN models performance were evaluated using a boundedness check criterion to ensure that the results are meaningful in an engineering context. In the present study, both the rational and first-order logarithmic nonlinear models underwent comprehensive testing and validation, and an additional boundedness check was applied to confirm the engineering relevance of the models' maximum and minimum outputs. As a result, when comparing the present modeling approach with traditional RSM, ANN, and regression methods used in similar studies, the findings suggest a higher reliability in the obtained results.

Table 5. Results of optimization for LR and SOLN models

Model	Scenario No.	Constraints	Optimization Algorithm	Minimum F_d	Suggested Design
LR	1	$50 \leq x_1 \leq 190,$ $355 \leq x_2 \leq 1400,$ $5 \leq x_3 \leq 10$	DE	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
			NM	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
			SA	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
			RS	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
			DE	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
	2	$50 \leq x_1 \leq 190,$ $355 \leq x_2 \leq 1400,$ $5 \leq x_3 \leq 10,$ $\{x_1, x_2, x_3\} \in \text{Integers}$	NM	1.12406	$x_1 = 51, x_2 = 1400,$ $x_3 = 8$
			SA	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
			RS	1.12187	$x_1 = 96, x_2 = 1101,$ $x_3 = 5$
			DE	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
	3	$x_1 \in \{50, 108, 190\},$ $x_2 \in \{355, 710, 1400\},$ $x_3 \in \{5, 7, 10\}$	NM	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
			SA	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
			RS	1.11615	$x_1 = 50, x_2 = 355, x_3 = 5$
SOLN	1	$50 \leq x_1 \leq 190,$ $355 \leq x_2 \leq 1400,$ $5 \leq x_3 \leq 10$	DE	1.11633	$x_1 = 50, x_2 = 586.404, x_3 = 5$
			NM	1.11633	$x_1 = 50, x_2 = 586.428, x_3 = 5$
			SA	1.11633	$x_1 = 50, x_2 = 586.428, x_3 = 5$
			RS	1.11633	$x_1 = 50, x_2 = 586.428, x_3 = 5$
	2	$50 \leq x_1 \leq 190,$ $355 \leq x_2 \leq 1400,$ $5 \leq x_3 \leq 10,$ $\{x_1, x_2, x_3\} \in \text{Integers}$	DE	1.11633	$x_1 = 50, x_2 = 586, x_3 = 5$
			NM	1.12223	$x_1 = 82, x_2 = 565, x_3 = 6$
			SA	1.11634	$x_1 = 50, x_2 = 617, x_3 = 5$
			RS	1.12181	$x_1 = 50, x_2 = 959, x_3 = 7$
	3	$x_1 \in \{50, 108, 190\},$ $x_2 \in \{355, 710, 1400\},$ $x_3 \in \{5, 7, 10\}$	DE	1.11642	$x_1 = 50, x_2 = 710, x_3 = 5$
			NM	1.11642	$x_1 = 50, x_2 = 710, x_3 = 5$
			SA	1.11642	$x_1 = 50, x_2 = 710, x_3 = 5$
			RS	1.11642	$x_1 = 50, x_2 = 710, x_3 = 5$

In terms of optimization, a comparison between the present and reference studies reveals that the optimum values for feed rate and drill diameter were identified at the lowest tested levels, at 50 mm/min and 5 mm, respectively, in both studies. However, spindle speed showed variability across the algorithms applied in each study. A common finding in the literature indicates that a low feed rate and drill diameter, combined with a moderate to high spindle speed, are more favorable for minimizing the delamination factor in the drilling process [4, 8, 9].

V. CONCLUSIONS

The study focused on mathematical modelling and optimization of the drilling process parameters and delamination factor relationship of HDPE/Washingtonia fiber biocomposite materials. The research highlights the significance of optimizing process parameters such as drill diameter, feed rate, and spindle speed to improve drilling efficiency and reduce the common difficulty of delamination, which is an integral part of the structural

integrity of manufactured components. Traditional approaches with limited regression models and neglect of nonlinear effects are found to be inadequate for addressing the optimization challenges in biocomposite production. In this study, a new mathematical modelling method is proposed, which uses artificial neural networks and regression as a hybrid to model the drilling process of HDPE/Washingtonia material. With the neuro regression method, which eliminates the use of a limited number of models in modelling methods such as ANN and RSM, 14 different mathematical models were tested to express the drilling process mathematically. The best models among linear, rational, logarithmic, polynomial and trigonometric were selected based on assessment criteria such as R^2 and boundedness check. The minimum delamination factor was obtained using four stochastic optimization methods: MDE, NMM, MSA, and MRS. This enabled a comparison of the results and tested their reliability. The important results obtained in the present study are as follows:

- i. Upon investigation of the 14 models, it was found that only the LR and SOLN models fulfilled the criteria for selection in the optimization process. These models exhibited appropriate R^2 training, R^2 testing, R^2 validation values, as well as valid boundedness.
- ii. When the LR and SOLN models were compared, the LR model gave smaller F_d value for Scenario 1 and Scenario 3.
- iii. The optimum values of minimum delamination factor (F_d) and its corresponding design parameters were found as $F_d = 1.11615$, $f = 50$ mm/min, $N = 355$ rev/min and $d = 5$ mm, respectively.
- iv. To the best of our knowledge, this study is the first to utilize the neuro-regression approach for model the delamination factor in biocomposite materials.

Future research could focus on examining the effects of critical design parameters, including material thickness, drilling geometry, and tool material, on the drilling process by applying Multiple Nonlinear Neuro Regression. Such a study holds significant potential to enhance understanding of these influences. Furthermore, the mathematical modeling of the drilling process for composites commonly derived from natural materials, such as flax, kenaf, ramie, and polylactic acid (PLA), could further demonstrate the Neuro Regression method advantages over traditional methods like artificial neural networks (ANN), regression techniques, and response surface methodology (RSM). This approach could offer deeper insights into material behavior, potentially establishing Neuro Regression as a robust alternative in composite material modeling.

REFERENCES

1. Lotfi, A., Li, H., & Dao, D. V. (2019). Effect of drilling parameters on delamination and hole quality in drilling flax fiber reinforced bio-composites. In *Sustainable Design and Manufacturing 2018: Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM-18)* 5 (pp. 71-81)
2. Bharath KN, Basavarajappa S (2016) Applications of biocomposite materials based on natural fibers from renewable resources: a review. *Sci Eng Compos Mater* 23(2):123–133. <https://doi.org/10.1515/secm-2014-0088>
3. Nassar MMA, Alzebdeh KI, Alsafy MMM, Piya S (2023) Optimizing drilling parameters for minimizing delamination in polypropylene-date palm fiber bio-composite materials. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 45(11). <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04528-9>
4. Belaadi A, Boumaaza M, Amroune S, Bouchak M (2020) Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites. *Int J Adv Manuf Technol* 111(7):2073–2094. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06217-6>
5. Benyettou R, Amroune S, Slamani M, KILIÇ A (2023) Investigation of machinability of biocomposites: modeling and ANN optimization. *Acad J Manuf Eng* 21(1).

6. Geng D, Liu Y, Shao Z, Lu Z, Cai J, Li X, Zhang D (2019) Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: a review. *Compos Struct* 216:168–186. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>
7. AL-Oqla FM (2023) Manufacturing and delamination factor optimization of cellulosic paper/epoxy composites towards proper design for sustainability. *Int J Interact Des Manuf* 17(2):765–773. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00980-4>
8. Adda B, Belaadi A, Boumaaza M, Bourchak M (2021) Experimental investigation and optimization of delamination factors in the drilling of jute fiber–reinforced polymer biocomposites with multiple estimators. *Int J Adv Manuf Technol* 116(9):2885–2907. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07628-9>
9. Belaadi A, Boumaaza M, Alshahrani H, Bourchak M, Jawaid M (2022) Drilling performance prediction of HDPE/Washingtonia fiber biocomposite using RSM, ANN, and GA optimization. *Int J Adv Manuf Technol* 123(5–6):1543–1564. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10248-6>
10. Tsao CC, Hocheng H (2004) Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *Int J Mach Tools Manuf* 44(10):1085–1090. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2004.02.019>
11. Ameer MF, Habak M, Kenane M, Aouici H, Cheikh M (2017) Machinability analysis of dry drilling of carbon/epoxy composites: cases of exit delamination and cylindricity error. *Int J Adv Manuf Technol* 88(9–12):2557–2571. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8967-8>
12. Wang Q, Jia X (2021) Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites. *Int J Adv Manuf Technol* 117(11):3487–3502. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07918-2>
13. Başar G, Kırılı Akın H, Kahraman F (2020) Modelling and analysis of thrust force in drilling of nanocomposites using response surface methodology. *Gazi Univ J Sci Part C Des Technol* 8(2):293–305. <https://doi.org/10.29109/gujsc.648188>
14. Fedai Y, Basar G, Kirli Akin H (2022) Multi-response optimization in drilling of MWCNTs reinforced GFRP using grey relational analysis. *Tech Vjesnik* 29(3):742–751
15. Der O, Ordu M, Basar G (2024) Optimization of cutting parameters in manufacturing of polymeric materials for flexible two-phase thermal management systems. *Mater Test* 66(10):1700–1719
16. Kaushik D, Singh I (2024) Analysis of drilling behavior of flax/PP composites. *Mater Manuf Process* 39(8):1061–1073
17. Aydin L, Oterkus S, Artem HS (2020) Designing engineering structures using stochastic optimization methods. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9780429289576>
18. Polatoğlu İ, Aydın L, Nevruz BÇ, Özer S (2020) A novel approach for the optimal design of a biosensor. *Anal Lett* 53(9):1428–1445. <https://doi.org/10.1080/00032719.2019.1709075>
19. Aydin L, Artem HS (2011) Comparison of stochastic search optimization algorithms for the laminated composites under mechanical and hygrothermal loadings. *J Reinf Plast Compos* 30(14):1197–1212. <https://doi.org/10.1177/0731684411415138>
20. Savran M, Aydin L, Ayaz A, Uslu T (2024) A new strategy for manufacturing, modeling, and optimization of 3D printed polylactide based on multiple nonlinear neuro regression analysis and stochastic optimization methods. *Proc Inst Mech Eng Part E J Process Mech Eng*. <https://doi.org/10.1177/09544089241272909>
21. Savran M, Aydin L (2023) Natural frequency and buckling optimization considering weight saving for hybrid graphite/epoxy-sitka spruce and graphite-flax/epoxy laminated composite plates using stochastic methods. *Mech Adv Mater Struct* 30(13):2637–2650. <https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2061656>
22. Savran M, Sayi H, Aydin L (2020) *Mathematica and optimization*. In: *Designing engineering structures using stochastic optimization methods*, 1st Edition, CRC Press, Boca Raton, pp 24–43.

APPENDICES

APPENDIX A. Full form of the fitted models in Table 4.

Model Name	Nomenclature	Models
Multiple Linear	L	$Y = 1.11016 + 0.000042839x_1 - 1.13552 \times 10^{-6}x_2 + 0.00152511x_3$
Multiple Linear Rational	LR	$Y = (-519.377 + 12.8935x_1 + 0.497835x_2 + 132.416x_3) / (-440.664 + 11.3939x_1 + 0.443951x_2 + 115.43x_3)$
Second Order Multiple Nonlinear	SON	$Y = 1.09409 + 0.00018213x_1 - 2.51266 \times 10^{(-7)}x_1^2 - 5.1393 \times 10^{(-6)}x_2 - 4.27754 \times 10^{(-9)}x_1x_2 + 4.26949 \times 10^{(-9)}x_2^2 + 0.00445545x_3 - 0.0000114426x_1x_3 - 3.24234 \times 10^{(-7)}x_2x_3 - 0.00010131x_3^2$
Second Order Multiple Nonlinear Rational	SONR	$Y = (-1.58142 \times 10^8 + 911539x_1 - 7172.74x_1^2 - 8670.79x_2 + 4.48778x_2^2 + 5.59348 \times 10^7x_3 + 23264.3x_1x_3 + 452.799x_2x_3 - 4.40876 \times 10^6x_3^2) / (-1.38915 \times 10^8 + 799876x_1 - 6353.56x_1^2 - 7732.93x_2 + 3.98358x_2^2 + 4.94452 \times 10^7x_3 + 21365x_1x_3 + 404.802x_2x_3 - 3.90673 \times 10^6x_3^2)$
Third Order Multiple Nonlinear	TON	$Y = 1.02447 + 0.000762679x_1 - 3.57252 \times 10^{(-6)}x_1^2 + 8.54747 \times 10^{(-9)}x_1^3 + 0.0000635067x_2 - 1.04997 \times 10^{(-7)}x_1x_2 + 2.82805 \times 10^{(-11)}x_1^2x_2 - 6.42632 \times 10^{(-8)}x_2^2 + 4.53921 \times 10^{(-11)}x_1x_2^2 + 1.91246 \times 10^{(-11)}x_3^2 + 0.0205229x_3 - 0.0000683518x_1x_3 + 4.30151 \times 10^{(-8)}x_1^2x_3 - 3.38983 \times 10^{(-6)}x_2x_3 + 1.26738 \times 10^{(-9)}x_1x_2x_3 + 2.46618 \times 10^{(-9)}x_2^2x_3 - 0.00181595x_3^2 + 3.05343 \times 10^{(-6)}x_1x_3^2 - 1.10434 \times 10^{(-7)}x_2x_3^2 + 0.0000678489x_3^3$
Fourth Order Multiple Nonlinear	FON	$Y = 0.980295 + 0.000986753x_1 - 4.14279 \times 10^{-6}x_1^2 - 9.26588 \times 10^{-9}x_1^3 + 6.49449 \times 10^{-11}x_1^4 + 0.000067316x_2 - 8.16945 \times 10^{-8}x_1x_2 + 4.338 \times 10^{-11}x_1^2x_2 + 7.22689 \times 10^{-12}x_1^3x_2 - 7.83772 \times 10^{-8}x_2^2 - 9.01056 \times 10^{-11}x_1x_2^2 - 5.98033 \times 10^{-13}x_1^2x_2^2 - 7.90162 \times 10^{-12}x_2^3 + 3.37408 \times 10^{-14}x_1x_2^3 + 3.19808 \times 10^{-14}x_2^4 + 0.0278606x_3 - 8.91857 \times 10^{-6}x_1x_3 - 1.88944 \times 10^{-7}x_1^2x_3 + 7.90893 \times 10^{-10}x_1^3x_3 + 5.40496 \times 10^{-6}x_2x_3 + 9.39881 \times 10^{-9}x_1x_2x_3 - 2.14474 \times 10^{-10}x_1^2x_2x_3 - 3.44292 \times 10^{-9}x_2^2x_3 + 3.12031 \times 10^{-11}x_1x_2^2x_3 - 3.91792 \times 10^{-12}x_2^3x_3 - 0.00176114x_3^2 - 4.23002 \times 10^{-6}x_1x_3^2 + 1.08498 \times 10^{-8}x_1^2x_3^2 - 2.17128 \times 10^{-8}x_2x_3^2 - 1.08569 \times 10^{-9}x_1x_2x_3^2 + 8.08286 \times 10^{-10}x_2^2x_3^2 - 0.000152162x_3^3 + 3.13967 \times 10^{-7}x_1x_3^3 - 7.49399 \times 10^{-8}x_2x_3^3 + 0.0000163266x_3^4$
Hybrid Model	HM	$Y = (-61.9492 + 17.7266 \log(x_1) - 1.43955 \log(x_1)^2 + 1.28699 \log(x_2) - 0.964652 \log(x_1) \log(x_2) + 0.106515 \log(x_2)^2 + 27.2315 \log(x_3) + 0.133602 \log(x_1) \log(x_3) + 0.696741 \log(x_2) \log(x_3) - 8.96799 \log(x_3)^2) / (-54.566 + 15.639 \log(x_1) - 1.2737 \log(x_1)^2 + 1.14463 \log(x_2) - 0.855412 \log(x_1) \log(x_2) + 0.0938038 \log(x_2)^2 + 23.9843 \log(x_3) + 0.14251 \log(x_1) \log(x_3) + 0.620307 \log(x_2) \log(x_3) - 7.94651 \log(x_3)^2)$
Second Order Trigonometric Nonlinear	SOTN	$Y = 0.177446 + 0.18046 \cos(x_1) + 0.189259 \cos(x_1)^2 + 0.00176386 \cos(x_2) - 0.00287373 \cos(x_1) \cos(x_2) + 0.236288 \cos(x_2)^2 + 0.0644773 \cos(x_3) - 0.00208998 \cos(x_1) \cos(x_3) + 0.00121105 \cos(x_2) \cos(x_3) + 0.268892 \cos(x_3)^2 + 0.152971 \sin(x_1) - 0.154314 \cos(x_1) \sin(x_1) - 0.00234474 \cos(x_2) \sin(x_1) + 0.00201114 \cos(x_3) \sin(x_1) + 0.214092 \sin(x_1)^2 - 0.069922 \sin(x_2) - 0.00734882 \cos(x_1) \sin(x_2) - 0.171164 \cos(x_2) \sin(x_2) - 0.00092947 \cos(x_3) \sin(x_2) - 0.00431512 \sin(x_1) \sin(x_2) + 0.0766015 \sin(x_2)^2 - 0.0964769 \sin(x_3) + 0.00272514 \cos(x_1) \sin(x_3) - 0.000070534 \cos(x_2) \sin(x_3) + 0.173623 \cos(x_3) \sin(x_3) - 0.00143825 \sin(x_1) \sin(x_3) + 0.000916233 \sin(x_2) \sin(x_3) + 0.279725 \sin(x_3)^2$
Second Order Trigonometric Nonlinear Rational	SOTNR	$Y = (1.02416 + 2.05291 \cos(x_1) + 1.01071 \cos(x_1)^2 + 2.02437 \cos(x_2) + 2.00063 \cos(x_1) \cos(x_2) + 1.02648 \cos(x_2)^2 + 2.02522 \cos(x_3) + 1.99839 \cos(x_1) \cos(x_3) + 2.0043 \cos(x_2) \cos(x_3) + 1.01234 \cos(x_3)^2 + 2.04227 \sin(x_1) + 2.00181 \cos(x_1) \sin(x_1) + 2.02175 \cos(x_2) \sin(x_1) + 2.03232 \cos(x_3) \sin(x_1) + 1.01345 \sin(x_1)^2 + 2.01017 \sin(x_2) + 2.02191 \cos(x_1) \sin(x_2) + 2.00416 \cos(x_2) \sin(x_2) + 1.95915 \cos(x_3) \sin(x_2) +$

		$1.98707 \sin(x_1) \sin(x_2) + 0.997679 \sin(x_2)^2 + 2.00457 \sin(x_3) + 2.00791 \cos(x_1) \sin(x_3) + 1.9508 \cos(x_2) \sin(x_3) + 2.03292 \cos(x_3) \sin(x_3) + 1.99345 \sin(x_1) \sin(x_3) + 1.97464 \sin(x_2) \sin(x_3) + 1.01182 \sin(x_3)^2 / (0.982162 + 1.96055 \cos(x_1) + 0.991999 \cos(x_1)^2 + 1.97253 \cos(x_2) + 1.99801 \cos(x_1) \cos(x_2) + 0.976149 \cos(x_2)^2 + 1.96414 \cos(x_3) + 1.99655 \cos(x_1) \cos(x_3) + 1.99384 \cos(x_2) \cos(x_3) + 0.9906 \cos(x_3)^2 + 1.9693 \sin(x_1) + 1.99877 \cos(x_1) \sin(x_1) + 1.97905 \cos(x_2) \sin(x_1) + 1.96071 \cos(x_3) \sin(x_1) + 0.990163 \sin(x_1)^2 + 1.97365 \sin(x_2) + 1.96884 \cos(x_1) \sin(x_2) + 1.98924 \cos(x_2) \sin(x_2) + 2.04994 \cos(x_3) \sin(x_2) + 2.00482 \sin(x_1) \sin(x_2) + 1.00601 \sin(x_2)^2 + 1.97735 \sin(x_3) + 1.98231 \cos(x_1) \sin(x_3) + 2.05264 \cos(x_2) \sin(x_3) + 1.97151 \cos(x_3) \sin(x_3) + 1.99898 \sin(x_1) \sin(x_3) + 2.03598 \sin(x_2) \sin(x_3) + 0.991562 \sin(x_3)^2)$
Third Order Multiple Nonlinear Rational	TONR	$Y = (1.00001 + 3.00308x_1 + 3.16091x_1^2 + 1.08627x_1^3 + 3.00681x_2 + 7.04699x_1x_2 + 3.77539x_1^2x_2 + 0.277339x_2^2 + 5.3307x_1x_2^2 - 0.0076471x_2^3 + 3.00036x_3 + 6.07393x_1x_3 + 3.2211x_1^2x_3 + 6.22103x_2x_3 + 6.99652x_1x_2x_3 + 3.6243x_2^2x_3 + 3.00257x_3^2 + 3.12472x_1x_3^2 + 3.34743x_2x_3^2 + 1.00205x_3^3) / (0.999993 + 2.99656x_1 + 2.82165x_1^2 + 0.948349x_1^3 + 2.99249x_2 + 4.86762x_1x_2 + 3.371x_1^2x_2 + 6.09581x_2^2 + 4.72851x_1x_2^2 - 0.00782694x_2^3 + 2.99959x_3 + 5.91753x_1x_3 + 2.76832x_1^2x_3 + 5.75612x_2x_3 + 5.23857x_1x_2x_3 + 2.77635x_2^2x_3 + 2.99713x_3^2 + 2.86071x_1x_3^2 + 2.6186x_2x_3^2 + 0.99771x_3^3)$
First Order Logarithmic Multiple Nonlinear	FOLN	$Y = 1.09039 + 0.0044644 \log(x_1) - 0.000956056 \log(x_2) + 0.010563 \log(x_3)$
First Order Logarithmic Multiple Nonlinear Rational	FOLNR	$Y = (-184689. + 34427.7 \log(x_1) + 11678.9 \log(x_2) + 4916.17 \log(x_3)) / (-162874. + 30430.4 \log(x_1) + 10417.7 \log(x_2) + 3967.76 \log(x_3))$
Second Order Logarithmic Multiple Nonlinear	SOLN	$Y = 1.04542 + 0.0349915 \log(x_1) - 0.00113135 \log(x_1)^2 - 0.0236313 \log(x_2) - 0.000607217 \log(x_1) \log(x_2) + 0.0023575 \log(x_2)^2 + 0.0612321 \log(x_3) - 0.00870958 \log(x_1) \log(x_3) - 0.00251446 \log(x_2) \log(x_3) + 0.00131744 \log(x_3)^2$
Second Order Logarithmic Multiple Nonlinear Rational	SOLNR	$Y = (-61.9492 + 17.7266 \log(x_1) - 1.43955 \log(x_1)^2 + 1.28699 \log(x_2) - 0.964652 \log(x_1) \log(x_2) + 0.106515 \log(x_2)^2 + 27.2315 \log(x_3) + 0.133602 \log(x_1) \log(x_3) + 0.696741 \log(x_2) \log(x_3) - 8.96799 \log(x_3)^2) / (-54.566 + 15.639 \log(x_1) - 1.2737 \log(x_1)^2 + 1.14463 \log(x_2) - 0.855412 \log(x_1) \log(x_2) + 0.0938038 \log(x_2)^2 + 23.9843 \log(x_3) + 0.14251 \log(x_1) \log(x_3) + 0.620307 \log(x_2) \log(x_3) - 7.94651 \log(x_3)^2)$



Araştırma Makalesi

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

İnceltilmiş uçlu prefabrik kirişlerin yönetmelikler ve yeni yaklaşımlara göre tasarımının karşılaştırılması

Hacer Tülen^{a,*}, Hilal Meydanlı Atalay^a

^aKocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, 41001, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 10 Temmuz 2024

Düzeltilme 7 Ekim 2024

Kabul 28 Kasım 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Prefabrik yapı

İnceltilmiş uçlu kiriş

Çubuk analojisi

Beton prefabrikasyon el kitabı

PCI tasarım el kitabı

ÖZET

Prefabrik yapılar fabrikada üretilen yapı elemanlarının şantiyede birleştirilmesi ile oluşmaktadır ve bağlantılar, yapısal sistemin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Bağlantı bölgesi, sadece elemanların birleştiği alanla sınırlı değildir, kuvvet aktarımı ve gerilme dağılımlarının gerçekleştiği her iki elemana bitişik bölgelerin tasarımı ve detaylandırmasından etkilenmektedir. Prefabrik taşıyıcı sistemlerde kolon-kiriş bağlantı bölgesinde kolon yüzeylerinde mevcut kısa konsollar ile kiriş birleşimlerinin yapılabilmesi için eleman uç kesitleri küçültülmekte ve kiriş uçları inceltildikçe bu bölgede kesme kuvveti artmaktadır. Bu sebeple prefabrik bir çerçeve sistemde kolon-kiriş bağlantı bölgesinde oluşan kuvvetlerin ve gerilmelerin izlediği yola göre elemanların birleşime bitişik bölgeleri tasarlanmalıdır. Sunulan çalışmada yayılı yük etkisindeki inceltilmiş uçlu prefabrik kirişin yürürlükteki yönetmelikler ve yeni yaklaşımlara göre tasarım adımları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda örnek olarak seçilen inceltilmiş uçlu prefabrik kiriş bağlantı bölgesi Beton Prefabrikasyon El Kitabı, Amerikan Prefabrik Beton Enstitüsü'nün (PCI Tasarım El Kitabı) tasarım el kitabı ve çubuk analojisi yöntemi esas alınarak tasarlanmıştır. Analiz sonuçları karşılaştırıldığında, çubuk analojisi yöntemine göre belirlenen toplam donatı alanının diğer yaklaşımlara göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bununla birlikte PCI Tasarım El Kitabı kriterlerine göre belirlenen toplam donatı alanının, Beton Prefabrikasyon El Kitabı'na göre belirlenen toplam donatı alanından daha fazla olduğu ve bu nedenle güvenli tarafta kaldığı tespit edilmiştir.

Comparison on the design of dapped-end precast beams according to design codes and new approaches

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 July 2024

Received in revised form 7 October 2024

Accepted 28 November 2024

Available online

Keywords:

Prefabricated structure

Dapped-end beam

Strut and tie method

Concrete prefabrication handbook

PCI design handbook

ABSTRACT

The prefabricated structures are constructed by assembling the factory manufactured structural members at the construction site and the connections in these structures constitute an important part of the structural system. In the beam-column connection zone in prefabricated structural systems, the beam end section is reduced in order to make the beam connection with the short cantilever on the column surface. The shear force increases in this region as the beam ends are thinned and this should be considered in the design. In the present study, the design steps of the dapped-end precast beam under distributed load are compared according to the current regulations and new approaches. In this context, the dapped-end precast beam connection area selected as an example was designed based on the Concrete Prefabrication Handbook, the design handbook of the American Precast Concrete Institute (PCI Design Handbook) and the strut-and-tie method. When the analysis results were compared, it was seen that the total reinforcement area determined according to the strut-and-tie method was greater than the other approaches. However, it was determined that the total reinforcement area determined according to the PCI Design Handbook criteria was greater than the total reinforcement area determined according to the Concrete Prefabrication Handbook and therefore remained on the safe side.

I. GİRİŞ

Prefabrikasyon önceden imal edilen elemanlarla yapım anlamına gelmekte olup genel olarak yapıyı oluşturan eleman ve bileşenlerin inşaat sahasında birleştirilmesi esasına dayanan bir yapım şekli olarak ifade edilebilir.

*Sorumlu yazar. Tel.: +90-505-550-9529; e-mail:hacer.tulen@kocaeli.edu.tr

Prefabrike yapıların kullanım alanları sanayi yapıları, konutlar, alt yapı projeleri ve mimari uygulamalar olarak karşımıza çıkmaktadır ve 20. yüzyılın son dönemlerinde prefabrike yapı endüstrisi dünyada oldukça popüler hale gelmiştir [1]. Prefabrike yapılar, yerinde dökme yapılara göre çeşitli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar yapımda hız, genel olarak yapı maliyetinde azalmalar, mimari tasarımda esneklik, kaliteli eleman üretimi ve enerji verimliliği olarak ifade edilebilir. Prefabrike yapılarda taşıyıcı sistem elemanlarının bağlantı detayları yapısal davranış üzerinde etkili olduğundan prefabrike elemanların birleşim bölgesinde kalan kısımlarının tasarımı önemlidir. Birleşim bölgeleri yükleri diğer elemanlara en kısa yoldan ve en güvenli şekilde aktarmalıdır. Prefabrike döşeme ve kirişlerin birleşim bölgeleri oluşturulurken, kolonlarda yer alan kısa konsollarla birleşimde konsolun üst yüzeyine kiriş ya da döşemenin üst yüzeyinin yerleşebilmesi için kesitler küçültülmektedir. Prefabrike yapıların birleşim bölgelerinde tek parça davranışı oluşturmak için önemli olan bu kesitlere sahip elemanlar inceltilmiş uçlu kirişler olarak adlandırılmaktadır [2]. Sunulan bu çalışmada inceltilmiş uçlu kirişlerde meydana gelen hasarlar ve hasar durumlarını etkileyen parametreleri içeren mevcut çalışmalar özetlenmiştir. Bununla birlikte inceltilmiş uçlu bir kirişte yayılı yük etkisinde oluşan gerilme dağılımı çubuk analogisi yöntemi (strut-and-tie model (STM)) kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın devamında, Beton Prefabrikasyon El Kitabı [3] ve PCI Tasarım El Kitabı'nda [4] yer alan tasarım kriterleri dikkate alınarak inceltilmiş uçlu kirişin bağlantı bölgesi tasarımı yapılmış ve üç tasarım yaklaşımının sonuçları karşılaştırılmıştır.

II. İNCELTİLMİŞ UÇLU KİRİŞLER

İnceltilmiş uçlu kirişler köprü kirişlerinde ve prefabrik yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Kiriş-kolon birleşimleri inşa edilirken kısa konsolları gizlemek için kiriş kesitleri inceltilmektedir. Uygulama sonucunda kirişin üst yüzeyi belirli bir seviyede tutulur ve deprem etkisi altında kat seviyelerinde diyaframlar oluşturmak için kolaylık sağlanır. İnceltilmiş uç bölgesinde kesme kuvveti kritiktir ve boyutlandırmada bu durum göz önüne alınmaktadır [5].

2.1 İnceltilmiş uçlu kirişlerin davranışı

Literatürde inceltilmiş uçlu kirişlerde oluşması beklenen hasar durumlarını ve hasarları minimum seviyede tutmak için yapılması gerekenleri ele alan birçok analitik ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Analitik çalışmalar incelendiğinde, inceltilmiş uçlu kirişler için kafes-kiriş analogisini içeren çalışmaların daha yaygın olduğu görülmektedir.

Mata-Falcón ve ark. [6] inceltilmiş uçlu kirişlerde oluşan hasar tiplerini incelemişler ve hesabı için STM modelini önermişlerdir. Önerilen modelin kontrolü için 15 farklı donatı konfigürasyonu ile 28 adet kiriş testi yapmışlardır. Testler sonucunda donatı miktarı değişiminin, yatay ve düşey donatı dağılımının davranış üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Tek bir bölgede yüksek miktarda donatıya sahip kirişlerde betonun ezilmesi ile hasar oluşmaktadır. STM geometrisi belirlenirken üst bölgede yer alan askı donatısının düğüm bölgesinin davranışını etkin bir biçimde yönettiği belirlenmiştir.

Aswin ve ark. [7] tarafından yapılan çalışmada inceltilmiş uçlu kirişlerde süreksizlikten dolayı oluşan gerilmeler ve bu gerilmelere bağlı hasarlar incelenmiştir. Dört farklı kiriş modeliyle üç parametrenin davranış üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu parametreler; inceltilmiş uçta bulunan donatı miktarı, eğilme donatısı miktarı ve uç kısımdaki beton tipinin etkisidir. Kirişlerin yük kapasiteleri belirlenirken deneysel sonuçlar, Amerikan tasarım

yönetmeliği kriterleri, STM ve Vector-2 programından alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda gerilmelerin ve hasarın yoğunlaştığı bölgelerin uç bölgeler olduğu raporlanmıştır. Eğilme donatısının artışı yük kapasitesini %46,7, uç bölgedeki donatı artışı %62,2 ve uç bölgedeki betonun kompozit bileşimlere sahip çimento karışımı kullanıldığında yük kapasitesinde %51,9 oranında artış olduğu sonucuna ulaşımlardır. Aswin ve ark. [8] tarafından yapılan diğer bir çalışmada deneysel olarak test edilmiş 24 adet inceltilmiş uçlu kirişin göçme yükünün farklı yönetmeliklere göre belirlenmesi amaçlanmıştır. ACI-318-08, Eurocode-2, BS-8110 ve bunların yanında PCI Tasarım El Kitabı dikkate alınarak nihai yük taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında kirişlerin yük taşıma kapasitesine beton basınç dayanımı, inceltilmiş ucun boyutları, kesme açıklığının etkili derinliğe oranı (a/d), etriye tipi, boyuna donatının formu, inceltilmiş uçtaki donatı ve askı donatısının miktarının etkisi incelenmiştir. Beton basınç dayanımı ve askı donatısı miktarı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığı belirtilmiş, deneysel ve analitik sonuçlar kıyaslandığında PCI ve ACI-318-08'e göre belirlenen yüklerin daha yakın değerler olduğu belirlenmiştir.

Wang ve Guo [9] inceltilmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımlarını incelemek amacıyla 22 adet kirişi test etmişlerdir. Çalışmada incelenen parametreler, inceltilmiş uç bölgesinin yüksekliği, etriye ve eğilme donatısının konfigürasyonudur. Testler sonucunda eğik etriye veya ana donatının pilye şeklinde düzenlenmesinin kesme kapasitesinde düşey etriyeye kıyasla daha etkin olduğu belirlenmiştir. İlk kesme çatlağının göçme yükünün %13-45 seviye aralığında oluştuğu raporlanmıştır. İnceltilmiş ucun yüksekliğinin kesme kapasitesini önemli ölçüde etkilediği ve kesit yüksekliğinin $0,45h$ değerinden büyük olması gerektiği belirtilmiştir.

Mohammed ve ark. [10] 27 adet inceltilmiş uçlu kiriş statik yük etkisinde test edilmiştir. Çalışmada askı donatısının ve diyagonal donatının davranışa etkisi bununla birlikte uç kısımda çimento esaslı kompozitlerin (ECC) kullanılmasının etkileri incelenmiştir. İlk çatlağın her zaman inceltilmiş ucun köşesinden oluşmaya başladığı gözlenmiş, oluşan çapraz çatlaklar için diyagonal donatının kullanımının askı donatısı kullanımından daha etkin olduğu, nihai yükün diyagonal donatı kullanımında %40,79 oranında artış gösterdiği raporlanmıştır. Askı donatısı olmadan diyagonal donatıyla düzenlenen konfigürasyonda inceltilmemiş bölgenin alt kısmında ciddi hasar oluşmuştur. Kiriş uçlarında çimento esaslı kompozitlerin kullanılmasının yapı performansını olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir.

Abdal-Moniem ve ark. [11] tarafından yapılan çalışmada 29 adet inceltilmiş uçlu kiriş için ABAQUS programı kullanarak iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak analizler yapılmış ve analiz sonuçlarını literatürde yer alan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen parametreler; kesme açıklığı/derinlik oranı (a/d), uzunluk oranı ve derinlik oranıdır. Kirişler, beton basınç dayanımına göre iki ana gruba ayrılarak incelendiğinde a/d oranı azaldıkça hem nihai dayanımın hem de başlangıç rijitliğinin arttığı gözlenmiştir. İnceltilmiş ucun derinliğinin kiriş derinliğine oranı arttıkça kesme çatlağına karşı direnç artmakta ve bu oran $0,45$ 'ten küçük olduğunda kesme çatlakları uç kısımda sonlanmaktadır. Uç kısmın uzunluğunun kirişin inceltilmemiş kısmının uzunluğuna oranının a/d oranıyla benzer bir davranış gösterdiği raporlanmıştır.

Abdul-Jawad [12] inceltilmiş uçlu kirişlerin eğilme davranışını incelemiştir. Kirişlerin doğrusal olmayan analizi ABAQUS programıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak üç adet kiriş için analizler yapılmış ve analitik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Parametrik çalışmada kesme açıklığının/derinliğe oranı (a/d), beton basınç dayanımı ve uç bölgedeki ana donatının miktarının davranışa etkisi incelenmiştir. a/d oranı azaldıkça

yük taşıma kapasitesinin arttığı, beton basınç dayanımı arttıkça taşınan yükün arttığı, uç bölgedeki ana donatı miktarı artıkça kirişin eğilme dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Ahmad ve ark. [13] varsayılan dış yükler için dört adet kirişi, derinliğine göre iki ayrı grup olarak düzenlenmişlerdir. Çalışmada kirişler monotonik yükleme etkisinde test edilmiş ve göçme yükleri belirlenmiştir. Deneysel sonucunda belirlenen göçme yükleri çubuk analojisiyle belirlenen analitik yükler ile karşılaştırılmıştır. Kiriş derinliği daha yüksek olan grupta test sonucunda elde edilen yükler analitik olarak belirlenen yüklere göre daha fazladır. Fakat derinliği daha az olan kirişlerde bu durumun tam tersi ortaya çıkmıştır. İncelenmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımını etkileyen tek faktörün kiriş derinliği olmadığı ancak kesme açıklığının derinliğe oranının davranış üzerinde çok etkili olduğu ifade edilmiştir.

Özkılıç ve ark. [5] incelenmiş uçlu aşıkların kesme kapasitesindeki değişimini deneysel olarak incelemiş ve sonuçları sonlu eleman modeliyle karşılaştırmışlardır. Kirişlerden biri TS 9967'ye uygun olarak tasarlanmıştır. İncelenen diğer kirişin ise askı donatısı miktarı TS 9967'de önerilen donatı miktarından daha az olacak şekilde düzenlenmiştir. Yönetmeliğe uygun olarak üretilen kirişin kesme kapasitesinin diğer kirişe göre %9 fazla olduğu belirlenmiştir. Sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar kıyaslandığında değerlerin birbirlerine yakın olduğu raporlanmıştır.

Taher [14] çalışmasında incelenmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımını arttırmak için kullanılan farklı güçlendirme tekniklerini deneysel olarak incelemiştir. Çelik köşebentler, eğik çelik cıvatalar, çelik levhalar ve karbon fiber kaplamalar güçlendirme için kullanılan elemanlardır. 52 adet kiriş 4 farklı grup şeklinde test edilmiştir. Gruplar farklı donatı detayları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Çatlağın genellikle incelenmiş uç bölgesinin kirişle birleştiği bölgede oluştuğu ifade edilmiştir. Tüm güçlendirme yöntemlerinin kesme kapasitesini arttırdığı fakat güçlendirme yöntemleri içinde çelik bulonların en iyi sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

Nagy-György ve ark. [15] incelenmiş uçlu kirişlerin karbon elyaf takviyeli polimerler (CFRP) aracılığıyla güçlendirilmesi üzerine deneysel ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. Çalışma incelenmiş uçlu prekast bir beton kirişte montaj sırasındaki hatalardan kaynaklı diyagonal çatlaklar oluşması ile başlatılmıştır. Çalışmanın deneysel aşamasında bir referans numune, iki adet yüksek dayanımlı CFRP plakalarıyla güçlendirilmiş kiriş ve bir adet yüksek elastisite modülüne sahip CFRP levhalarla güçlendirilmiş kiriş test edilmiştir. Testler sonucunda CFRP plakalarıyla güçlendirilmiş kirişlerin referans numuneye göre yük taşıma kapasitesinde artış görüldüğü ifade edilmiştir. Bununla birlikte levhalarla güçlendirilen numunede kapasite artışı gözlenmemiştir. Kirişlerin sonlu eleman modelleri ATENA yazılımında oluşturulmuştur. Analizler sonucunda CFRP plakalarıyla kiriş arasındaki bağlantının incelenmiş uç bölgesinde kopma ihtimalinin yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Jirawattanasomkul ve ark. [16] incelenmiş uçlu ve öngerilmeli köprü kirişlerini incelemiştir. Kirişlerde mevcut hasarların ve muhtemel kırılma durumlarının belirlenmesi için 13 farklı kiriş için sonlu eleman analizleri yapmışlardır. Etkisi incelenen parametreleri incelenmiş bölgede yer alan donatı miktarı ve öngerilme kuvvetlerinin kaybı olarak belirlemişlerdir. Analizler sonucunda kirişin incelenmiş uç bölgesinde meydana gelen diyagonal çatlağın yetersiz askı donatısı ve öngerilme kuvvetinin kaybı sonucu oluştuğu belirtilmiştir. PCI (2010) tarafından önerilen donatı düzeninin önemini vurgulamışlardır.

Moreno-Martínez ve Meli [17] mevcut incelenmiş uçlu kirişlerin servis yükleri ve nihai dayanım açısından performansını değerlendirmek ve incelenmiş uçta oluşan çatlak performansını arttıracak çözümlerin belirlenmesi

için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Dört adet numuneyi düşey yükler altında test etmişlerdir. İlk numune PCI Tasarım El Kitabı kriterlerine göre tasarlanmıştır. İkinci numuneye ardgerilme uygulanmıştır. Üçüncü numunede askı donatılarının yerine çapraz çubuklar kullanılmış ve son numunede hem çapraz çubuklar hem de ardgerme kullanılmıştır. Deneysel sonuçta ardgerme kuvveti uygulanan numunenin çatlak kontrolü açısından en iyi davranışı gösterdiği raporlanmıştır.

Desnerck ve arkadaşları [18] inceltirilmiş uçlu kirişlerin tasarımında yer alan takviye donatılarının katkısını belirlemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada referans numunesi, diyagonal donatı içermeyen kiriş numunesi, U şekilli donatının kullanılmadığı numune ve kesme donatılarının azaltıldığı kiriş numunesi olarak 4 farklı durum göz önüne alınmıştır. Kesme donatılarının azaltıldığı kiriş dışında diğer kirişlerde kiriş ucunda kırılmalar gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçta takviye donatılarının kullanılmaması durumunda referans numunesine göre taşıma kapasitesinin yaklaşık %40 daha az olduğu belirtilmiştir.

Özkılıç ve ark. [19] inceltirilmiş uçlu aşıkların çelik lifler kullanarak kesme kapasitesini arttırmayı hedeflemişlerdir. Ana değişkenler kullanılan çelik lifler ve liflerin en-boy oranlarıdır. İnceltirilmiş uçlu aşıkların kirişlerini hem deneysel hem de analitik olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar referans numune ve 2 farklı çelik lif içeren 3 gruptan oluşmaktadır. Çalışmanın analitik kısmı Abaqus programıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerde çelik lif içeren betonun sadece kirişin inceltirilmiş bölgesinde ve hem inceltirilmiş bölgede hem de inceltirilmiş bölge ile kirişin birleştiği kısımda kullanılması durumu incelenmiştir ve optimum çelik içeriğini belirlemek amaçlanmıştır. Çelik lif kullanımının kesme kapasitesini 1.53 kat arttırdığı ve enerji tüketimine olumlu katkı sağladığı raporlanmıştır.

Aswin ve ark. [20] inceltirilmiş uçlu kirişlerde kullanılan ana donatılarının her birinin yapısal performans üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı konfigürasyona sahip 8 adet kiriş test edilmiştir. Referans numunesi PCI kriterlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Analizler sonucunda performansı etkileyen en önemli donatının inceltirilmiş kısımda yer alan eğilme donatısı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte diyagonal donatıların düşey askı donatılarından çok daha efektif olduğu ifade edilmiştir.

Lu ve ark. [21] çalışmalarında inceltirilmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımını belirleyebilmek için 24 adet kiriş testi yapmışlardır. İncelenen ana parametreler beton basınç dayanımı, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d), ana donatı ve kirişlerdeki düşey etriyelerdir. Test edilen kirişlerin tamamı eğilmeden göçmüştür. Beton dayanımı arttıkça kesme dayanımının arttığı, a/d oranı küçüldükçe nihai dayanımın arttığı ifade edilmiştir. Kesme dayanımını belirlemek için önerilen STM modelinin farklı parametreler için doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Hussain ve Shakir [22] çalışmalarında kompozit kesitli inceltirilmiş uçlu kirişlerin statik ve tekrarlı yükler etkisi altında performansını incelemişlerdir. Yükleme şeklinin etkisi, farklı çelik kesitlerin kullanılması, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) incelenen parametrelerdir. Yapılan deneylerde ilk çatlak meydana geldiği yük, nihai dayanım, göçme modu, yük-deplasman ilişkisi ve süneklik oranının belirlenmesine odaklanılmıştır. Deneysel sonuçta inceltirilmiş uç bölgesinde I kesit kullanıldığında kesme kapasitesinin a/d oranı 1,0 olduğunda %33,33 ve a/d oranı 1,5 olduğunda %39,42 arttığı raporlanmıştır.

Rentería-Soto ve ark. [23] çalışmalarında inceltirilmiş uçlu kirişler için önerilen STM modellerinden ikisinin kıyaslamasını yapmışlardır. Biri ortogonal diğeri diyagonal bağlantılı olmak üzere iki STM modeli kullanılmıştır. Donatı detayları belirlenen kirişler test edilmiştir. Testler sonucunda diyagonal olarak düzenlenen donatının

ortogonal olandan daha iyi sonuç verdiğini belirlenmiş, buna karşın donatı diyagonal olarak düzenlendiğinde kirişin yer değiştirme kapasitesinin azaldığı ifade edilmiştir.

Aksoylu ve ark. [24] inceltirilmiş uçlu aşıklarında meydana gelen hasarlar ve bu hasarların nedenlerini incelemişlerdir. 5 farklı konfigürasyona sahip 10 adet numune için deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır. TS-9967 kriterlerine uygun olarak tasarlanan ve tasarlanmayan kirişlerle birlikte mesnet bölgesinde çelik kesitlerin kullanıldığı kirişler ve Z tipinde donatıya sahip kirişler test edilmiştir. Çalışmanın sonunda Z tipinde donatıya sahip kirişlerin diğer numunelere göre yaklaşık %30 daha yüksek yük kapasitesi sergilediğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte optimum Z tipi donatıyı belirlemek için sonlu eleman analizleri yapmışlardır.

Syed ve ark. [25] inceltirilmiş uçlu kirişlerin dinamik yükler altındaki davranışını incelemişlerdir. Bu kapsamda 31 farklı kiriş analitik olarak test edilmiştir. Analizler LS-DYNA yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada seçilen ana parametreler ana donatı, askı donatıları ve farklı beton sınıflarıdır. Analizler sonucunda beton dayanımı arttıkça kesme dayanımının arttığı, farklı donatı konfigürasyonlarının inceltirilmiş uçlu kirişlerin göçme modunu değiştirmediğini ve hepsinin kesme kuvvetinden kaynaklı göçtüğü raporlanmıştır. Bununla birlikte askı donatılarının ve ana donatıların çatlak oluşumunda etkin rol oynadığı belirtilmiştir.

Rajapakse ve ark. [26] inceltirilmiş uçlu kirişlerin göçme modlarını belirlemek için 8 adet kiriş deneyi tabii tutmuşlardır. Çalışma kapsamında incelenen parametreler donatı miktarı ve yatay donatının düşey donatıya oranı olup bu parametrelerin çatlak kontrolü, dönme kapasitesi ve birleşimin dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda toplamda aynı yatay ve düşey donatı alanına sahip kiriş birleşimleri için daha fazla yatay donatı içeren birleşimin daha güçlü olduğu ifade edilmiştir. İnceltirilmiş uç bölgesine düşey olarak yerleştirilen donatıların çatlak kontrolünde etkin olmadığı buna karşın dönme kapasitesine önemli katkı sağladığı belirlenmiştir.

Mohamed ve Elliott [27] inceltirilmiş uçlu kirişlerin kayma mukavemetini artırmak için kendiliğinden yerleşen çelik lifli beton kullanmışlardır. Donatı konfigürasyonu, beton basınç dayanımı ve uç bölgesinin yüksekliği dikkate alınarak 10 adet kiriş deneyi tabii tutulmuştur. Deneyler sonucunda tüm kiriş numunelerinde benzer çatlak gelişimi olduğunu gözlenmiş, çoğunlukla kiriş çatlaklarının inceltirilmiş bölgenin kirişle birleştiği bölgede başlayıp ardından uç bölgesinde eğimli çatlaklar oluştuğu ifade edilmiştir. Tüm numunelerin kesme etkisi nedeniyle göçtüğü raporlanmıştır. Çelik lifler kesme kapasitesinin artmasına katkı sağlamış inceltirilmiş bölgede çelik lifli beton kullanılması durumunda donatı miktarının azaltılabileceği belirtilmiştir.

Desnerck ve ark. [28] inceltirilmiş uçlu kirişlerin yük taşıma kapasitesine korozyon, ankraj çatlakları, kesme donatısı miktarı ve donatı düzeninin etkisini belirlemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada 9 adet farklı özelliğe sahip kiriş test edilmiştir. Referans numunenin donatıları STM yaklaşımıyla belirlenmiştir. Parametrelerin etkileri hem ayrı ayrı incelenmiş hem de birlikte değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda farklı donatı düzenlerinin yük taşıma kapasitesi üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğu belirtilmiştir. İnceltirilmiş bölgede kullanılan köşegen, U ve düşey donatıların kesitlerinde ki %50' lik azalma kırılma yükünde %35' lik bir fark oluşmasına neden olmuştur. Birden fazla parametrenin etkisi aynı anda incelendiğinde yük taşıma kapasitesi üzerinde bu parametrelerin doğrusal kombinasyonlarından daha büyük bir etkiye neden olabileceği raporlanmıştır.

Oviedo ve ark. [29] STM yaklaşımının statik süreksizliğe sahip betonarme elemanlar için güçlü bir araç olduğu, bununla birlikte tasarıma yapısal optimizasyon yöntemlerinin dahil edilmesinin numerik olarak daha etkili

olduğunun kanıtlandığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında numerik olarak ispatlanan bu durumu deneysel olarak incelemişlerdir. İncelenen dokuz kirişten beşi homojenleştirme yapısal optimizasyon algoritmasından türetilen optimal modeller kullanılarak, dört tanesi de geleneksel STM modellerine göre tasarlanmıştır. Tüm homojenizasyon numuneleri geleneksel yöntemlerle tasarlanan numunelere göre çatlak kontrolünde daha iyi performans göstermiştir. Homojenizasyonun yük taşıma kapasitesinde artışa neden olduğunu raporlamışlardır.

Atta ve Taman [30] incelenmiş uçlu kirişlerin kırılma mekanizmalarını daha iyi anlamak ve kirişlerin dıştan öngerilmeye sahip elemanlarla güçlendirilmesi durumunda performansını incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. 8 adet kiriş örneği deneye tabi tutulmuştur. Kirişler öngerilmeye sahip elemanların yanal, düşey ve eğimli olarak kirişe dıştan bağlanmasıyla ve bu elemanların farklı bölgelere yerleşimleriyle güçlendirme gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda düşey olarak uygulanan güçlendirmenin diğer yönlere göre daha etkili olduğu ve referans numunesine göre düşey olarak güçlendirilmiş kirişin kapasitesinin %82 arttığı ifade edilmiştir. Kirişlerin öngerilmeli elemanlarla yanal olarak güçlendirilmesi durumunda basınç kırılması olduğu raporlanmıştır.

Shakir ve Alliwe [31] incelenmiş uçlu kirişlerin davranışlarını incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Davranışa etkisi incelenen parametreler kesme açıklığının faydalı derinliğe oranı (a/d), askı donatısı ve incelenmiş bölgede yer alan eğilme donatısının alanının azaltılması olarak ifade edilmiştir. Deneyler sonucunda a/d oranının davranış üzerinde etkili olduğu, a/d oranının 1,5' tan 1,0' e düşürülmesi durumunda kapasitede yaklaşık %48 artış meydana geldiği ifade edilmiştir. a/d oranı 1,0 olan kirişte askı donatısı alanının %40 azaltılması yük taşıma kapasitesini %6 oranında azaltmıştır. İncelenmiş bölgede yer alan eğilme donatısı alanının %50 azalması durumunda a/d oranı 1,0 olan kirişin kapasitesinin %12,4 ve 1,5 olan kirişin kapasitesinin %12 azaldığı raporlanmıştır.

Fayed ve ark. [32] farklı derinliklere sahip betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada incelenen parametreler kiriş derinliği, etriye oranı, derinliğin değiştiği bölgelerde üst ve alt kısımda bulunan boyuna donatıların özellikleridir. 2 adet sabit derinlikli ve 10 adet incelenmiş uçlu kiriş test edilmiştir. Alt ve üst düzeyde ayrı ayrı derinliğin azaltılması sonucunda yük taşıma kapasitesinde referans numuneye göre sırasıyla %23,56 ve %27,35 azalma olduğu belirtilmiştir. İncelenmiş bölgelerde etriye kullanımı kirişlerin taşıma kapasitesini arttırmış ve sünekliği önemli ölçüde etkilemiştir. STM yöntemi kullanılarak belirlenen değerler ile testlerden elde edilen değerlerin yakın olduğu raporlanmıştır.

Syed ve ark. [33] daha önce statik olarak test edilmiş incelenmiş uçlu kirişlerin sonlu eleman modellerini oluşturarak dinamik yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Davranışa etkisi incelenen parametreler donatı çapları, eğilme ve askı donatısı miktarı, beton basınç dayanımı ve uygulanan yükün değeri olarak açıklanmıştır. Çalışmada LS-DYNA yazılımı kullanılmıştır. İncelenmiş uçlu kiriş modelleri oluşturulurken beton için farklı yapısal malzeme modelleri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına ağ boyutlarının etki ettiği belirtilmiştir. Kullanılan malzeme modellerinin üstünlükleri raporlanmış, modeller sayesinde betonda oluşan çatlaklarının yayılma durumunun izlenebileceği belirtilmiştir.

Shakir ve ark. [34] geometrik ve statik olarak süreksizlik içeren kirişlerin davranışını incelemek amacıyla analitik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada kirişler 3 grup halinde incelenmiştir. İlk grup incelenmiş uçlu kirişlerden, ikinci grup T kesitli derin kirişlerden ve üçüncü grup dikdörtgen boşluklar içeren kirişlerden oluşmaktadır. Analizler ANSYS yazılımı ile yapılmıştır. İncelenmiş uçlu kirişlerin uç bölgelerinde ve askı donatılarında %25

oranında azalma yük taşıma kapasitesinde sırasıyla %15 ve %32 oranında azalmaya yol açmıştır. İnceltilmiş uçlu kirişlerde kesme açıklığının faydalı derinliğe oranı azaldıkça yük taşıma kapasitesinin arttığı ifade edilmiştir. T kesitli derin kirişlerde aynı donatı oranı boşluğun yerine bağlı olarak yük taşıma kapasitesinde %41-%49 oranında azalmaya yol açmıştır.

Aksoylu ve ark. [35] incelttilmiş uçlu aşık kirişlerinin davranışını belirlemek için hem deneysel hem analitik bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmanın deneysel kısmında yönetmelikte belirtilen tasarım kriterlerini sağlayan ve sağlamayan kirişlerle CFRP yöntemiyle güçlendirilmiş kirişler test edilmiştir. Analizler ABAQUS yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen sonuçların yakın olduğu belirlenmiştir. Analitik çalışmada etkisi incelenen parametreler beton basınç dayanımı, donatının çekme dayanımı ve öngerme seviyesidir. Beton basınç dayanımı ve donatı çekme dayanımı arttıkça kirişlerin kesme kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. CFRP güçlendirme tekniği kullanılan kirişlerin kapasitesinde artış olduğu ve hasar bölgesinin değiştiği raporlanmıştır.

Zamri ve ark. [36] incelttilmiş uçlu kirişlerde diyagonal çatlağı ve ani kırılmayı önlemek için yoğun olarak donatı kullanılan bölgelerde donatı miktarını azaltmak için çelik liflerin uygulanma olasılığını araştırmışlardır. Çalışmada 2 gruptan oluşan 10 adet kiriş test edilmiştir. Gruplar incelttilmiş bölgenin yüksekliğine göre belirlenmiştir. İncelenen bir diğer parametre ise kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranıdır. Çelik lif kullanımının kesme kapasitesi ve sünekliği artırdığı belirtilmiştir. Bununla birlikte kesme kuvvetlerinin sadece diyagonal donatılara aktarıldığı ve bu donatıların kirişler için önemli olduğu ifade edilmiştir. Deneysel sonuçta incelttilmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımlarını tahmin etmek için yarı ampirik iki denklem geliştirilmiştir.

Don ve ark. [37] literatürde test edilen incelttilmiş uçlu kirişler için doğrusal olmayan analizler yapmışlardır. Analizler için ATENA Science yazılımı kullanılmıştır. Referans numunesi, diyagonal donatının kullanılmadığı kiriş numunesi, incelttilmiş bölgede U şekilli donatının kullanılmadığı kiriş numunesi ve kesme donatısı azaltılan kiriş numunesi olmak üzere 4 adet kiriş incelenmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar kıyaslandığında çatlak şekillerinin ve göçme durumlarının birbiriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Yük taşıma kapasitesi ve deformasyon kapasitesi en çok azalan numune diyagonal donatının kullanılmadığı kiriş numunesi olup yaklaşık %50'lik bir azalma gözlenmiştir. Tüm kiriş numunelerinde ilk diyagonal çatlama incelttilmiş ucun kirişin inceltilmemiş bölgesiyle birleştiği köşede oluşmuştur. Oluşan çatlağın açısının ve boyutunun donatı düzenine göre değiştiği belirtilmiştir.

Shakir ve Hamad [38] 10 adet boşluklu kirişi test etmişlerdir. İncelenen numuneler incelttilmiş uçlu boşluklu kirişler ve boşluklu kirişler olarak 2 gruba ayrılmıştır. Her bir grupta boşluğun her iki yanında düşey donatı içeren bir adet referans numunesi bulunmaktadır. Bununla birlikte boşluklu kirişler farklı güçlendirme yöntemleri ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme için çelik lif katkılı beton, diyagonal donatılar, çelik plakalar kullanılmıştır. Kiriş davranışı, çatlak dağılımı, yükleme geçmişi, süneklik ve tokluk açısından değerlendirilmiştir. Kirişlere incelttilmiş uçların ilavesi ile yük taşıma kapasitesinin %9-12 oranında azaldığı belirtilmiştir. Her bir grupta kompozit kesitle güçlendirilmiş kirişlerde %21-23 ile en yüksek iyileştirmelerin sağlandığı raporlanmıştır.

Al-Maliki ve ark. [39] incelttilmiş uçlu kirişlerin ardgerme olarak çalışan bulonlarla güçlendirilmesini araştırmışlardır. Etkisi incelenen değişkenler civataların sayısı, boşluklu ve boşluksuz kesit durumudur. İncelttilmiş uçlu kiriş kesitlerinin boşluk içermesi durumunda kesme kapasitesinin %8-%16 azaldığı, sehimde ise %15-%20 arasında bir artış olduğunu gözlenmiştir. Bulonlarla güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitesinde %8-%20

aralığında artış gözlemlenmiş ve yer değiştirmenin %20-%30 aralığında azaldığı ifade edilmiştir. Kirişlerde güçlendirme ile ani hasarların azaldığı raporlanmıştır.

Santarsiero ve Picciano [40] inceltmiş uçlu kirişlerin ard-germe tendonları kullanılarak güçlendirilmesinin davranış üzerindeki etkilerini incelemiştir. İki farklı donatı düzenine ve yük taşıma kapasitesine sahip inceltilmiş uçlu kiriş için sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve ATENA programı ile analizler yapılmıştır. Çalışmada ana parametre olarak tendonlara uygulanan gerilme miktarı incelenmiştir. Analizler sonucunda, ard-germe tendonlarının kırılma modlarını değiştirdiği ve yük taşıma kapasitesini artırdığı belirlenmiştir.

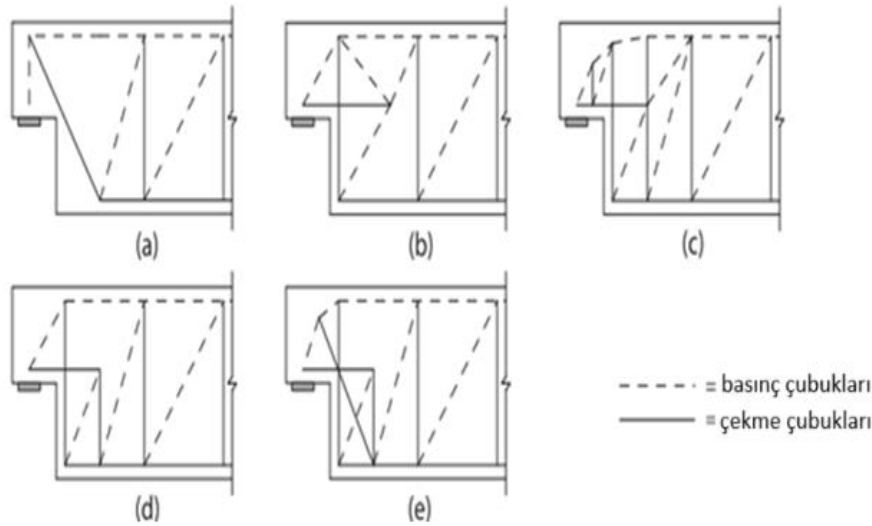
Mihaylov [41], inceltmiş uçlu kirişlerin uç bölgelerinin kirişle birleştiği kısımlarda meydana gelen çatlak dağılımlarını incelemiş ve çatlak genişliğinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için bir model önermiştir. Bu model, akma anındaki çatlak genişliğini tahmin etmek ve yüksüz halden akma anına kadar çatlakların gelişimini takip etmek amacıyla geliştirilmiştir. Modelin doğrulanması için 42 testlik bir veri tabanı kullanılmıştır. Çatlak genişliğini etkileyen ana faktörler, inceltilmiş uçlu kirişlerdeki donatı miktarı ve detayları olarak belirlenmiştir. Önerilen modelin, değişkenlerin etkisini iyi bir şekilde yakaladığı ve bu nedenle servis koşullarında çatlak kontrolü için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Literatürde inceltmiş uçlu kirişlerle ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, çatlakların genellikle inceltmiş bölgenin kirişle birleştiği bağlantı bölgesinde başladığı ve hasarın yoğun olarak bu bölgede oluştuğu ifade edilmektedir. İnceltmiş uçlu kirişlerin davranışları, deneyler, sonlu elemanlar analizi ve STM yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Donatının etkisi incelenirken, özellikle inceltmiş bölgede yer alan donatı, eğilme donatısı ve askı donatıları dikkate alınmıştır. İnceltmiş bölgede yer alan donatıların yük taşıma kapasitesini daha fazla etkilediği belirtilmiştir. Eğilme ve askı donatıları ise yük kapasitesini artırmaktadır. Beton basınç dayanımı da incelenen bir parametredir ve basınç dayanımı arttıkça yük kapasitesi ve kesme dayanımının arttığı ifade edilmiştir. Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve oran azaldıkça nihai dayanımın arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, inceltmiş uç bölgesinin yüksekliği de önemli bir parametre olarak incelenmiş ve çalışmalarda bu değer 0.45h'dan daha büyük olması önerilmektedir.

2.2 Çubuk Analogisi Yöntemi (*Strut-and-tie method (STM)*)

Çubuk analogisi yöntemi, betonarme ve öngerilmeli yapılardaki süreksiz bölgelerinin (D-bölgesi) analizi için kullanılabilen basit ve etkili bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntem, mühendislerin yapı elemanlarında yük aktarım mekanizmasını kavrayarak donatı detaylarını iyi bir şekilde elde etmelerine ve elemanların yük taşıma kapasitelerini çok etkili bir şekilde belirlemelerine olanak sağlamaktadır. Betonarme elemanlarda yüklerin veya mesnet kuvvetlerinin etkilediği bölgeler ile eleman kesitlerinin değiştiği bölgelerde yani gerilmelerin birbirine paralel bir şekilde oluşmadığı, çok eksenli gerilme dağılımının mevcut olduğu bölgeler süreksizlik bölgesi (D-bölgesi) olarak tanımlanmaktadır. Süreksizliğin olmadığı bölgeler ise B Bölgesi olarak tanımlanmaktadır ve Bernoulli-Navier hipotezinin geçerli olduğu kabul edilen bu bölgelerde bile iç kuvvetlerin kesit tesirlerinden hesaplanması ancak bazı kabullerle yapılabilmektedir. Dolayısıyla yapı elemanlarında geometrik veya statik süreksizliğin bulunduğu bölgelerde iç kuvvetleri belirlemek için geleneksel yöntemler yeterli olmamaktadır. Bu sebeple süreksizlik bölgelerinde yaklaşık yöntemler veya çubuk sistem modelleri kullanılmaktadır [42]. Kafes-kiriş modeli olarak da tanımlanan çubuk analogisi yöntemi gerilme alanlarının betonarme tasarıma uygulanması esasına

dayanan alt sınır plastisite teoremi olarak ifade edilebilmektedir. Yöntemde analiz edilecek yapısal bir eleman, uygulanan yük boyunca çekme ve basınç çubuklarından oluşan kafes kiriş olarak idealize edilmektedir. Kesikli çizgiler basınç çubuklarını, sürekli çizgiler çekme çubuklarını temsil etmektedir. Çubuk analogisi yönteminin kullanımı, gerilmelerin yayılışının net bir şekilde anlaşılmasında ve gerilme alanının görselleştirilmesinde deneyim beceri gerektirmektedir. Literatürde inceltilmiş uçlu kirişler için geliştirilmiş farklı çubuk modelleri önerilmektedir ve bu modellerden bazıları Şekil 1’de gösterilmektedir [43].



Şekil 1. Literatürde inceltilmiş uç kirişler için önerilen çubuk modelleri [44]

2.2.1. Model çubuklarının ve düğüm noktalarının boyutlandırılması

Ülkemizde bulunan şartnamelerde çubuk analogisiyle hesap detayları mevcut değildir. Bu nedenle boyutlandırmada ACI 318-19’da [44] tanımlanan limitler kullanılmaktadır ve Tablo 1’de elemanların tasarımında kullanılan denklemlere yer verilmiştir.

Tablo 1. ACI-318-19’da önerilen denklemler

Elemanlar	Denklemler
Çekme çubukları	$F_{nt} = A_{ts} \cdot f_y + A_{tp} \cdot \Delta f_p$
Basınç çubukları	$F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs}$ $F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs} + A_s' \cdot f_s'$
Düğüm noktaları	$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_c \cdot \beta_s \cdot f_c'$ $F_{nz} = f_{ce} \cdot A_{nz}$ $f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_c \cdot \beta_n \cdot f_c'$

Tablo 1’de A_{ts} çekme donatısı kesit alanı, f_y akma dayanımı, A_{tp} öngerilmemiş elemanlarda değeri sıfırdır, Δf_p yük faktörlerinden dolayı öngerilmeli donatıdaki gerilme artışı, f_{ce} efektif beton basınç dayanımı, A_{cs} kesit alanı, A_s' basınç donatısı alanı, f_s' basınç donatısının dayanımı, β_c ve β_s basınç ve çekme çubukları için tanımlanmış katsayılar ve f_c' beton basınç dayanımı, A_{nz} düğüm bölgesindeki alan, β_n düğüm noktası için ACI 318-19’a göre belirlenen bir katsayıdır.

İnceltilmiş uçlu kirişlerin kesit tesirleri hesaplanırken basit mesnetli kirişe benzer bir yol izlenmektedir. Bununla birlikte kiriş uçlarının kesitinin azaltılarak inceltilmesi kesme kuvvetinin önemli bir kısmının inceltilmiş bölgede oluşmasına neden olup bu durum inceltilmiş ucun boyutlandırmasında dikkate alınmaktadır. İnceltilmiş uçlu kirişlerin çözümünde ilk olarak maruz kalacağı yük etkisinde oluşan kesit tesirleri belirlenerek iç kuvvet diyagramları oluşturulmaktadır. Oluşan mesnet tepkilerine göre kirişin her noktasındaki gerilmeler göz önüne alınarak kirişin uç kısmı boyutlandırılmaktadır. Prefabrike kiriş-kolon birleşimi moment aktarmayan bağlantı detayına sahip olduğunda dikkate alınan moment sıfır ve kesme kuvveti maksimum değerdedir [4]. BPEK ve PCI'da donatı alanlarını belirlemek için önerilen denklemler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Beton Prefabrikasyon El Kitabı ve PCI Tasarım El Kitabına göre tasarım detayları

	BPEK	PCI
İnceltilmiş uçta eğilme ve çekme donatısı	$A_s = \frac{[V_d \times a + H_d \times (h-d)]}{f_{yd} \times d} + \frac{H_d}{f_{yd}}$	$A_s = \frac{[V_u \left(\frac{a}{d}\right) + N_u \left(\frac{h}{d}\right)]}{\phi f_y}$
Kesme sürtünme donatısı	$A_s = A_{sf} + A_n = \frac{2}{3} \times \frac{V_d}{f_{yd} \mu_e} + \frac{H_d}{f_{yd}}$ $A_n = 0.5(A_s - A_{sf})$	$A_s = A_f + A_n = \frac{2V_u}{3\phi f_y \mu_e} + \frac{N_u}{\phi f_y}$ $A_n = 0.5(A_s - A_f)$
Sürtünme Katsayısı	$\mu_e = \frac{6.9 \times \lambda^2 \times b \times h \times \mu}{V_d}$	$\mu_e = \frac{1000 \lambda b h \mu}{V_u}$
İnceltilmiş uçtaki askı donatısı	$A_v = \frac{1}{2 \times f_{yd}} \times \left[\frac{V_d}{0.85} - 0.65 \times f_{ctd} \times b \times d \right]$	$A_v = \frac{\left(\frac{V_u}{\phi} - 2 \lambda b d \sqrt{f_c} \right)}{2 f_y}$
İnceltilmemiş kesitteki askı donatısı	$A_{sh} = \frac{V_d}{f_{yd}}$	$A_{sh} = \frac{V_u}{\phi f_y}$
Eğik beton basınç kuvvetinin yatay bileşenini alan donatı	$A'_{sh} = A_{sh}$	$A'_{sh} = A_{sh}$

Tablo 2'de a , kesme kuvvetinin A_{sh} donatısına olan uzaklığını, h inceltilmiş kısımdaki kiriş yüksekliğini, d inceltilmiş kısımdaki faydalı kiriş yüksekliğini, f_y donatının akma dayanımını, f_{yd} tasarım akma dayanımı, f_{ctd} betonun çekme dayanımını ifade etmektedir. λ beton katsayısı ve μ sürtünme katsayısıdır. Her iki katsayıda tablolar aracılığıyla belirlenmektedir.

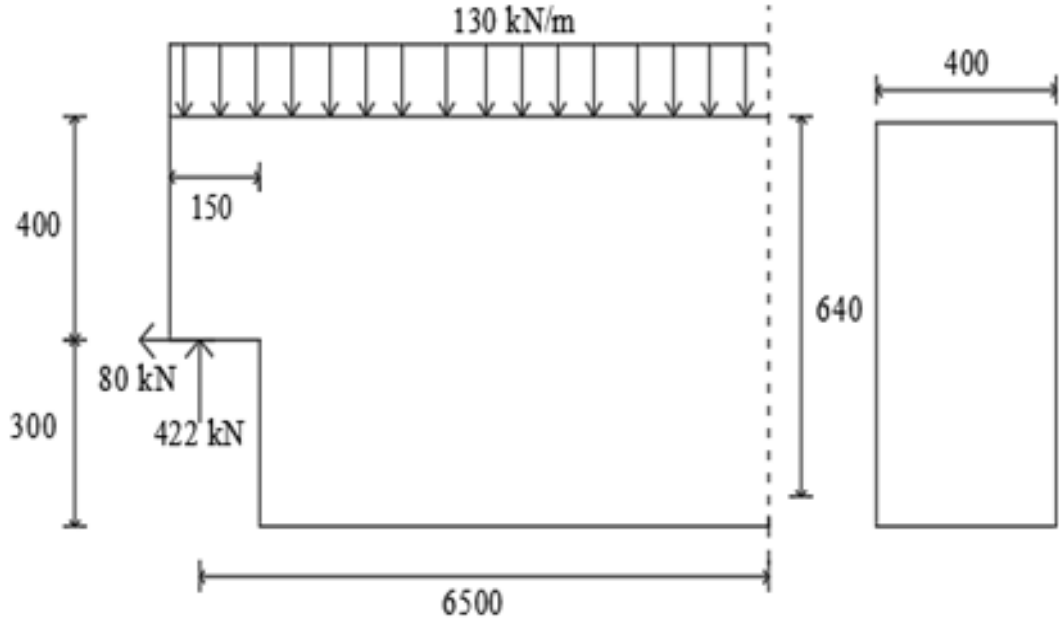
2.4 Düzgün Yayılı Yüke Maruz Kalan İnceltilmiş Uçlu Kirişlerin Tasarımı

Prefabrike betonarme inceltilmiş uçlu kirişlerin tasarımında çeşitli yönetmelikler ve farklı yaklaşımlardan faydalanılmaktadır. Çalışma kapsamında yayılı yüke maruz kalan inceltilmiş uçlu prefabrike bir kiriş, eğilmeyen elemanlar ve betonarme elemanların süreksizlik bölgelerinde uygulanabilir bir yaklaşım olan STM, Beton Prefabrikasyon El Kitabı (BPEK) ve PCI Tasarım El Kitabında (PCI) verilen koşullar dikkate alınarak tasarım yapılmıştır. Üç ayrı durum için yapılan tasarım sonuçları karşılaştırılmıştır. Tasarımı yapılacak prefabrike inceltilmiş uçlu kiriş Şekil 3'te gösterilmektedir. Kirişte beton basınç dayanımı 35 MPa ve donatı akma dayanımı ise 420 MPa olarak kabul edilmiştir.

2.4.1. Model çubuklarının ve düğüm noktalarının boyutlandırılması

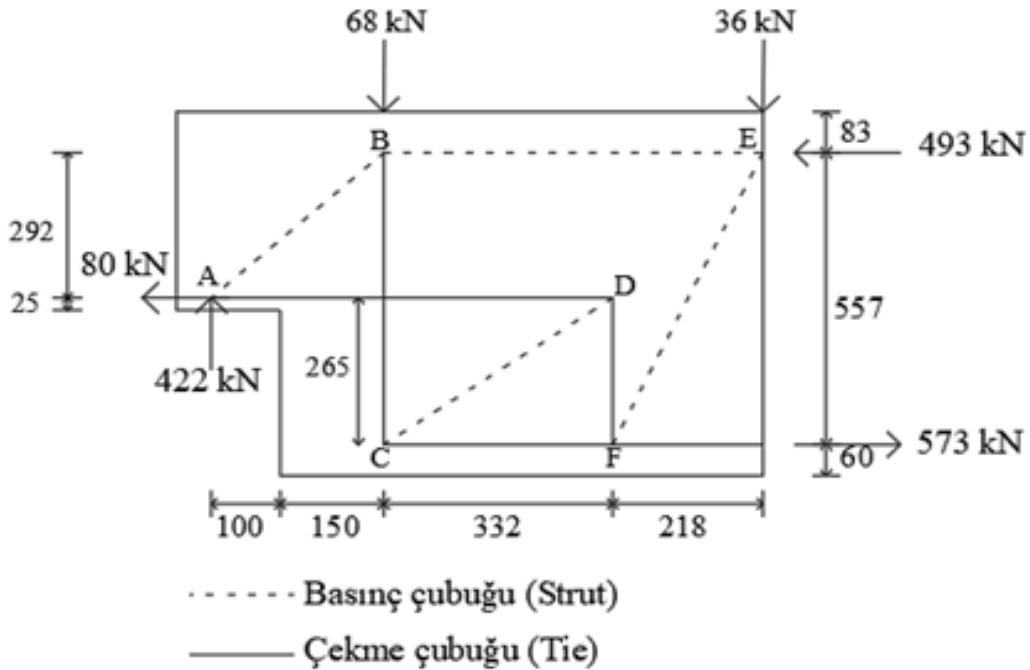
STM metodu ile hesap yapılırken taşıyıcı sistemin eleman boyutları, donatı düzeni, malzeme dayanımları, yükleme ve mesnetlenme durumu dikkate alınarak uygun bir çubuk model geliştirilmelidir. Türk yönetmeliklerinde çubuk

modellerle hesapta kullanılabilcek şartlara yer verilmediğinden boyutlandırma yapılırken ACI 318-19 yönetmeliğinde tanımlanan sınır değerler referans alınacaktır.



Şekil 3. Yayılı yüke maruz tasarımı yapılacak inceltmiş uçlu kiriş (Boyutlar mm'dir.)

D bölgesinin uzunluğu kiriş yüksekliğine eşit kabul edilmiştir. Tasarımda kullanılan STM modeli Şekil 4'te gösterilmektedir. İç kuvvetler belirlenip denge denklemleri yazılarak Tablo 3'te yer alan çubuk kuvvetleri elde edilmiştir.



Şekil 4. Tasarımda kullanılan STM modeli

Tablo 3. Çubuk Analojisi Sonuçları

Elemanlar	AB	AD	BE	BC	CD	CF	DF	EF
Kuvvet(kN)	-556	442	-362	354	-567	443	354	-379
Donatı Alanı (mm ²)	785	1403	-	1124	-	1406	992	-
Seçilen Donatı	-	5Ø20	-	3Ø16	-	5Ø20	4Ø14	-

AD, BC, CF ve DF çekme çubuklarıdır. Gerekli donatı alanlarını belirlemek için çubuk kuvvetleri akma dayanımı ve kuvvet azaltma faktörünün çarpımına bölünmüştür. CB ve DF düşey çekme çubuklarının bulunduğu bölgede kullanılması gereken donatı alanı kapalı etriye olarak tasarlanmıştır. CF çekme çubuğunda oluşan kuvveti karşılamak için gerekli donatı belirlenmiştir.

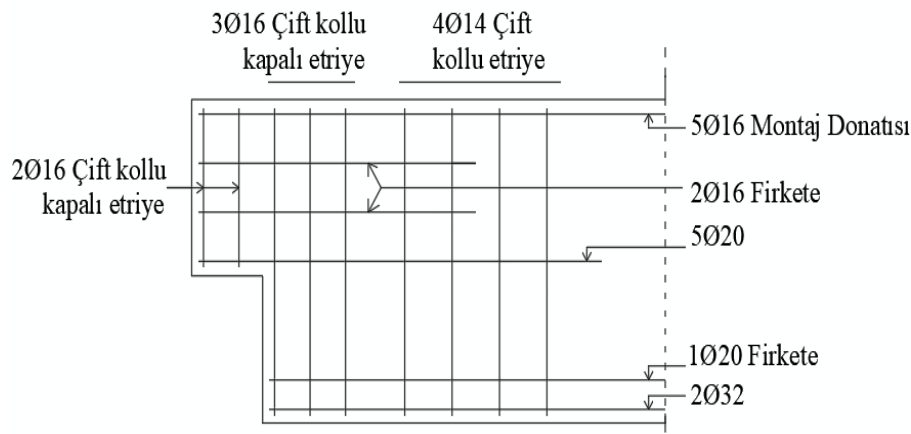
Düğüm noktalarının tasarımında düğüme birleşen çubuk kuvvetlerinin basınç ve çekme olması durumları seçilecek katsayı için önemlidir. A düğümü mesnetin yer aldığı düğümdür. Mesnet plağı 400x100x15 kabul edildiğinde oluşan gerilme 10,55 MPa, gerilme limiti ise 17,85 MPa olduğundan uygundur.

AB basınç çubuğundaki gerilmenin kontrolü için öncelikle basınç çubuğunun etkili boyu 121,5 mm olarak hesaplanmıştır. AB basınç çubuğunda oluşan gerilme 11,44 MPa iken gerilme limiti 16,7 MPa olduğundan güvenlidir.

B düğümü bir tane çekme çubuğu bulunan bir düğümdür. B düğümünün nihai dayanımı 17,85 MPa olarak belirlenmiştir. Nihai dayanımı sağlamak için gereken minimum efektif derinlik 55 mm'dir. Mesnet bölgesinde yerleştirilen kapalı etriye 3Ø16 olduğu dikkate alındığında ve 75 mm arayla yerleştirildiğinden düğüm bölgesinin genişliği 166 mm olarak belirlenmiştir.

C düğümü iki çekme çubuğu ve bir basınç çubuğu içermektedir. Düğüme izin verilen limitler ile donatı etkili derinliği kontrol edilmiştir. Düğümün nihai dayanımı 13,39 MPa ve CD basınç çubuğunun genişliği 106 mm olarak belirlenmiştir. CF çekme çubuğuyla aktarılacak kuvvet ve düğümün genişliği gözönüne alınarak kiriş açıklığında yer alan 32 mm'lik donatının üstüne 20 mm çapında U şeklinde donatı ilave edilmiştir. Donatılar arasındaki mesafe 50 mm olarak belirlenmiştir.

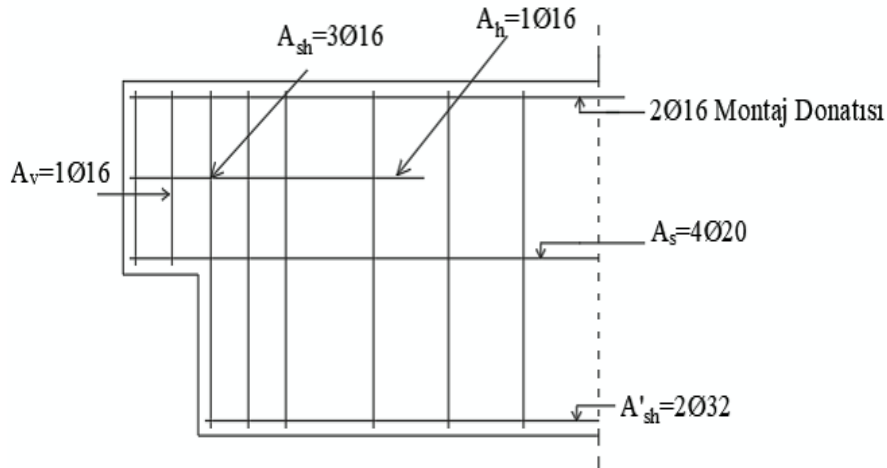
Mesnetin üzerindeki bölgede yer alan ana donatıya (A_s) paralel olacak şekilde düzenlenecek olan donatı için gerekli alan 575 mm² olarak hesaplanmış ve U şeklinde 2Ø16 donatı düzenlenmiştir. Ayrıca inceltilmiş kısma çift kollu 2Ø16'lık donatı yerleştirilmiştir. Şekil 5'de donatı düzeni gösterilmiştir.

**Şekil 5.** STM modeli dikkate alınarak oluşturulan donatı düzeni

2.4.2. İnceltmiş uçlu kirişin Beton Prefabrikasyon El Kitabına göre boyutlandırılması

Bu bölümde Şekil 3'te verilen betonarme prefabrikte inceltmiş uçlu kirişin yürürlükten kaldırılan TS 9967 yönetmeliğinde yer alan kriterleri içeren BPEK'ye göre tasarımı yapılmıştır. Tablo 2'de gösterilen denklemlere göre inceltmiş ucun alt yüzüne yerleştirilecek eğilme donatısı alanı A_s , 1005 mm^2 olarak belirlenmiştir. Donatı olarak $4\phi 20$ seçilmiştir. Buna göre kirişin üst yüzeyine yerleştirilecek konstrüktif montaj donatısı ise $2\phi 16$ olarak düzenlenmiştir.

İnceltmiş uçta kayma güvenliğini sağlamak için gereken donatı alanı 393 mm^2 olarak hesaplanmış ve donatı (A_h) $1\phi 16$ olarak düzenlenmiştir. İnceltmiş ucun hemen bitiminde kullanılacak kapalı etriye için ihtiyaç duyulan donatı alanı 1156 mm^2 'dir. A_{sh} donatısı $3\phi 16$ olarak düzenlenmiştir. Yönetmelikte A_{sh} ve A'_{sh} donatı alanlarının eşit olması gerektiği ifade edilmiş bu alan kiriş ana donatısıyla karşılanmıyorsa ilave donatı kullanılması önerilmiştir. A'_{sh} donatısı $2\phi 32$ olarak düzenlenmiştir. İnceltmiş uç bölgesinde olası çatlakları engellemek için kullanılacak askı donatısı alanı Tablo 2'de verilen ilgili denklem ile belirlenmiştir. İhtiyaç duyulan donatı alanı 399 mm^2 'dir. Seçilen donatı $1\phi 16$ 'dır ve kapalı etriye olarak düzenlenmiştir. Sonuç olarak inceltmiş uçlu prefabrikte kiriş için oluşan donatı düzeni Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Beton Prefabrikasyon El Kitabı kriterlerine göre donatı düzeni

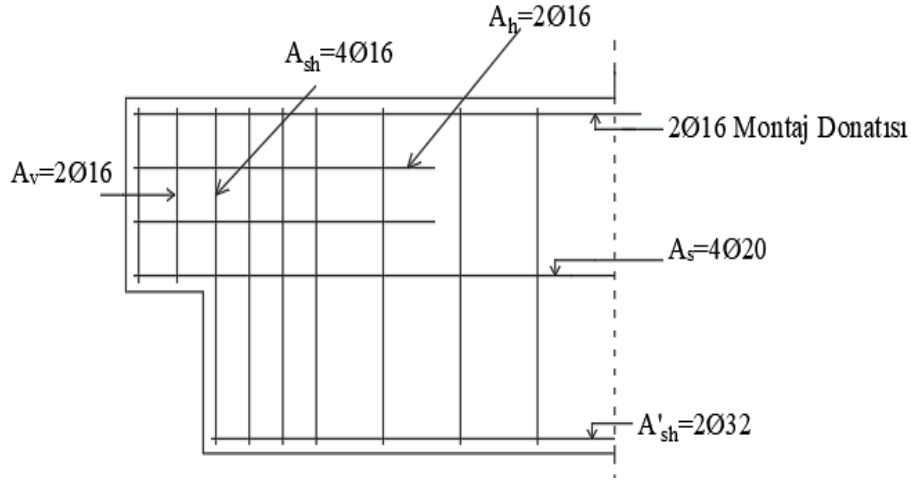
2.4.3. İnceltmiş uçlu kirişin PCI ile boyutlandırılması

Şekil 3'de yer alan kiriş verilen yükleme ve malzeme özellikleri dikkate alınarak PCI Tasarım El Kitabında yer alan koşullara uygun olarak tasarlanmıştır. Tasarım kitabında boyutlar inch (in) ve gerilmeler kips per square inch (ksi) birimleriyle ifade edilmiştir.

İnceltmiş uçta eğilme ve aksenal çekme için kullanılması gereken donatı miktarı Tablo 2'de A_s donatısını belirlemek için verilen denklemler kullanılmış ve büyük çıkan donatı alanı dikkate alınmıştır. Gelen etkileri karşılamak için gerekli donatı alanı (A_s) 1167.7 mm^2 olarak belirlenmiş, buna karşı gelen donatı $4\phi 20$ olarak seçilmiştir.

Doğrudan kesme durumunda oluşması muhtemel çatlağın önlenmesi için gerekli donatı (A_h) yine Tablo 2’de verilen denklem ile hesaplanmıştır. Gerekli donatı alanı 458 mm^2 ve yerleştirilecek donatı $2\text{Ø}16$ olarak belirlenmiştir.

İnceltilmiş ucun kirişle birleştiği köşeden itibaren oluşması muhtemel diyagonal çatlağı önlemek için ihtiyaç duyulan donatı alanı ise 1342 mm^2 olarak hesaplanmış, donatı konfigürasyonu $4\text{Ø}16$ olarak belirlenmiştir. PCI’da A'_{sh} donatısının alanının en az A_{sh} donatı alanı kadar olması önerildiğinden inceltilmemiş kısımdaki eğilme donatısı içinde $2\text{Ø}32$ kullanılmıştır. İnceltilmiş uçta oluşması beklenen diyagonal çatlağı engellemek için düşey olarak yerleştirilerek donatı (A_v) Tablo 2’de verilen ilgili denklem ile hesaplanmıştır. Gerekli donatı alanı 497 mm^2 ve seçilen donatı $2\text{Ø}16$ ’dır. Sonuç olarak inceltilmiş uçlu prefabrikte kiriş için PCI’ya göre oluşan donatı konfigürasyonu Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. PCI şartlarına göre donatı düzeni

III. SONUÇLAR

Prefabrikasyon yüksek kalitede yapıların kısa sürede inşa edilmesine olanak sağlayan yapım teknolojisi olduğundan prefabrikte elemanlar taşıyıcı sistemlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte yapı elemanları önüretimli olduğundan farklı tipteki bağlantı detayları uygulanmakta olup yapı sistemlerinin statik ve dinamik yükler etkisindeki davranışı birleşim bölgesinin özelliklerine bağlıdır. Mimari gereklilikler sebebiyle prefabrikte sistemlerin birleşim bölgelerinde kullanılan elemanlardan biri de inceltilmiş uç ve kenarlardır. Kolonlarda yer alan kısa konsollar ile birleşimlerde konsolun üst yüzeyine kiriş veya döşemenin tam olarak yerleştirilmesi amacıyla elemanların kesitleri küçültülerek inceltilmiş bölgeler oluşturulmaktadır. Eleman kesitinin küçültülmesi kesme kuvvetinin artışına neden olacağından tasarımda bu durum dikkate alınmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde inceltilmiş uçlu kirişlerin davranışını etkileyen parametreler donatı miktarı ve konfigürasyonu, beton dayanımı, inceltilmiş ucun boyutları, kiriş derinliği ve kesme açıklığının derinliğe oranı şeklinde ifade edilebilir. Bu etkileri gözlemleyebilmek için araştırmacılar analitik ve deneysel yollara başvurmuşlardır ve yapılan çalışmalarda sıklıkla STM modellerinin kullanıldığı görülmüştür.

Bu kapsamda sunulan çalışmada yayılı yüke maruz inceltilmiş uçlu prefabrikte bir kiriş için STM modeli, BPEK ve PCI'da yer alan denklem ve koşullar dikkate alınarak üç ayrı tasarım yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen kuvvetlere karşı direncin sağlanabilmesi için gereken donatı alanları Tablo 4'de birlikte gösterilmiştir. Tablo 5'de toplam donatı alanları verilmiştir.

Tablo 4. Tasarımda kullanılan donatı alanları

Kullanılan donatının yeri ve konfigürasyonu	STM	BPEK	PCI
İnceltilmiş uçta çekme donatısı, A_s	1403,2	1005,0	1167,7
Kesme sürtünme donatısı, A_h	575	393,0	458,0
İnceltilmemiş kesitteki askı donatısı, A_{sh}	1124,0	1156,0	1342,0
İnceltilmiş uçtaki askı donatısı, A_v	615	399,6	497,0
Eğik beton basınç kuvvetinin yatay bileşenini alan donatı, A'_{sh}	1406,35	1156,0	1342,0

Tablo 5. Toplam donatı alanları

Toplam donatı alanları	STM	BPEK	PCI
	5123,5	4109,6	4806,7

Gerekli donatı alanları kıyaslandığında inceltilmiş uçta eğilme ve çekme kuvvetlerini karşılamak için kullanılması gereken donatının STM modelinde BPEK'na göre yaklaşık %40 ve PCI'a göre %20 daha fazla olduğu görülmüştür. PCI'da BPEK'a göre %16 daha fazla donatı kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

İnceltilmiş uç bölgesinde kesme kuvvetini karşılamak için yönetmeliklerde tasarım koşulu olarak belirtilen A_h donatısı, STM modelinde düğüm noktasındaki gerilme limitlerinin aşılmasına karşı direnç oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. BPEK'ye göre belirlenen kesme sürtünme donatısının alanı PCI'ya göre belirlenen donatı alanından %17 daha az bulunmuştur.

PCI'ya göre inceltilmiş ucun köşesinden başlaması muhtemel diyagonal çatlağı önlemek için kullanılması gereken düşey donatı STM modeline göre %19 ve BPEK'na göre %16 daha fazladır. BPEK'nda ise STM modeline göre %3 daha fazla donatı kullanılması gerektiği belirlenmiştir. PCI'ya göre inceltilmiş uçta oluşması muhtemel diyagonal çekme çatlağını önlemek için belirlenen donatı miktarı BPEK'na göre %25 daha fazla olması gerektiği belirlenmiştir. Eğik beton basınç kuvvetinin yatay bileşenini alan A'_{sh} donatısı için belirlenen alanlar karşılaştırıldığında STM modelinde BPEK'ye göre %22 ve PCI'ya göre %5 daha fazla olduğu görülmüştür.

İnceltilmiş uçlu kirişler prefabrikte yapılarda sıklıkla kullanılmakta olup, bu kirişlerin uç bölgelerinde meydana gelen kesme kuvvetleri büyük önem taşımaktadır. STM yöntemi, betonarme elemanların süreksizlik bölgelerinin analizlerinde kullanılarak yük aktarım mekanizmasını göz önünde bulundurur ve donatı detaylarını belirler. Çalışmada, boyutları ve yükleme durumu literatüre uygun olarak belirlenen inceltilmiş uçlu kirişin STM yöntemi, PCI ve BPEK tasarım kriterleri ile donatı alanları belirlenmiştir. Toplam donatı alanları göz önüne alındığında, en yüksek donatı miktarının STM yönteminde belirlendiği görülmüştür. Bu durum, STM yönteminde inceltilmiş uçlu kirişin bağlantı bölgesinde meydana gelen gerilmelerin dağılımına bağlı olarak donatı alanlarının bulunması ile ilişkilendirilebilir.

PCI kriterleriyle belirlenen toplam donatı miktarı, BPEK kriterleriyle belirlenen toplam donatı miktarından daha fazladır ve PCI yönetmeliği daha güvenli tarafta kalmaktadır. İnceltilmiş uçlu kirişlerde kesme kuvvetleri etkindir ve inceltilmiş ucun kirişe bağlandığı köşede başlayan diyagonal çekme çatlağına karşı dayanım için üç yaklaşım karşılaştırıldığında, en yüksek donatı miktarı PCI'a göre belirlenmiştir. Donatı alanları ayrı ayrı incelendiğinde, genel olarak üç yaklaşımın birbiriyle uyumlu olduğu söylenebilir. PCI'da verilen tasarım kriterlerinin a/d oranı

1'den küçük inceltilmiş uçlu kirişler için olduğu ifade edilmiştir. Gelecek çalışmalarda, a/d oranının farklı değerlerinin donatı alanı üzerindeki etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Binti Nur SJ (2013) Analysis of reinforced concrete dapped-end beams using Vector2. Dissertation, Universiti Teknologi Petronas.
2. Şeren C (2006) Depreme dayanıklı prefabrike betonarme yapı tasarımı ve güçlendirilmesi. Dissertation, İstanbul Teknik Üniversitesi.
3. Barka G, Ataköy H, Yüksel E (2018) Beton Prefabrikasyon El Kitabı, Tasarım, Üretim ve Montaj Esasları, Türkiye Prefabrik Birliği, Ankara, Türkiye.
4. Design and typical details of connections for precast and prestressed concrete (PCI) (2010) Prestressed Concrete Institute, Chicago, USA.
5. Özkılıç YO, Aksoy C, Yazman Ş, Gemi L, Arslan MH (2019) Prefabrike inceltilmiş aşik uçlarının deneysel ve numerik sonlu eleman analizlerinin karşılaştırılması. International Science and Academic Congress, Konya, Türkiye, sayfa 303-310.
6. Mata-Falcón J, Pallarés L, Miguel PF (2019) Proposal and experimental validation of simplified strut-and-tie models on dapped-end beams. Eng Struct 183:594-609. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.010>
7. Aswin M, Mohammed BS, Liew MS, Syed ZI (2015) Shear failure of rc dapped-end beams. Advances in Materials Science and Engineering, 309135. <https://doi.org/10.1155/2015/309135>
8. Aswin M, Syed ZI, Wee T, Liew MS (2014) Prediction of failure loads of RC dapped-end beams. Applied Mechanics and Materials 567:463-468. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.567.463>
9. Wang O, Guo Z (2005) Experimental investigation on the shear capacity of RC dapped end beams and design recommendations. Struct Eng Mech 21(2):221-235.
10. Mohammed BS, Aswin M, Liew MS, Zawawi NAWA (2019) Structural performance of RC and R-ECC dapped-end beams based on the role of hanger or diagonal reinforcements combined by ECC. Int J Concr Struct Mater 13, 44. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0356-x>
11. Abdal-Moniem AEN, Madkour H, Farah K, Abdullah A (2020) Numerical investigation of reinforced-concrete beams with half-joints. Struct Build 173(10):715-729. <https://doi.org/10.1680/jstbu.2020.173.10.703>
12. Abdul-Jawad HM (2018) Modelling of dapped-end beams using Abaqus software. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) 9(1):1-10.
13. Ahmad S, Elahi A, Hafeez J, Fawad M, Ahsan Z (2013) Evaluation of the shear strength of dapped ended beam. Life Science Journal 10(3):1038-1044.
14. Taher SEDF (2005) Strengthening of critically designed girders with dapped-ends. Struct. Build 158:141-152. <http://dx.doi.org/10.1680/stbu.2005.158.2.141>
15. Nagy-György T, Sas G, Daescu AC, Barros JAO, Stoian V (2012) Experimental and numerical assessment of the effectiveness of FRP-based strengthening configurations for dapped-end RC beams. Eng Struct 44:291-303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.006>
16. Jirawattanasomkul T, Kongwang N, Likitlersuang S, Yodsudjai W, Charuvisit S, Sato Y. (2021) Failure analysis of dapped-end cracking in posttensioned bridge girder. American Society of Civil Engineers, J. Bridge Eng 26(11):04021082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001786](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001786)
17. Moreno-Martínez YJ, Meli R (2014) Experimental study on the structural behavior of concrete dapped-end beams. Eng Struct 75:152-163. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.051>
18. Desnerck P, Lees JM, Morley CT (2016) Impact of the reinforcement layout on the load capacity of reinforced concrete half-joints. Eng Struct 127:227-239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.061>
19. Özkılıç YO, Aksoy C, Arslan MH (2021) Experimental and numerical investigations of steel fiber reinforced concrete dapped-end purlins. J Build Eng 36:102119. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102119>
20. Aswin M, Al-Fakih A, Syed ZI, Liew MS (2023) Influence of different dapped-end reinforcement configurations on structural behavior of rc dapped-end beam. Build 13, 116. <https://doi.org/10.3390/buildings13010116>
21. Lu WY, Chen TC, Lin IJ (2015) Shear strength of reinforced concrete dapped-end beams with shear span-to-depth ratios larger than unity. J Mar Sci Technol 23(4): 431-442. <https://doi.org/10.6119/JMST-015-0511-1>
22. Hussain HN, Shakir QM (2019) Experimental study of the behavior of reinforced concrete beams with composite dapped end under effect of static and repeated loads. Int J Appl Sci Technol 2, 1. <https://doi.org/10.30560/ijas.v2n1p43>

23. Rentería-Soto J, Cruz-Solís JJ, Betancourt-Chávez JR, Narayanasamy R (2019) Experimental study of two strut and tie models for dapped-end beams. *International Journal For Technological Research In Engineering* 6, 7.
24. Aksoylu C, Özkılıç YO, Arslan MH (2020) Damages on prefabricated concrete dapped-end purlins due to snow loads and a novel reinforcement detail. *Eng Struct* 225:111225. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111225>
25. Syed ZI, Kewalramani M, Hejah ES (2019) Structural reliability of dapped end beams with different reinforcement layouts under dynamic loading. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 575:012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/575/1/012003>
26. Rajapakse C, Degee H, Mihaylov B (2022) Investigation of shear and flexural failures of dapped-end connections with orthogonal reinforcement. *Eng Struct* 260:114233. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114233>
27. Mohamed RN, Elliott KS (2008) Shear strength of short recess precast dapped-end beams made of steel fiber self compacting concrete. Singapore Concrete Institute.
28. Desnerck P, Lees JM, Morley CT (2017) The effect of local reinforcing bar reductions and anchorage zone cracking on the load capacity of RC half-joints. *Eng Struct* 152:865–877. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.021>
29. Oviedo R, Gutiérrez S, María HS (2016) Experimental evaluation of optimized strut-and-tie models for a dapped beam. *Struct Concr* 17, 3. <https://doi.org/10.1002/suco.201500037>
30. Atta A, Taman M (2016) Innovative method for strengthening dapped-end beams using an external prestressing technique. *Mater Struct* 49:3005–3019. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0701-8>
31. Shakir QM, Allawe R (2019) Behavior of self-compacting reinforced concrete dapped end beams. *Int J of Appl Sci* 2,1. <https://doi.org/10.30560/ijas.v2n1p33>
32. Fayed S, Madenci E, Özkılıç YO (2022) Flexural behavior of rc beams with an abrupt change in depth: experimental work. *Build* 12, 2176. <https://doi.org/10.3390/buildings12122176>
33. Syed ZI, Hejah ES, Mohamed OA (2017) Modelling of dapped-end beams under dynamic loading. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 6, 3. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.6.3.242-247>
34. Shakir QM, Al-Sahlawi YM, Abd BB, Hamad SA (2023) Nonlinear finite element analysis of high-strength reinforced concrete beams with severely disturbed regions. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17, 1. <https://doi.org/10.14525/JJCE.v17i1.03>
35. Aksoylu C, Özkılıç YO, Yazman Ş, Gemi L, Arslan MH (2021) İnceltilmiş uçlu önüretimli aşık kirişlerinin yük taşıma kapasitelerinin deneysel ve numerik olarak irdelenmesi ve çözüm önerileri. *Teknik Dergi* 32(3):10823-10858. <https://doi.org/10.18400/tekderg.667066>
36. Zamri NF, Mohamed RN, Elliott KS (2021) Shear capacity of precast half-joint beams with steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Constr Build Mater* 272:121813. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121813>
37. Don W, Suryanto B, Tambusay A, Suprobo P (2022) Forensic assessments of the influence of reinforcement detailing in reinforced concrete half-joints: A nonlinear finite element study. *Struct* 38:689–703. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.029>
38. Shakir QM, Hamad SA (2021) Behavior of pocket-type high-strength rc beams without or with dapped ends, *Pract Period Struct Des Constr*, 26(4):04021048. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000624](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000624)
39. Al-Maliki HNG, Hussain AJ, Fahad JJ (2018) Comparative study on experimental behavior of r.c. inverted dapped-end girders with openings strengthened by vertical normal bolts. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences* 1, 25.
40. Santarsiero G, Picciano V (2024) Post-tension retrofitting of RC dapped-end beams: A numerical investigation. *Structural Concrete* 1–19. <https://doi.org/10.1002/suco.202300207>
41. Mihaylov BI (2024) Model for rapid evaluation of corner crack widths in reinforced concrete dapped-end connections. *Engineering Structures* 303, 117497. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117497>
42. El-Metwally SEE, Chen W (2018) *Structural Concrete strut and tie models for unified design*. Taylor and Francis, Boca Raton.
43. Desnerck P, Lees JM, Morley CT (2018) Strut-and-tie models for deteriorated reinforced concrete half-joints. *Eng Struct* 161:41-54. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.013>
44. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)* (2019). American Concrete Institute, Michigan, USA.
45. *Yapı Elemanları, Taşıyıcı Sistemler ve Binalar-Prefabrikte Betonarme ve Öngerilmeli Betondan-Hesap Esasları ile İmalat ve Montaj Kuralları (TS 9967)* (1992), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
46. *Öndökümlü Beton Mamuller - Genel Kurallar (TS EN 13369)* (2010). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Influence of essential oil on the properties of UV-crosslinked Polyacrylamide/sodium caseinate (PAAM/SC) hydrogels

Ahmetcan Gün^a, Azra Albayrak^a, Fatma Nur Parın^{a*}, Recep İlhan^{a,b}, Uğur Parın^c

^aPolymer Materials Engineering, Bursa Technical University, Bursa, 16310, Turkey^bMechanical Engineering, Bursa Technical University, Bursa, 16310, Turkey^cDepartment of Microbiology, Aydın Adnan Menderes University, Aydın, 09000, Turkey

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 Sep 2024

Received in revised form 12 Dec 2024

Accepted 11 Jan 2025

Available online

Keywords:

Polyacrylamide/sodium caseinate hydrogels

β-CD

Orange blossom essential oil (OBEO)

Compression test

Antibacterial efficiency

ABSTRACT

Presently, numerous studies have shown that hydrogels can help with wound healing in a variety of approaches. Oil-loaded protein-based hydrogels were fast produced via free radical photopolymerization (UV crosslinking). The water phase consisted of sodium caseinate polymer and acrylamide monomer, whereas the oil phase included orange blossom essential oil (OBEO). The bio-based surfactant β-cyclodextrin (β-CD) stabilized oil loaded-hydrogels. β-CD/OBEO complexes in specific proportions (1:1, 1:2, and 1:4) was added to water phase. ATR-FT-IR confirms the functional groups in hydrogels. The hydrogels have a swelling ratio above 280 % for 24 hours. The maximum compression strength for hydrogels with (β-CD/OBEO, 1:2) is almost 1 MPa. All oil-loaded hydrogels showed antibacterial efficiency against *Escherichia coli* (*E. coli*) and *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*), with inhibition zones of 6-10 mm. According to the findings, the synthesized hydrogels can be used as wound dressings in wound healing applications.

I. INTRODUCTION

The skin on the human body exerts a significant influence on many different human activities, including protection from pathogens, sensing the external environment and regulating body temperature. In addition to its elastic and soft tissue, the skin is susceptible to damage as a result of external factors because it envelops the body. Skin damage is one of the most common physical injuries in human history over many years. Designing new wound treatment materials is a very necessary issue in the findings of modern medical technology [1]. Human skin has the ability to self-repair these damages to maintain its structural integrity. Even though it has this ability, the skin must be supported for wound care (especially for large and open wounds or burns) to prevent infection and desiccation, relieve pain, protect the open area, accelerate the healing process and prevent scarring [2]. Wound dressings play an important role in the healing process. Wound dressings are developed in various materials and forms for different wound types and healing stages. Examples of these forms are gel, alginate, hydrogel, foam, hydrocolloid, film. Hydrogels have been the center of attention of researchers in recent years due to their high water content and providing a moist environment for wound tissue.

Hydrogels are cross-linked, hydrophilic polymer chains containing water without dissolving [3]. Hydrogels have been around for many years and these days, hydrogels continue to fascinate materials scientists and biomedical researchers [4]. Because of their high swelling ratio, biocompatibility, and porous shape, hydrogels with

*Corresponding author. Tel.: +90-224-300-3611; e-mail: nur.parin@btu.edu.tr

antibacterial characteristics have been thoroughly researched [5]. Hydrogels are frequently used in agriculture to maintain soil moisture in dry climates, as well as in sanitary applications like tampons and diapers. Another crucial category of wet wound dressings that may meet most of the ideal wound dressing requirements is hydrogel. Hydrogel wound dressings have many standards for a suitable wound dressing, including supporting moist healing, rehydrating dead tissues, improving debridement healing, cleansing dry, sloughy or necrotic wounds, avoiding biological reactions, cooling the wound surface, and being non-irritant, non-adherent, and permeable to metabolites. Natural materials offer therapeutic value in enhancing stem cell activity and speeding wound healing due to their bioactive components. Hydrogels may be prepared using many methods, such as freeze-thawing, gas foaming, emulsion templating, and particle leaching. The oil-in-water emulsion template is increasing in popularity for creating composite hydrogels due to its ease of usage and versatility [6].

Sodium caseinate is a compound derived from casein, a protein present in mammals' milk. Therefore, casein-based hydrogels are biocompatible, biodegradable, renewable, readily available, affordable, and non-toxic [7]. Various forms of casein hydrogels have been utilized for the delivery and controlled release of a wide range of biomolecules [8]. To enhance a crosslink reaction, casein hydrogels must contain a crosslinking agent. Casein crosslinking agents that have been researched in previous studies include glutaraldehyde (Glu) [7].

Phytochemicals such as essential oils, tannins, flavonoids and alkaloids may exhibit broad-spectrum antimicrobial activity against bacteria, fungi and other pathogens. Some synthetic drugs may also have antimicrobial effects, but the development of antibiotic resistance is a growing concern related to synthetic antibiotics. In addition, medicinal plants often contain compounds that stimulate tissue regeneration and wound closure.

The chemical composition of essential oils and their effects on tissue have been extensively researched for decades. Anti-inflammatory, antioxidant and antimicrobial effects of the material used during tissue repair are very important. Essential oils exhibit strong properties related to these three main issues [9,10]. Orange blossom essential oil (OBEO) is known as neroli and it has therapeutic characteristics, including antibacterial activity, anti-inflammatory, and antioxidant effects [11]. These bioactivities owing to many terpenes such as linalool (44-53%), α -terpineol (5-6%), geraniol (3-4%), (E)-nerolidol and (E,E)-2,6-farnesol (2-5%), limonene (8-12%), (E)- β -ocimene (3-5%), and β -pinene (2-4%) from the oil [12]. Many of the studies showed that these terpene groups protect pathogens. Furthermore, these groups may be polymerized or functionalized with other monomers and chemical groups.

In the last 5 years, researchers have become increasingly interested in the effect of essential oils on hydrogels. For instance, Naik et al. (2021) studied the potential of polyacrylamide-based materials loaded with essential oils for wound healing applications [13]. Moradi et al. (2024) synthesized hydrogels loaded with antibacterial myrtle oil nanoemulsions for burn treatment, using a free radical polymerization method to graft acrylamide and acrylic acid [14]. Li et al. (2022) explored the antibacterial properties of film-shaped acrylamide-based nanocomposite hydrogels incorporating essential oils [15]. These studies collectively demonstrate the potential of acrylamide-based hydrogels to acquire diverse properties when loaded with essential oils.

This study aims to be able to produce cross-linked hydrogels in very short periods with UV, as opposed to cross-linking by thermal method. Therefore, the OBEO-loaded polyacrylamide/sodium caseinate hydrogels were synthesized via UV crosslinking method. The changes in the amount of OBEO on the morphological,

spectroscopical, swelling, and mechanical properties of the hydrogels produced have been studied. Moreover, antibacterial efficiency against gram (-) *Escherichia coli*, and gram (+) *Staphylococcus aureus* bacteria has been examined.

II. EXPERIMENTAL METHOD

2.1 Materials and Preparation Techniques

Acrylamide powder (AAm) Veskim Chemical Company, Turkey, sodium caseinate (Alfasol, Turkey) and orange blossom essential essential oil (>95% purity) were purchased from KDR-Natural, Turkey. β -cyclodextrin (β -CD) was kindly donated by Wacker Chemical Company, Germany. MBAAm (99% purity, Sigma Aldrich Chemie GmbH, Steinheim, Germany) and Irgacure 2959 (99% purity, Sigma Aldrich Chemie GmbH, Steinheim, Germany) were used as received. Glycerol and citric acid were purchased from the local market. Ethanol (98% purity) was bought out from Sigma Aldrich Chemie GmbH, Steinheim, Germany). Distilled water was used in the experiments.

To obtain hydrogels, a certain amount of AAm monomer was dissolved in water using a magnetical stirrer. Then, a certain amount of sodium caseinate also was added to the solution and the added to materials were mixed by mechanical stirrer at 100 rpm for 5 minutes. After obtaining a homogeneous mixture, a certain amount of MBAAm crosslinker, and Irgacure 2959 (photoinitiator) was added to the mixture, respectively. All materials were stirred until completely dissolved (about 15 min). With this method, pure PAAm/SC hydrogel was obtained.

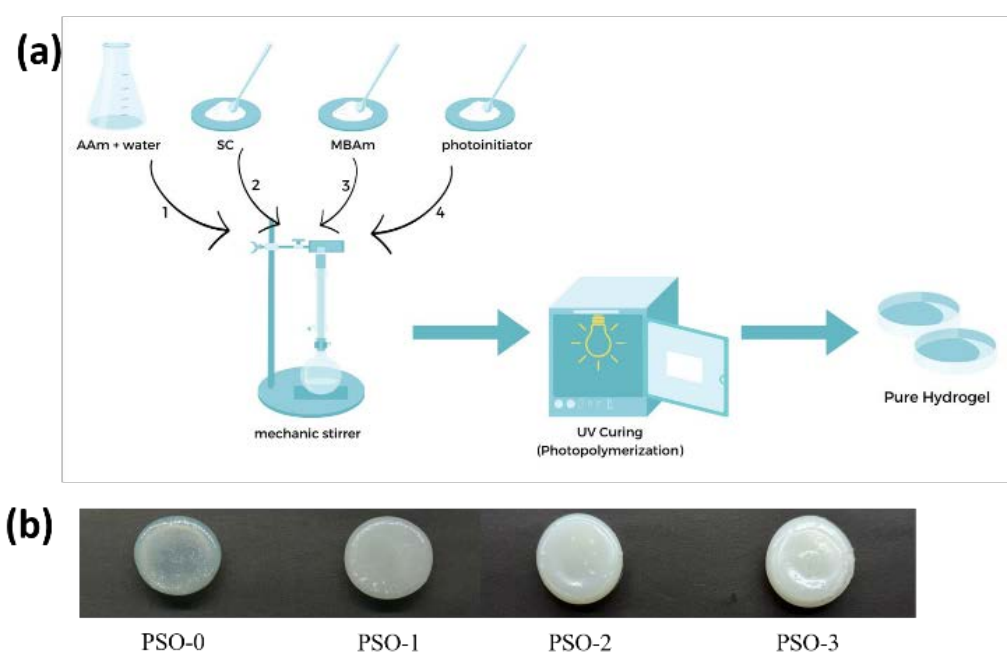


Figure 1. (a) Schematical illustration and (b) digital images of preparation of PAAm/SC hydrogels

The resulting solutions were cured for 30 minutes to ensure crosslinking. UV curing (300W, 20 cm distance) was used in this study. The cured hydrogels were washed in alcohol (10 mL) to remove impurities. The pure hydrogel sample was coded as PSO-0.

To obtain oil-loaded hydrogels, different ratios of OBEO were determined to consider β -CD/OBEO ratios. After preparing homogenous hydrogel solutions, OBEO has been added drop by drop to the solution mixture (Figure 1). These β -CD/OBEO ratios were adjusted as 1:1, 1:2, and 1:4, and sample codes were identified as PSO-1, PSO-2, and PSO-3, respectively. All synthesized hydrogel samples were kept in a desiccator until material characterization. The hydrogel composition is given in Table 1. These ratios were calculated based on the total polymer solution (5 mL).

Table 1. The compositions of the hydrogel

Samples	AAm (%)	Sodium caseinate (%)	MBAAm (%)	β -CD/OBEO	Photoinitiator (w/v) (%)
PSO-0	50	10	10	-	0.03
PSO-1	50	10	10	1:1	0.03
PSO-2	50	10	10	1:2	0.03
PSO-3	50	10	10	1:4	0.03

2.2 Optical Microscope Analysis

The morphology of pure hydrogel and oil-loaded hydrogel samples was observed optical microscope (Leica-M125) with 10X magnification.

2.3 Spectroscopic Analysis

FT-IR spectrophotometer (Perkin Elmer/Spectrum Two) was used for chemical structural characterization of the obtained films. The films were scanned using diamond crystal in the wavenumber range from 4000 to 500 cm^{-1} with an average 16 scans at 4 cm^{-1} resolution by transmission mode.

2.4 Swelling Test

Swelling ratios (SR) of all samples have been calculated as follows. Firstly, a dried the hydrogels were soaked at room temperature in distilled water. The hydrogels were washed away and weighed at specific time intervals. The swelling ratio was calculated as follows [16].

$$SR (\%) = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

2.5 Compression test

Compression tests were carried out by compressing the hydrogels (cylindrical, diameter 33.81 ± 0.71 mm, height 6.78 ± 0.52 , and fully hydrated) to 60% of their original height using a universal testing machine (Shimadzu, model AGS-X, Japan) at a load of 1 kN and a crosshead speed of 2 mm/min. During all tests force and displacement data were collected. Then using the data, the elastic modulus, and compression stresses of the hydrogels were obtained. The modulus was calculated from the linear slope of the stress–strain curves at low strains. Compression stress is the stress value at 60% strain. The stress (σ_c) was calculated by $\sigma_c = 4F/\pi d^2$, where F was the loading force, and d was the original diameter of the hydrogel. All tests were performed for the hydrogels at ambient conditions (25°C, 60% RH), and results were given with their standard deviations.

2.6 Antibacterial Efficiency

The antibacterial efficiencies of gels were determined by the standard strains of *Escherichia coli* ATCC® 25922, and *Staphylococcus aureus* ATCC® 25923. Trypton Soy Agar (Merck Millipore™ 105458) was used for the growth of lyophilized bacterial strains. The inoculated culture media were incubated for 24 hours (37°C) under aerobic conditions. In an isotonic saline solution, bacterial suspensions were adjusted to 0.5 McFarland (1×10^8 CFU/mL) turbidity. Antimicrobial efficacy was evaluated qualitatively by the disk diffusion method.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Optical Microscope Analysis

It is observed that the amount of oil changes the surface images of hydrogels (Figure 2). The addition of oil into hydrogel solution did not appear to alter the integrity of the hydrogels, as they maintained their form with slight fluctuations in volume. Surface morphology exceptions were observed in control hydrogels (without cells), where the pure sample contracted and wrinkled on the surface [17]. However, samples with oil have oil droplets in the sample (Figure 2b, 2c, and 2d). Further, Optical these images reveal the coarse texture of hydrogels [18]. The dispersion of oil droplets is unequal. It can be from the oil molecules' random distribution that different ester form hydrophobic interactions with the polymer molecules.

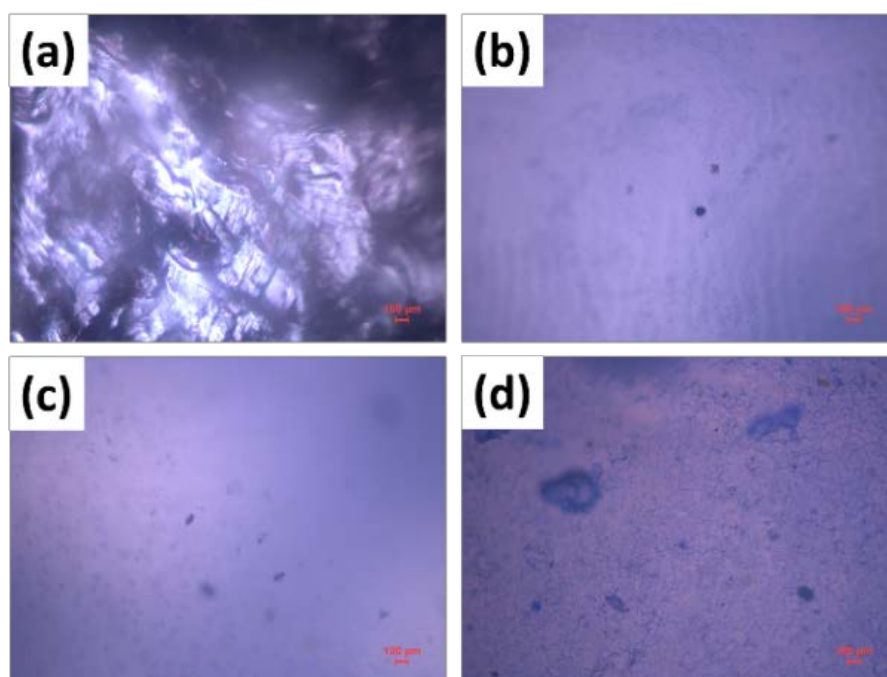


Figure 2. Optical microscope images of PAAm/SC hydrogels. (a) PSO-0, (b) PSO-1, (c) PSO-2, (d) PSO-3, respectively

3.2 Spectroscopic Analysis

The functional groups and physical interactions between polyacrylamide – sodium caseinate and OBEO were examined using FT-IR (Figure 3). The spectra show distinct absorption peaks for AAm, sodium caseinate and OBEO. Hydrogels exhibit stretching vibrations of the $-NH_2$ group in the range $3410-3421\text{ cm}^{-1}$. The peaks at $1682-$

1685 cm^{-1} (stretching of $-\text{C}=\text{O}$) correspond to the properties of the acrylamide unit [19]. The peaks of sodium caseinate at 1541 and 1658 cm^{-1} due to amide 1 and amide 2 groups [20].

The OBEO showed a characteristic peak at 1743 cm^{-1} which is identified as the stretch of the $-\text{C}=\text{O}$ bond due to the ester group [21]. In this study, the absorption peak at 1721 cm^{-1} was found ($-\text{C}=\text{O}$) and the peaks at 3320 cm^{-1} was related to $-\text{OH}$ stretch. The absorption bands in 2929 cm^{-1} , 2872 cm^{-1} in OBEO spectrum due to the asymmetric and symmetric C-H stretching. The bands at 1038 cm^{-1} and 1075 cm^{-1} were attributed to C-O stretching vibration. The detected peaks are in parallel with the literature [21-23].

Changes in the FTIR spectra of hydrogels produced by incorporation of oil into the polymer solution have been observed. As the oil concentration increases, peaks caused by oil have been clearly observed in PSO-3 hydrogels at 2934 cm^{-1} and 2857 cm^{-1} owing to the asymmetric and symmetric C-H stretching. Further, the peaks intensity of PSO-0 compared to PSO-2 were slightly decreased at 1665 cm^{-1} , 1618 cm^{-1} , and 1461 cm^{-1} . The peak in OBEO at 1038 cm^{-1} showed its presence in the samples PSO-1 and PSO-3. A peak of 1653 cm^{-1} in the PSO3 hydrogel may indicate that a new bond may be formed between the main terpenoid components (linalool, terpinen-4-ol, α -terpineol) in the OBEO and acrylamide.

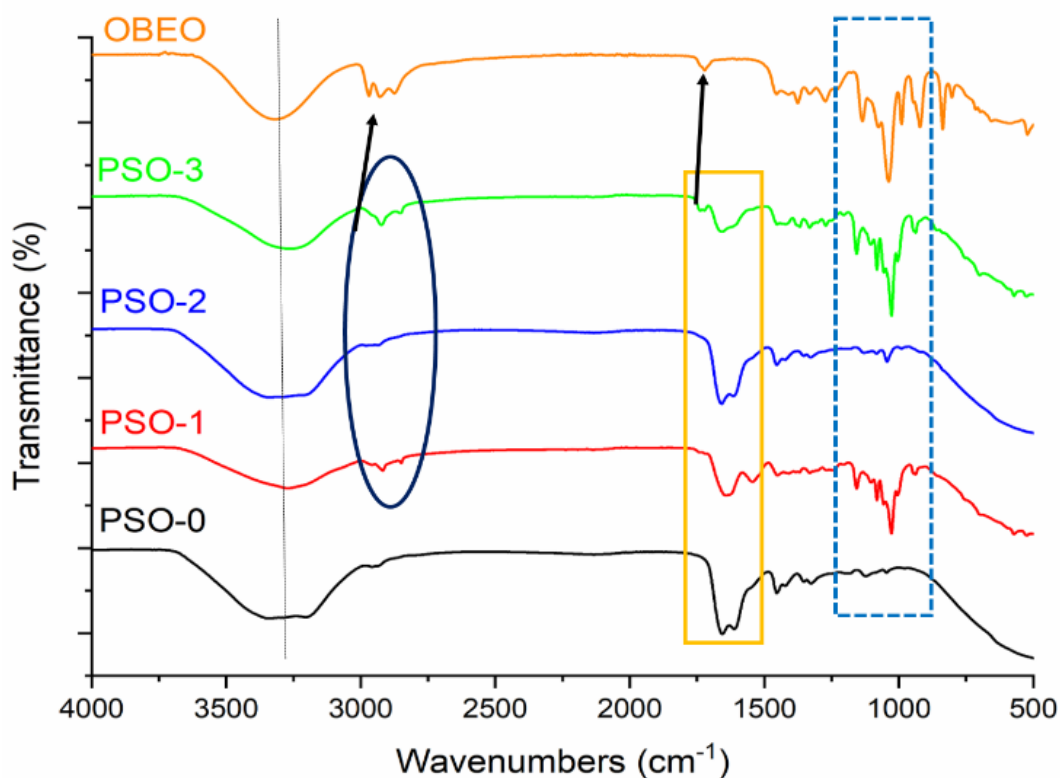


Figure 3. FT-IR spectra of the PAAm/SC hydrogels and OBEO

3.3 Swelling Test

Swelling is critical to investigating the properties of hydrogels. To measure the swelling ratio, a hydrogel sample's swelling capacity versus time profile is created by measuring free-absorbency capacity at regular periods [24]. The abundance of amide, carboxyl, and hydroxyl groups in sodium caseinate/acrylamide hydrogel contributes to its swelling ratio [25]. It was obvious that the oil ratio had a significant influence on the swelling behaviour of oil-

loaded hydrogels. It is expected that the swelling ratio will decrease with an increase in the amount of essential oil. However, as the amount of oil increased in the study, results showed decreased swelling ratios except for the PSO-2 hydrogel (Figure 4). Because the formation of new bonds between the OBEO and the polymer matrix (polyacrylamide and sodium caseinate), as in the mechanical test results. The swelling ratios at the end of 24 hours were found to be 310.7%, 304.5%, 286.5%, and 310.8% in the PSO-0, PSO-1, PSO-2, and PSO-3, respectively. However, any extreme difference was observed between the swelling properties of hydrogels and an increase in the amount of oil.

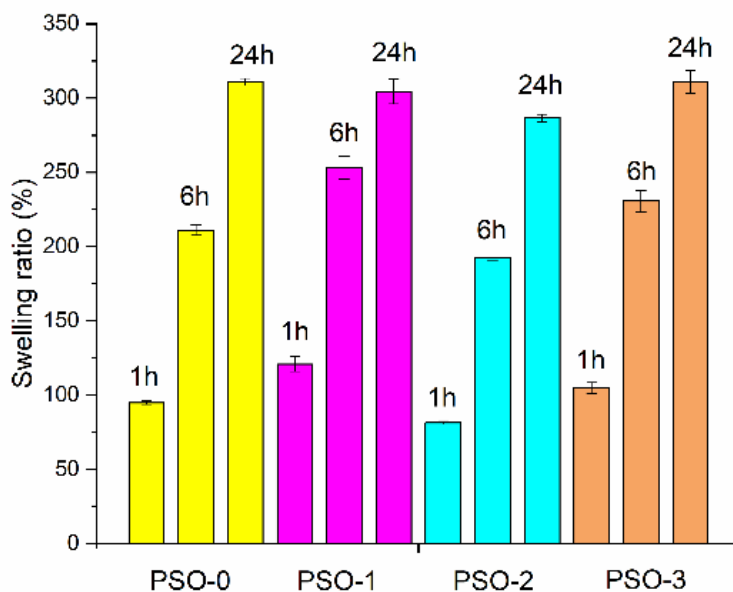


Figure 4. Swelling ratios of PAAm/SC hydrogels

3.4 Compression test

Hydrogels are frequently preferred materials for biomedical applications. They are of great interest in areas such as drug delivery, ligament repair, wound dressing and tissue engineering. In such applications, hydrogels are expected to exhibit good mechanical strength. Because hydrogels are subjected to certain loads such as compression load in the in-body environment. Therefore, in this study, hydrogels were subjected to compression tests and their properties were determined. In the tests, the hydrogels were compressed at a strain value of 60% of their height. As a result of the test, force and strain values were obtained and the modulus of elasticity and compressive stress values of the hydrogels were calculated. The mechanical test results of the hydrogels are given in Figure 5.

Figure 5a shows the elastic modulus values of the sample according to the changing material. When Figure 5a is examined, the elastic moduli for PSO-0, PSO-1, PSO-2, and PSO-3 hydrogels are 7, 17, 49, and 37 kPa, respectively. Generally, it can be said that an increase in the elastic modulus value was observed as the oil ratio increased, except for PSO-3 hydrogel. This decrement is due to the incompatibility of β -CD used as a compatibilizing agent with the oil ratio. As a result, it was determined that PSO-2 hydrogel had the optimum oil ratio. The hydrogel at this ratio has the best elastic modulus and exhibits better mechanical properties compared to other oil ratios.

The graph given in Figure 5b shows the compressive stress values depending on the changing material. When Figure 5b is examined, it is seen that the progression of the stress values obtained is the same as the modulus values. The compressive stress values of the materials with PSO-0, PSO-1, and PSO-2 hydrogels were 17 kPa, 131 kPa, and 1013 kPa, respectively. The compressive stress value of PSO-3 was 482 kPa. When the mechanical properties were analyzed in general, it was observed that the mechanical properties increased with increasing oil content. Accordingly, the optimum oil ratio was determined for PSO-2 hydrogels and the best mechanical strength values were observed in this sample. It is thought that orange blossom essential oil is also cross-linked during curing and the mechanical properties increase as a result of the increase in cross-link density.

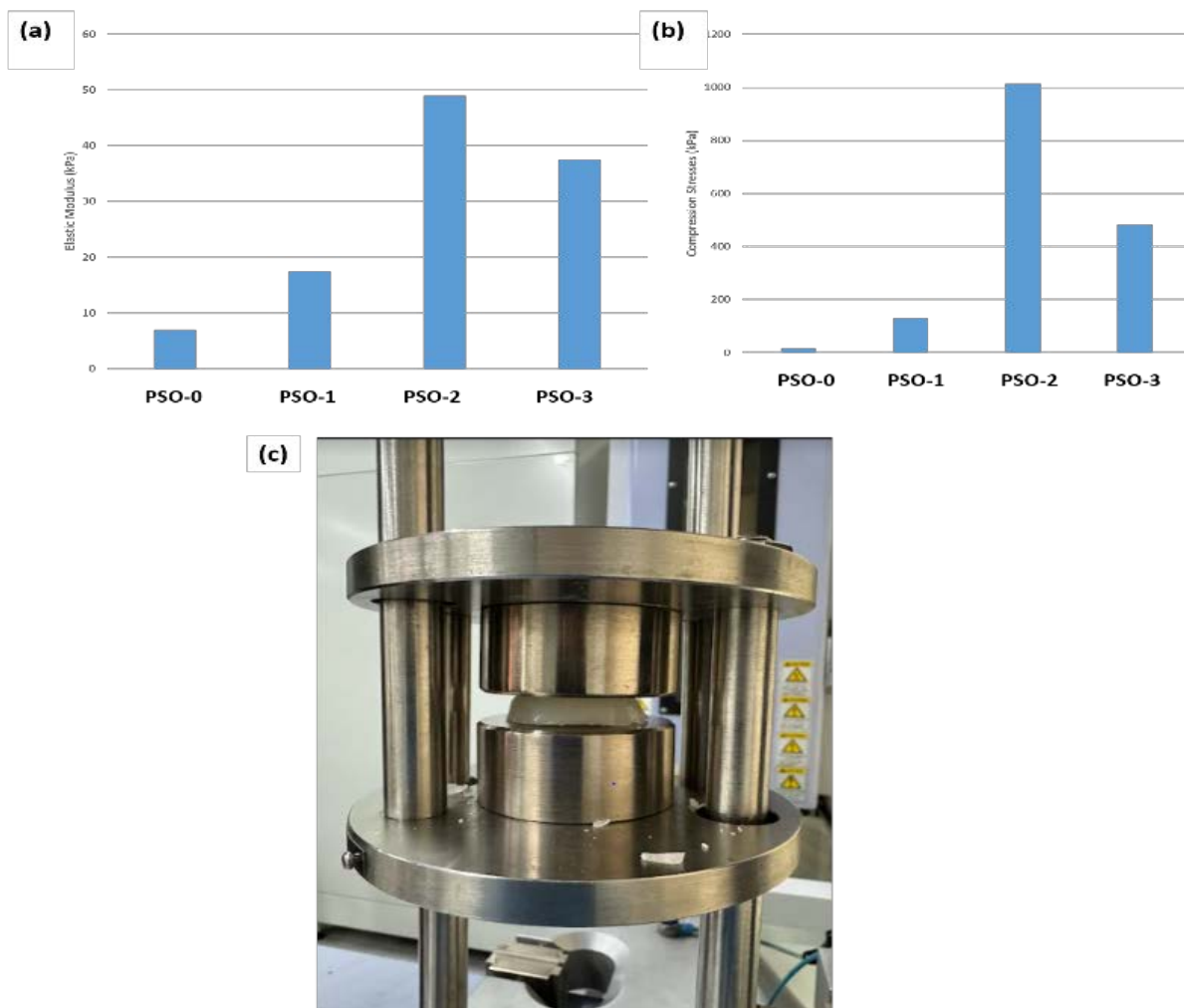


Figure 5. (a) Representative elastic modulus of the hydrogels. (b) Representative compressive stress of the hydrogels. (c) Demonstration of a PSO-0 hydrogel in the mechanical test

3.5 Antibacterial Efficiency

Bacterial infections cause a major threat to human health. Strong antibacterial materials and diverse, and easy-to-manufacture products are crucial [26]. In this scope, antibacterial hydrogels have high mechanical and biological properties and may be used for various purposes.

Many studies reported that the orange blossom essential oil is responsible for the antibacterial efficiency due to the components contained in the essential oil, such as β -pinene, limonene, linalool, nerylacetate, linalyl acetate, and α -terpinyl acetate [12]. In this study, pure hydrogel (PSO-0) did not show any antibacterial efficiency against both gram (-) and gram (+) bacteria. PSO-1, PSO-2 and PSO-3 hydrogels have zone inhibition (ZOI) values of 6 mm, 7 mm, and 10 mm against *S. aureus* bacteria (Figure 6). *E. coli* cells, unlike *S. aureus*, have an outer membrane outside the peptidoglycan layer, which may protect them from external antimicrobial compounds to some extent [27]. Therefore, oil-loaded hydrogels indicated less effect on gram (-) bacteria (*E.coli*). While PSO-1 hydrogels don't have any antibacterial efficiency against *E.coli*, PSO-2, and PSO-3 hydrogels have 6 mm, and 8 mm ZOI values, respectively (Table 2). To sum up, it has been confirmed in this study that increasing the concentration of oil increases the antibacterial effect.

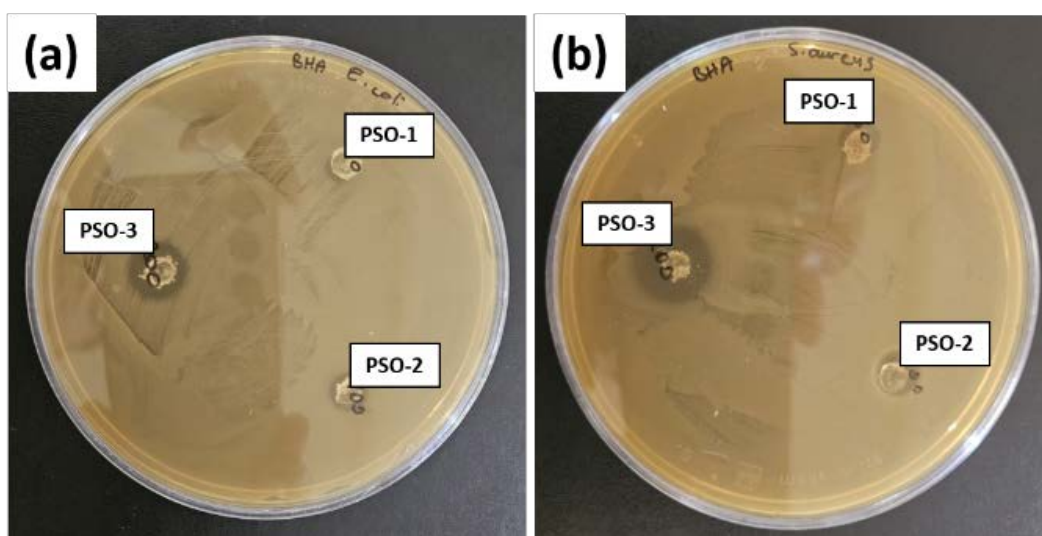


Figure 6. Antibacterial activity of the hydrogels against (a) *E. coli*, (b) *S. aureus* pathogens

Table 2. Antibacterial efficiencies of OBEO-loaded hydrogels

Bacterial strains	Polymer zone diameter (mm)		
	PSO-1	PSO-2	PSO-3
<i>Escherichia coli</i>	0	6	8
<i>Staphylococcus aureus</i>	6	7	10

IV. CONCLUSIONS

Orange blossom oil-loaded hydrogels were effectively synthesized via the UV crosslinking method. It has been appointed that the surface morphologies of hydrogels change with the addition of OBEO. Further, some new peaks have formed in the FT-IR spectra. PSO-2 hydrogels (β -CD/OBEO, 1:2) have a maximum compression strength of almost 1 MPa. The antibacterial test results of PSO-3 hydrogels were found to have the highest ZOI value of 10 mm compared to other hydrogels. As a result of the analyses, it was determined that the optimum sample was PSO-2 hydrogels. The findings indicate that the newly synthesized oil-loaded hydrogels will be effective for wound healing in future therapeutic applications.

ACKNOWLEDGMENT

The author thanks to acknowledge Esra SEVİMLİ and Bursa Technical University Chemistry Department for their kind help in the FT-IR analysis.

REFERENCES

1. Yu R, Zhang H, Guo B (2022) Conductive biomaterials as bioactive wound dressing for wound healing and skin tissue engineering. *Nanomicro Lett.* 14:1-46. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00751-y>
2. Qu J, Zhao, X, Liang Y, Zhang T, Ma PX, Guo B (2018) Antibacterial adhesive injectable hydrogels with rapid self-healing, extensibility and compressibility as wound dressing for joints skin wound healing. *Biomater* 183:185-199. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2018.08.044>
3. Okay O (2020) Self-Healing and Shape-Memory Hydrogels. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry, The 100 Year of Polymers* 48:507-525. <https://doi.org/10.15671/hjbc.797525>
4. Chirani N, Yahia LH, Gritsch L, Motta FL, Chirani S, Farè S (2015) History and applications of hydrogels. *J Biomed Sci* 4:1-23. <https://hdl.handle.net/11311/1170426>
5. Parin FN (2023) Synthesis and Characterisation of PVP-AAm Hydrogels via Hybrid Process: Morphological, Physical, and Antibacterial Activity. *J Adv Res Nat* 9:697-709. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1255113>
6. Foudazi R, Zowada R, Manas-Zloczower I, Feke DL (2023) Porous hydrogels: Present challenges and future opportunities. *Langmuir* 39:2092-2111. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02253>
7. Nascimento LGL, Casanova F, Silva NFN, de Carvalho Teixeira AVN, de Carvalho AF (2020) Casein-based hydrogels: A mini-review. *Food Chem* 314:126063. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126063>
8. Casanova F, Silva NFN, Gaucheron F, Nogueira MH, Teixeira AV, Perrone IT, Alves MP, Fidelis PC, de Carvalho AF (2017) Stability of casein micelles cross-linked with genipin: A physicochemical study as a function of pH. *Int Dairy J* 68:70-74. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.12.006>
9. Semeniuc CA, Pop CR, Rotar AM (2017) Antibacterial activity and interactions of plant essential oil combinations against Gram-positive and Gram-negative bacteria. *J Food Drug Anal* 25:403-408. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.06.002>
10. Pérez-Recalde M, Arias IER, Hermida ÉB (2018) Could essential oils enhance biopolymers performance for wound healing? A systematic review. *Phytomedicine* 38:57-65. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2017.09.024>
11. Ma J, Lee J, Han SS, Oh KH, Nam KT, & Sun JY (2016) Highly stretchable and notch-insensitive hydrogel based on polyacrylamide and milk protein. *ACS Appl Mater Interfaces* 8:29220-29226. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b10912>
12. Ammar AH, Bouajila J, Lebrihi A, Mathieu F, Romdhane M, Zagrouba F (2012) Chemical composition and in vitro antimicrobial and antioxidant activities of Citrus aurantium L. flowers essential oil (Neroli oil). *PJBS* 15:1034-1040. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2012.1034.1040>
13. Naik JB, Rajput RL, Narkhede JS, Mujumdar A, Patil PB (2021) Synthesis and evaluation of UV cross-linked Poly (acrylamide) loaded thymol nanogel for antifungal application in oral candidiasis. *J Polym Res* 28:1-13. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02377-x>
14. Moradi M, Barati A, Moradi S, Zarinabadi E. (2024) Synthesis and characterization of starch-based hydrogels containing myrtus oil nanoemulsion for wound dressings. *Polym Bull* 81:3043-3062. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02377-x>
15. Li W, Zhao Y, Sun W, Dong T, Saldaña MD, Sun W (2022) Multi-responsive poly N-isopropylacrylamide/poly N-tert-butylacrylamide nanocomposite hydrogel with the ability to be adsorbed on the chitosan film as an active antibacterial material. *Int J Biol Macromol* 208:1019-1028. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.198>
16. Zhang K, Feng W, Jin C (2020) Protocol efficiently measuring the swelling rate of hydrogels. *MethodsX* 7:100779. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100779>
17. Kundu D, Banerjee T (2020) Development of microcrystalline cellulose based hydrogels for the in vitro delivery of Cephalexin. *Heliyon*, 6:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03027>
18. Popa EG, Rodrigues MT, Coutinho DF et al (2013) Cryopreservation of cell laden natural origin hydrogels for cartilage regeneration strategies. *Soft Matter*, 9:875-885. <https://doi.org/10.1039/C2SM26846A>
19. Magalhães ASG, Almeida Neto MP et al (2012) Application of FTIR in the determination of acrylate content in poly (sodium acrylate-co-acrylamide) superabsorbent hydrogels. *Quím Nova*, 35:1464-1467. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000700030>

20. Pan K, Zhong Q, Baek SJ (2013) Enhanced dispersibility and bioactivity of curcumin by encapsulation in casein nanocapsules. *J Agric Food Chem* 61:6036-6043. <https://doi.org/10.1021/jf400752a>
21. Abdel-Gaber AM, Hijazi KM, Younes GO, Nsouli B (2017) Comparative study of the inhibitive action between the bitter orange leaf extract and its chemical constituent linalool on the mild steel corrosion in HCl solution. *Quím Nova* 40:395-401. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170020>
22. Jeannot V, Chahboun J, Russell D, Baret P (2005) Quantification and determination of chemical composition of the essential oil extracted from natural orange blossom water (*Citrus aurantium* L. ssp. *aurantium*). *Int J Aromather* 15:94-97. <https://doi.org/10.1016/j.ijat.2005.03.012>
23. Bhatia S, Al-Harrasi A, Al-Azri MS, Ullah S, Bekhit AEDA, Pratap-Singh A, Chatli MK, Anwer Md K, Aldawsari MF (2022) Preparation and physicochemical characterization of bitter orange oil loaded sodium alginate and casein based edible films. *Polymers* 14:1-15. <https://doi.org/10.3390/polym14183855>
24. Zhang K, Feng W, Jin C (2020) Protocol efficiently measuring the swelling rate of hydrogels. *MethodsX* 7:100779. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100779>
25. Kędzierska M, Kudłacik-Kramarczyk S, Jamroży M, Bańkosz M, Walter J, Potemski P, Drabczyk A (2023) Verification of the Influence of the 2-Hydroxy-2-methylpropiohenone (Photoinitiator) Content in Hydrogel Materials on Their Physicochemical Properties and Surface Morphology. *Coatings* 13:1-21 <https://doi.org/10.3390/coatings13010040>
26. Wang X, Song R, Johnson M, He Z, Milne C, Wang X, et al (2021) An injectable chitosan-based self-healable hydrogel system as an antibacterial wound dressing. *Mater* 14:1-11. <https://doi.org/10.3390/ma14205956>
27. Wang J, Li YaoZong L, YongFeng G, ZouFeng, X, MuHua Z, YinYan H et al (2018) Cinnamon oil-loaded composite emulsion hydrogels with antibacterial activity prepared using concentrated emulsion templates. *Ind Crops Prod* 112:281-289. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.022>



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Synthesis and application of soybean oil based photocurable polyurethane acrylates for aluminum coating

Berivan Ozer^a, Betül Nur Kus^a, Pelin Yetman^a, Müslüm Demircioğlu^a, Oguz Eryılmaz^a,
 Erhan Sancak^a, Zehra Yıldız^{a,*}

^aTextile Engineering, Marmara University, 34854, Istanbul, Turkey.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 August 2024

Received in revised form 18 November 2024

Accepted 4 December 2024

Available online

Keywords:

Soybean oil
Photo curing
Metal coating
Spray coating
Carbamate ester

ABSTRACT

The aim of this work is to create a new bio-based photocurable oligomer by starting with soybean oil instead of petroleum-based chemicals. For this purpose, acrylic acid (AA) and epoxidized soybean oil (ESBO) were initially reacted. Then the obtained acrylated ESBO (AESBO) oligomer was reacted with the isocyanate groups of the 2,4-toluene diisocyanate - 2-hydroxyethyl methacrylate (TDI-HEMA) adduct. TDI was chosen as the isocyanate source since it is the most widely produced and used form of isocyanate in the global polyurethane industry. HEMA provided the hydroxyl and acrylate groups needed for UV curing and polyurethane production, respectively. Additionally, the oligomer is flexible due to the methyl side group of HEMA. The synthesized oligomer was characterized by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and differential scanning calorimetry (DSC) analysis. The coating compositions included the produced TDI-HEMA modified AESBO oligomer, as well as a variety of reactive diluents and a photoinitiator. Then formulations were applied on aluminum plates by spray coating and cured by UV light. The impact of the type of reactive diluent on the film forming and coating performance were all searched. Overall results proved that the inclusion of reactive diluents in the coating formulations helped to increase the coating quality and performance by adjusting the crosslinking density resulting in enhancement in adhesion.

I. INTRODUCTION

The degree of ductility or brittleness and crosslinking density of the coating material has a significant impact on a coating layer's resistance to scratches. Brittle coatings are more prone to damage or deformation when a force is applied to a coated substrate. It is possible to modify a coating material's brittleness and crosslinking density by designing an appropriate oligomer with the necessary capabilities. Because of their great chemical resistance, good adhesion, better abrasion resistance, durability, and toughness, polyurethanes are preferred in the coatings business. They work well in many applications such as footwear, adhesives, packaging materials, coatings, paints, heat insulators, foams, elastomers, biomedical items, and composites [1-3]. Polyols and diisocyanates, which give PU coatings their elastomeric qualities, are the building blocks of polyurethanes [4]. The high degree of crosslinking density between the isocyanate and hydroxyl groups gives polyurethane resins exceptional chemical resistance as well [5]. Utilizing photocuring technology, crosslinked polymeric structures are created by triggering a photochemical reaction with UV light. Following the degradation of photoinitiators by UV radiation, the photochemical reaction takes place in chemical species with unsaturated groups, such as vinyl ether, acrylate, etc. with free radicals. With UV-curing technology, the crosslinked structure is created in a matter of seconds, saving time, and the manufacturing process is ecologically beneficial since less or no solvent is utilized [6]. Furthermore, crosslinking is done at low temperatures, which has the financial benefit [7].

*Corresponding author. Tel.: +90-216-777-3980; e-mail: zehra.yildiz@marmara.edu.tr

Two functional chemical species with a hydroxyl group (hydroxyethyl methacrylate, hydroxyethyl acrylate, etc.) and an isocyanate group (toluene diisocyanate, isophorone diisocyanate, etc.) can react to create photocurable polyurethane acrylates. It is possible to construct polyurethane acrylates with specific qualities by varying the stoichiometry of the hydroxyl and isocyanate functionalities. A popular technique for creating UV-curable oligomer/polymer structures is the toluene diisocyanate-hydroxyethyl methacrylate (TDI-HEMA) reaction. In the TDI-HEMA adduct, HEMA provides the photocurable acrylate functionality that gives the oligomer flexibility, while TDI provides the isocyanate groups that give the oligomer its stiffness and hardness [8]. The -OH groups of HEMA react first with the isocyanates at para-positions during the synthesis of the TDI-HEMA adduct. The reactivity preference between the isocyanates in para- and ortho-positions can be explained by the variations in reactivity. Compared to isocyanates in para-position, those in ortho-position exhibit four times lower reactivity. In order to facilitate subsequent reactions, the isocyanates in ortho-positions are purposefully left unreacted [9]. Many researchers are searching for plentiful, affordable, non-toxic, biodegradable, and renewable plant-based replacements for polyols derived from petrochemicals [10-17], which are used in the synthesis of PU. When it comes to polymer synthesis, vegetable oils offer a viable substitute for petroleum-based starting monomers [18]. Soybean oil is the preferred vegetable oil because of its five unsaturated groups, which enable certain functional groups to react with it. According to the literature, the most popular method for modifying soybean oil is the epoxidation reaction, which is carried out with the help of a catalyst and hydrogen peroxide. The oligomer can then be given the required functionality by reacting with amines, acids, etc. on the produced oxirane ring on the soybean oil structure [4]. This study's primary goal is to synthesize a novel bio-based photocurable oligomer using soybean oil as a starting material rather than chemicals derived from petroleum. In order to achieve this, epoxidized soybean oil (ESBO) will first react with acrylic acid (AA). The resulting acrylated ESBO, or AESBO, will then undergo an additional reaction with the NCO groups of the TDI-HEMA adduct in an orthogonal configuration. Since TDI is the most produced and often utilized isocyanate type in the worldwide polyurethane sector, it was selected as the isocyanate source. HEMA was used as a source of hydroxyl and acrylate groups, respectively, to enable UV curing and polyurethane synthesis. In addition, the methyl side group of HEMA provides the oligomer with flexibility. The synthesized TDI-HEMA-modified AESBO oligomer was used in the coating formulations along with various types of reactive diluents and photoinitiators. The effects of the reactive diluent type on the coating performance and film forming properties were discussed.

II. EXPERIMENTAL METHOD

2.1 Materials

Tetrahydrofuran (THF, non-reactive diluent), photo initiator (1-hydroxycyclohexyl phenyl ketone, Irgacure® 184), epoxidized soybean oil (ESBO) (MW=952 g/mole, EEW=232 g/equiv.), 1,6-hexanediol diacrylate (HDDA, reactive diluent), N-vinylpyrrolidone (NVP, reactive diluent), trimethylolpropane triacrylate (TMPTA, reactive diluent), hydroquinone (HQ, inhibitor), dibutyltin dilaurate (T12, catalyst), acrylic acid (AA), 2,4-toluene diisocyanate (TDI), 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA), triphenyl phosphine (TPP, catalyst), sodium hydroxide (NaOH), were all obtained from Merck and used without any purification.

2.2 Synthesis of the TDI-HEMA Modified AESBO Oligomer

Figures 1, 2, and 3 are all showing the synthesis scheme of the proposed functional oligomer. In this study, the proposed oligomer is different from those of earlier research since it modifies soybean oil using the TDI-HEMA adduct. Figure 1 belongs to the synthesis scheme of the AESBO oligomer. During this reaction, a round-bottom flask, equipped with a nitrogen gas inlet, a condenser, and a magnetic stirrer were all used. The ESBO: AA molar ratio of 1:5 was set considering the epoxy equivalent weight (EEW) of ESBO (232 g/equiv.). At the beginning of the reaction, ESBO and HDDA (reactive diluent) (30% out of the total ESBO and AA amount) were loaded into

the glass flask. Another glass beaker was employed to dissolve HQ (300 ppm) and TPP (1000 ppm) in AA via ultrasonification. After the inclusion of the AA solution dropwise into the main flask, the reaction started to be heated at 100 °C for 2 h and 120 °C for 2 h. During the reaction, the depletion of AA was followed by the acid titration method, and the reaction was ended when a constant acid value (AV) of 8.25 mg KOH/g was observed. During the reaction, TPP initiated the reaction between the epoxide groups of ESBO and acid groups of AA by starting a nucleophilic attack resulting in the formation of phosphonium betaine. Following the attachment of an AA proton to the betaine, the carboxylate anion's action on the electrophilic carbon of the phosphorus created an ester bond (Figure 1a).

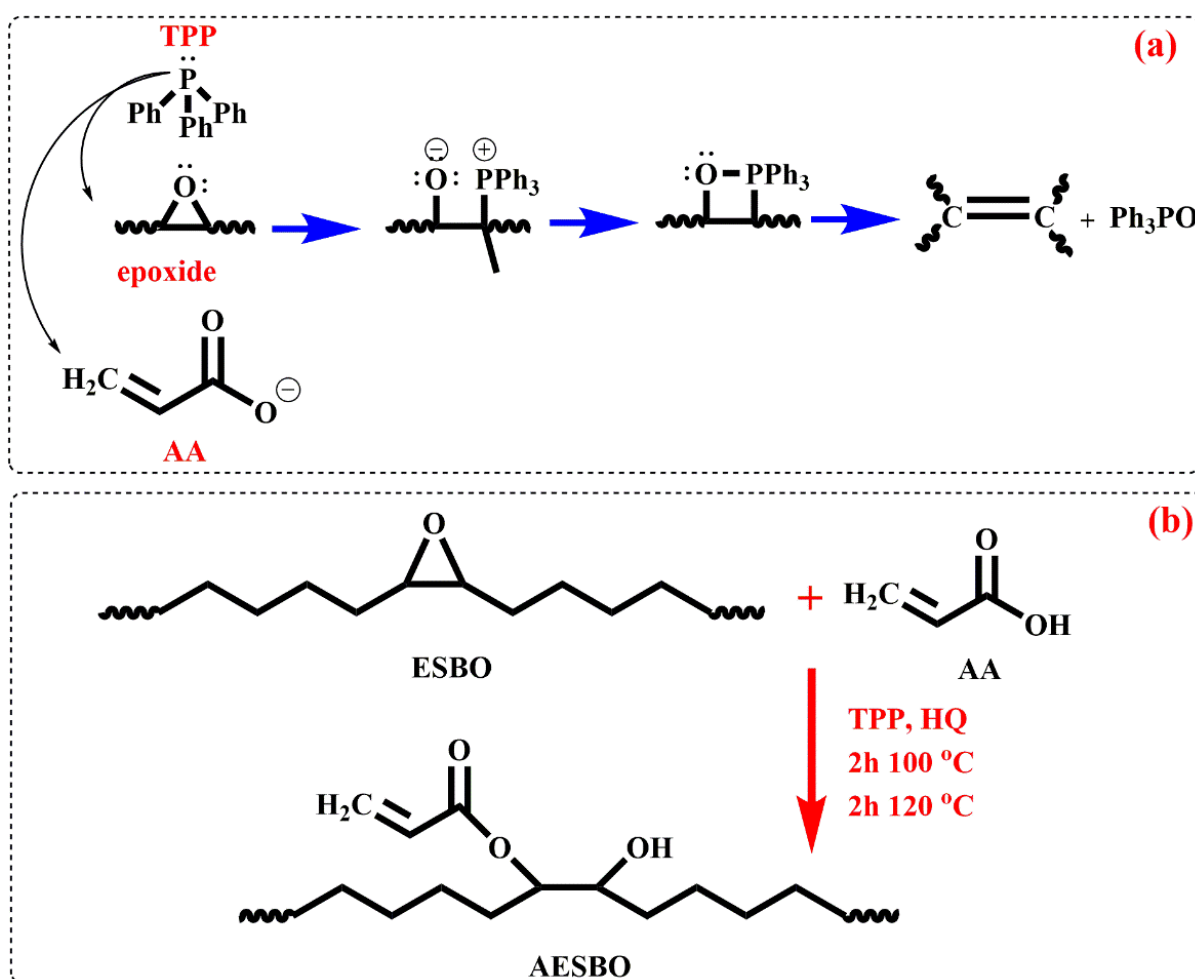


Figure 1. (a) Initiation reaction of TPP, (b) Synthesis scheme of the AESBO oligomer

In the second step, TDI-HEMA adduct was synthesized (Figure 2) to add urethane functional groups to the oligomer backbone. A round-bottom flask was employed having a magnetic stirrer and a condenser, for the synthesis reaction. The molar ratio of TDI:HEMA was set as 1:1 thus the one NCO group of TDI was intentionally left unreacted for further reaction with AESBO oligomer. At the beginning of the reaction, TDI along with THF (non-reactive diluent) were loaded into the flask, and then 0.03 wt% catalyst (T12) was added to the flask. Due to the sudden heat release, an ice bath was used, and HEMA was added dropwise to the main flask. After 30 min. of stirring in the ice bath, the reaction mixture was stirred at room temperature for another 30 min. Then the reaction proceeded at 70 °C for 1 h.

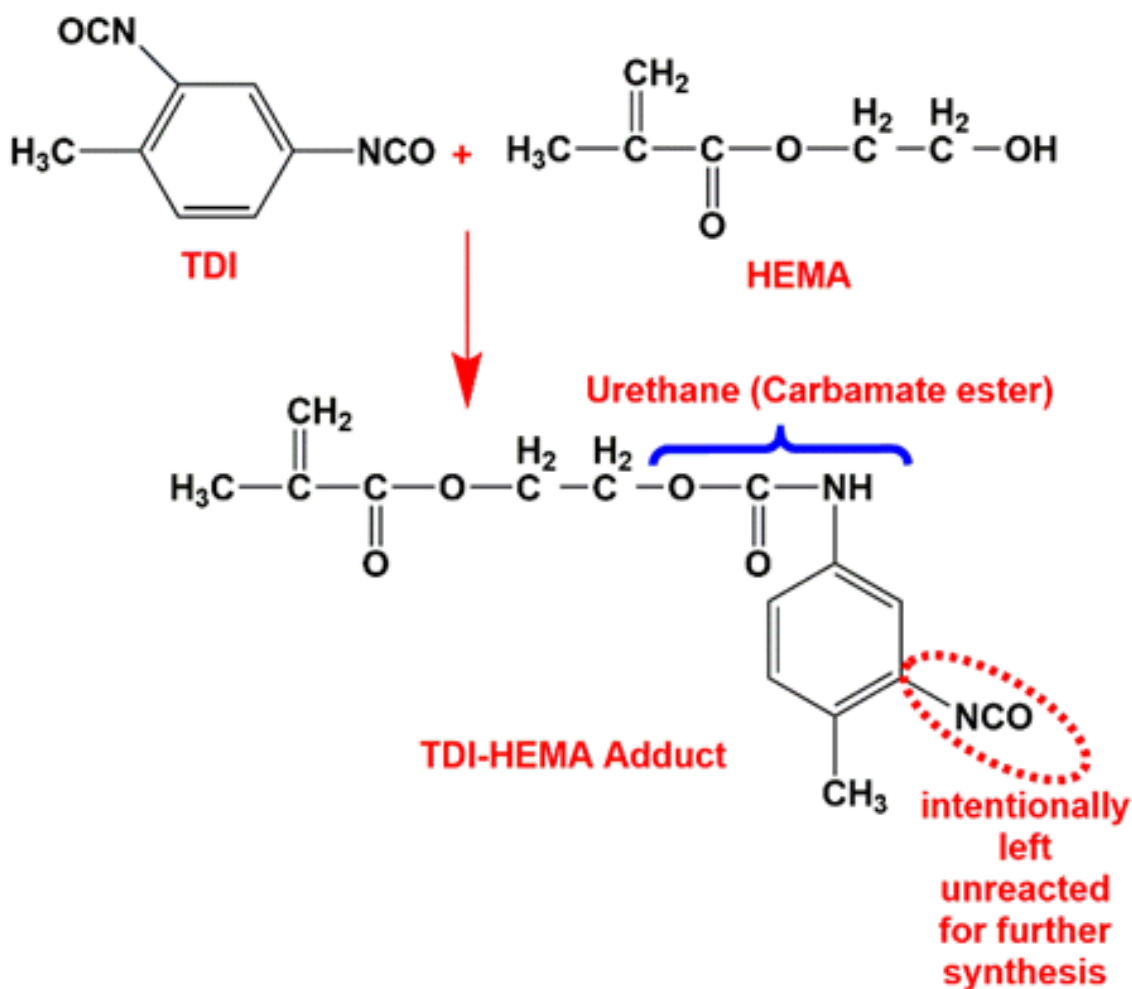


Figure 2. Synthesis scheme of the TDI-HEMA adduct

In the last step of the reaction, the -OH groups of AESBO oligomer which is formed by the epoxide ring opening reaction were reacted with the -NCO group of TDI-HEMA adduct. The scheme of this reaction can be followed in Figure 3. A certain amount of AESBO oligomer was mixed with the TDI-HEMA adduct by measuring the molar ratio of unreacted -NCO groups, in a round bottom flask having a magnetic stirrer and condenser. The reaction flask was heated to 80 °C for 1 h. The reaction ended when the isocyanate peak in FTIR spectra completely disappeared.

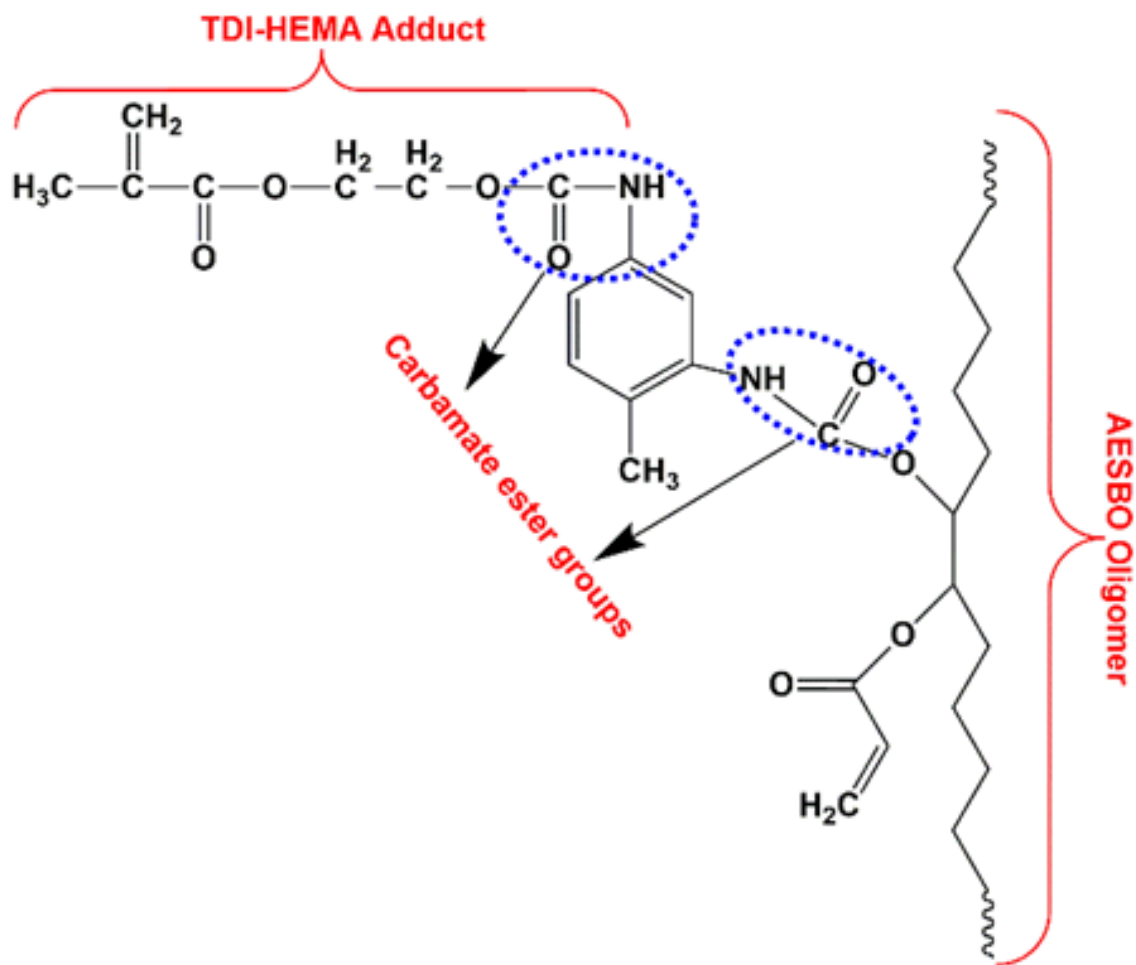


Figure 3. Synthesis scheme of the TDI-HEMA modified AESBO oligomer

2.2.1. Preparation and Application of Coating Formulations

The synthesized TDI-HEMA modified AESBO oligomer was included in the coating formulations along with 40 wt.% reactive diluent and 5 wt.% photoinitiator. Reactive diluents are frequently used in UV-curable coating formulations to reduce the formulation's viscosity and improve the coating layer's mechanical characteristics by adjusting the crosslinking density [21]. In this study, three different types of reactive diluents were employed to observe the effects of reactive diluent types on the coating performance of photo-cured TDI-HEMA modified AESBO oligomer. The type of the reactive diluent and the sample codes are illustrated in Table 1. After preparing the coating formulations, a spray gun (Figure 4a) was used to coat the Al surface. Then the coated surfaces were put in a zip-locked PE bag and two glass plates in order to prevent oxygen inhibition during photo-curing. A UV cabinet (Figure 4b), with a 365 nm UV light capacity, was used to cure the formulation.

Table 1. Sample codes and compositions

Sample Codes	Reactive Diluent	Functionality
A	None	None
B	NVP (N-vinylpyrrolidone)	Aromatic
C	HDDA (1,6-hexanediol diacrylate)	Difunctional
D	TMPTA (trimethylolpropane triacrylate)	Trifunctional

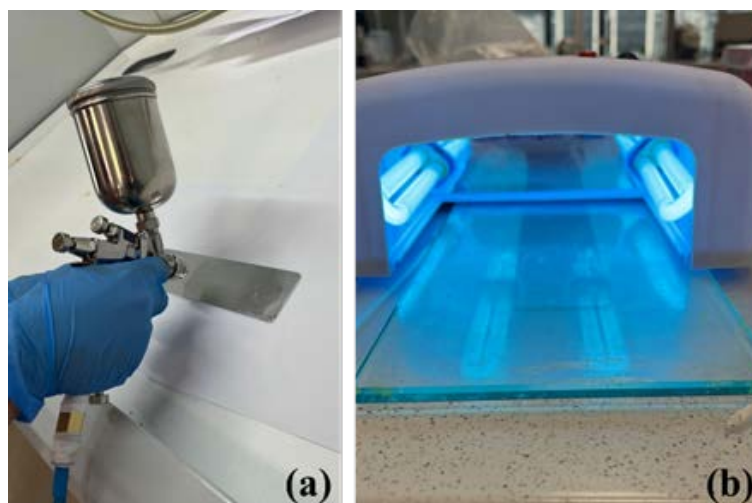


Figure 4. Spray coating (a) and UV-curing (b) processes

2.3. Characterization of materials

The synthesized oligomer was included in coating formulations along with the reactive diluents (Table 1) and photo initiator. Then, the formulations were casted on PTFE molds and cured by UV light to obtain UV-cured free films. Fourier transform infrared (FTIR, Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR, with a ZnSe ATR sample holder) was used to analyze the chemical structure of the synthesized oligomers. Differential scanning calorimetry (DSC, Perkin Elmer Jade DSC instrument with Pyris software) was employed to observe the thermal transitions (T_g and T_d) of UV-cured free films. DSC analysis was recorded from 30-250 °C with a heating rate of 10 °C/min under a nitrogen atmosphere. The adhesion of coating formulations on Al plates was evaluated by using a cross-hatch (adhesion) test according to the DIN 53151 standard, by using a SH model of Sheen cross-cut testing kit. The coated UV-cured Al plates were also tested by means of rust formation upon water exposure by using the ASTM D610-08 standard.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 FTIR Analysis

The synthesized oligomers give characteristic peaks about the intended functional groups. The peak at 1744 cm^{-1} belongs to the carbonyl group of soybean oil for the spectra of a and b, whereas in c, it represents the carbonyl groups of HEMA and carbamate ester groups. The C-H asymmetric stretching vibration peaks in $-\text{CH}_2-$ and $-\text{CH}_3$ groups were observed at 2924 cm^{-1} and 2854 cm^{-1} , respectively. In the spectra of ESBO, the C-O-C asymmetric stretching vibration peaks at 823 cm^{-1} and 1155 cm^{-1} were attributed to the existence of the epoxide group. These peaks both disappeared after the reaction with AA. The newly formed peaks at 1619 cm^{-1} and 1636 cm^{-1} in AESBO spectra confirmed the existence of acrylate functionality with C=C double bond stretching vibration and C=O vibration. Additionally, the C-H bending vibration peak at 809 cm^{-1} also supports the epoxide ring-opening reaction. On the spectra of c and d, the carbonyl groups of HEMA and carbamate ester peaks at 1744 cm^{-1} overlap with the carbonyl group peaks of ESBO. Additionally, the peaks at $825\text{-}895\text{ cm}^{-1}$ region on the spectra of c and d,

are confirming that the existence of multiple substitution aromatic hydrocarbon units of TDI. The non-reactive diluent (THF) still exists in the system which needs to be evaporated prior to the coating and UV curing stages [19, 20].

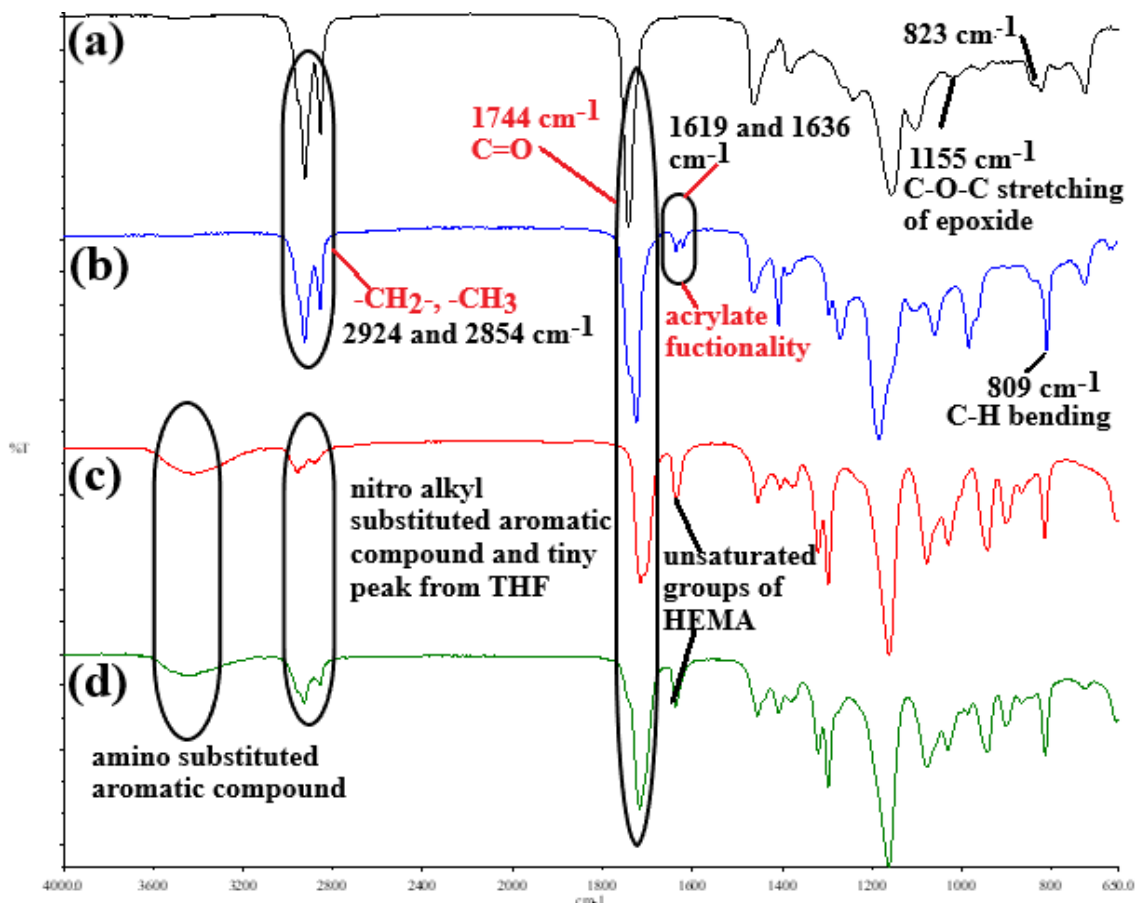


Figure 5. FTIR spectra of the synthesized oligomers; (a) ESBO, (b) AESBO, (c) TDI-HEMA adduct, (d) TDI-HEMA modified AESBO

3.2 DSC Analysis

DSC analysis was employed to observe the thermal transitions of UV-cured free films. Figure 6 shows the DSC curves of free films utilizing each reactive diluent type. The inclusion of reactive diluents in the formulation causes an increase in crosslinking density resulting in less molecular mobility with higher T_g values [21]. Accordingly, due to the bulky aromatic functional group of NVP, the sample of B showed the highest T_g value ($102\text{ }^\circ\text{C}$). Considering samples C and D, having HDDA and TMPTA as reactive diluents, it is obvious that with the increasing functionality of the reactive diluents, T_g moves towards higher temperatures [22]. Thus, the T_g value of D is higher than C due to the trifunctional groups on its backbone. In other words, the decrease in T_g values can be explained by the following explanation; due to the penetration of reactive diluent molecules having shorter chains with less functionality between soybean oil-based oligomers, the chain alignment was disrupted and the van der Waals bonding between the adjacent chains were reduced thereby providing more free volume in the system. Besides T_g , the decomposition area was also observed in the $140\text{-}190\text{ }^\circ\text{C}$ temperature range for all samples due to the inherent decomposition temperature of acrylate-based monomers around $180\text{ }^\circ\text{C}$ [23, 24].

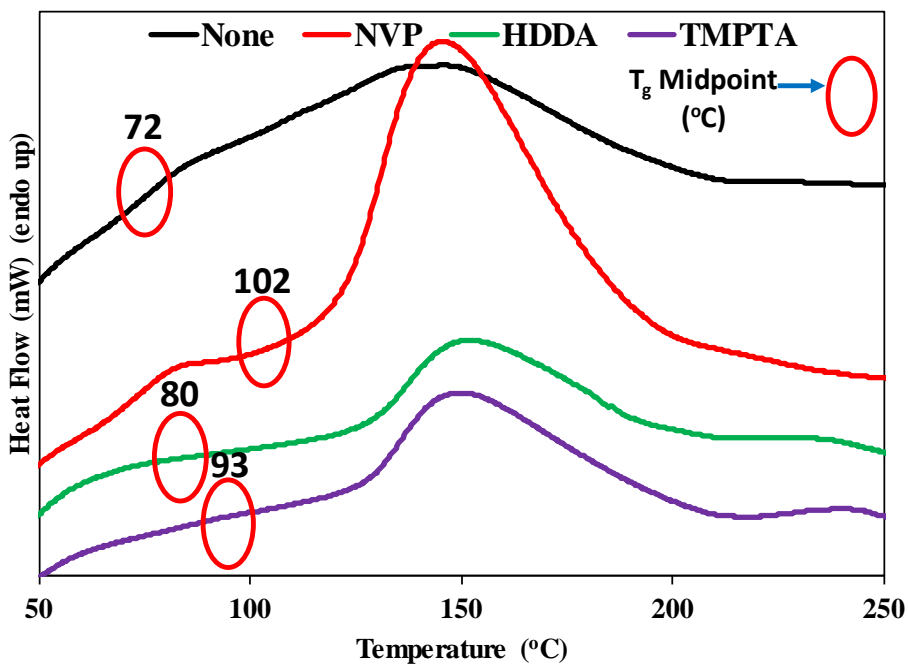


Figure 6. DSC curves of UV-cured free films

3.3 Crosscut Adhesion Test

The ASTM standard was followed for performing the cross-hatch (adhesion) test. The cross-hatch test result varies between 1B and 5B, where 1B denotes poor adhesion, which means that 35–65% of the film is taken from the surface, and 5B shows no film pull-off, which indicates the highest level of adhesion [25]. Figure 7 shows the cross-hatch test results along with the sample surface images. The sample A shows the poorest adhesion with a cross-hatch result of 2B. This result stems from the lack of reactive diluent in the formulation. After adding reactive diluents, the adhesion of the coating layer remarkably increased for all samples. The polar nature of acrylate groups in HDDA and TMPTA which support adhesion promotion caused the best cross-hatch test results with 4B in samples C and D. In contrast, in the sample of B, the pyrrolidone group of NVP has less polarity resulting in a less adhesion onto the Al surface.

3.4. Water Immersion Test

Table 2 shows the water immersion testing results of coated and UV-cured Al plates based on the visual evaluation of rusted areas after 24h water immersion. During the evaluation, rusted areas are categorized into 3 groups in terms of the shape and type of rusting. These are spot (S), pinpoint (P), and hybrid (H). In this study, after 24h water immersion of Al plates, rusting areas were observed in both spots and pinpoint shapes, thus a hybrid-type rusting occurred. Grading varies from 0 to 10 and 10 means no rusting, and 0 means more than 50% rusting. The testing result is given with both the grade and the type of rusting, i.e. 8-P means the rusted area is in the range of 0.03-0.1 % with a pinpoint rusting shape. Accordingly, the highest rusting grade of 3-H, which means that the rusted area is in the range of 10-16 % with a hybrid rusting shape, was recorded in the sample of A due to the lack of reactive diluent in the formulation resulting in poor adhesion on the surface. It is obvious that the inclusion of reactive diluent to the formulation helped to prevent the formation of rust by increasing the crosslinking density

resulting in enhancement in adhesion onto the surface. It seems that trifunctional and aromatic functional reactive diluents are much more effective than difunctional ones in preventing rusting [26].

Table 2. Water immersion testing results

Sample Codes			
None	NVP	HDDA	TMPTA
3-H	7-H	5-H	6-H
Scale and Type of Rusting			

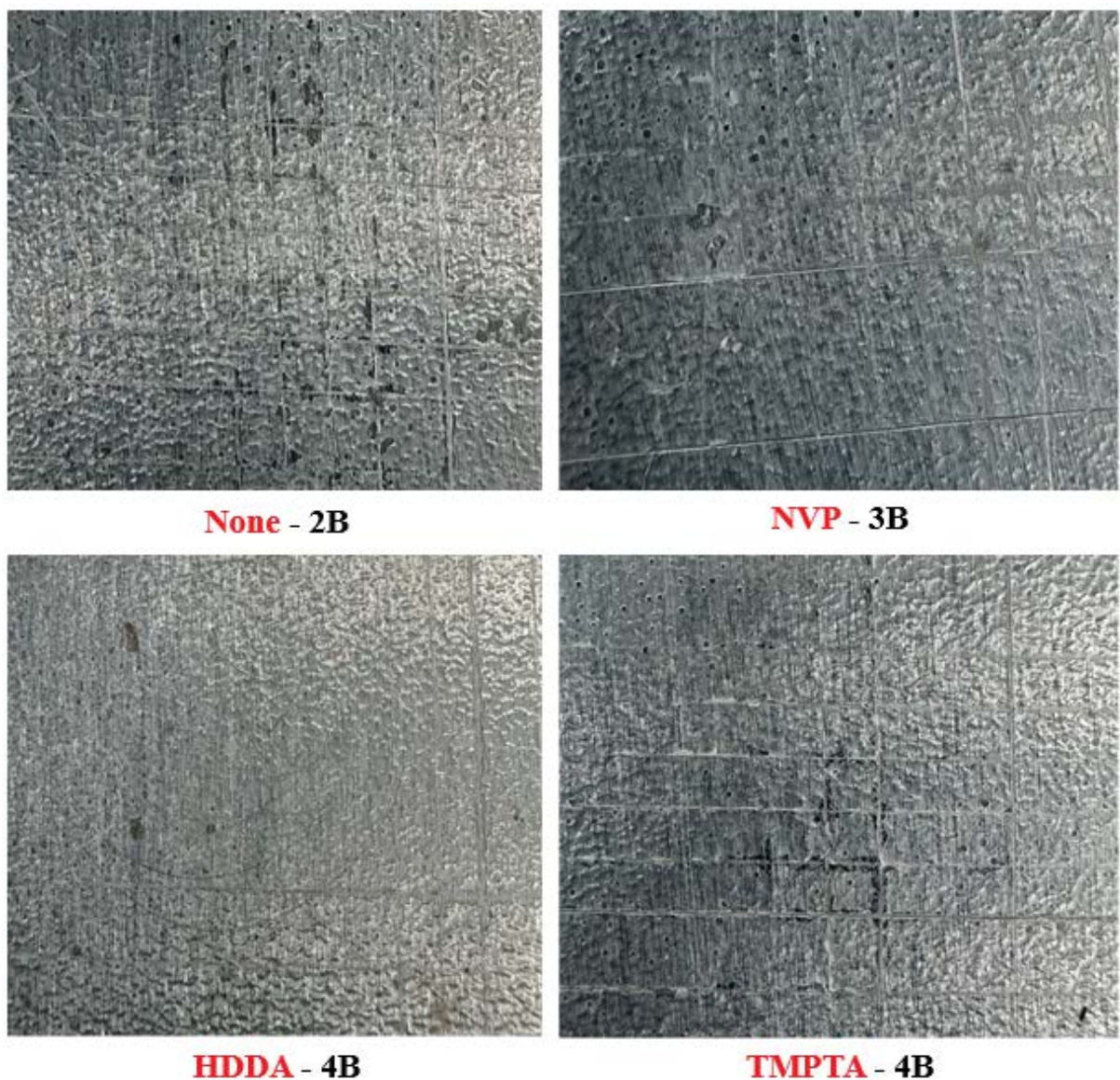


Figure 7. Cross cut testing results with the surface images

IV. CONCLUSIONS

In this study, a bio-based alternative to the petrochemical coating formulations on Al plates was examined with the help of UV-curing technology. The epoxide groups of ESBO were reacted with AA, and then the NCO groups of TDI-HEMA adduct were employed to modify the AESBO oligomer. The obtained photocurable oligomer was included in coating formulations with various reactive diluent types. FTIR spectra proved the formation of acrylic

functional groups in the AESBO oligomer backbone. The formation of carbamate ester groups upon the reaction with TDI-HEMA adduct was also followed by the FTIR spectroscopy. Due to the increase in crosslinking density with reactive diluents, T_g values shifted to the higher temperatures. The crosscut adhesion and water immersion test results revealed that the inclusion of reactive diluents in the coating formulations helped to increase crosslinking density resulting in enhancement in adhesion through giving less rusted areas. The number of functional groups of reactive diluents is the key parameter that determines the coating quality and performance. Besides, the type of functional group (aliphatic, aromatic, etc.) is also effective in coating quality by adjusting the free volume and molecular mobility of the polymer network. As conclusion, this study proved that bio-based photocurable formulations can be suggested as an alternative to the petrochemical components in conventional metal coating applications.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was financially supported by TÜBİTAK IRA-SME project with the grant number “122N399”. The extended abstract of this study was orally presented at 14th International Fiber and Polymer Research Symposium (ULPAS), Bursa, Turkey, on 24-25th May, 2024.

REFERENCES

1. Boisaubert P, et al (2020) Photo-crosslinked coatings from an acrylate terminated non-isocyanate polyurethane (NIPU) and reactive diluent. *European Polymer Journal* 138, 109961. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109961>
2. Choi WC, et al (2023) Study on Press Formability and Properties of UV-Curable Polyurethane Acrylate Coatings with Different Reactive Diluents. *Polymers* 15(4), 880. <https://doi.org/10.3390/polym15040880>
3. Wang X, Soucek MD (2013) Investigation of non-isocyanate urethane dimethacrylate reactive diluents for UV-curable polyurethane coatings. *Progress in Organic Coatings* 76(7-8):1057-1067. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.03.001>
4. Alam M, et al (2014) Vegetable oil based eco-friendly coating materials: A review article. *Arabian Journal of Chemistry* 7(4):469-479. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.023>
5. Das A, and Mahanwar P (2020) A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 3(3):93-101. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.07.002>
6. Park JW, et al (2018) Evaluation of UV curing properties of mixture systems with differently sized monomers. *Materials* 11(4):509. <https://doi.org/10.3390/ma11040509>
7. Wang S, et al (2020) Making organic coatings greener: Renewable resource, solvent-free synthesis, UV curing and reparability. *European Polymer Journal* 123:109439. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109439>
8. Yan Z, et al (2013) Synthesis and properties of a novel UV-cured fluorinated siloxane graft copolymer for improved surface, dielectric and tribological properties of epoxy acrylate coating. *Applied surface science* 284:683-691. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.156>
9. Wang SJ, et al (2012) Preparation of polyurethane-poly (butyl acrylate) hybrid latexes via miniemulsion polymerization. *Applied Mechanics and Materials* 204:3938-3941. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3938>
10. Eryilmaz O (2024) Revalorization of cellulosic fiber extracted from the waste stem of Brassica oleracea var. botrytis L. (cauliflower) by characterizing for potential composite applications. *International Journal of Biological Macromolecules* 266:131086. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131086>
11. Eryilmaz O, Kocak ED, and Sancak E (2023) Braided natural fiber preforms, In: Midani M (ed) *Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites*, Woodhead Publishing, Manchester UK, pp 221-237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95329-0.00007-7>
12. Eryilmaz O, et al (2020) Investigation of the Water-Based Ink Hold onto the Thermoplastic Composites Reinforced with Sisal Fibers. *Journal of Textile Science Fashion Technology* 5(3). <https://dx.doi.org/10.33552/JTSFT.2020.05.000612>

13. Eryılmaz O, and Ovalı S (2024) Investigation and Analysis of New Fiber from *Allium fistulosum* L. (Scallion) Plant's Tassel and its Suitability for Fiber-Reinforced Composites. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* 29(1):51-66. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1410520>
14. Ovalı S, and Eryılmaz O (2024) Physical and Chemical Properties of a New Cellulose Fiber Extracted from the *Mentha pulegium* L. (Pennyroyal) Plant's Stem. *Çukurova University Journal of The Faculty of Engineering* 39(1):211-220. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1460444>
15. Ovalı S, Eryılmaz O, and Uyanık S (2024) Exploring the potential of sustainable natural cellulosic fiber from *Sorghum bicolor* (*Sorghum vulgare* var. *technicus*) stem for textile and composite applications. *Cellulose* 31(5):3289-3302. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05800-4>
16. Yildiz Z, and Eryılmaz O (2023) Preimpregnated natural fiber preforms, In: Midani M (ed) *Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites*, Woodhead Publishing, Manchester, UK, pp 327-340. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95329-0.00003-X>
17. Yildiz Z, et al (2024) Sustainable fabric printing by using pre-consumed cellulosic textile wastes: The effect of waste particle content. *Journal of Cleaner Production* 448:141635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141635>
18. Islam MR, Beg MDH, and Jamari SS (2014) Development of vegetable-oil-based polymers. *Journal of applied polymer science* 131(18). <https://doi.org/10.1002/app.40787>
19. Yildiz Z (2022) Usage of UV-Curable Soybean Oil Based Coating Formulations for Pretreated Cotton Fabrics. *Textile and Apparel* 32(3):232-242. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.940434>
20. Yildiz Z, et al (2018) Effects of NCO/OH ratio and reactive diluent type on the adhesion strength of polyurethane methacrylates for cord/rubber composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 57(10):935-944. <https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1364382>
21. Yildiz Z, and Onen HA (2017) Dual-curable PVB based adhesive formulations for cord/rubber composites: The influence of reactive diluents. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 78:38-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.06.004>
22. Wang F, Hu J, and Tu W (2008) Study on microstructure of UV-curable polyurethane acrylate films. *Progress in Organic Coatings* 62(3):245-250. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.12.005>
23. Goswami A, Umarji A, and Madras G (2010) Degradation kinetics of poly (HDDA-co-MMA). *Journal of applied polymer science* 117(4):2444-2453. <https://doi.org/10.1002/app.32122>
24. Li Q, et al (2016) Thermal degradation kinetics of poly (acrylate/ α -methyl styrene) copolymers. *Polymer Degradation and Stability* 128:158-164. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.10.003>
25. Dehmen OG, et al (2021) Synthesis and characterization of UV-curable cellulose acetate butyrate-based oligomers and their cotton fabric coatings. *Journal of Coatings Technology and Research* 18:1075-1085. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00461-5>
26. Goodarzi IM, et al (2014) Eco-friendly, acrylic resin-modified potassium silicate as water-based vehicle for anticorrosive zinc-rich primers. *Journal of applied polymer science* 131(12). <https://doi.org/10.1002/app.40370>



TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmelik hükümlerine göre tasarımı yapılan binaların performansının incelenmesi

Necati Mert^a, Muhammet Mustafa Tokay^a, Enes Özdemir^b ve Hasan Sesli^{b,*}

^a*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 54000, Türkiye.*

^b*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yalova Üniversitesi, Yalova, 77200, Türkiye.*

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 18 Temmuz 2024

Düzeltilme 28 Kasım 2024

Kabul 6 Ocak 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

TBDY-2018

DBYBHY-2007

Performans analizi

Yapısal davranış

Betonarme binalar

ÖZET

Bu çalışmada, Yalova ilinde inşa edilmiş olduğu varsayılan binaların deprem performansları, TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 tasarım yönetmeliklerine göre değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, binaların döşeme sistemi, kat sayısı ve yerel zemin sınıfları değiştirilerek, yapıların davranışları ve depreme karşı performansları STA4CAD betonarme yapısal analiz paket programı ile değerlendirilmiştir. Bu analizler sonucunda, elde edilen veriler ışığında yapıların doğal titreşim periyotları, taban kesme kuvvetleri ve etkin görelî kat ötelemeleri gibi parametreleri karşılaştırılmış ve beton ve donatı miktarlarındaki değişim incelenmiştir. Ortak bir mimari plan kullanılarak, yapıların tasarımında zemin sınıfı, kat sayısı ve döşeme sistemlerindeki değişiklikler göz önünde bulundurulmuş ve TBDY-2018 ve DBYBHY-2007'deki sınırlar dikkate alınarak yapıların davranışları incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda TBDY-2018'de zorunlu hale getirilen etkin kesit rijitliklerinin, yapıların davranışını önemli ölçüde değiştirdiğini ortaya koymuştur. Bu değişiklikler, yapıların daha rijit hale gelmesine ve dolayısıyla depreme karşı daha güvenli olmasına yol açmıştır. Bu doğrultuda, TBDY-2018'e göre tasarımı yapılan yapıların, DBYBHY-2007'ye göre çok daha fazla donatı ve betona ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Ayrıca, DBYBHY-2007'ye göre tasarlanmış binaların deprem performanslarının, TBDY-2018'in belirlediği performans kriterlerini karşılamadığı tespit edilmiştir.

Evaluation of the performance of buildings designed specifically according to TBEC-2018 and TEC-2007 regulations provisions

ARTICLE INFO

Article history:

Received

Received in revised form

Accepted

Available online

Keywords:

TBEC-2018

DBYBHY-2007

performance-based analysis

structural behavior

reinforced concrete buildings

ABSTRACT

In this study, the earthquake performances of buildings assumed to have been built in Yalova province were evaluated according to TBEC-2018 and TEC-2007 design regulations. Within the scope of the study, the floor system, number of storey and soil classes of the buildings were changed and the behavior of the buildings and their performance against earthquakes were evaluated according to the provisions of both regulations with the STA4CAD reinforced concrete structural analysis software. As a result of these analyses, the parameters of the structures such as natural vibration periods, base shear forces and relative story drifts were compared. The changes in the amounts of concrete and reinforcement according to both regulations were examined. Using a common floor plan, changes in soil class, number of storey and floor systems were taken into account in the design of the buildings, and the behavior of the buildings was examined taking into account the limits of both regulations. As a result of the analysis, it has been revealed that the effective section stiffnesses in TBEC-2018 significantly change the behavior of the structures. These changes have led to structures becoming more rigid and therefore safer against earthquakes. In this regard, it has been observed that the structures designed according to TBEC-2018 need much more reinforcement and concrete than TEC-2007. In addition, it has been determined that the earthquake performances of structures designed according to old regulations do not meet the performance criteria determined by TBEC-2018.

I. GİRİŞ

Ülkemiz, Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF) ile Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF) gibi deprem kuşakları etkisi altındadır. Bu faylar ara ara büyük depremler üreterek büyük can kayıplarına ve yıkımlara yol açmaktadır. Sanayileşme, kentleşme vb. nedenlerle nüfus yoğunluğunun fazla olduğu yerlerin önemli bir kısmının fay kuşaklarına yakın olmasının yanında yetersiz zemin koşulları ve depreme dayanıksız yapıların varlığı, şiddetli deprem etkisinde afetin boyutunu önemli ölçüde belirlemektedir [1].

Deprem daha önceden tahmin edilmesi ve hesap edilmesi en zor olan bir dinamik yük etkisi olmaktadır. Bu sebeple yapı davranışını kontrol altına alabilmek sadece olası deprem yükü etkisinde yapı davranışını öngerebilmek ile mümkün olmaktadır.

Sesli, 2023 yılında Türkiye’de geçmişten itibaren uygulamalarda sıkça yaşanan sorunlar, bilimsel araştırmalar sonucu elde edilen yeni bilimsel veriler ve teknolojik gelişmeler ışığında 1947, 1953, 1961, 1968, 1975, 1998, 2007 ve halen yürürlükte olan 2018 deprem yönetmeliği olmak üzere, deprem yönetmelikleri toplam 8 kez revize edilmiştir. 1998 deprem yönetmeliğinin uygulamaya sokulmasının hemen ardından 17 Aralık 1999 tarihinde meydana gelen 7,6 büyüklüğündeki Kocaeli Depremi sonucunda geçmişte yapılan uygulama hataları, bölgenin ve ülkenin ağır bir faturası haline dönüşmüştür. Yaşanan deprem tecrübesi ile yaklaşık 10 yıl süre zarfındaki gelişmelere bağlı olarak, 1998 deprem yönetmeliğine beton ve çelik donatı sınıfı gibi mikro ölçekte değişikliklerin yanında bina değerlendirme ve güçlendirme bölümü eklenerek “2007 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)” yürürlüğe girmiştir [2]. Bilim alanında artan teknolojik gelişmeler ve araştırmalar neticesinde artık yeni bir yapı yönetmeliğine ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır. 18 Mart 2018’de Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018), Resmî Gazete de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.

TBDY-2018 ile gelişen modern çağın ve teknolojinin getirdiği olanaklardan faydalanarak yapıların tasarımında daha modern yaklaşımlar ve daha kapsamlı analiz yöntemleri ile yapıların analizlerini değerlendirme fırsatı bulunmuştur. TBDY-2018’de zemin ile ilgili bilgiler daha kapsamlı bir bölümde ele alınarak Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007’ye nazaran daha kapsamlı değerlendirilmesi sağlanmıştır. TBDY-2018’in yürürlüğe girmesi ile birçok bilimsel çalışma yapılarak yönetmeliğin sağladığı katkılar ortaya konulmuştur.

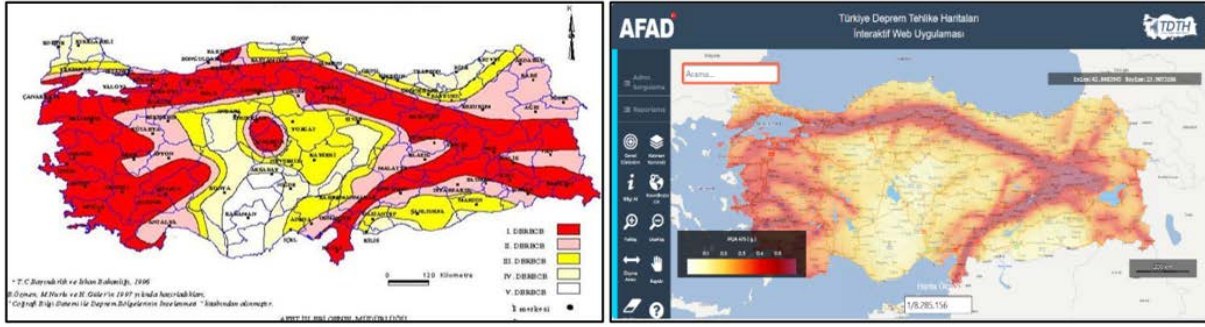
Keskin vd., 2018 yılında eski yönetmelik ve yeni yönetmelikte en zayıf zemin sınıfı olarak yer alan Z4 ve ZE için yaptıkları çalışmada ZE zemin sınıfının yük ve deplasmanlarında yeni yönetmelikte önemli artışlar olduğunu tespit etmişlerdir [3]. Karaca vd., 2020 yılında TBDY-2018’e göre tasarlanmış olan beş farklı binanın DBYBHY-2007’ye göre donatı miktarının arttığını gözlemlemişlerdir. Bu durumun sebebinin kesit rijitliklerinin azaltılmadan daha fazla yükleme yapılan kesitlere daha fazla donatı ihtiyacı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, kesit rijitliklerinin azaltılmasının yapıdaki görelî kat ötelemelerini etkilediğini tespit etmişlerdir [4]. Meral 2021 yılında, farklı katlara sahip yapıların davranışını Sap 2000 sonlu eleman paket programında doğrusal elastik zaman tanım alanı yöntemi ve tepki spektrumuna göre karşılaştırmıştır. Elde ettiği sonuçlarda her iki analiz yöntemine göre tepe noktası deplasmanlarda artışın olduğunu ve 7 katlı yapılarda riskli duruma geldiğini tespit etmiştir [5]. Gündoğay ve Aksakal 2022 yılında, TBDY-2018 ile DBYBHY-2007’deki sınır şartlarını dikkate alarak kare kolonları, kolonların üzerine gelen eksenel yükü, etriye aralığını, betonun dayanımını, boyuna donatı çapını değişken parametreler olarak dikkate alarak her iki yönetmeliğe göre kolonların eğrilik sünekliğini karşılaştırmışlardır. Yeni yönetmeliğe göre elde edilen eğrilik sünekliğinin eski yönetmeliğe oranla güvende kaldığını tespit etmişlerdir [6].

Doğan vd., 2022 yılında, TBDY-2018'e göre saplama kirişlerin momentlerinin düşey deprem etkisini de dikkate alarak eski yönetmeliğe göre 4 kat arttığı sonucuna varmışlardır. Eski yönetmeliğe oranla düşey deprem etkisinin konsol kirişlerin mesnet momentlerindeki artışı üzerinde %20 katkısı olduğunu tespit etmişlerdir [7]. Sümer ve Hamsici 2019 yılında, TBDY-2018'e göre tasarımı yapılan binalardaki kat sayısının artmasıyla birlikte taban kesme kuvvetinin 2007 yönetmeliğine göre daha düşük olduğunu ve yumuşak zemine doğru gidildikçe etkin görelî kat ötelemelerinin daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [8]. Dalayan ve Şahin 2019 yılında, 5 katlı betonarme konut yapısının deprem yükleri altındaki performansını DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerine göre doğrusal olmayan artımsal itme analizi ile incelemişlerdir. TBDY-2018'e göre yapı daha uzun periyotlar ve daha düşük deprem kuvvetleriyle hesaplanmış, ancak şekil değiştirme hasar sınırları daralmıştır, bu nedenle hedef performans DBYBHY-2007 ile benzer kaldığını tespit etmişlerdir [9]. Çetin vd., 2020 yılında, farklı bölgesel zemin sınıflarının binalarda ortaya çıkan A1 burulma düzensizliklerine etkisini incelemişlerdir. 270 farklı binanın modellemesi ve analizini, beş farklı bina tipi için Sap 2000 analiz programını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, TBDY-2018'e göre normal binaların burulma düzensizliği katsayısının DBYBHY-2007'ye göre azaldığı, ancak düzensiz binaların burulma düzensizliği katsayısının DBYBHY-2007'ye göre arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, yapının merkezine asimetrik bir perde duvar yerleştirildiğinde burulma düzensizliğinin arttığını gözlemlemişlerdir [10]. Ünsal vd., 2020 yılında, TBDY-2018 ve DBYBHY-2007'yi temel olarak bina yüksekliğinin toplam eşdeğer sismik yük ve maksimum tepe yer değiştirme üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda taban kesme değerinin eski düzenlemelerle yapılan analiz sonuçlarına göre daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, TBDY-2018'e dayalı olarak yapılan analizlerde, en büyük deplasman değerlerinin DBYBHY-2007'ye dayalı olarak yapılan analizlere kıyasla daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir [11]. Aksoylu ve Arslan 2021 yılında, TBDY-2018'de hesaplanan taban kesme kuvvetinin, DBYBHY-2007'de hesaplandan daha düşük olduğunu saptamışlardır. Görelî kat ötelemelerinin her iki yönetmelikte belirtilen sınırlar içinde kaldığını tespit etmişlerdir [12]. Adar vd., 2021 yılında, betonarme taşıyıcı sistemler için hesaplanan yer değiştirme değerlerinin, DBYBHY-2007 yönetmeliğine oranla yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumun, TBDY-2018'de belirtilen sınır olarak tanımlanan görelî kat deplasmanlarının artmasına denk olduğunu tespit etmişlerdir. Yeni ve eski yönetmeliklere göre değerlendirilen burulma düzensizliği katsayısının farklı olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, daha fazla yer değiştirme talepleri nedeniyle, yeni yönetmeliğe göre doğal titreşim periyodunun eski yönetmeliğe oranla daha uzun olduğunu tespit etmişlerdir [13]. Bu çalışmada deprem etkisi altındaki yapıların, taban kesme kuvvetleri, yapı doğal titreşim periyotları ve etkin görelî kat ötelemeleri üzerinde değerlendirmeler yapılarak her iki yönetmeliğe göre kesit boyutları ile donatı miktarındaki değişimler ve yapıların, TBDY-2018 performans kriterlerine göre deprem performansları araştırılmıştır.

II. YÖNTEM

Bu çalışmanın temel amacı, TBDY-2018 ile DBYBHY-2007'e göre tasarlanan yapılar arasındaki temel farklılıkların ortaya konması ve TBDY-2018 kapsamında deprem performanslarının karşılaştırılmasıdır. Bunun için öncelikle DBYBHY-2007'ye göre TBDY-2018'e eklenen ve değiştirilen hususlar incelenmiştir.

DBYBHY-2007'de Türkiye 4 deprem bölgesine ayrılırken TBDY-2018'de ise deprem bölgeleri ifadesi kaldırılarak deprem bölgeleri haritası yerine 'Türkiye Deprem Tehlike Haritası' getirilmiştir. Bu harita ile inşa edilmesi planlanan her yapıya ait lokasyon bilgisi girilerek konuma ait spektral ivme katsayıları elde edilmektedir. Şekil 1'de Eski ve yeni yönetmelikte kullanılan deprem tehlike haritaları karşılaştırmalı verilmiştir.



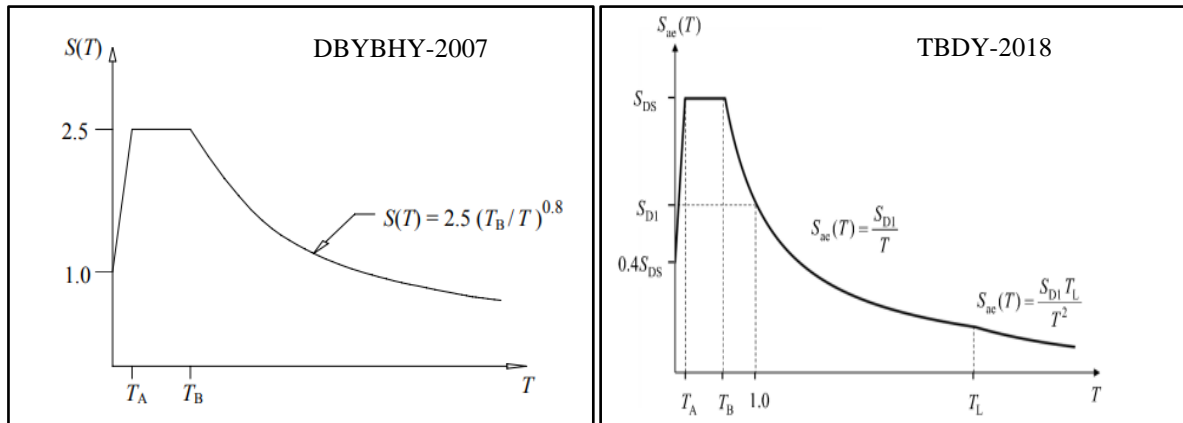
Şekil 1. TBDY-2018 ve DBYBHY-2007'de kullanılan deprem tehlike haritaları [14]

DBYBHY-2007'de deprem yer hareketi düzeyi tanımlanmamış olup, tasarımı yapılan tüm binalarda 50 yılda aşılma olasılığı %10, tekrarlanma periyodu 475 yıl olarak belirtilen tasarım deprem kullanılmıştır. Yeni yönetmelikte 4 adet deprem yer hareketi düzeyi (DD) tanımlanmıştır. Tanımlanan bu deprem yer hareketi düzeyleri mevcut ve yeni yapılacak yapıların nitelik durumuna bağlı performans değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. TBDY-2018'de tanımlanan 4 adet deprem yer hareketi düzeyi Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. TBDY-2018'de tanımlanan deprem yer hareketleri

Deprem Düzeyi	Tekrarlanma Periyodu	50 yılda Aşılma Olasılığı	Tamımı
DD-1	2475	%2	En büyük deprem
DD-2	475	%10	Standart Tasarım depremi
DD-3	72	%50	Sık deprem
DD-4	43	%68	Servis depremi

Eski yönetmelikteki deprem bölgeleri için belirlenen etkin yer ivme katsayısı (A_0) yerine, TDTH'da binanın yapılacağı lokasyona ait kısa periyot ve 1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayıları (S_s ve S_1) dikkate alınmaktadır. Bu katsayılar zemin sınıfına göre belirlenen kısa periyot ve 1,0 saniye periyot için elde edilen zemin etki katsayıları (F_s ve F_1) ile çarpılarak spektrum eğrilerinin belirlenmesinde kullanılan kısa periyot ve 1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayıları (S_{DS} ve S_{D1}) elde edilmektedir. Ayrıca TBDY-2018'de depremin üçüncü bileşeni olan düşey deprem etkisi de dikkate alınmaktadır. Özellikle merkez üssüne yakın olan yerleşim yerlerinde, depremin düşey bileşenin etkisi oldukça fazla olmaktadır. Şekil 2'de TBDY-2018 ile DBYBHY-2007'de kullanılan spektrum eğrilerinin karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 2. TBDY-2018 ve DBYBHY-2007'de kullanılan spektrum eğrileri [15-16]

Denklem 1’de DBYBHY-2007’ye göre belirlenen spektral ivme katsayısı,

$$\begin{aligned}
 S(T) &= 1 + \left(1.5 * \left(\frac{T}{T_A} \right) \right) & (0 \leq T \leq T_A) \\
 S(T) &= 2.5 & (T_A \leq T \leq T_B) \\
 S(T) &= 2.5 * \left(\frac{T_B}{T} \right)^{0.8} & (T_B \leq T)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Denklem 2’de TBDY-2018’e göre belirlenen spektrum ivme katsayısı verilmektedir.

$$\begin{aligned}
 S_{ae}(T) &= \left(\left(0,4 + 0,6 * \frac{T}{T_A} \right) \right) * S_{DS} & (0 \leq T \leq T_A) \\
 S_{ae}(T) &= S_{DS} & (T_A \leq T \leq T_B) \\
 S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1}}{T} & (T_B \leq T \leq T_L) \\
 S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1} * T_L}{T^2} & (T_L \leq T)
 \end{aligned} \tag{2}$$

DBYBHY-2007’de 4 farklı zemin grubu (Z1, Z2, Z3, Z4) tanımlanmaktadır. Z1 zemin sınıfı en iyi zemin sınıfı olup, en yumuşak zemin Z4 olmaktadır. TBDY-2018’de ise zemin sınıfları, zemin katmanlarının üst 30 metrelik kesimindeki ortalama zemin özelliklerine göre belirlenmektedir. ZF sınıfındaki yerel zeminler için sahaya özel zemin davranış analizleri yapılması istenmektedir. TBDY-2018’de dikkate alınan yerel zemin sınıfları Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3. TBDY-2018 yerel zemin sınıfları [15]

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		(V_S) ₃₀ [m/s]	(N_{60}) ₃₀ [darbe/30 cm]	(c_u) ₃₀ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa)	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	İçeren profiller Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler:	< 180	< 15	< 70
ZF	1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

DBYBHY-2007’de 4 adet bina önem katsayısı ($I=1.5, I=1.4, I=1.2, I=1$) tanımlanırken, TBDY-2018’de $I=1.4$ sınıfı yapılar $I=1.5$ grubuna dahil edilmiştir. Ayrıca DBYBHY-2007’ye göre farklı olarak Deprem Tasarım Sınıfı’nın (DTS) seçilmesi için 3 adet Bina Kullanım Sınıfı (BKS) tanımlanmıştır. Eski yönetmelikte bina önem katsayısı, göz önüne alınan tasarım depremine oranla daha yüksek deprem etkisini ifade etmek için kullanıldığı

görüldürken, yeni yönetmelikte ise aynı düzeydeki depremin etkisi altında daha yüksek bir performans seviyesini elde etmek amacıyla taşıyıcı sistem davranış katsayısının azaltılmasında kullanılmaktadır [17].

TBDY-2018’de Tablo 4’te eski yönetmelikteki deprem bölgelerine karşılık gelen 4 adet Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) tanımlanmıştır. DTS, kısa periyot tasarım spektral ivme katsayı ve BKS’ye göre belirlenirken, bina yükseklik sınıfını belirlemede de kullanılmaktadır. DBYBHY-2007 yönetmeliğinde, bina yüksekliği ile ilgili herhangi bir kısıt bulunmayıp, binanın yapılacağı yerdeki belediyenin bina yüksekliği ile ilgili bir sınırlama yapma imkânı bulunmaktadır. TBDY-2018 ile ise 8 adet Bina Yüksekliği Sınıfı (BYS) tanımlanarak bina yüksekliğine binanın inşa edileceği DTS ve taşıyıcı sistem tercihiyle bağlı olarak bir sınırlama getirilmiştir. Bu bağlamda, istenilen her bina, her bina yüksekliğinde yapılamamaktadır.

Tablo 4. Deprem tasarım sınıfları [15]

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS=1	BKS=2,3
$S_{DS} < 0.33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	DTS = 3a	DTS = 3
$0,50 \leq S_{DS} < 0,75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0,75 \leq S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

TBDY-2018 ile, minimum kesit ve dayanım koşullarının dikkate alınması, malzeme dayanımlarının azaltılması ve yüklerin arttırılmasından dolayı kesit akma dayanımı tasarım dayanımından daha fazla olmaktadır. Bu nedenle bu fazlalığı belirtmek için dayanım fazlalığı katsayısı (D ; akma dayanımının tasarım dayanıma oranı) tanımlanmıştır.

Çalışmada dikkate alınacak olan asmolen döşeme sistemi, TBDY-2018’in yürürlüğe girmesi ile taşıyıcı sistem seçimine ait bazı sınırlamalar getirilmiştir. TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 yönetmeliklerinde asmolen döşeme sistemi tasarlanması durumundaki taşıyıcı sistemle ilgili sınırlamalar Tablo 5’te verilmektedir.

Tablo 5. TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 yönetmeliklerinde asmolen döşeme sistemi için taşıyıcı sistem sınırları

KONU	DBYBHY-2007	TBDY-2018
Bina Yüksekliği Sınırlaması	Herhangi bir bina yüksekliği sınırlaması yoktur.	Bina yüksekliği sınırlaması vardır ve binanın yapılacağı konuma bağlı olarak değişmektedir.
Taşıyıcı Sistem Süneklik Düzeyi Seçimi	Süneklik düzeyi yüksek taşıyıcı sistem seçimine izin verilmiştir.	Süneklik düzeyi karma ve sınırlı seçilebilmektedir.
Perde duvar olma zorunluluğu	Perde duvar içermeyen binalarda, Süneklik düzeyi normal; kolon ve kiriş içeren binalar süneklik düzeyi normal sistem olarak değerlendirilecektir.	DTS=3,4 olan yerlerde olmama durumu var. Ancak taşıyıcı sistem davranış katsayısı sınırlı seçilme zorunluluğu vardır.
Taban Devrilme Momenti Koşulu	-	DTS=1,2 perde duvar koyma zorunluluğu vardır. Mdev \geq 0.75Mo sağlanamazsa süneklik düzeyi sınırlı seçilmektedir.

2.1 Sayısal Model

Çalışma kapsamında, TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmeliklerinde öngörülen minimum kesit koşulları ve maksimum göreceli ötelemeler dikkate alınarak yapılar tasarlanmaktadır. Dikkate alınan TBDY-2018 ve DBYBHY-2007’ye göre kat adeti, döşeme sistemleri ve zemin sınıflarının binaların; deprem performansı, davranışı ve donatı miktarı üzerindeki etkileri ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

Çalışmada dikkate alınan yapıların, Yalova ilinde yapıldığı kabul edilmektedir. Yalova ilinde, 2018 yılından önce tasarımı yapılan yapılarda, asmolen döşeme sistemi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. TBDY-2018'in yürürlüğe girmesi ile asmolen döşeme sistemine sahip yapı tasarımı yapılması durumunda getirilen zorluklar, asmolen döşeme sisteminin deprem sırasındaki olumsuz davranışı ile yapıların maliyetinin artması nedeniyle kirişli plak döşeme sistemi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada asmolen ve kirişli plak döşeme sistemi üzerinde çalışmalar yapılarak yapıların davranışları incelenmektedir.

Binaların yapılacağı yer Yalova ili kabul edilmiştir. Binaların yapılacağı konuma ait bilgiler ve veriler Tablo 6'da verilmektedir. 1 adet ortak mimari ile kat adeti (3,4,5,6 katlı), döşeme sistemi ve zemin sınıfı değiştirilen (Asmolen ve Kirişli) 56 adet betonarme binanın, TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 yönetmeliğinde belirtilen minimum kesit ve farklı zemin koşulları dikkate alınarak tasarımlar yapılmaktadır. Tasarımı yapılan konut binaları, her iki doğrultuda da 4'er metrelik 4 açıklığa sahip simetrik plan üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Deprem hesap yöntemi olarak modal hesap yöntemleri dikkate alınmaktadır. Tasarımı yapılan kirişli döşeme sistemine sahip bütün binalarda, döşemelerde döşeme kalınlığı 15 cm, Merdiven döşemesinde sabit yük 0.727 t/m^2 hareketli yük 0.35 t/m^2 , diğer döşemelerde sabit yük 0.545 t/m^2 hareketli yük 0.2 t/m^2 alınmıştır. TBDY-2018'e göre yapılardaki kiriş, kolon, döşeme ve temel beton sınıfı olarak C25, donatı sınıfı olarak B420C dikkate alınmaktadır. Tasarımı yapılan asmolen döşeme sistemine sahip bütün binalarda ise döşeme kalınlığı 7 cm, Sahanlık döşeme kalınlığı 15 cm, Merdiven döşemesinde sabit yük 0.727 t/m^2 hareketli yük 0.35 t/m^2 , diğer döşemelerde sabit yük 0.545 t/m^2 hareketli yük 0.2 t/m^2 alınmıştır. DBYBHY-2007'ye göre ise beton sınıfı C20, donatı sınıfı ise S420 çeliği dikkate alınmaktadır.

Tablo 6. Binanın konumu ve spektral ivme katsayı değerleri

Bina Konumu		Spektral İvme Katsayıları		En Büyük Yer İvmesi [G]	En Büyük Yer Hızı [Cm/Sn]
ENLEM	BOYLAM	Kısa Periyot için Harita Spektral İvme Katsayısı (S_s)	1.0 sn Periyot için Harita Spektral İvme Katsayısı (S_1)	PGA	PGV
40,65648°	29,29857°	1,4867	0,3954	0,611	42,532

TBDY-2018 ve DBYBHY-2007'ye göre tasarımı yapılan kirişli plak döşeme sistemine sahip binaların süneklik düzeyi yüksek taşıyıcı sistem seçilirken, asmolen döşeme sisteminde, DBYBHY-2007'ye göre süneklik düzeyi yüksek taşıyıcı sistem seçimi yapılırken, TBDY-2018'de ki binalar süneklik düzeyi sınırlı seçilmiştir. Tablo 7'de her iki yönetmelik kirişli döşeme sistemine sahip binaların karakteristik deprem verileri verilmiştir. Tablo 8'de her iki yönetmelik asmolen döşeme sistemine sahip binaların karakteristik deprem verileri verilmiştir.

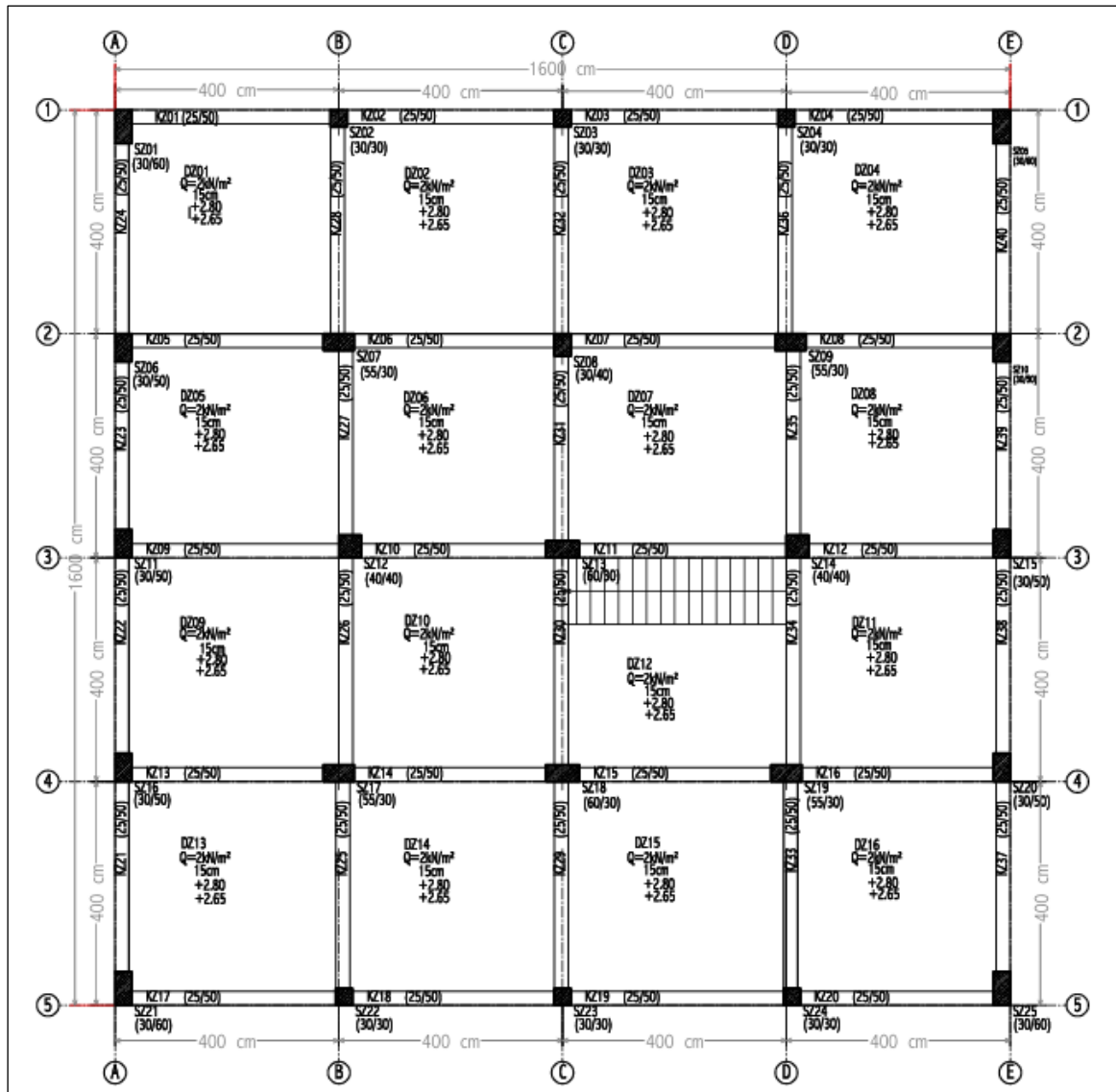
Tablo 7. Kirişli döşeme sistemine sahip binaların karakteristik deprem verileri

	DBYBHY-2007	TBDY-2018
BKS	-	3
I	1	1
R	7-8	7-8
Deprem Bölgesi	1	-
A_0	0,4	-
D	-	2,5-3
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	-	DD2
DTS	-	1
BYS	-	6-7-8

Tablo 8. Asmolen döşeme sistemine sahip binaların karakteristik deprem verileri

	DBYBHY-2007	TBDY-2018
BKS	-	3
I	1	1
R	7-8	5
Deprem Bölgesi	1	-
A ₀	0,4	-
D	-	2,5
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	-	DD2
DTS	-	1
BYS	-	6-7-8

Tasarımı yapılan binalarda kullanılan döşeme sistemleri ve kat adetleri Tablo 9’da dikkate alınan yerel zemin sınıfı karşılaştırması da Tablo 10’da verilmektedir. Şekil 3’te kirişli döşeme sistemine sahip binaların ortak kat planı ve Şekil 4’te ise asmolen döşeme sistemine sahip binaların ortak kat planı verilmektedir.

**Şekil 3.** Kirişli döşeme sistemine sahip binaların ortak kat planı [18]**Tablo 9.** Döşeme sistemleri ve kat adetleri

DÖŞEME SİSTEMİ	KAT ADETLERİ
Asmolen Döşeme Sistemi	3, 4, 5
Kirişli Plak Döşeme Sistemi	3, 4, 5, 6

ortaya çıkan ilk 3 modu ise Tablo 12’de verilmektedir. Değerlendirilmesi yapılan binalarda ilk 2 mod ötelenme modu ve 3. Mod ise burulma modu olmaktadır. Modal analiz sonucunda, binaların farklı titreşim modları, farklı frekanslarda meydana gelir.

Tablo 11. Kirişli döşeme sistemine sahip binaların ilk 3 modları

Bina Kodu	Bina Ağırlığı (Ton)	T (sn)	1. MOD y (ω)	2.MOD x (ω)	3.MOD b (ω)
K3Z1	751,935	0,41	15,15	16,84	18,38
K3ZB	755,180	0,51	12,31	13,37	14,77
K3Z2	757,886	0,37	17,00	18,90	20,22
K3ZC	766,058	0,45	14,06	15,38	16,99
K3Z3	757,886	0,37	17,00	18,90	20,22
K3ZD	776,925	0,40	15,62	16,70	19,48
K3Z4	758,516	0,37	17,08	19,14	20,50
K3ZE	822,122	0,31	20,51	20,63	28,90
K4Z1	1029,652	0,54	11,56	12,83	14,26
K4ZB	1033,783	0,68	9,21	9,93	11,04
K4Z2	1050,596	0,43	14,53	15,88	17,86
K4ZC	1050,897	0,58	10,75	11,45	13,01
K4Z3	1050,824	0,44	14,34	15,83	17,79
K4ZD	1071,934	0,51	12,33	12,40	15,49
K4Z4	1057,914	0,41	15,22	16,75	18,77
K4ZE	1138,652	0,38	16,69	17,22	24,57
K5Z1	1329,342	0,54	11,70	12,47	15,56
K5ZB	1336,333	0,72	8,78	9,01	10,65
K5Z2	1337,876	0,52	12,12	12,96	16,20
K5ZC	1336,333	0,72	8,78	9,01	10,65
K5Z3	1346,600	0,48	13,04	13,44	17,06
K5ZD	1429,825	0,48	13,19	14,12	19,86
K5Z4	1378,487	0,43	14,71	15,76	21,72
K5ZE	1489,742	0,36	17,61	20,62	27,95

Tablo 12. Asmolen Döşeme Sistemine Sahip Binaların İlk 3 Modları

BİNA KODU	BİNA AĞIRLIĞI (Ton)	T (sn)	1. MOD y (ω)	2.MOD x (ω)	3.MOD b (ω)
A3Z1	824,610	0,45	14,06	15,71	18,67
A3ZB	932,482	0,20	31,01	33,93	35,04
A3Z2	860,665	0,29	21,79	21,97	25,78
A3ZC	932,482	0,20	31,01	33,93	35,04
A3Z3	860,665	0,29	21,91	22,06	25,91
A3ZD	932,483	0,20	31,01	33,93	35,04
A3Z4	860,665	0,29	22,02	22,15	25,94
A3ZE	938,700	0,20	31,21	34,05	35,44
A4Z1	1188,515	0,36	17,32	17,52	21,51
A4ZB	1260,476	0,29	21,43	24,34	24,85
A4Z2	1194,341	0,35	17,87	17,89	22,39
A4ZC	1266,504	0,29	21,92	24,13	25,67
A4Z3	1199,101	0,35	17,74	17,86	22,45
A4ZD	1266,504	0,29	21,92	24,13	25,67
A4Z4	1199,101	0,35	17,75	17,86	22,45
A4ZE	1266,504	0,29	21,92	24,13	25,67
A5Z1	1505,774	0,45	13,86	14,25	17,54
A5ZB	1582,306	0,40	15,44	18,46	18,77
A5Z2	1505,774	0,45	13,86	14,25	17,54
A5ZC	1577,463	0,43	14,78	17,64	18,48
A5Z3	1505,774	0,45	13,86	14,25	17,54
A5ZD	1580,786	0,42	14,98	17,99	18,48
A5Z4	1505,774	0,45	13,86	14,25	17,54
A5ZE	1580,786	0,42	14,98	17,99	18,48

Tablo 13’te değişen kat sayısı ve döşeme sistemlerine bağlı olarak Spektrum köşe periyotları, spektrum katsayıları ve yapı doğal titreşim periyotları verilmektedir. Her iki yönetmelik için elde edilen tasarım spektral ivme katsayıları arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilmek için DBYBHY-2007’ye göre elde edilen spektrum katsayısı deprem bölgelerine bağlı olarak belirlenen Etkin Yer İvme Katsayısı (A_0) ile çarpılarak tasarım spektral ivme katsayısına dönüştürülmektedir.

Tablo 13. TBDY-2018 ile DBYBHY-2007'ye göre tasarımı yapılan binaların spektrum ivme katsayıları ve doğal titreşim periyotları

KAT SAYISI DÖŞEME SİSTEMİ	DBYBHY-2007						TBDY-2018					
	Zemin Sınıfı	T _A	T _B	T _P	S(T)	A ₀ * S(T)	Zemin sınıfı	T _A	T _B	T _P	S _{Ae} (T)	
3 KATLI	KİRİŞLİ	Z1	0,100	0,300	0,410	1,950	0,780	ZB	0,047	0,236	0,510	0,620
		Z2	0,150	0,400	0,370	2,500	1,000	ZC	0,066	0,332	0,450	1,318
		Z3	0,150	0,600	0,370	2,500	1,000	ZD	0,100	0,510	0,400	1,487
		Z4	0,200	0,900	0,370	2,500	1,000	ZE	0,160	0,800	0,310	1,197
3 KATLI	ASMÖLEN	Z1	0,100	0,300	0,450	1,807	0,723	ZB	0,047	0,236	0,200	1,338
		Z2	0,150	0,400	0,290	2,500	1,000	ZC	0,066	0,332	0,200	1,784
		Z3	0,150	0,600	0,290	2,500	1,000	ZD	0,100	0,510	0,200	1,487
		Z4	0,200	0,900	0,290	2,500	1,000	ZE	0,160	0,800	0,200	1,197
4 KATLI	KİRİŞLİ	Z1	0,100	0,300	0,540	1,562	0,625	ZB	0,047	0,236	0,680	0,465
		Z2	0,150	0,400	0,430	2,359	0,945	ZC	0,066	0,332	0,580	1,022
		Z3	0,150	0,600	0,440	2,500	1,000	ZD	0,100	0,510	0,510	1,476
		Z4	0,200	0,900	0,410	2,500	1,000	ZE	0,160	0,800	0,380	1,197
4 KATLI	ASMÖLEN	Z1	0,100	0,300	0,350	2,210	0,884	ZB	0,047	0,236	0,290	1,090
		Z2	0,150	0,400	0,350	2,500	1,000	ZC	0,066	0,332	0,290	1,784
		Z3	0,150	0,600	0,350	2,500	1,000	ZD	0,100	0,510	0,290	1,487
		Z4	0,200	0,900	0,350	2,500	1,000	ZE	0,160	0,800	0,290	1,197
5 KATLI	KİRİŞLİ	Z1	0,100	0,300	0,540	1,562	0,625	ZB	0,047	0,236	0,720	0,439
		Z2	0,150	0,400	0,520	2,027	0,811	ZC	0,066	0,332	0,610	0,972
		Z3	0,150	0,600	0,480	2,500	1,000	ZD	0,100	0,510	0,480	1,487
		Z4	0,200	0,900	0,430	2,500	1,000	ZE	0,160	0,800	0,360	1,197
5 KATLI	ASMÖLEN	Z1	0,100	0,300	0,450	1,807	0,723	ZB	0,047	0,236	0,400	0,790
		Z2	0,150	0,400	0,450	2,275	0,910	ZC	0,066	0,332	0,430	1,379
		Z3	0,150	0,600	0,450	2,500	1,000	ZD	0,100	0,510	0,420	1,487
		Z4	0,200	0,900	0,440	2,500	1,000	ZE	0,160	0,800	0,420	1,197
6 KATLI	KİRİŞLİ	Z1	0,100	0,300	0,650	1,347	0,539	ZB	0,047	0,236	0,870	0,363
		Z2	0,150	0,400	0,620	1,761	0,704	ZC	0,066	0,332	0,740	0,801
		Z3	0,150	0,600	0,580	2,500	1,000	ZD	0,100	0,510	0,580	1,298
		Z4	0,200	0,900	0,520	2,500	1,000	ZE	0,160	0,800	0,430	1,197

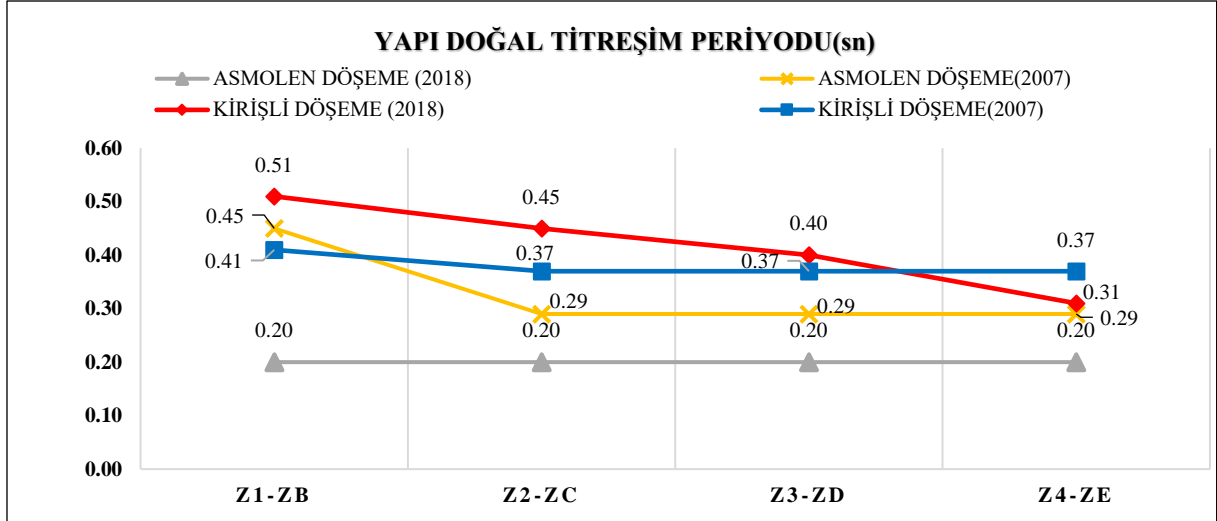
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre farklı kat sayısı ve zemin koşullarında STA4CAD betonarme analiz paket programında analizi yapılan kirişli ve asmolen döşeme sistemine sahip binaların değerlendirilmesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen yapı doğal titreşim periyotları, binalara x ve y yönünde etkiyen taban kesme kuvvetleri, x ve y yönünde maksimum etkin görel kat ötelemeleri, taban kesme kuvvetinin binaların ağırlıklarına oranı ve deprem etkisindeki binalarda yeni ve eski yönetmeliklere göre kullanılacak olan beton ve donatı miktarları değerlendirilmiştir.

Değişen yerel zemin sınıfları ve döşeme sistemleri grafiklerde kısaltma olarak verilmektedir. Kısaltmalarda **K** ve **A** harfi döşeme sistemini (Kirişli, Asmolen döşeme sistemi), **3, 4, 5, 6** kat sayısını (**3, 4, 5, 6** Katlı), **Z1, Z2, Z3, Z4** DBYBHY-2007'ye göre yerel zemin sınıflarını, **B, C, D, E** TBDY-2018'e göre yerel zemin sınıflarını göstermektedir.

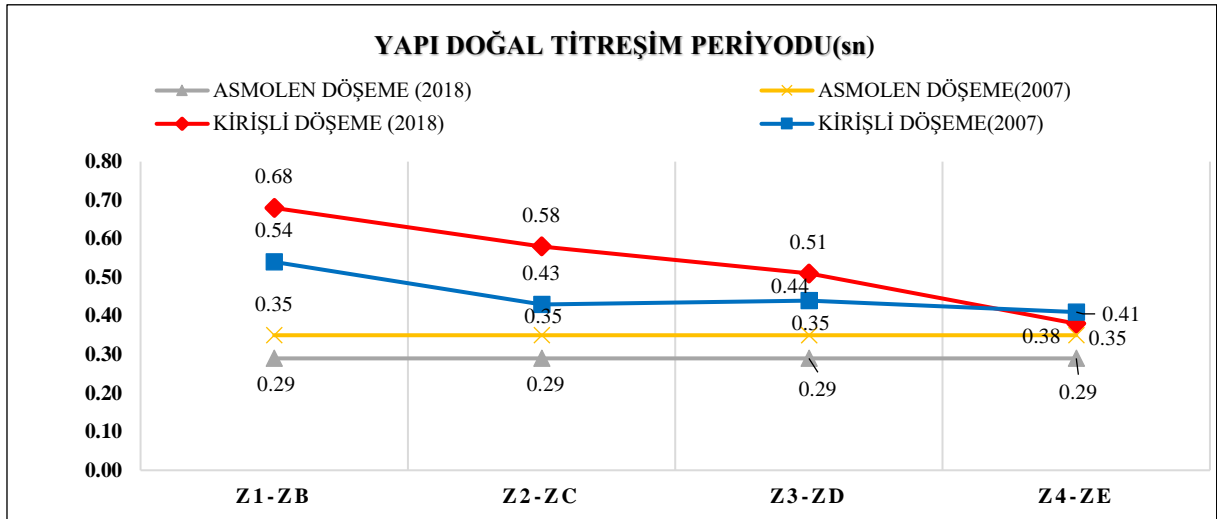
3.1 TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre 3,4,5 ve 6 katlı yapıların doğal titreşim periyotlarının irdelenmesi

Şekil 5'te 3 katlı yapıların, Şekil 6'da 4 katlı yapıların, Şekil 7'de 5 katlı yapıların, Şekil 8'te 6 Katlı yapıların doğal titreşim periyotlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 5. Üç katlı yapıların yapı doğal titreşim periyotları

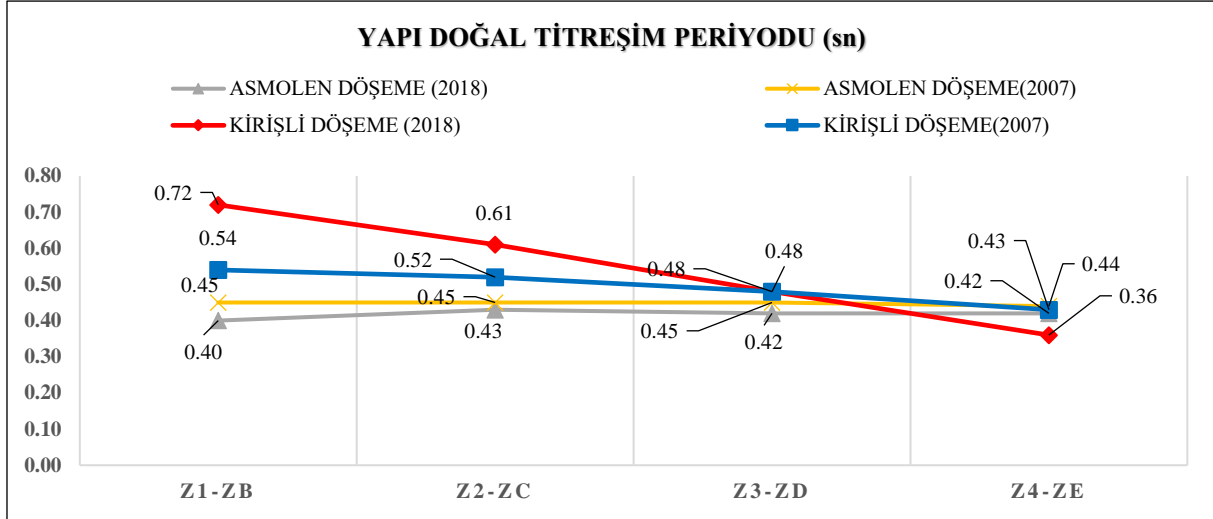
Şekil 5'teki 3 katlı kirişli döşeme sistemine sahip bir yapıda, yapı doğal titreşim periyodu; Z1 yerel zemin sınıfında 0.41 sn iken ZB yerel zemin sınıfında 0.51 sn, Z2 yerel zemin sınıfında 0.37 sn iken ZC yerel sınıfında 0.45 sn, Z3 yerel zemin sınıfında 0.37 sn iken ZD yerel sınıfında 0.40 sn, Z4 yerel zemin sınıfında 0.37 sn iken ZE yerel sınıfında 0.31 sn olarak gözlemlenmiştir. 3 katlı asmolen döşeme sistemine sahip bir yapıda, yapı doğal titreşim periyodu Z1 yerel zemin sınıfında 0.45 sn, Z2-Z3-Z4 yerel zemin sınıflarında 0.29 sn iken ZB-ZC-ZD-ZE yerel zemin sınıflarında 0.20 sn olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Dört katlı yapıların yapı doğal titreşim periyotları

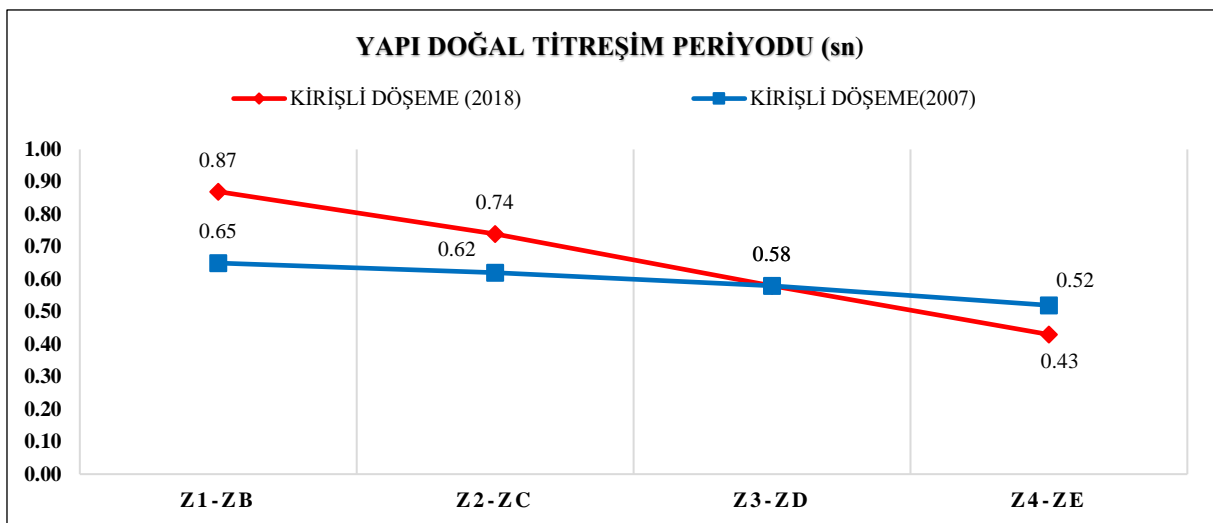
Şekil 6'daki 4 katlı kirişli döşeme sistemine sahip bir yapıda, yapı doğal titreşim periyodu; Z1 yerel zemin sınıfında 0.54 sn, ZB yerel zemin sınıfında 0.68 sn, Z2 yerel zemin sınıfında 0.43 sn iken ZC yerel sınıfında 0.58 sn, Z3 yerel zemin sınıfında 0.44 sn iken ZD yerel sınıfında 0.51 sn, Z4 yerel zemin sınıfında 0.41 sn iken ZE yerel

sınıftaki yapı doğal titreşim periyodu 0.38 sn olarak gözlemlenmiştir. 4 katlı asmolen döşeme sistemine sahip bir yapıda, yapı doğal titreşim periyodu; Z1-Z2-Z3-Z4 yerel zemin sınıflarında 0.35 sn, iken ZB-ZC-ZD-ZE yerel zemin sınıflarında 0.29 sn olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Beş katlı yapıların yapı doğal titreşim periyotları

Şekil 7'deki 5 katlı kirişli döşeme sistemine sahip bir yapıda, yapı doğal titreşim periyodu; Z1 yerel zemin sınıfında 0.54 sn iken ZB yerel zemin sınıfında 0.72 sn, Z2 yerel zemin sınıfında 0.52 sn iken, ZC yerel sınıfında 0.61 sn, Z3 yerel zemin sınıfında 0.48 sn iken ZD yerel sınıfında 0.48 sn, Z4 yerel zemin sınıfında 0.43 sn iken ZE yerel sınıfında 0.36 sn olarak gözlemlenmiştir. 5 katlı asmolen döşeme sistemine sahip bir yapıda, yapı doğal titreşim periyodu; Z1-Z2-Z3 yerel zemin sınıfında 0.45 sn, Z4 yerel zeminde sınıfında 0.44 sn iken ZB yerel zemin sınıfında 0.40 sn, ZC yerel sınıfında 0.43 sn, ZD yerel sınıfında 0.42 sn, ZE yerel sınıfında 0.42 sn olarak gözlemlenmiştir.



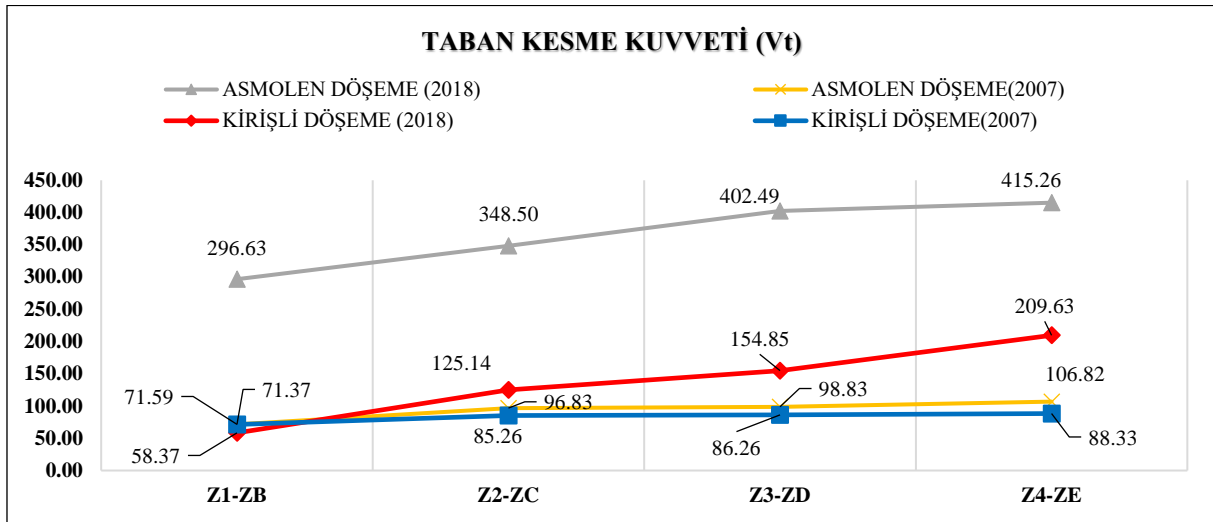
Şekil 8. Altı katlı yapıların yapı doğal titreşim periyotları

Şekil 8’teki 6 katlı kirişli döşeme sistemine sahip bir yapıda, yapı doğal titreşim periyodu; Z1 yerel zemin sınıfında 0.65 sn iken ZB yerel zemin sınıfında 0.87 sn, Z2 yerel zemin sınıfında 0.62 sn iken, ZC yerel sınıfında 0.74 sn, Z3 yerel zemin sınıfında 0.58 sn iken ZD yerel sınıfında 0.58 sn, Z4 yerel zemin sınıfında 0.52 sn iken ZE yerel sınıfında 0.43 sn olarak gözlemlenmiştir.

Genel olarak ZD ve ZE yerel zemin sınıfları haricinde kalan zemin sınıflarında TBDY-2018'e göre tasarlanan yapıların doğal titreşim periyodu, DBYBHY-2007'ye göre tasarlanan yapılarınkinden daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun sebebi, TBDY-2018'de dikkate alınan etkin kesit rijitliklerinin kolon ve kirişlerin rijitliklerini azaltmasıyla doğal titreşim periyodunun artması olarak düşünülmektedir.

3.2 TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre 3,4,5 ve 6 katlı yapıların taban kesme kuvvetlerinin irdelenmesi

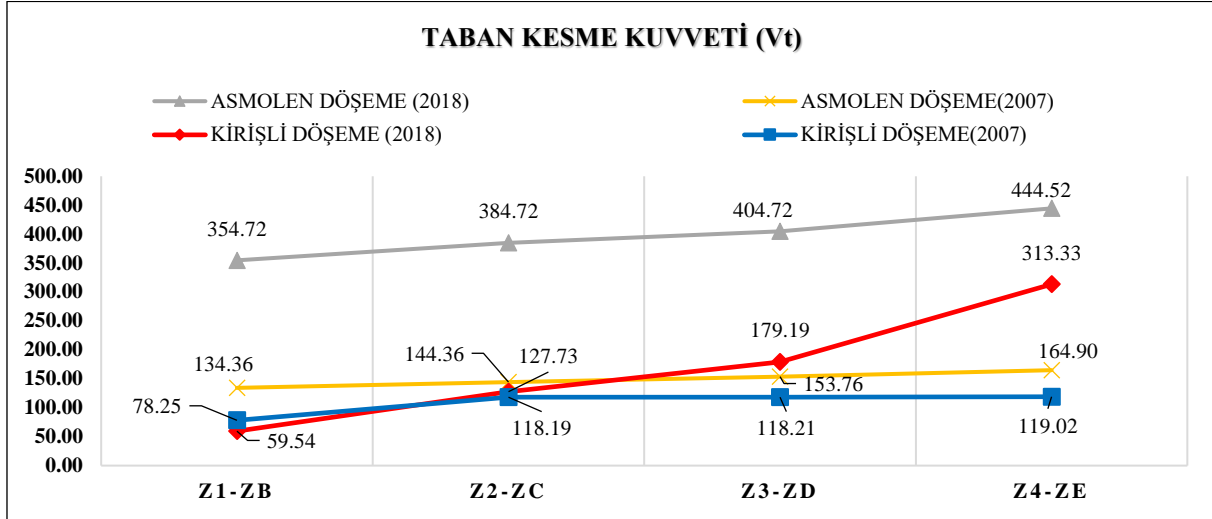
Şekil 9’da 3 katlı yapıların, Şekil 10’da 4 katlı yapıların, Şekil 11’de 5 katlı yapıların, Şekil 12’de 6 Katlı yapıların taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 9. Üç katlı yapıların taban kesme kuvvetleri

Şekil 9’deki 3 katlı kirişli döşeme sistemine sahip bir yapıda, x yönünde yapıya etkiyen taban kesme kuvveti Z1 yerel zemin sınıfında 71.37 tf iken ZB yerel zemin sınıfındaki taban kesme kuvveti 58.37 tf, Z2 yerel zemin sınıfında 85.26 tf iken, ZC yerel sınıfındaki taban kesme kuvveti 125.14 tf, Z3 yerel zemin sınıfında 86.26 tf iken ZD yerel sınıfındaki taban kesme kuvveti 154.85 tf, Z4 yerel zemin sınıfında 88.33 tf iken ZE yerel sınıfındaki taban kesme kuvveti 209.63 tf olarak gözlemlenmiştir. Değerlendirmeler, sadece DBYBHY-2007 yönetmeliğinde Z1 yerel zemin sınıfında yer alan yapıya etkiyen taban kesme kuvvetinin, TBDY-2018’e göre tasarlanan yapılarıdaki taban kesme kuvvetlerine oranla daha yüksek olduğunu göstermektedir ve zemin kötleştikçe TBDY-2018 yönetmeliğinde oluşan taban kesme kuvvetlerinde DBYBHY-2007’ye göre daha hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Ayrıca asmolen ve kirişli döşemede oluşan taban kesme kuvvetleri karşılaştırıldığında DBYBHY-2007’ye göre çok fazla bir fark gözlenmiyorken, TBDY-2018’de asmolen döşeme kullanılması

durumunda ciddi bir artış söz konusu olmaktadır. 3 katlı asmolen döşeme sistemine sahip bir yapıda, x yönünde en büyük taban kesme kuvvetinin ZE yerel zemin sınıfı X doğrultusunda 415.26 tf olduğu, ancak DBYBHY-2007'ye göre en büyük taban kesme kuvvetinin Z4 yerel zemin sınıfında her iki doğrultuda 106.82 tf olduğu belirlenmiştir.

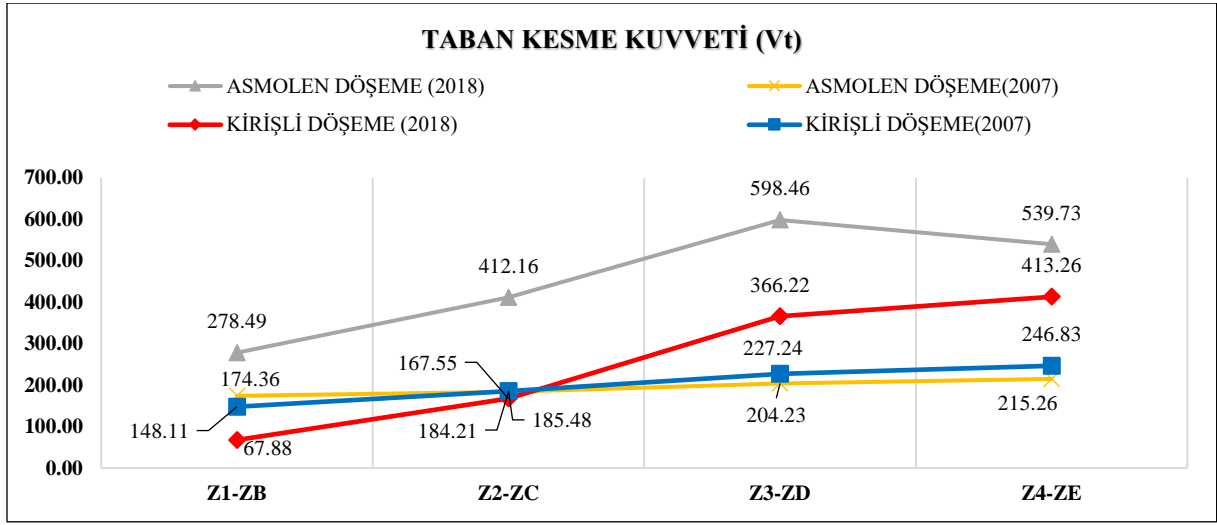


Şekil 10. Dört katlı yapıların taban kesme kuvvetleri

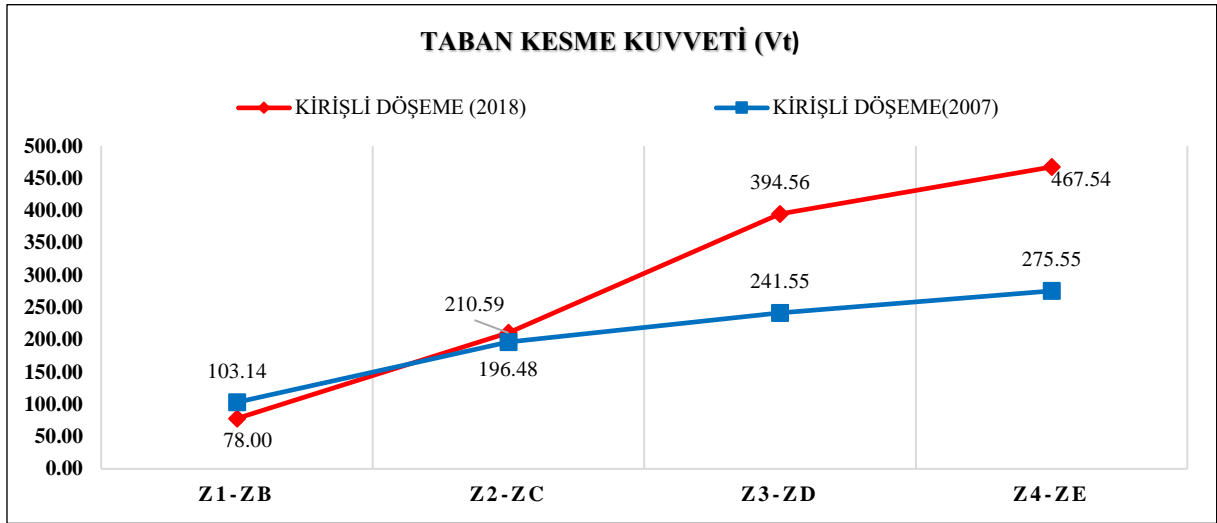
Şekil 10'daki 4 katlı kirişli döşeme sistemine sahip bir yapıda, x yönünde yapıya etkiyen taban kesme kuvveti Z1 yerel zemin sınıfında 78.25 tf iken ZB yerel zemin sınıfındaki taban kesme kuvveti 59.54 tf, Z2 yerel zemin sınıfında 118.19 tf iken, ZC yerel sınıfındaki taban kesme kuvveti 127.73 tf, Z3 yerel zemin sınıfında 118.21 tf iken ZD yerel sınıfındaki taban kesme kuvveti 179.19 tf, Z4 yerel zemin sınıfında 119.02 tf iken ZE yerel sınıfındaki taban kesme kuvveti 313.33 tf olarak gözlemlenmiştir. Değerlendirmeler, sadece DBYBHY-2007 yönetmeliğinde Z1 yerel zemin sınıfında yer alan yapıya etkiyen taban kesme kuvvetinin, TBDY-2018'e göre tasarlanan yapılarıdaki taban kesme kuvvetlerine oranla daha yüksek olduğunu göstermektedir. 4 katlı asmolen döşeme sistemine sahip bir yapıda, en büyük taban kesme kuvvetinin ZE yerel zemin sınıfı X doğrultusunda 444.52 tf olduğu, ancak DBYBHY-2007'ye göre en büyük taban kesme kuvvetinin Z4 yerel zemin sınıfında her iki doğrultuda 164.90 tf olduğu görülmektedir.

Şekil 11'deki 5 katlı kirişli döşeme sistemine sahip bir yapıda, x yönünde yapıya etkiyen taban kesme kuvveti Z1 yerel zemin sınıfında 148.11 tf iken ZB yerel zemin sınıfındaki taban kesme kuvveti 67.88 tf, Z2 yerel zemin sınıfında 185.48 tf iken, ZC yerel sınıfındaki taban kesme kuvveti 167.55 tf, Z3 yerel zemin sınıfında 227.24 tf iken ZD yerel sınıfındaki taban kesme kuvveti 366.22 tf, Z4 yerel zemin sınıfında 413.26 tf iken ZE yerel sınıfındaki taban kesme kuvveti 313.33 tf olarak gözlemlenmiştir. Değerlendirmeler, sadece DBYBHY-2007 yönetmeliğinde Z1 ve Z2 yerel zemin sınıfında yer alan yapıya etkiyen taban kesme kuvvetinin, TBDY-2018'e göre tasarlanan yapılarıdaki taban kesme kuvvetlerine oranla daha yüksek olduğunu göstermektedir. 5 katlı asmolen döşeme sistemine sahip bir yapıda, en büyük taban kesme kuvvetinin ZE yerel zemin sınıfı Y doğrultusunda 539.73

tf olduğu, ancak DBYBHY-2007'ye göre en büyük taban kesme kuvvetinin Z4 yerel zemin sınıfında her iki doğrultuda 215.26 tf olduğu belirlenmiştir.



Şekil 11. Beş katlı yapıların taban kesme kuvvetleri

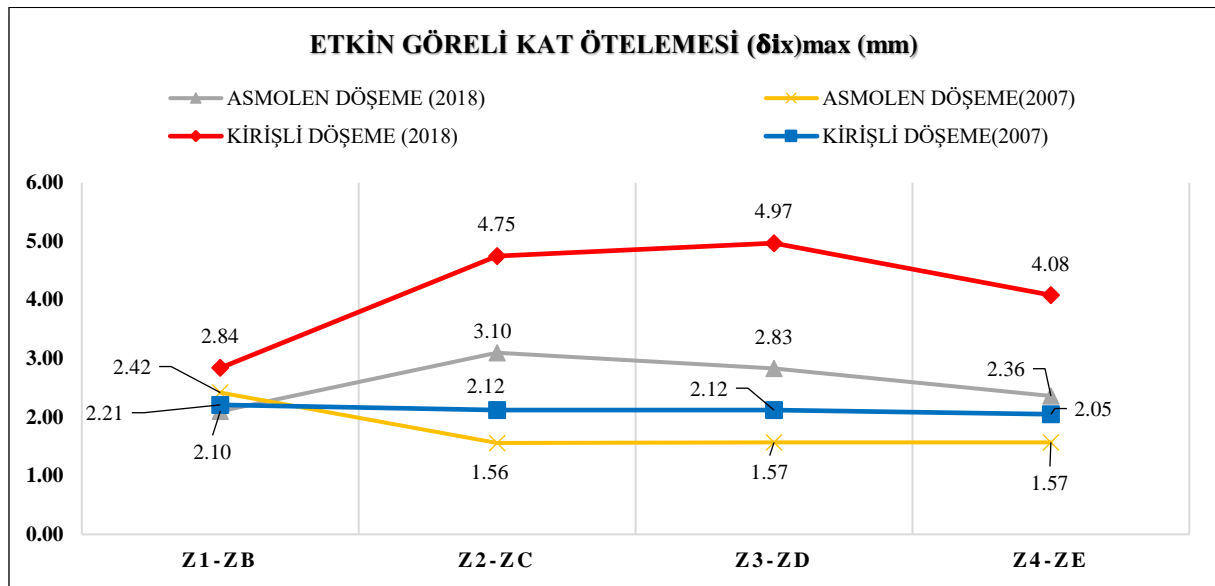


Şekil 12. Altı katlı yapıların taban kesme kuvvetleri

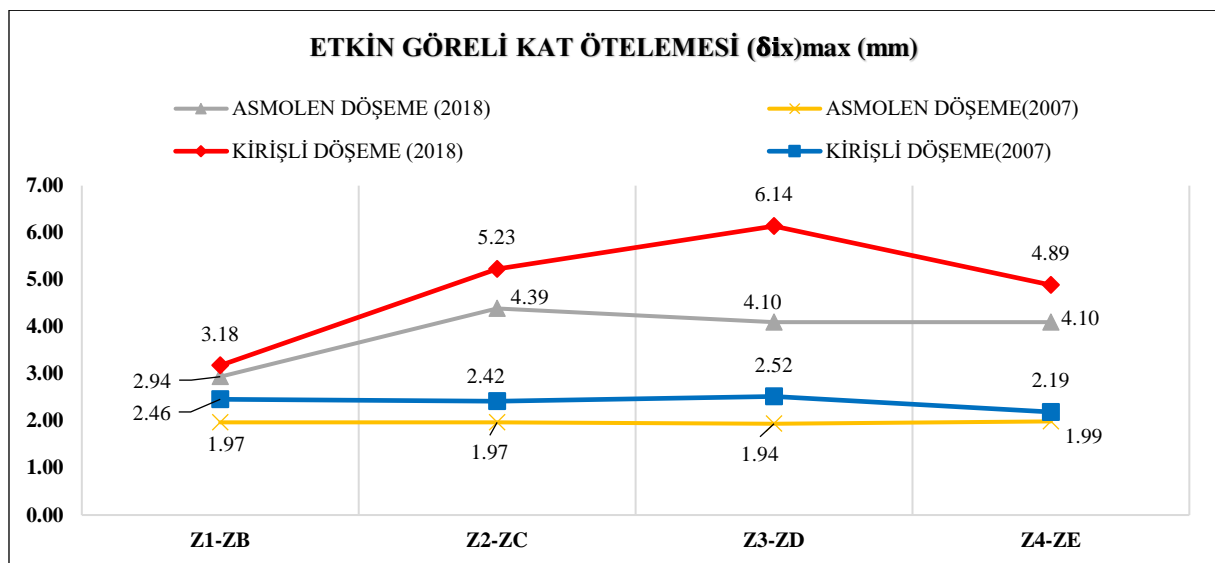
Şekil 12'deki 6 katlı bir yapıda, x yönünde yapıya etkiyen taban kesme kuvveti Z1 yerel zemin sınıfında 103.14 tf iken ZB yerel zemin sınıfındaki taban kesme kuvveti 78.00 tf, Z2 yerel zemin sınıfında 196.48 tf iken, ZC yerel zemin sınıfındaki taban kesme kuvveti 210.59 tf, Z3 yerel zemin sınıfında 241.55 tf iken ZD yerel zemin sınıfındaki taban kesme kuvveti 394.56 tf, Z4 yerel zemin sınıfında 275.55 tf iken ZE yerel zemin sınıfındaki taban kesme kuvveti 467.54 tf olarak gözlemlenmiştir. Değerlendirmeler, sadece DBYBHY-2007 yönetmeliğinde Z1 yerel zemin sınıfında yer alan yapıya etkiyen taban kesme kuvvetinin, TBDY-2018'e göre tasarlanan yapılarındaki taban kesme kuvvetlerine oranla daha yüksek olduğunu göstermektedir.

3.3 TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre 3,4,5 ve 6 katlı yapıların etkin görelî kat ötelemelerinin irdelenmesi

Şekil 13'te 3 katlı yapıların, Şekil 14'te 4 katlı yapıların, Şekil 15'te 5 katlı yapıların, Şekil 16'da 6 Katlı yapıların etkin görelî kat ötelemelerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 13'teki 3 katlı yapılarda, oluşan maksimum etkin görelî kat ötelemesinin kirişli döşeme sistemine sahip yapılar için, TBDY-2018'e göre en büyük değerinin ZD yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 4.97 mm, DBYBHY-2007'ye göre en büyük değerinin Z3 yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 2.05 mm olduğu görülmektedir. Asmolen döşeme sistemine sahip yapılar için, TBDY-2018'e göre en büyük değerinin ZC yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 3.10 mm, DBYBHY-2007'ye göre en büyük değerinin Z4 yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 2.42 mm olduğu görülmektedir.



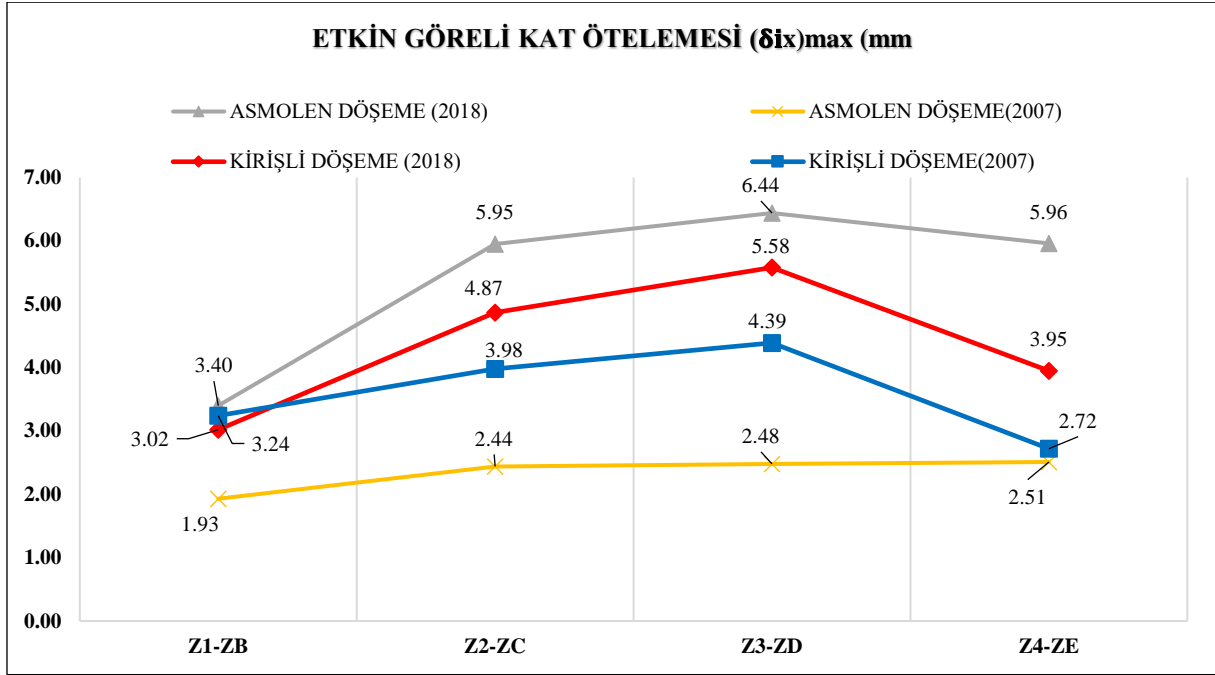
Şekil 13. Üç katlı yapıların x doğrultusunda etkin görelî kat ötelemeleri



Şekil 14. Dört katlı yapıların x doğrultusunda etkin görelî kat ötelemeleri

Şekil 14'teki 4 katlı yapılarda, oluşan maksimum etkin görelî kat ötelemesinin kirişli döşeme sistemine sahip yapılar için, TBDY-2018'e göre en büyük değerinin ZD yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 6.14 mm, DBYBHY-2007'ye göre en büyük değerinin Z3 yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 2.52 mm olduğu görülmektedir.

Asmolen döşeme sistemine sahip yapılar için, TBDY-2018'e göre en büyük değerinin ZC yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 4.39 mm, DBYBHY-2007'ye göre en büyük değerinin Z4 yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 1.99 mm olduğu görülmektedir.

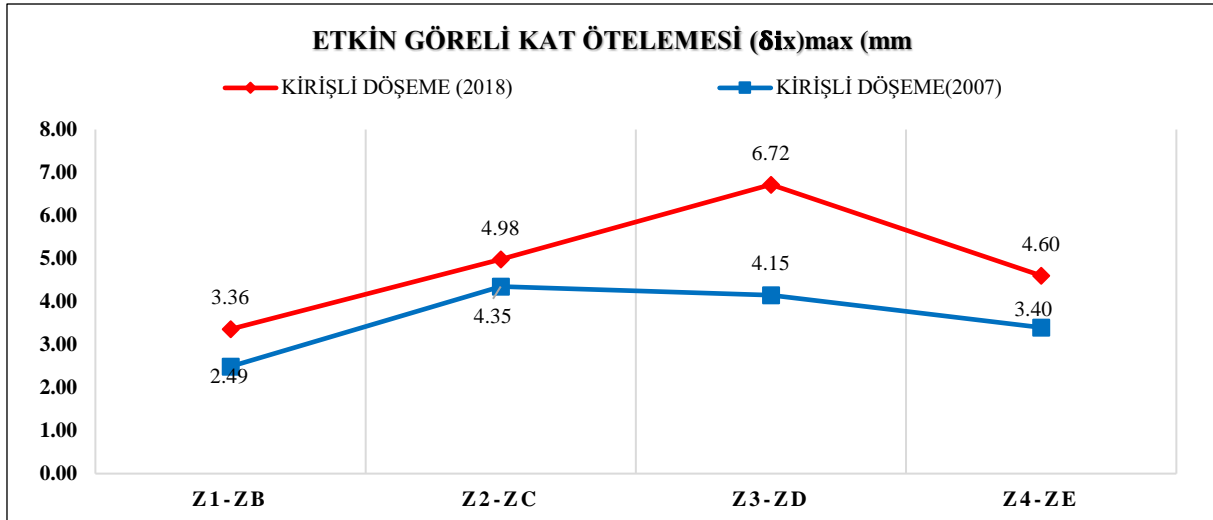


Şekil 15. Beş katlı yapıların x doğrultusunda etkin görelî kat ötelemeleri

Şekil 15'teki 5 katlı yapılarda, oluşan maksimum etkin görelî kat ötelemesinin kirişli döşeme sistemine sahip yapılar için, TBDY-2018'e göre en büyük değerinin ZD yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 5.58 mm, DBYBHY-2007'ye göre en büyük değerinin Z3 yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 4.39 mm olduğu görülmektedir.

Asmolen döşeme sistemine sahip yapılar için, TBDY-2018'e göre en büyük değerinin ZD yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 6.44 mm, DBYBHY-2007'ye göre en büyük değerinin Z4 yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 2.51 mm olduğu görülmektedir.

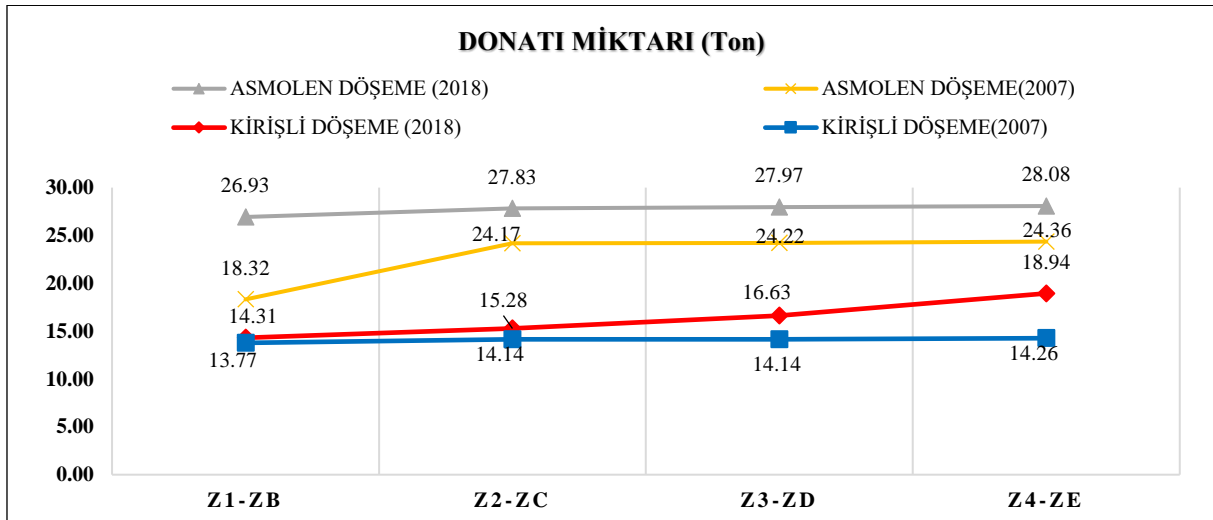
Şekil 16'daki 6 katlı yapılarda, oluşan maksimum etkin görelî kat ötelemesinin kirişli döşeme sistemine sahip yapılar için, TBDY-2018'e göre en büyük değerinin ZD yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 6.27 mm, DBYBHY-2007'ye göre en büyük değerinin Z3 yerel zemin sınıfında x doğrultusu için 4.15 mm olduğu görülmektedir.



Şekil 16. Altı katlı yapıların x doğrultusunda etkin görelî kat ötelemeleri

3.4 TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre 3,4,5 ve 6 katlı yapılarda kullanılan donatı miktarının irdelenmesi

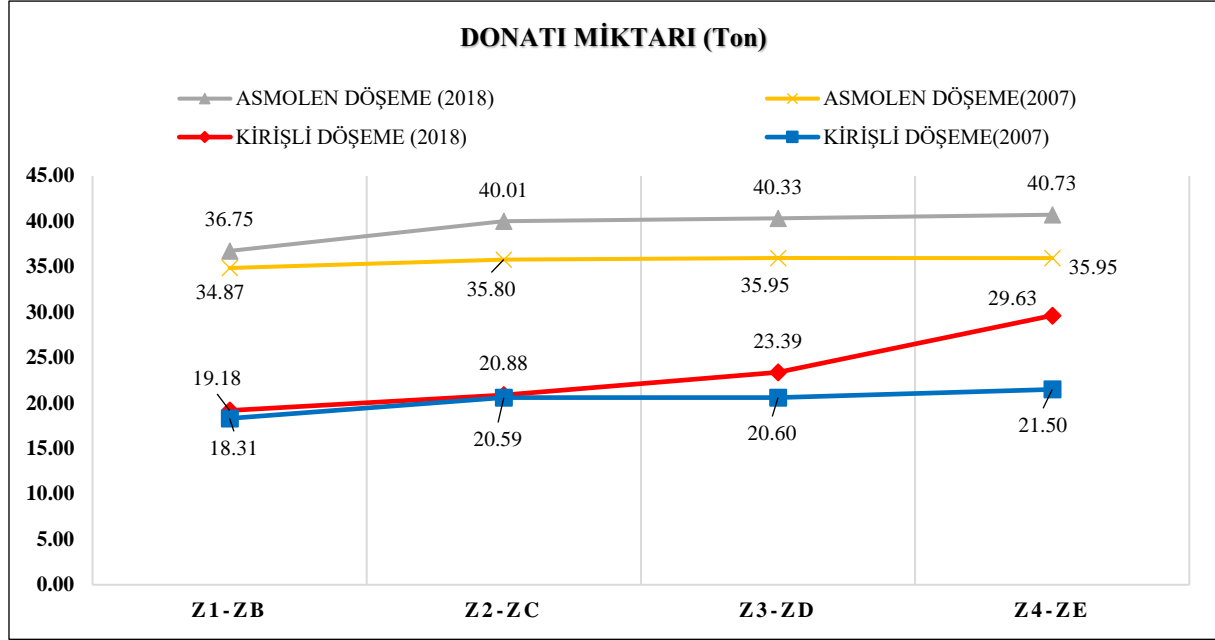
Şekil 17’de 3 katlı yapıların, Şekil 18’te 4 katlı yapıların, Şekil 19’da 5 katlı yapıların, Şekil 20’de 6 katlı yapılarda kullanılan donatı miktarlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 17. Üç katlı yapılarda kullanılan donatı miktarları

Şekil 17’deki 3 katlı yapılarda, değişen zemin yerel sınıflarında en fazla donatı kullanılan ZE yerel zemin sınıfında, TBDY-2018’e göre kullanılan donatı miktarı 18.94 ton ’dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe, donatı miktarının ortalama %6-8.90 arttığı gözlemlenmiştir. DBYBHY-2007’ye göre ise en fazla donatı kullanılan Z4 yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 14.26 ton ’dur. Ayrıca, zemin sınıfı kötüleştikçe donatı miktarının ortalama %1-2.96 arttığı görülmüştür. Asmolen döşeme sistemine sahip 3 katlı yapılarda, TBDY-2018’e göre ZE yerel zemin sınıfında kullanılan donatı miktarı 28.08 ton ’dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe donatı miktarının ortalama %2-3.5 arttığı tespit

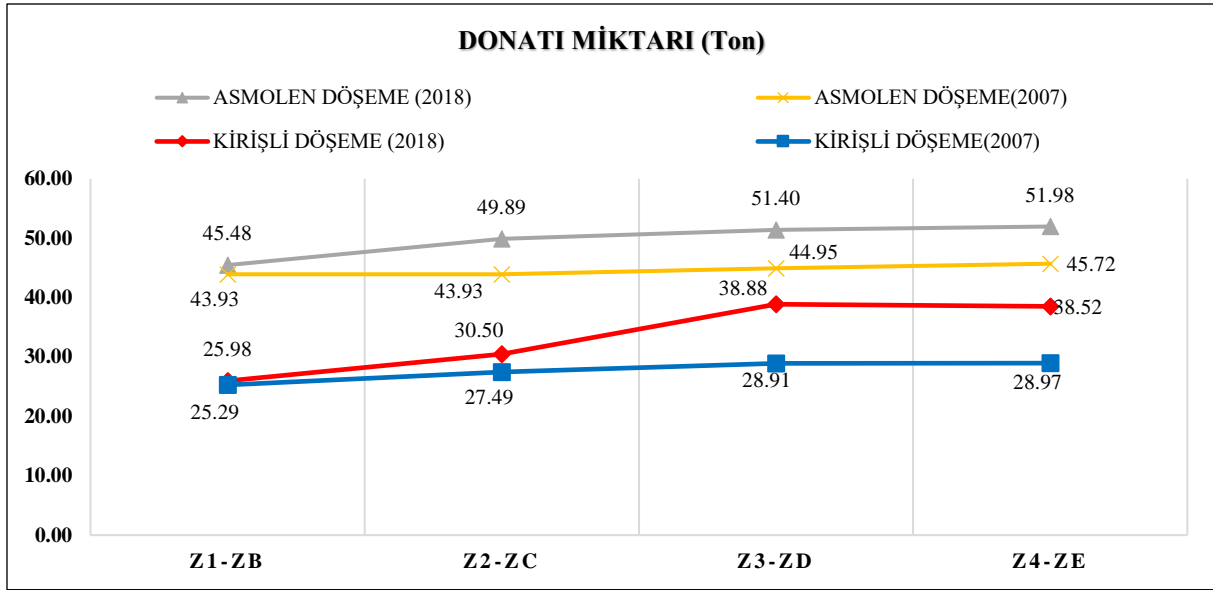
edilmiştir. DBYBHY-2007'ye göre ise en fazla donatı kullanılan Z4 yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 24.36 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe, donatı miktarındaki kayda değer artışın yalnızca Z1-Z2 yerel zemin sınıfları arasında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 18. Dört katlı yapılarda kullanılan donatı miktarları

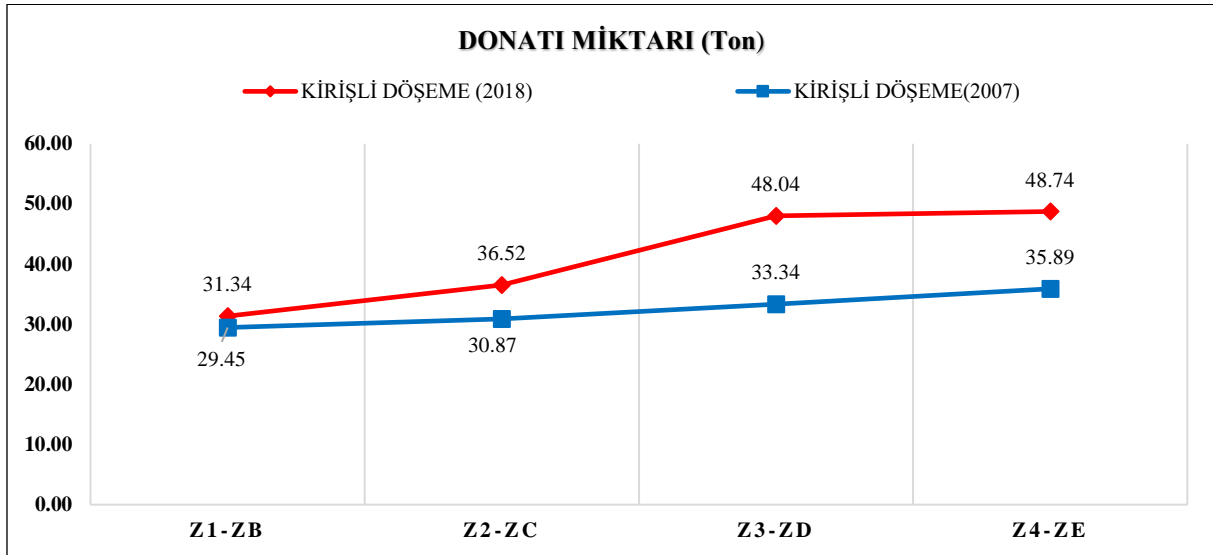
Şekil 18'deki kirişli döşeme sistemine sahip 4 katlı yapılarda, TBDY-2018'e göre değişen zemin yerel sınıflarında en fazla donatı kullanılan ZE yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 29.63 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe donatı miktarının ortalama %10-21 arttığı gözlemlenmiştir. DBYBHY-2007'ye göre ise en fazla donatı kullanılan Z4 yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 21.50 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe, donatı miktarında kayda değer artış sadece Z1-Z2 yerel zemin sınıfları arasında olmuştur. Asmolen döşeme sistemine sahip 4 katlı yapılarda, TBDY-2018'e göre ZE yerel zemin sınıfında kullanılan donatı miktarı 40.73 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe, donatı miktarında kayda değer artış ZB-ZC yerel zemin sınıfları arasında görülmüştür. DBYBHY-2007'ye göre ise Z4 yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 35.95 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe, donatı miktarının ortalama %2-2.5 arttığı belirlenmiştir.

Şekil 19'daki Kirişli döşeme sistemine sahip 5 katlı yapılarda, TBDY-2018'e göre değişen zemin yerel sınıflarında en fazla donatı ve beton kullanılan ZE yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 38.52 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe, donatı miktarındaki kayda değer artışın ZC-ZD yerel zemin sınıfları arasında gözlemlenmiştir. DBYBHY-2007'ye göre ise en fazla donatı kullanılan Z4 yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 28.97 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe, donatı miktarındaki kayda değer artış Z1-Z2 yerel zemin sınıflarında, görülmüştür. Asmolen döşeme sistemine sahip 5 katlı yapılarda, TBDY-2018'e göre ZE yerel zemin sınıfında kullanılan donatı miktarı 51.98 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe, donatı miktarı ortalama %1-9 artmıştır. DBYBHY-2007'ye göre ise Z4 yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 45.72 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştikçe, donatı miktarındaki kayda değer artış Z3-Z4 yerel zemin sınıflarında olmuştur.



Şekil 19. Beş katlı yapılarda kullanılan donatı miktarları

Şekil 20'deki Kirişli döşeme sistemine sahip 6 katlı yapılarda, TBDY-2018'e göre değişen zemin yerel sınıflarında en fazla donatı ZE yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 48.74 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştiğinde, donatı miktarının ortalama %5-15 arttığı gözlemlenmiştir. DBYBHY-2007'ye göre ise en fazla donatı kullanılan Z4 yerel zemin sınıfında, donatı miktarı 35.89 ton 'dur. Zemin sınıfı kötüleştiğinde, donatı miktarındaki artışın ortalama %4.60-7 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 20. Altı katlı yapılarda kullanılan donatı miktarları

3.5 TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre 3,4,5 ve 6 katlı yapılarda kullanılan beton miktarının irdelenmesi

Tablo 14'te 3, 4, 5, 6 katlı yapılarda kullanılan beton miktarlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 14. Tasarımı yapılan binalarda kullanılan beton miktarları

Kat sayısı	Döşeme sistemi	DBYBHY-2007		TBDY-2018		% Değişim
		Zemin Sınıfı	Beton Miktarı (m ³)	Zemin Sınıfı	Beton Miktarı (m ³)	
3 Katlı	Kirişli	Z1	171,150	ZB	173,440	1,32%
		Z2	174,760	ZC	178,740	2,23%
		Z3	174,760	ZD	184,160	5,10%
		Z4	175,080	ZE	207,780	15,74%
	Asmolen	Z1	158,850	ZB	218,130	27,18%
		Z2	178,610	ZC	218,130	18,12%
		Z3	178,610	ZD	218,130	18,12%
		Z4	178,630	ZE	221,120	19,22%
		Z1	229,270	ZB	231,250	0,86%
4 Katlı	Kirişli	Z2	239,610	ZC	239,800	0,08%
		Z3	239,700	ZD	250,880	4,46%
		Z4	243,160	ZE	284,910	14,65%
		Z1	247,630	ZB	290,830	14,85%
	Asmolen	Z2	250,660	ZC	293,850	14,70%
		Z3	252,950	ZD	293,850	13,92%
		Z4	252,950	ZE	293,850	13,92%
		Z1	298,450	ZB	301,700	1,08%
		Z2	302,700	ZC	321,400	5,82%
5 Katlı	Kirişli	Z3	307,060	ZD	363,250	15,47%
		Z4	326,050	ZE	386,550	15,65%
		Z1	310,780	ZB	360,800	13,86%
		Z2	310,780	ZC	362,250	14,21%
	Asmolen	Z3	310,780	ZD	363,770	14,57%
		Z4	310,780	ZE	363,770	14,57%
		Z1	358,140	ZB	362,040	1,08%
		Z2	363,240	ZC	385,680	5,82%
		Z3	370,200	ZD	439,320	15,73%
6 Katlı	Kirişli	Z4	391,260	ZE	465,480	15,94%

Tablo 14'e göre, farklı yönetmeliklere (TBDY-2018 ve DBYBHY-2007) ve zemin sınıflarına göre yapılan beton miktarları incelenmiştir. Kirişli döşeme sistemine sahip TBDY-2018'e göre, 3 katlı yapılarda ZE zemin sınıfında en fazla beton kullanılmış (207,78 m³), zemin sınıfı kötüleştikçe beton miktarındaki artış ZD-ZE sınıfları arasında belirgin olmuştur. DBYBHY-2007'ye göre ise, Z4 zemin sınıfında 175,08 m³ beton kullanılmış ve zemin sınıfı kötüleştikçe beton miktarı %1-2.5 artmıştır. Asmolen döşeme sistemine sahip TBDY-2018'de ise beton miktarı ZE zemin sınıfında 221,12 m³'ye çıkmıştır, fakat zemin sınıfı kötüleştikçe kayda değer bir artış gözlemlenmemiştir.

4 katlı yapılarda ise, TBDY-2018'e göre ZE zemin sınıfında beton miktarı 284,91 m³, DBYBHY-2007'ye göre Z4 sınıfında 243,16 m³ olmuştur. 5 katlı yapılarda ise TBDY-2018'de ZE zemin sınıfında 386,55 m³ beton kullanılmış, DBYBHY-2007'de ise Z4 zemin sınıfında 326,05 m³ beton kullanılmıştır. 6 katlı yapılarda, TBDY-2018'de ZE zemin sınıfında 465,48 m³ beton, DBYBHY-2007'de ise Z4 zemin sınıfında 391,26 m³ beton kullanılmıştır.

Genel olarak, kat sayısı arttıkça ve yerel zemin sınıfı kötüleştikçe her iki yönetmelik için de beton miktarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, asmolen döşeme sistemine sahip yapılarda kullanılan beton miktarı, kirişli döşeme sistemine sahip yapılardan genellikle daha fazladır.

3.6 TBDY-2018 ile DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre 3,4,5 ve 6 katlı yapıların performanslarının irdelenmesi

Tablo 15'te 3 katlı yapıların, Tablo 16'da 4 katlı yapıların, Tablo 17'de 5 katlı yapıların, Tablo 18'te 6 katlı yapılarda kullanılan donatı miktarlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 15. 3 Katlı yapıların performanslarının değerlendirilmesi

Bina Kodu	TBDY-2018	DBYBHY-2007	TBDY-2018	DBYBHY-2007
			Gevrek Hasar	Gevrek Hasar
3KZ1B	KH	KH	-	2 Adet Kolon
3KZ2C	KH	GÖ (Kolon ve giriş göçme bölgesi)	-	-
3KZ3D	KH	GÖ (Kolon göçme bölgesi)	-	5 Adet Kolon
3KZ4E	KH	GÖ (İleri Giriş Hasarı=%85>%35)	-	4 Adet Kolon
3AZ1B	KH	GÖ (Vcoranı=%40,0>%30)	-	6 Adet Kolon
3AZ2C	KH	KH	-	7 Adet Kolon
3AZ3D	KH	GÖ (Vcoranı=%45,0>%30)	-	5 Adet Kolon
3AZ4E	KH	GÖ (Vcoranı=%38,0>%30)	-	4 Adet Kolon

Tablo 15'e göre, 3 katlı kirişli döşeme sistemine sahip DD-2 deprem yer hareketi altında farklı zemin sınıflarındaki yapılarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

ZB-Z1 zemin sınıfındaki yapılarda, yeni yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda kirişler ve kolonlar hasar görmüş ancak bu hasar yönetmeliğin izin verdiği sınırlar içinde kaldığı için KH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda ise 2 adet gevrek kolonun güçlendirilmesi şartı ile KH performans düzeyini sağlamıştır.

ZC-Z2 zemin sınıfındaki yapılarda, yeni yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda 1. kattaki kirişlerin %75'inde belirgin hasar, kolonlarda ise %30'a kadar hasar oluşmuş ve KH düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda ise 1. kattaki kirişlerin %100'ü ve kolonların %7'si göçme bölgesine geçmiştir.

ZD-Z3 zemin sınıfındaki yapılarda, yeni yönetmeliğe göre 1. ve 2. kattaki kirişlerin çoğu belirgin hasar almış ve kolonların %87'si hasar görmüştür; KH düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmeliğe göre ise 5 kolon gevrek hasar almış ve %7'si göçme bölgesine girdiği için GÖ düzeyinde kalmıştır.

ZE-Z4 zemin sınıfındaki yapılarda, yeni yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda kolonlar sınırlı hasar bölgesinde kalarak KH performans düzeyi sağlanmışken, eski yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda kirişlerin %85'i ileri hasara uğramış ve 4 kolon gevrek hasar alarak KH düzeyini sağlayamamıştır.

Tablo 14'e göre, 3 katlı asmolen döşeme sistemine sahip DD-2 deprem yer hareketi altında farklı zemin sınıflarındaki yapılarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

ZB-Z1 zemin sınıfında, yeni yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda kirişler ve kolonlar sınırlı hasar bölgesinde kalarak SH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise 1. kattaki kirişlerin çoğu belirgin hasara ulaşmış ve kolonlardaki plastikleşme oranı %40'a çıkmıştır, bu nedenle KH düzeyi sağlanamamıştır.

ZC-Z2 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte 1. kattaki kirişlerin %95'inde belirgin hasar oluşmuş, kolonlarda ise %30'a kadar hasar meydana gelmiştir ve KH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise 1. kattaki kirişlerin %100'ü belirgin hasara ulaşmış, kolonların %50'si belirgin hasar görmüş ve 7 kolon gevrek hasar almıştır.

ZD-Z3 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerin çoğu belirgin hasara uğramış ancak kolonlar sınırlı hasarda kalmış ve KH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin tamamı belirgin hasara ulaşmış, kolonlardaki plastikleşme oranı %45'e çıkmış ve 5 kolon gevrek hasar görmüştür.

ZE-Z4 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerin çoğu belirgin hasar almış, kolonlar sınırlı hasarda kalmış ve KH düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin tamamı belirgin hasara geçmiş ve kolonlardaki plastikleşme oranı %38'e ulaşarak 4 kolon gevrek hasar almış, bu nedenle KH düzeyi sağlanamamıştır.

Tablo 16. 4 Katlı yapıların performanslarının değerlendirilmesi

Bina Kodu	TBDY-2018	DBYBHY-2007	TBDY-2018	DBYBHY-2007
			Gevrek Hasar	Gevrek Hasar
4KZ1B	KH	KH	-	9 Adet Kolon
4KZ2C	KH	KH	-	7 Adet Kolon
4KZ3D	KH	GÖÇME (İleri Kiriş Hasarı=%90>%35)	-	5 Adet Kolon
4KZ4E	KH	GÖÇME (Kolon Vc=%51>%30) Göçme Bölgesi Kiriş Hasarı=%100>%35)	-	4 Adet Kolon
4AZ1B	KH	KH	-	3 Adet Kolon
4AZ2C	KH	KH	-	5 Adet Kolon
4AZ3D	KH	GÖ (Vcoranı=%43,0>%30)	-	5 Adet Kolon
4AZ4E	KH	GÖ (Vcoranı=%39,0>%30)	-	7 Adet Kolon

Tablo 16'ya göre, 4 katlı kirişli döşeme sistemine sahip DD-2 deprem yer hareketi altında farklı zemin sınıflarındaki yapılarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

ZB-Z1 zemin sınıfında, yeni yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda 1. ve 2. kattaki kirişlerin çoğunda belirgin hasar oluşurken, kolonlarda %36'ya kadar hasar oluşmuştur. Eski yönetmelik ile tasarlanan yapıda ise KH performans düzeyi sağlanmış ancak 9 kolonda gevrek hasar görülmüştür.

ZC-Z2 zemin sınıfında, yeni ve eski yönetmeliklere göre tasarlanan yapılarda kiriş ve kolonlardaki hasarlar KH performans düzeyini aşmamıştır. Eski yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda 7 adet kolonda gevrek hasar görülmüştür.

ZD-Z3 zemin sınıfında, yeni yönetmelikle tasarlanan yapıda kiriş ve kolonlarda hasar meydana gelmiş ancak bu hasarlar KH performans düzeyini sağlamıştır. Eski yönetmelik ile tasarlanan yapıda ise kirişlerde ileri hasar, kolonlarda ise göçme oluşmuş ve yapı göçme durumuna gelmiştir.

ZE-Z4 zemin sınıfında, yeni yönetmelikle tasarlanan yapıda kiriş ve kolonlarda hasar oluşmuş ancak bu hasarlar KH düzeyini geçmemiştir. Eski yönetmelik ile tasarlanan yapıda ise kirişlerin %95'i göçme bölgesine girmiş ve kolonlarda plastikleşme oranı %51'e ulaşarak göçme durumu oluşmuştur.

Tablo 15'e göre, 4 katlı asmolen döşeme sistemine sahip DD-2 deprem yer hareketi altında farklı zemin sınıflarındaki yapılarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

ZB-Z1 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte 1. ve 2. kattaki kirişlerin çoğu belirgin hasar alırken, kolonların %36'sı -x deprem doğrultusunda belirgin hasara ulaşmıştır. Eski yönetmelikte yapı KH performans düzeyini sağlamış, ancak 3 kolon gevrek hasar görmüş ve 1. katta kolonların %35'inde belirgin hasar oluşmuştur.

ZC-Z2 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerin çoğu bütün katlarda belirgin hasar alırken, kolonlar sınırlı hasar bölgesinde kalmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin tamamı belirgin hasar almış ve kolonların %60'ı belirgin hasara ulaşmış, 5 kolon gevrek hasar görmüştür. KH düzeyi sağlanmıştır.

ZD-Z3 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kiriş ve kolonlarda herhangi bir gevrek hasar oluşmamış ve kolonlar sınırlı hasar bölgesinde kalarak KH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin tamamı belirgin hasar almış, kolonlardaki plastikleşme oranı %43'e ulaşmış ve 5 kolon gevrek hasar görmüştür, bu nedenle KH düzeyi sağlanamamıştır.

ZE-Z4 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerde hasar oluşmuş ancak göçme veya ileri hasar bölgesine geçilmemiş ve KH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin tamamı belirgin hasar almış,

kolonlardaki plastikleşme oranı %39'a çıkmış ve 7 kolon gevrek hasar görmüştür, bu nedenle KH düzeyi sağlanamamıştır.

Tablo 17. 5 Katlı yapıların performanslarının değerlendirilmesi

Bina Kodu	TBDY-2018	DBYBHY-2007	TBDY-2018	DBYBHY-2007
			Gevrek Hasar	Gevrek Hasar
5KZ1B	KH	KH	-	6 Adet Kolon
5KZ2C	KH	KH	-	2 Adet Kolon
5KZ3D	KH	GÖÇME (İleri Kiriş Hasarı=%95>%35)	-	7 Adet Kolon
5KZ4E	KH	GÖÇME (İleri Kiriş Hasarı=%95>%35)	-	6 Adet Kolon
5AZ1B	KH	KH	-	4 Adet Kolon
5AZ2C	KH	KH	-	7 Adet Kolon
5AZ3D	KH	GÖÇME (Göçme bölgesi kolon=%39,0)	-	10 Adet Kolon
5AZ4E	KH	GÖÇME (Göçme bölgesi kolon=%86,0)	-	11 Adet Kolon

Tablo 17'ye göre, 5 katlı kirişli döşeme sistemine sahip DD-2 deprem yer hareketi altında farklı zemin sınıflarındaki yapıların performans sonuçları şu şekildedir:

ZB-Z1 zemin sınıfında, yeni yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda kirişlerin çoğu her iki deprem doğrultusunda belirgin hasar alırken, kolonlarda 1. katta %8'e kadar hasar oluşmuş ve KH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin çoğu belirgin hasar almış ve kolonlarda 1. katta %29 hasar görülmüş, KH düzeyi sağlanmış ancak 6 kolon gevrek hasar görmüştür.

ZC-Z2 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte tasarlanan yapıda kirişlerde belirgin hasar oluşmuş ve kolonlar %8'e kadar hasar almıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin çoğu belirgin hasar alırken, kolonlarda %30'a kadar hasar meydana gelmiş ve 2 kolon gevrek hasar görmüştür.

ZD-Z3 zemin sınıfında, yeni yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda herhangi bir gevrek eleman oluşmamış, kirişlerin %100'ü belirgin hasara uğramış, kolonlar ise sınırlı hasar bölgesinde kalmıştır. Eski yönetmelikte ise 1. katta kirişlerin %95'i ileri hasara, %5'i göçme bölgesine geçmiş ve 10 adet kolon gevrek hasar gördüğünden KH düzeyi sağlanamamıştır.

ZE-Z4 zemin sınıfında, yeni yönetmeliğe göre tasarlanan yapıda kirişlerin çoğu belirgin hasar alırken, kolonların büyük çoğunluğu sınırlı hasarda kalmış ve KH düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin %95'i göçme bölgesine geçmiş ve 6 kolon gevrek hasar görmüştür, bu nedenle KH düzeyi sağlanamamıştır.

Tablo 16'ya göre, 5 katlı kirişli döşeme sistemine sahip DD-2 deprem yer hareketi altında farklı zemin sınıflarındaki yapıların performans sonuçları şu şekildedir:

ZB-Z1 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerin ve kolonların çoğunda sınırlı hasar oluşmuş ve KH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin çoğu belirgin hasar bölgesine geçmiş, kolonların %50'si belirgin hasara ulaşmış ve 4 kolon gevrek hasar görmüştür.

ZC-Z2 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerin %50'sinden fazlasında belirgin hasar meydana gelirken, kolonların en fazla %3'ü belirgin hasara ulaşmıştır. Eski yönetmelikte kirişlerin tamamı belirgin hasar alırken, kolonların plastikleşme oranı %26 olup 7 kolon gevrek hasar görmüştür; bu kolonların güçlendirilmesiyle KH performans düzeyi sağlanmıştır.

ZD-Z3 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte elemanlarda gevrek hasar oluşmamış, kirişlerin büyük çoğunluğu belirgin hasar bölgesine geçmiş ve kolonlar sınırlı hasar bölgesinde kalmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin tamamı belirgin hasar alırken, kolonlar göçme bölgesine ve 10 adet kolonda gevrek hasar tespit edilmiştir.

ZE-Z4 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerin çoğu belirgin hasar almış ve kolonların büyük çoğunluğu sınırlı hasar bölgesinde kalarak KH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin tamamı belirgin hasar almış, kolonlar göçme bölgesine geçmiştir ve 11 adet kolonda gevrek hasar olduğundan KH performans düzeyi sağlanamamıştır.

Tablo 18. 6 katlı yapıların performanslarının değerlendirilmesi

Bina Kodu	TBDY-2018	DBYBHY-2007	TBDY-2018	DBYBHY-2007
			Gevrek Hasar	Gevrek Hasar
6KZ1B	KH	KH	-	2 Adet Kolon
6KZ2C	KH	GÖÇME (Göçme bölgesi Kiriş Hasar oranı=%100,0>%20 Plastiklesen kolon Vc oranı=%36,0>%30)	-	-
6KZ3D	KH	GÖÇME (Plastiklesen kolon Vc oranı=%80,0>%30)	-	-
6KZ4E	KH	GÖÇME (Plastiklesen kolon Vc oranı=%83,6>%30)	-	-

Tablo 18'e göre, 5 katlı kirişli döşeme sistemine sahip DD-2 deprem yer hareketi altında farklı zemin sınıflarındaki yapıların performans sonuçları şu şekildedir:

ZB-Z1 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte tasarlanan yapıda kirişlerin çoğu belirgin hasar almış, kolonların büyük çoğunluğu sınırlı hasarda kalmış ve KH performans düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin çoğu belirgin hasar alırken, 1. katta kolonların %43'ü belirgin hasara ulaşmış ve 2 kolon gevrek hasar görmüştür, ancak KH düzeyi sağlanmıştır.

ZC-Z2 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerin çoğu belirgin hasar almış, kolonlarda ise %10'a kadar belirgin hasar oluşmuştur. Eski yönetmelikte kirişlerin %100'ü göçme bölgesine geçmiş ve kolonlardaki plastikleşme oranı %36'ya ulaşarak KH düzeyini sağlayamamıştır.

ZD-Z3 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerin çoğu belirgin hasar almış, ancak kolonlarda %17'lik bir hasar ile KH düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise yapı göçme aşamasına gelmiştir.

ZE-Z4 zemin sınıfında, yeni yönetmelikte kirişlerin çoğu belirgin hasar almış, kolonlarda ise çoğunluk sınırlı hasarda kalmış ve KH düzeyi sağlanmıştır. Eski yönetmelikte ise kirişlerin %100'ü belirgin hasara geçmiş ve kolonlarda plastikleşme oranı %83,6'ya ulaştığı için yapı göçme durumuna gelmiştir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada ortak bir mimari ile TBDY-2018 ve DBYBHY-2007'ye göre değerlendirmesi yapılan yapıların, taşıma gücüne göre ilgili olduğu yönetmeliklerdeki verilen sınırları sağlatılıp, tasarımları yapılarak analizler ışığında; yapı doğal titreşim periyotları, taban kesme kuvvetleri, etkin görel kat ötelemeleri, yapılarda kullanılan donatı miktarlarındaki değişimler ile yeni ve eski yönetmeliğe göre tasarımı yapılan yapıların, TBDY-2018 performans kriterlerine göre deprem performansları incelenmiştir.

Uygulama amacıyla, yapıların Yalova ilinde yapıldığı kabul edilmiştir. TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 yönetmeliklerindeki yerel zemin sınıflarına göre, kat sayısı (3, 4,5, 6 Katlı) ve döşeme sistemi (Asmolen, Kirişli)

değiştirilerek iki yönetmelik arasında yapılarda oluşan davranış farklılıkları ve deprem performansları ortaya konulmuştur.

Analizler sonucunda elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Yapı doğal titreşim periyotunun, hem TBDY-2018 hem de DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre kat sayısının artmasıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Kirişli döşeme sistemine sahip yapılar için, TBDY-2018'e göre tasarlanmış olan yapıların doğal titreşim periyotlarının, DBYBHY-2007'ye göre tasarlanmış olanlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde, asmolen döşeme sistemine sahip yapılar için bu durumun tam tersi gözlenmiş ve DBYBHY-2007 yönetmeliğine göre tasarlanmış olan yapılarda doğal titreşim periyotlarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu farklılığın TBDY-2018'de dikkate alınan etkin kesit rijitliklerinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
2. Taban kesme kuvveti, hem TBDY-2018 hem de DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre kat sayısının (ve dolayısıyla kütle) artmasıyla birlikte artmaktadır. Kirişli döşeme sistemine sahip yapılar için, Z1 yerel zemin sınıfındaki yapıların, ZB yerel zemin sınıfındakilere göre daha yüksek taban kesme kuvvetine maruz kaldığı gözlenmiştir; ancak asmolen döşeme sistemine sahip yapılar için bu farklılık belirgin değildir. Ayrıca, her iki yönetmelik için de sert zeminden yumuşak zemine doğru ilerledikçe taban kesme kuvvetinin arttığı ve kirişli döşeme sistemine sahip yapılar için TBDY-2018'e göre tasarlanmış ZB yerel zemin sınıfındaki yapılar hariç, taban kesme kuvvetinin DBYBHY-2007'ye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
3. Etkin görel kat ötelemelerinin kat sayısı ve sert zeminden yumuşak zemine gidildikçe her iki yönetmelik içinde arttığı görülmüştür. Analizler incelendiğinde zemin sınıfı ZD'den sonra etkin görel kat ötelemesinin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin ise yönetmelikteki ilgili öteleme sınırı sağlamak ve kolon kiriş birleşim bölgelerindeki kesme güvenliğinin sağlanmamasından dolayı artan kesit boyutları ve yapıya eklenen perde duvarlar olduğu görülmüştür. Böylece yapıların rijitliği arttığından dolayı ötelemeler azalmıştır. Her iki yönetmelik için de kirişli döşeme sistemine sahip yapıların etkin görel kat ötelemelerinin, asmolen döşeme sistemine sahip yapılara göre arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin ise kat yüksekliği sabit kalmak üzere TBDY-2018'e göre tasarımı yapılan asmolen döşeme sistemine sahip yapılarda, taban devrilme momenti sağlatılmak üzere eklenen çok sayıda perde duvarlar ile yapıların rijitliği oldukça artmıştır. Bundan dolayı kirişli döşeme sistemine sahip yapılara nazaran etkin görel kat ötelemeleri düşük çıkmıştır. Ayrıca TBDY-2018 ile dikkate alınan etkin kesit rijitlikleri ile kolonların rijitliği %30 azaltıldığından dolayı etkin görel kat ötelemeleri eski yönetmeliğe oranla artmıştır. Bundan dolayı yeni yönetmeliğe göre tasarımı yapılan yapılarda, daha büyük kesitlere ihtiyaç duyulmuştur.
4. Yapılarda kullanılan donatı miktarlarının, TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 yönetmelikleri altında kat sayısı ve zeminin kötüleşmesine bağlı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. Asmolen döşeme sistemine sahip yapılar için kullanılan beton ve donatı miktarlarının, yapı ağırlığı ve yapının periyoduyla ilişkili olarak deprem yükünün etkisiyle, her iki yönetmelik altında da kirişli döşeme sistemine sahip yapılarınkine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tasarımlarda, bazı yapıların düşey taşıyıcı eleman boyutları sabit tutularak sadece zemin sınıfının değiştirilmesiyle yapılan analizlerde, donatı miktarlarında artış olduğu belirlenmiştir. Bu artışın nedeni, düşey taşıyıcı eleman boyutlarının sabit tutulmasıyla zemin sınıfının kötüleşmesi sonucunda düşey taşıyıcı elemanların daha fazla deprem yüküne maruz kalması ve buna bağlı olarak donatının artan basınç gerilmelerini taşımasıdır. Bu durumda,

kesitteki donatı oranının artmasıyla kolon boyutunun yetersiz hale gelmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, yönetmeliklerde pirsantaj oranının ifade edilmesi gerekmektedir. Bu durumun temel sonucu, yeni yönetmeliklerin kapasite tasarımını dikkate alması ve yapıların sünek davranışa yönlendirilmesidir. Dolayısıyla, yeni yönetmelikle birlikte malzeme özelliklerine, beton ve donatı hesap dayanımlarına göre hesaplanan taşıma gücü ve kapasite momentleri ile yapıların deprem etkisi altındaki davranışının daha gerçekçi bir şekilde analiz edilmesi hedeflenmiştir.

5. Kirişli ve asmolen döşeme sistemine sahip binaların, DD-2 deprem yer hareketi altında, doğrusal olmayan Tek Modlu İtme Yöntemi ile deprem performansları değerlendirildi. TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre tasarlanan binalarda, eski yönetmeliğe göre %65'inin performans kriterlerini sağlayamadığı, %35'inin ise gevrek elemanların güçlendirilmesiyle sağladığı belirlendi. Kirişli döşemeli yapılarda performans sorununun %60'ı kiriş hasarından, %40'ı ise kolon hasarından kaynaklanırken, asmolen döşemeli yapılarda tüm yapıların kolonlarının ileri hasar veya göçme bölgesine geçmesi nedeniyle performans kriterlerini sağlayamadığı görüldü. Ayrıca, zemin tipi değişikçe hasarların arttığı ancak kat sayısı arttıkça bu ilişkinin geçerli olmadığı gözlemlendi. Sonuç olarak, eski yönetmelik hükümleriyle tasarlanmış binaların ortalama %65'inin büyük bir risk taşıdığı tespit edilmiştir.

Her iki yönetmeliğe göre tasarımı yapılan yapılarda ilgili olduğu yönetmelikteki görelî kat öteleme sınırları sağlatılmak zorunda olduğundan dolayı elamanlardaki ötelemeler arasındaki fark tam olarak ortaya konulamamıştır. Bu sebeple her iki yönetmelik içinde izin verilen sınırlar dikkate alınmayarak yapıların analizleri yapılarak her iki yönetmelik arasındaki görelî kat öteleme farkı ortaya konulmalıdır. Ayrıca Yapılan çalışma Yalova ilinde yapıldığından dolayı asmolen ve kirişli döşeme sistemleri üzerinde çalışma yapılması için kat sayısı en fazla 6 seçilmiştir. Bu sebeple deprem bölgesi olmayan bir konumda kat sayısı artırılarak yeni kazanımlar elde edilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Hamsici M (2019) Çok Katlı Betonarme Binalarda 2018 Deprem Yönetmeliği ile Tanımlanan Spektrum Eğrilerinin Etkisinin Araştırılması. Dissertation, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
2. Sesli H (2023) 1999 Kocaeli Depremi Öncesi ve Sonrasında İnşa Edilen Binaların Yapısal Performans Düzeylerinin Değerlendirilmesi ve YSİS Uygulaması-Yalova Örneği. Yalova Üniversitesi Bilimsel Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Yalova, Türkiye.
3. Keskin E, Bozdoğan KB (2018) 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli ili Özelinde Değerlendirilmesi. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi 4(1):74-90.
4. Karaca H, Oral M, Erbil M (2020) Yapısal Tasarım Bağlamında 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Karşılaştırılması, Niğde Örneği. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 9(2):898-903. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.667365>
5. Meral E (2019) Betonarme binalarda kısa kolon etkilerinin araştırılması. International Journal of Engineering Research and Development 11(2):515-527. <https://doi.org/10.29137/umagd.495192>
6. Gündoğay A, Aksakal AK (2022) Betonarme Kolon Eğrilik Sünekliğinin 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre İncelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi (34):202-210. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1079707>
7. Doğan O, Genç Y, Akgül M (2022) DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 kapsamında betonarme çerçeve ve saplama/ikincil kirişlerin kesit tesirlerindeki değişimin karşılaştırılması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi 13(2):295-305. <https://doi.org/10.24012/dumf.1053898>
8. Sümer Y, Hamsici M (2020) Çok katlı betonarme binalarda 2018 deprem yönetmeliği ile tanımlanan spektrum eğrilerinin etkisi. Academic Platform-Journal of Engineering and Science 8(2):349-354. <https://doi.org/10.21541/apjes.641250>

9. Dalyan İ, Şahin B (2019) Mevcut betonarme bir binanın 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre deprem yükleri altındaki taşıyıcı sistem performansının değerlendirilmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi 1(2):134-147. <https://doi.org/10.46464/tdad.631998>
10. Çetin K, Demir A, Altıok TY (2020) 2007 VE 2018 Türk Deprem Yönetmeliklerine Göre Yerel Zemin Sınıflarının Yapılardaki Burulma Düzensizliğine Etkisi. Konya Journal of Engineering Sciences 8(2):282-290. <https://doi.org/10.36306/konjes.578184>
11. Ünsal İ, Öncel FA, Şahan F (2020) TDY 2007 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine göre yapı yüksekliğinin taban kesme kuvveti ve tepe deplasmanı üzerindeki etkisinin incelenmesi. Konya Journal of Engineering Sciences 8(4):930-942. <https://doi.org/10.36306/konjes.752139>
12. Aksoylu C, Arslan MH (2021) 2007 ve 2019 Deprem yönetmeliklerinde betonarme binalar için yer alan farklı deprem kuvveti hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması olarak irdelenmesi. International Journal of Engineering Research and Development 13(2):359-374. <https://doi.org/10.29137/umagd.844186>
13. Adar K, Büyüksaraç A, Işık E, Ulu AE (2021) 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Yapısal Analizler Işığında Karşılaştırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi (25):306-317. <https://doi.org/10.31590/ejosat.906347>
14. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (<https://tdth.afad.gov.tr/>) Erişim 10 Haziran 2024.
15. TBDY (2018). Deprem etkisi altındaki binaların tasarımı için esaslar. Ankara, Türkiye. (<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>) Erişim 5 Ocak 2024.
16. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, (2007), Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, T.C. Resmî Gazete, 26454, 06 Mart 2007. (<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/03/20070306-3-1.pdf>) Erişim 5 Ocak 2024.
17. Doğangün A (2021) Deprem-Zemin ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. İstanbul, Birsen Yayınevi, ss 356.
18. STA4CAD Statik (2024) Yapısal Analiz Programı. Versiyon V-14 Statik.



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Üç boyutlu polimer kafes yapıları ile çimento esaslı kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Mehmet Yavuz Karabulut^{a,b,*}, Salih Yazıcıoğlu^c

^aAnkara Medipol University, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey.

^bGazi University, Institute of Science, PhD, Ankara, Turkey.

^cGazi University, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 9 Kasım 2024

Düzeltilme 2 Ocak 2025

Kabul 21 Ocak 2025

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Üç boyutlu yazıcılar

Gyroid

Fluorite

Mekanik özellikler

3 nokta eğme testi

Düşürme testi

ÖZET

İnşaat mühendisliğinde beton en yaygın kullanılan mühendislik malzemesidir. Basınç dayanımının yüksek olmasına rağmen, çekme dayanımına karşı zayıf ve düşük süneklik gösterir. Betonun sünekliğini artırmak için takviye malzemeleri kullanılır. Bu çalışmada hem sünekliğini arttırmak hem hafiflik sağlamak ve hem de enerji emme kapasitesini arttırmak için Gyroid ve Fluorite gibi hücresel kafes yapılar çimento esaslı harç içerisine gömülmüştür. Ayrıca, üç boyutlu polimer kafes yapılar ile üretilen çimento esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri kontrol harcı (KH), lifli harç (LH) ve iki farklı kafes konfigürasyonu ile üretilen Gyroid harç (GH) ve Fluorite harç (FH) kullanılarak araştırılmıştır. Kafes yapılar eriterek biriktirme modellemesi (EBM) ile 3B yazıcılar kullanılarak akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemeden üretilmiştir. Kafes yapılar çimento esaslı harcin içine gömülerek numuneler hazırlanmıştır. Üretilen kafes takviyeli numuneler üzerinde basınç, orta noktadan yüklemeli 3 nokta eğilme testi ve darbe deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; en yüksek basınç dayanım değerini lifli harç (LH) numune göstermiştir. Lifli harcin (LH) kafes takviyeli çimento esaslı harç numunelerinden daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Darbe dayanımından elde edilen sonuçlara göre ise kafes yapıları çimento esaslı harç numunelerin sünek bir davranış gösterdiği ve daha yüksek darbe emme enerjisi değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Production of cement-based composites with three-dimensional polymer lattice structures and investigation of their mechanical properties

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 November 2024

Received in revised form 2 January 2025

Accepted 21 January 2025

Available online

Keywords:

3D Printing

Gyroid

Fluorite

Mechanical properties

3-point bending

Drop test

ABSTRACT

In civil engineering, concrete is the most commonly used engineering material. Despite its high compressive strength, it is weak against tensile strength and shows low ductility. Reinforcement materials are used to increase the ductility of concrete. In this study, cellular lattice structures such as Gyroid and Fluorite were embedded in cement-based mortar in order to increase ductility, provide lightness and increase energy absorption capacity. In addition, the mechanical properties of cement-based composites produced with three-dimensional polymer lattice structures were investigated using control mortar (KH), fiber mortar (LH) and Gyroid mortar (GH) and Fluorite mortar (FH) produced with two different lattice configurations. The lattice structures were produced from acrylonitrile butadiene styrene (ABS) material using 3D printers by fusion deposition modelling (EBM). Samples were prepared by embedding the lattice structures in cement-based mortar. Compression, mid-loading 3-point bending test and impact tests were performed on the produced lattice-reinforced samples. According to the results obtained; The highest compressive strength value was shown by the fiber mortar (LH) sample. It was observed that the cage-reinforced cement-based mortar samples had higher energy absorption capacity. According to the results obtained from the impact strength, it was observed that the cage-structured cement-based mortar samples showed a ductile behaviour and had higher impact absorption energy values.

I. GİRİŞ

Beton, performans, maliyet ve bulunabilirlik arasında dengeli bir malzemedir. Dünyanın en büyük ve en zorlu mühendislik projelerinin çoğunda beton kullanılmıştır. Ancak, betonun çekme kuvvetleri altındaki kırılma tepkisi ve basınç kuvvetleri altındaki yarı kırılma tepkisi, onu tek başına kullanıldığında sadece basınç yükü durumlarıyla sınırlandırmıştır. Bu nedenle, çeşitli yükleme koşulları altında sünek ve öngörülebilir bir davranış sağlamak için takviye malzemeleri ile kullanılması gerekli olmuştur. Günümüzde en yaygın kullanılan kompozit malzemelerden biri olan beton, teknolojik gelişmelerle yeniden yorumlandıkça yeni hedefler ortaya çıkmaktadır. Yüksek performans talebiyle geliştirilen betonlar, en olumsuz koşullarda bile yüksek dayanım gösterecek şekilde tasarlanmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlarda amaç, olumsuzluklara karşı yüksek dayanım eşliğini aşarak 100 MPa sınırını geçmek ve 140 MPa ve üzeri değerleri hedeflemektir. Bu seviyelere ulaşmak için, betonun agrega çapı küçültülerek daha fazla yüzey alanı ve rijitlik elde edilir. Azaltılmış su/çimento oranı, seçilen çimento sınıfı ve agrega türü de yüksek dayanım hedefi için gereken önemli kriterlerdir. Ayrıca, belirlenen dayanım hedeflerine ulaşan betonun, zamanla dayanım kazanmaya devam etmesi de kritik bir husustur [1-4].

Yüksek dayanımlı betonların kullanılması ile gevrekliğin yüksek oranda arttığı gözlenmiştir. Süneklik hedefinden uzaklaşması betonun gevrek olması ile sonuçlanmıştır. Gevrekliği azaltmak için donatı kullanılabileceği gibi alternatif bir yol olarak da lifler kullanılabilir. Betonun sünekliğini artırmanın alternatif bir yolu, çelik veya polimer liflerin kullanılmasıdır. Liflerin dağılımı bazı düzlemlerde yığılmaya bazılarının da ise hiç yer almamasına neden olmaktadır. Bu heterojenlik, lif takviyeli kompozitlerin genel performansında öngörülemeyecek şekilde yol açmakta ve malzemenin beklenen çekme dayanımını ve kırılma tokluğunu azaltabilmektedir. Üç boyutlu takviyelerin sağladığı süreklilik ve öngörülebilirlik, bu sorunları azaltmanın anahtarı olabilir. Kiriş testleri ve araştırmalar sonucunda yüksek performanslı lifli beton sünekliği artmıştır. Test sonuçlarında tokluk süneklik çatlak dayanımı ve enerji emiliminin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir [4-8].Lifli beton; beton karışımının içerisine belirli oranlarda lif atılması ve beton karışımına devam edilmesi sonucu olarak üretilmektedir. Lifler karışımın devam etmesi ve kalıba yerleştirilmesi sırasında üç boyutlu olarak beton içerisine rastgele dağılmaktadır.[9] Rastgele dağılım ne yazık ki bazı sorunlara neden olmaktadır. [10] Hangi düzlemde ne kadar sıklıkla oldukları bilinmemekle birlikte bazı eşit olmayan heterojen karışımlarla sonuçlanmaktadır [11]. Lifli betonda liflerin dağılımına müdahale edilebileceği gibi kalıba yerleştirilmesi sırasında betonun liflerinin yönlendirilmesi söz konusudur [12]. Bu yönelim sayesinde çekme numunelerinin ve basınç numunelerinin amaçlanan ya da hedeflenen dayanımlara ulaşması sağlanmaktadır [9-15]. Çimentolu malzemeleri takviye etmek için 3D yazdırılmış polimerler kullanılarak daha önce çok sayıda çalışma yapılmıştır. Salazar ve diğerleri üç boyutlu oktet kafesle takviye edilmiş çimentolu malzemelerin ilk araştırmasını yapmış ve yüksek işlenebilirliğe sahip bir harç kullanarak artan süneklik elde etmişlerdir [16]. Farina ve diğerleri fotopolimer reçineden 3D yazdırılmış basit, ayırık 7.5 mm çapında silindirik çubuklar şeklinde polimerik "liflerle" çimento harcını takviye etmişlerdir. Yazıcıdan çıkan takviye silindirlerinin yüzeylerini mm ölçeğinde çıkıntılarla güçlendirmenin, aynı çap ve malzemedeki pürüzsüz takviye çubuklarına göre kompozitin çok daha fazla deformasyon sertleşmesine yol açtığını bulmuşlardır [17]. Pürüzlü takviyeye sahip numuneler üç noktalı eğilme testlerinde kayma kırılması gösterirken, daha pürüzsüz silindirlerle takviye edilen yapılar eğilme kırılması sergilemiştir. Bu arada, Nam ve diğerleri, bağlantılı fotopolimer reçine liflerinden oluşan takviye ağlarının farklı mekânsal dağılımlarıyla 3D yazdırılarak yapılan takviyenin yönelimi ve dağılımının etkilerini araştırmışlardır. Daha yüksek çekme geriliminin olduğu bölgelerde daha yoğun bir örgüye sahip üçgenleştirilmiş bir takviye yapısı kullanıldığında daha yüksek tepe eğilme dayanımı elde ettiklerine dair bazı

bulgular bulmuşlardır [18]. Ancak, herhangi bir numunede çimentonun doğasında var olan kırılabilirlik önemli ölçüde azaltılamamıştır; bu, kullanılan polimer takviyenin görece düşük hacim oranından kaynaklanıyor olabileceğini öngörmüşlerdir. Rosewitz ve diğerleri biyomimetik çimento-polimer kompozitleri geliştirmiş ve arttırılmış süneklik ve bazı durumlarda takviye edilmemiş harçtan daha yüksek tepe dayanımı gösteren çeşitli hücreli polimerik takviye yapıları değerlendirmiştir [19]. Xu ve diğerleri FDM kullanarak ABS'den üretilen petek kafeslerle takviye edilmiş ince panellerin performansını test etmişlerdir. Bu paneller, eğilme testlerinde süneklik ve çoklu çatlama göstermiştir [20]. Ancak hem Rosewitz'in hem de Xu'nun çalışmaları, karmaşık geometriler veya yük durumlarına uygulanabilirliğini sınırlayabilecek prizmatik veya "iki boyutlu" takviye geometrileri kullanmıştır.

Diğer çalışmalarda da üç boyutlu kafes yapısı tasarımında farklı kafes yapıların deneysel olarak ölçümleri yapıldığı görülmektedir [20-30]. En çok kullanılan kafes tasarımları kübik, hegzagonal, oktet, Kelvin olarak öne çıkmaktadır. Yapılan bilimsel araştırmalarda düz kübik yapı ve hegzagonal yapıdan uzaklaşmıştır. Kafes yapıların öne çıkan bir başka özelliği ise aynı birim hacim düşünüldüğünde bu hacmin ne kadarının hacimce doldurabildiğidir. Kafesler bu özelliklerine göre kendi aralarında modellendiklerinde dayanım artışları gözlenmiş olup bu kafes türleri yaygınlaşmıştır. En önemli hacim alabilen ve diğerlerine göre daha fazla dayanım sağlayan model gyroid'tir [31-38]. Bu nedenle çalışmada gyroid yapı kullanılmıştır.

Yüksek dayanımlı betonun sünekliğinin artırılması liflerin dağılımı ve yerleştirilmesi ile sağlanması farklı sonuçlar oluşturabilir. Önceden tasarlanmış olan tasarımın kullanılması gerekmektedir. Üç boyutlu kafeslerin tasarımı ve ona uygun kalıp oluşturularak, kalıba yerleştirilmesi önemlidir. Literatürde polimerik üç boyutlu kafes yapıların, beton içerisinde kullanıldığında süneklik artışına neden oldukları belirlenmiştir [20, 22-30]. Skratko ve arkadaşları gyroid modellerden oluşturdukları farklı hacimdeki kafes yapılarının beton içerisindeki dayanımlarını incelemiştir. Farklı hacimde aynı modelin kıyaslanması yapıldığında basınç dayanımı hacim arttıkça azalmış, eğilme dayanımı ise artmıştır. Çalışma sonucunda yük azalmasının ani olduğu küçük kuvvetlerde uzamanın devam ettiği gözlenmiştir [39].

Bu çalışmanın amacı, betonun süneklik ve enerji emme kapasitesini artırmak, aynı zamanda yapının hafifliğini korumak için yeni yaklaşımlar geliştirmektir. Beton, inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan yüksek basınç dayanımına sahip bir malzeme olmasına rağmen, çekme dayanımının düşük olması ve sınırlı süneklik sunması gibi özellikleri nedeniyle bazı kısıtlamalara sahiptir. Çalışmada, bu dezavantajları gidermek için Gyroid ve Flourite gibi hücreli kafes yapılar, üç boyutlu (3D) yazıcılarla üretilen akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemeler kullanılarak çimento esaslı harç içine gömülmüştür. Bu hücreli yapılar, çimento esaslı harçların hafifliğini korurken aynı zamanda mekanik özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemektedir.

II. DENEYSEL METOT / TEORİK METOD

Çalışma deneysel bir çalışmadır. Bu bölümde araştırma kapsamında üç boyutlu yazıcı ile üretilen kafes yapıda kullanılan malzeme, çimento esaslı harcı oluşturan malzemeler ve numunelerin hazırlanması ve deney süreci yer almaktadır.

2.1 Kullanılan malzemeler-ABS filament

Çalışmada üç boyutlu yazıcıda kafes sistemin oluşturulması için Akrilonitril bütadien stiren (ABS) filament kullanılmıştır. Kafes yapının üretilmesinde Eriterek Biriktirme Modellemesi (EBM) yöntemi kullanılmıştır. ABS filamentinin ürün özellikleri üreticiden alınmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Çalışmada kullanılan ABS filamentinin teknik özellikleri

	Çekme dayanımı (Mpa)	Elastik modül (MPa)	Akma gerilimi (Mpa)	Poisson oranı	Yoğunluk (gr/cm ³)
ABS	30	2000	29	0,35	1,05

ABS ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde çimento esaslı harç içerisinde istediğimiz performansı göstermesi beklenmektedir [40-42].

2.2 Çimento esaslı harç

Üç boyutlu yazıcılardan üretilen kafes yapılar için çimento esaslı harç karışımı hazırlanıp kullanılmıştır. Çimento esaslı harç hazırlamak için karışımlarda CEM 1 42,5 portland çimentosu, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan bağlayıcıların kimyasal özellikleri Tablo 2 de verilmiştir. Ayrıca agrega olarak iki farklı kuvars kumu kullanılmıştır. Kuvars kumunun maksimum tane çapı 3 mm'dir. Lifli beton içeriğinde sika PPM-12 polipropilene mikro lif bir metreküpte 600 gram olacak şekilde eklenmiştir. Çimento esaslı harcın karışımına ait oranlar ise Tablo 3'te, çalışmada kullanılan lifin teknik özellikleri de Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 2. Bağlayıcıların kimyasal analizi

Bileşen	Çimento (%)	Yüksek fırın cürufu (%)	Silis dumanı (%)
SiO ₂	19,06	36,65	90,14
CaO	60,90	31,45	2,33
Al ₂ O ₃	5,32	14,32	0,42
Fe ₂ O ₃	3,18	0,97	0,27
MgO	2,16	10,02	4,42
SO ₃	3,47	0,98	0,22
Na ₂ O	0,74	0,45	0,53
K ₂ O	1,41	0,74	0,81
Kızdırma kaybı	3,7	-	0,42

Tablo 3. Betonun karışım oranları

Seri	Portland Çimento (kg)	YFC (kg)	SF (kg)	Kum(1) (kg)	Kum (2) (kg)	Su / Bağlayıcı	Lif (g)	SA (kg)
KB, BG, BF	621	249	179	477	477	0.5	-	15.5
LB	621	249	179	476.7	476.7	0.5	600	15.5

Tablo 4. Lifin teknik özellikleri

Lif adı	Çap (µm)	Boy (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Erime derecesi (°C)	Polipropilene	İlgili standart
Sika ppm-12	32	12	0,91	160	%100	(EN 14889-2)

2.3 Numunelerin hazırlanması

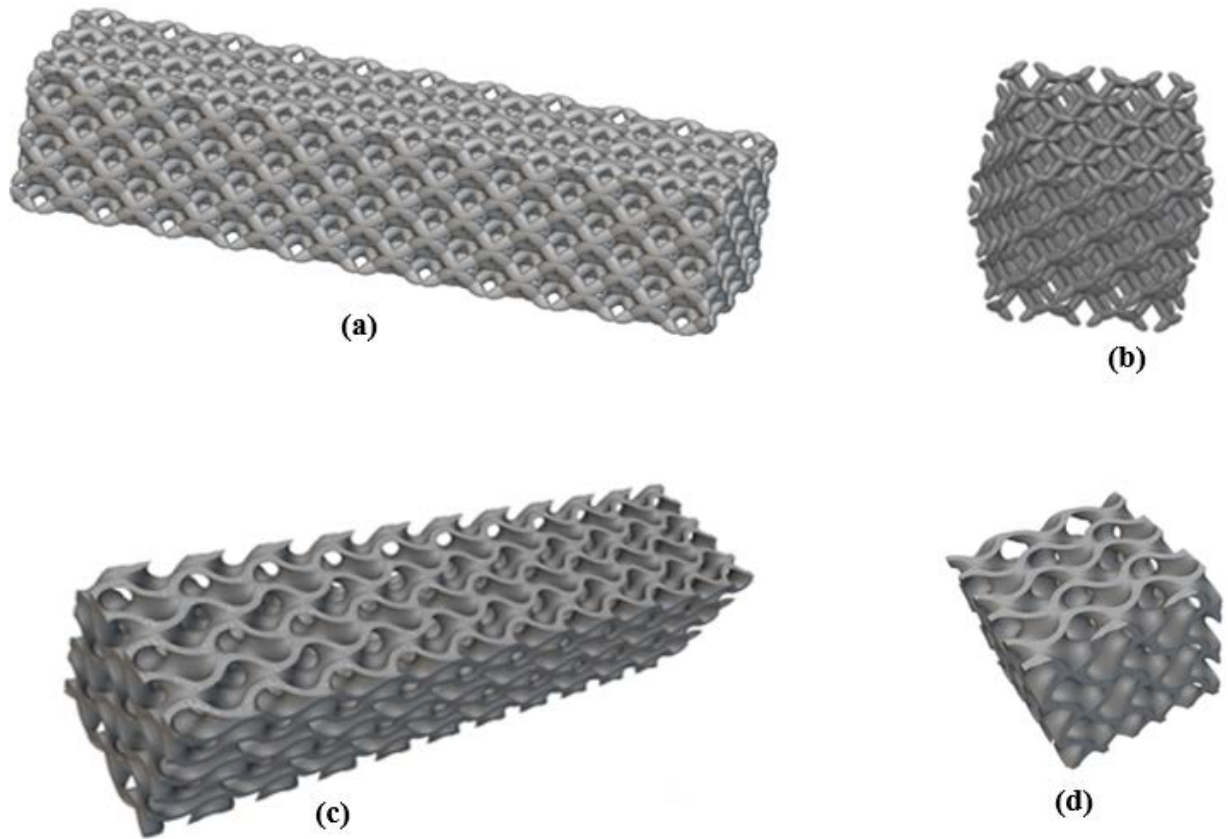
Bu çalışmada, Fluorite ve gyroid kafes model yapılarının kullanılması tercih edilmiştir. Fluorite kafes yapısı yüzey merkezli kübik kafes yapısını temsil eden benzersiz birbirini kesen köşe noktalardan oluşur. Bu yapı birbirinin içerisine geçen tekrarlayan üç boyutlu yapı modelleri arasındaki en iyi dayanım özellikleri gösteren modellerden birisi olduğu için çalışma kapsamında seçilmiştir. 45°'lik açılar ile düğüm noktalarını oluşturan uzay kafes sistemin bir örneğidir.

Diğer tercih edilen model ise Gyroid'tir. Gyroid kafes yapısı organiktir. Gyroid kafes yapısı hafiflik, dayanıklılık ve yüksek yüzey alanı gerektiren uygulamalarda özellikle 3D baskıda kullanılır. Hem en yüksek hacim yapısı ile hacmi doldururken hem de en boşluklu yapısı ile doluluk oranını azaltmaktadır. Birbirini tekrar eden köşesiz yapısı betonun dayanımına, maksimum dayanım hedefine büyük katkıyı sağlayacağı öngörülmüştür [43-44]. Üretilen kafes yapıların basınç ve eğilme testlerinde kullanılacak örneklerin geometrik özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Kafes yapıların geometrik özellikleri

Örnekler	Hücresel Kafes Boyu (mm ³)	Kalınlık (mm)	Kafes Beton Küp Kalıp Boyutları (mm ³)	Takviyeli	Birim Hücre Kafes Sayısı	Kapladığı Hacim Oranı
Gyroid Küp Basma Testi	67x67x67	4	70x70x70		5x5x5	%27.0
Fluorite Küp Basma Testi	67x67x67	4	70x70x70		5x5x5	%22.7
Gyroid Kiriş Eğme	67x67x267	4	70x70x270		5x5x21	%28.0
Fluorite Kiriş Eğme	67x67x267	4	70x70x270		5x5x21	%24.7

Şekil 1'de gösterildiği gibi, küp ve kiriş şeklindeki kafesler 3D yazıcı ile üretilmiştir. Ayrıca Şekil 1 (a-d) de üretilen numunelerin modelleri verilmiştir.



Şekil 1. Kafes takviyeli beton küp ve kiriş modelleri (a) Fluorite kiriş (b) Fluorite küp (c) Gyroid kiriş (d) Gyroid küp

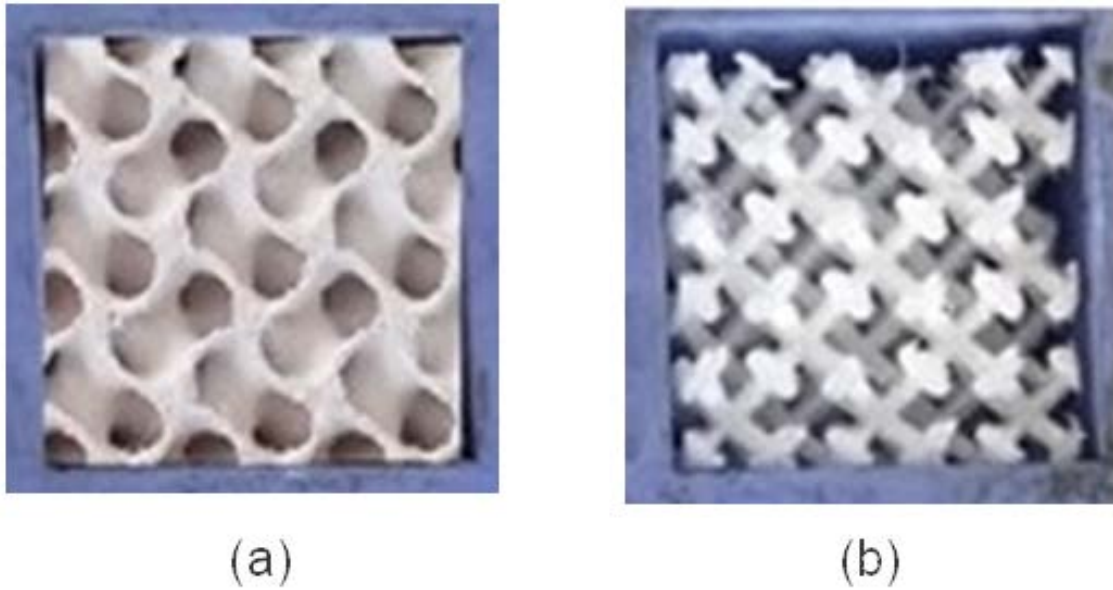
3D yazıcı ile basılan kafes modeller, hazırlanan kalıplar içerisine yerleştirilmiş ve kalıplar çimento esaslı harç ile doldurulmuştur.

2.4. Basınç dayanımı

Üretimi yapılan modeller için çimento esaslı harç seçilmiştir. Modeller laboratuvar ortamında hazırlanan kalıpların içerisine şekil 2’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Çimento esaslı harçlar hazırlanan kalıplara yerleştirildikten sonra 1 gün kalıp içerisinde bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılarak 28 gün boyunca 20 ± 2 °C kür havuzlarında bekletilmiştir. 28. Günün sonunda kür havuzundan çıkarılan numuneler TS EN 12390-3 standardına göre $0,6 \pm 0,2$ MPa/s yükleme hızı uygulanarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuş ve denklem 1 ile basınç dayanımları hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

Denklemden: (f_c : Basınç dayanımı (MPa); F : Kırılma anında uygulanan maksimum kuvvet (N); A_c : Numunenin kesit alanını (mm²)) göstermektedir.



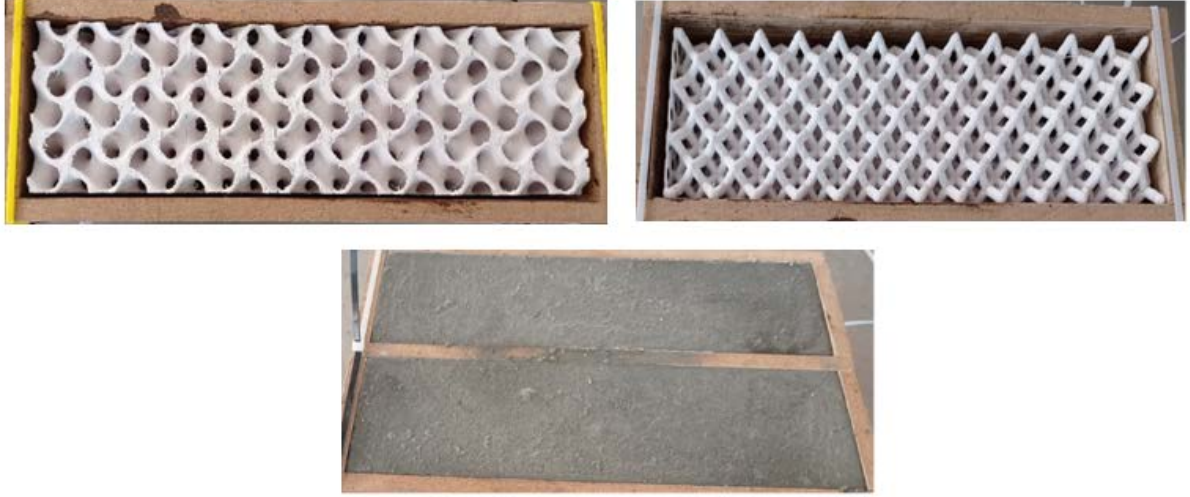
Şekil 2. Kafeslerin kalıplara yerleştirilmesi (a) Gyroid,(b) Fluorite

2.5. Eğilme dayanımı

Çimento esaslı harcın eğilme dayanımını belirlemek için yapılan testler genellikle "iki noktadan yükleme testi" veya "orta noktadan yükleme testi" olarak bilinir. Eğilme deneyi için hazırlanan kafes modeller laboratuvar ortamında hazırlanan kalıpların içerisine şekil 3’te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler TS EN 12390-5’e göre orta noktadan yük uygulama yöntemi ile teste tabi tutulmuştur. Numunenin kırılma anındaki yük değeri kaydedilerek eğilme dayanımı denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{ct} = \frac{3FL}{2d_1 d_2^2} \quad (2)$$

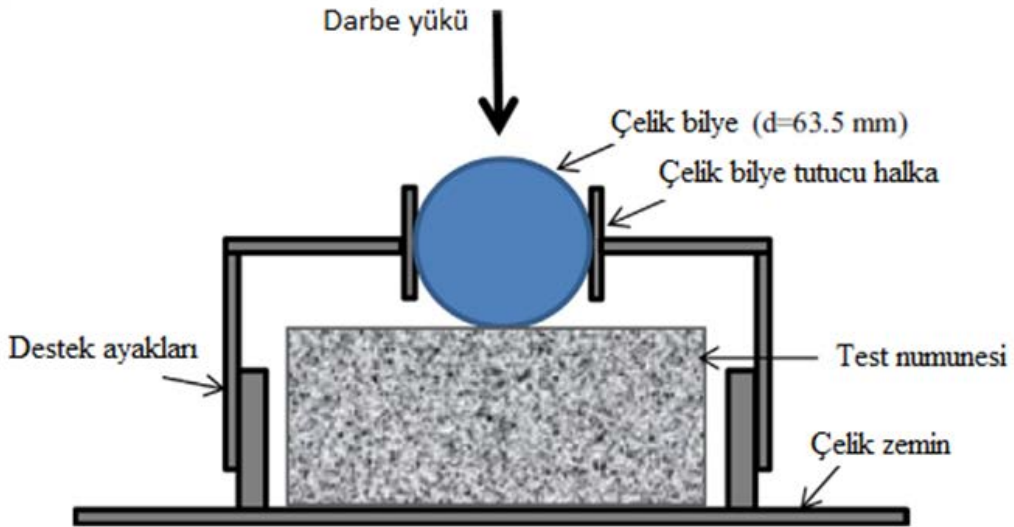
Bu denklemde; f_{ct} =eğilme dayanımını (MPa), F= En büyük yük (N), L= Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm), d_1 ve d_2 ise deney numunesinin enkesit boyutlarını(mm) göstermektedir.



Şekil 3. Gyroid (G) ve Fluorite (F) kafeslerin kalıp içerisindeki görüntüsü

2.6. Darbe dayanımı

Betonun darbe dayanımı, çeşitli laboratuvar testleri ile belirlenir. Bu testler, beton numunelerinin belirli bir yük altında ne kadar dayanıklı olduğunu ölçmeyi amaçlar. Bu çalışmada üretilen numunelerin darbe dayanımlarının belirlenebilmesi için ACI-544 standardına göre modifiye edilen çarpma test düzeneği kullanılmıştır [45]. Test düzeneği Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Darbe testi deney cihazı [47]

Darbe Test deney cihazının özellikleri; üst kısımda görülen kürenin ağırlığı (4,45 kg), test numunesine serbest düşüş ile darbe uygulayıp, numunenin darbe dayanımını ölçer. Ağırlık belirli bir yükseklikten (457 mm) serbest bırakılarak hazırlanan numuneye darbe uygulanır. Alt kısımda yer alan metalik küre, darbe uygulamak için kullanılır. Darbe uygulamak için kullanılan çelik topun çapı 63.5 mm'dir. Bu top, darbenin uygulandığı yüzeyin özelliklerine göre enerji transferini optimize eder. Yapılan çalışmada numunelerin darbe enerjisi değerleri denklem (3)'e göre hesaplanmıştır.

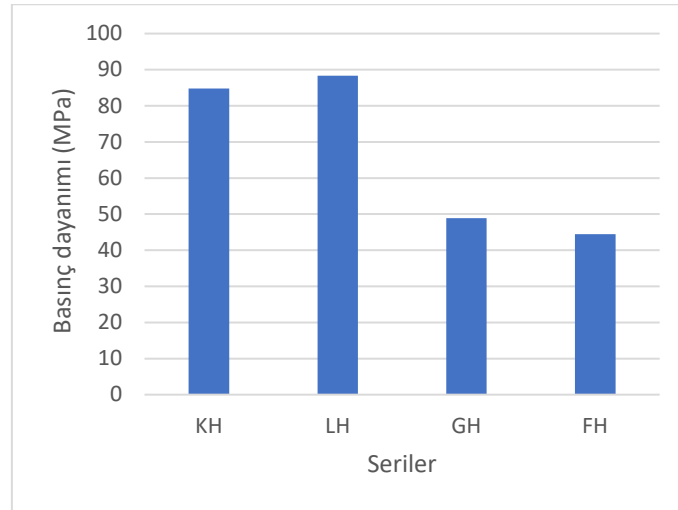
$$EI = N \times m \times g \times h \quad (3)$$

Denklemin (5) de EI = Darbe enerjisi (J), N vuruş sayısı, (m) düşen kütle, (g) yer çekimi ivmesi, (h) ise yükseklik olarak belirtilmiştir [45-49].

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.2. Basınç dayanım deneyi

Çimento esaslı harcın basınç dayanımı, yapı malzemesi olarak kullanılan betonun ezilme kuvvetine karşı gösterdiği direnci, betonun dayanıklılığı ve yapı güvenliği açısından en önemli mekanik özelliklerinden biridir. Çalışmada basınç dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 5'te görülmektedir.

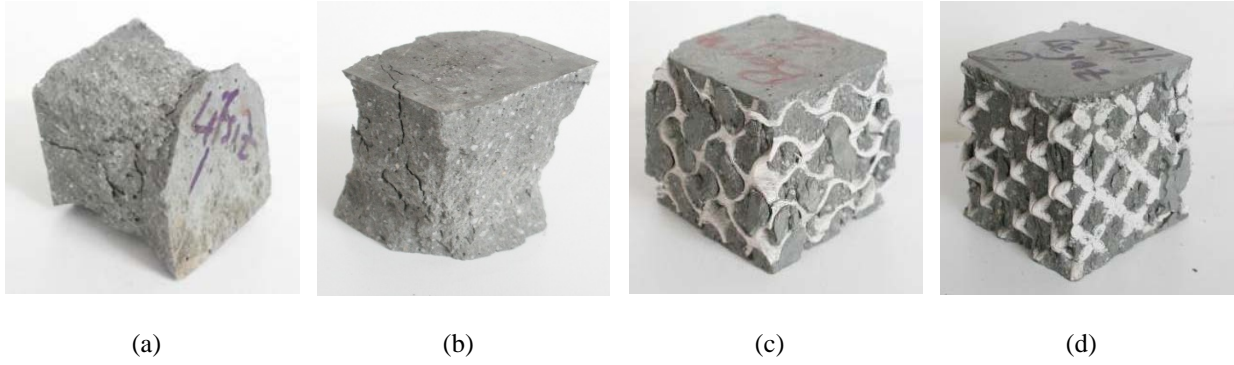


Şekil 5. Basınç dayanımı deney sonuçları grafiği

Şekil 5'ten de görüldüğü gibi çimento esaslı lifli harcın basınç dayanımı en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Xu ve diğerleri çalışmalarında, FDM kullanarak ABS'den üretilen petek kafeslerle takviye edilmiş ince panellerin, eğilme testlerinde süneklik ve çoklu çatlama olduğunu bulmuşlardır [20]. Diğer yandan çalışmamızda çimento esaslı lifli harcın, ilk çatlama dayanımını artırıcı etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Liflerin, çimento esaslı harçların deformasyon kapasitesini artırarak çatlak ilerlemesini yavaşlattığını ve betonun kısmi kırılmalar sonrasında bile yük taşıma kapasitesini koruduğu belirlenmiştir. Çimento esaslı lifli ve lifsiz harçlar, diğer kafes

yapıdaki betonlara göre çok daha yüksek dayanımına sahiptir. Bu, klasik betona eklenen liflerin ve lifsiz yapıların kafes yapıdaki betonlardan daha fazla basınç dayanımı sunduğunu göstermektedir. Basınç dayanımındaki bu azalma kafes yapıların daha yumuşak davranışına atfedilebilir. Kafes yapılar, çimento hamuru ile kafes yapı arasındaki daha zayıf bağ dayanımı veya daha düşük aderans nedeniyle çimento matrisinde boşluk görevi görebilir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi Gyroid kafes yapı çimento esaslı harçların basınç dayanımı, fluorite kafes yapı çimento esaslı harçların dayanımından yüksektir. Burada gyroid daha iyi bir başlangıç direnci ve ilave olarak, başlangıçta ve kırılmalar boyunca daha güçlü bir yapı sunmaktadır. Kafes yapılar arasında en düşük dayanım kaybını fluorite kafes yapılar göstermiştir. Sonuç olarak, farklı çimento esaslı harç tipleri arasında çimento esaslı lifli harç dayanım açısından en iyi performansı sergilemiştir. Basınç deneyine tabi tutulan numunelerin kırılma sonrası görüntüleri Resim 1'de verilmiştir.



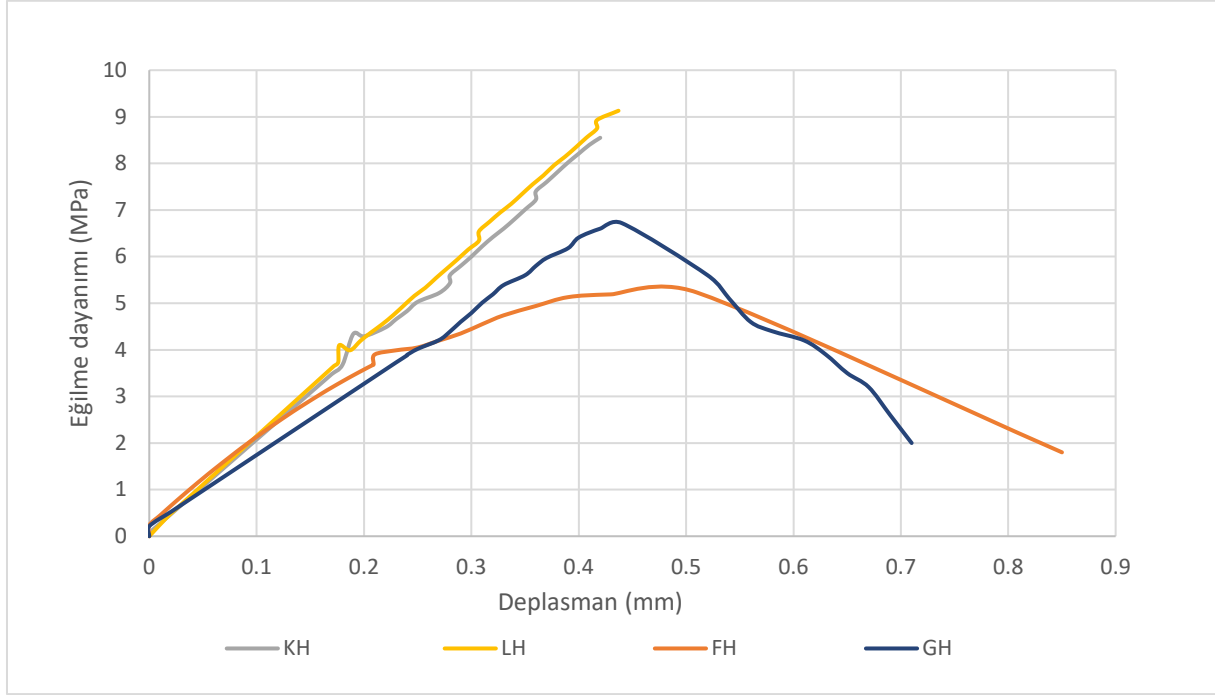
Resim 1. Beton numuneler kırılma sonrası (a) Kontrol harcı-KH, (b) Lifli Harc-LH, (c) Gyroid (G), (d) Fluorite (F)

Resim 1(c) ve (d) de görüldüğü gibi kafes yapıların kalıp içerisinde kapladığı belirli bir hacim vardır. Kaplanan hacimden dolayı Fluorite ve gyroid kafes yapı modellerinde numunelerin içerisinde bulunan çimento esaslı harç miktarı diğer numunelere göre daha azdır. Ancak bu kafes yapıların içerisinde çimento esaslı harcın hacmi daha az olsa da resim 1(c) ve (d) den de görüldüğü gibi numuneler dağılmamış ve hacim stabilitesini korumuştur. Diğer yandan, çimento esaslı lifsiz harç kırılma sonrasında aniden büyük çatlaklar oluşturarak kırılmıştır. Kırılma sonrasında Çimento esaslı lifsiz harçlar tamamen parçalara ayrılmış ya da numunelerde büyük bir çatlaklar oluşmuştur. Çimento esaslı lifsiz harçlarda, kırılma enerjisini absorbe etme kapasitesi düşük olduğu için yük altında çatlama aniden meydana gelmiş ve gevrek bir kırılma oluşmuştur. Şekil 1c ve d görüldüğü gibi gyroid ve fluorite kafes yapı çimento esaslı harçların basınç dayanımı sonrası parçalanması veya ani kırılması daha sünek olmuştur.

3.2. Eğilme deneyi

Kür işlemi yapılan numunelere orta noktadan yükleme testi uygulanmış ve eğilme deneyi testinin sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde grafik üzerinden tokluk değerleri Excel programı kullanılarak hesaplanmıştır. Eğri altında kalan alan hesaplandığında KH 1,79, LH 1,99 olarak bulunmuş olmasına rağmen; FH 3,01, GH ise 2,89 olarak hesaplanmıştır. Grafik üzerinden de anlaşılacağı gibi Gyroid ve Fluorite kafes yapılarla en yüksek tokluk ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç ile Xu ve Šavija'nın çalışmasına

benzer sonuçlar elde edilmiştir [20]. Çalışmadaki deneyin sonucunda kaynak [4-8] deki çalışmalardaki gibi tokluk, süneklik, çatlak dayanımı ve enerji emiliminin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Literatürde bu çalışmadan farklı olarak Salazar ve diğerleri çalışmalarında üç boyutlu oktet kafesle takviye edilmiş çimentolu malzemelerini kullanmışlardır. Çalışmadan elde edilen bulgularla bu çalışmanın bulguları karşılaştırıldığında, yüksek işlenebilirliğe sahip bir harç kullanıldığında süneklikte artış elde edilmiştir [16].



Şekil 6: Eğilme deneyi sonuçları grafiği

3.2. Darbe enerjisi deneyi

Çimento esaslı harç serilerinin darbe direnci performansları tablo 6'da verilmiştir. İlk görünür çatlakla sonuçlanan darbe sayısı (N1) ve nihai darbe sayısı (N2) olarak gösterilmiştir.

Tablo 6. Darbe testi sonuçları tablosu


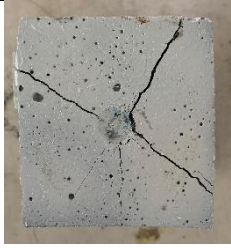






Seriler	Vuruş sayısı		Darbe enerjisi (kN mm)	
	İlk çatlak (N1)	Nihai vuruş (N2)	İlk çatlak (W1)	Nihai enerji (W2)
KH	1	2	19,95	39,90
LH	1	3	19,95	59,85
GH	1	30	19,95	598,50
FH	1	23	19,95	458,85

Kontrol numunesinin ilk vuruş ile son vuruş arasındaki enerji değişimi 19.95 iken Gyroid kafes yapılı çimento esaslı harç numuneler 598,50 ile en yüksek enerji performansını göstermiştir. Düşük performans gösteren Fluorite

kafes yapılı çimento esaslı harçlı numunenin 458,85 ile enerji artışı göstermesi kafes yapının olumlu etkisini göstermektedir.

Darbe deneyine ait görseller Tablo 7’de verilmiştir. Çimento esaslı kontrol harcı ve lifli harcın darbe etkisiyle ani bir kırılma gösterdiği görülmektedir. Gyroid ve fluorite kafes yapılı çimento esaslı harçların ise darbe etkisiyle dağılmadığı ve kendi geometrik şeklini koruduğu görülmektedir. Bu, betonun darbe dayanımı veya sismik dayanım gibi zorlayıcı koşullarda daha dayanıklı olmasına katkı sağlamaktadır.

Tablo 7. Darbe deneyi görselleri

	Kontrol Harcı (KH)	Lifli Harç (LH)	Gyroid (GH)	Fluorite (FH)
İlk vuruş				
Nihai vuruş				
Son vuruş sayısı	2	3	30	23

IV. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, çimento esaslı kontrol harcı (KH), lifli harç (LH), Gyroid harç (GH) ve Flourite harç (FH) numuneler üzerinde basınç, üç nokta eğilme ve darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, çimento esaslı lifli harcın (LH) en yüksek basınç dayanımını verdiği, ancak kafes takviyeli çimento esaslı harçların daha yüksek enerji yutma kapasitesine ve darbe dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bu da yeni nesil inşaat projelerinde sünekliği ve enerji emme kapasitesi yüksek bileşenlerin kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır. Numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına göre en yüksek dayanımı sırasıyla çimento esaslı lifli ve çimento esaslı kontrol harçları (KH) göstermiştir. Çimento esaslı lifli harç ve çimento esaslı kontrol harcında kırılma gevrek oluşmuşken kafes yapılı betonlarda daha sünek kırılma meydana geldiği görülmüştür. Eğilme deneyi sonuçlarına göre kafes yapılı çimento esaslı harçların tokluk değeri daha yüksek çıkmıştır. Gyroid ve fluorite kafes yapılı çimento esaslı harçların basınç ve darbe etkisiyle dağılmadığı ve kendi geometrik şekillerini koruduğu görülmüştür. Gyroid ve fluorite kafes yapılar betonun darbe, çarpma, deprem gibi zorlayıcı koşullarda daha dayanıklı olmasına katkı sağlamaktadır. Darbe testi sonuçlarına göre gyroid yapısı diğer numunelere göre daha fazla enerji potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Deneylerin daha çok numune ve kafes yapısı ile test edilmesi gelecek çalışmalarda incelenmesi önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi BAP FDK-2022-8071 kodlu “üç boyutlu farklı polimer kafes yapılı çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özelliklerinin araştırılması” başlıklı doktora projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Teng L, Zhang R, Khayat KH (2022) Tension-stiffening effect consideration for modeling deflection of cracked reinforced uhpc beams. *Sustainability* 14(1):415. <https://doi.org/10.3390/su14010415>
2. Salahaddin SD, Haido JH, Wardeh G (2022) The behavior of UHPC containing recycled glass waste in place of cementitious materials: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials* 17:e01494. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01494>
3. Kilany RM, Sharobim K, Husseien N (2014) Mechanical properties of UHPC with hybrid fibers. *Port-said Engineering Research Journal* 18(1):106-113. <https://doi.org/10.21608/pserj.2014.46805>
4. Hematibahar M, Hasanzadeh A et al (2023) Influence of 3D-printed reinforcement on the mechanical and fracture characteristics of ultra high performance concrete. *Result in Engineering* 19:101365, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101365>
5. İsa MN, Pilakoutas K, Guadagnini M (2021) Determination of tensile characteristics and design of eco-efficient UHPC. *Structures* 32:2174-2194. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.114>
6. Medicis C, Gonzalez S, Alvarado YA et al (2022) Mechanical performance of commercially available premix uhpc-based 3d printable concrete. *Materials* 15:6326. <https://doi.org/10.3390/ma15186326>
7. Nasrin S, İbrahim A (2021) Flexural response of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) hybrid bridge deck connections made with local materials. *Construction and Building Materials* 270:121451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121451>
8. Thomas RJ, Sorensen AD (2020) Review of strain rate effects for UHPC in tension. *Construction and Building Materials* 153:846-856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.168>
9. Bolander JE, Choi S (2008) Fracture of fiber-reinforced cement composites: effects of fiber dispersion. *International Journal of Fracture* 154: 73–86. <https://doi.org/10.1007/s10704-008-9269-4>
10. Stähli P, Custer R, Van Mier JGM (2008) On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. *Materials and Structures* 41:189–196. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9229-x>
11. Abrishambaf A, Barros JAO, Cunha VMCF (2013) Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. *Cement and Concrete Research* 51:57–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.009>
12. Sarmiento EV, Geiker MR, Kanstad T (2016) Influence of fibre distribution and orientation on the flexural behaviour of beams cast from flowable hybrid polymer-steel FRC. *Construction and Building Materials* 109:166–176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.005>
13. Zhou B, Uchida Y (2017) Relationship between fiber orientation/distribution and post-cracking behaviour in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Composites* 83:66–75. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.007>
14. Stähli P, Van Mier JGM (2007) Manufacturing, fibre anisotropy and fracture of hybrid fibre concrete. *Engineering Fracture Mechanics* 74:223–242. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.01.028>
15. Švec O, Žirgulis G, Bolander JE, Stang H (2014) Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements. *Cement and Concrete Composites* 50:60–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.002>
16. Salazar B, Williams I, Aghdasi P, Ostertag C, Taylor H (2018) International congress on polymers in concrete (ICPIC 2018). *International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018)*:261–266. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78175-4_32
17. Farina I, Fabbrocino F, Carpentieri G, Modano M, Amendola A, Goodall R et al (2016) On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers. *Composites Part B: Engineering* 90:76–85. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.006>
18. Nam YJ, Hwang YK, Park JW, Lim YM (2019) Feasibility study to control fiber distribution for enhancement of composite properties via three-dimensional printing. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 26:465–469. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1432809>
19. Rosewitz JA, Choshali HA, Rahbar N (2019) Bioinspired design of architected cementpolymer composites. *Cement Concrete Composites* 96:252–265. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.010>
20. Xu Y, Šavija B (2019) Development of strain hardening cementitious composite (SHCC) reinforced with 3D printed polymeric reinforcement: mechanical properties. *Composites Part B: Engineering* 174. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107011>

21. Hao W, Liu J, Kanwal H (2022) Compressive properties of cementitious composites reinforced by 3D printed PA 6 lattice. *Polymer Testing* 117:107811. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107811>
22. Liu J, Kanwal H, Tang C, Hao W (2022) Study on flexural properties of 3D printed lattice-reinforced concrete structures using acoustic emission and digital image correlation. *Construction and Building Materials* 333:127418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127418>
23. Qin S, Cao S, Yılmaz E, Li J (2021) Influence of types and shapes of 3D printed polymeric lattice on ductility performance of cementitious backfill composites. *Construction and Building Materials* 307:124973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124973>
24. Salazar B, Aghdasi P, Williams ID et al (2020) Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete. *Materials and Design* 196:109184. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109184>
25. Son J, Cao M, Cai L et al (2021) 3D printed polymeric formwork for lattice cementitious composites. *Journal of Building Engineering* 43:103074. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103074>
26. Li J, Cao S, Song W (2023) Flexural behavior of cementitious backfill composites reinforced by various 3D printed polymeric lattices. *Composite Structures* 323:117489. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117489>
27. Xie B, Li X, Zhao X, Hu N (2023) Tunable properties and responses of architected lattice-reinforced cementitious composite components induced by versatile cell topology and distributions. *Composite Structures* 312:116850. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116850>
28. Chen M, Chen Z, Xuan Y et al (2023) Static and dynamic compressive behaviour of 3D printed auxetic lattice reinforced ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites* 139:105046. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105046>
29. Choudhry NK, Nguyen TK, Nguyen-Van V et al (2024) Auxetic lattice reinforcement for tailored mechanical properties in cementitious composite: Experiments and modelling. *Construction and Building Materials* 438:137252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137252>
30. Tang C, Liu J, Hao W, Wei Y (2023) Flexural properties of 3D printed graded lattice reinforced cementitious composites using digital image correlation. *Materials and Design* 227:111734. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111734>
31. Suzuki J, Seki M, Matsushita Y (2000) The tricontinuous double-gyroid structure from a three-component polymer system. *The Journal of Chemical Physics* 112: 4862–4868. <https://doi.org/10.1063/1.481089>
32. Abueidda DW, Elhebeary M et al (2019) Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study. *Materials and Design* 165:107597. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107597>
33. Nguyen TK, Suhaizan MS et al (2023) Mechanical responses of buoyant bio-inspired foamed concrete structures. *Construction and Building Materials* 391:131731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131731>
34. Li D, Liao W, Dai N, Xie YM (2019) Comparison of mechanical properties and energy absorption of sheet-based and strut-based gyroid cellular structures with graded densities. *Materials* 12(13): 2183. <https://doi.org/10.3390/ma12132183>
35. Peng C, Tran P (2020) Bioinspired functionally graded gyroid sandwich panel subjected to impulsive loadings. *Composites Part B: Engineering* 188:107773. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107773>
36. Higuera S, Miralbes R, Ranz D (2022) Mechanical properties and energy-absorption capabilities of thermoplastic sheet gyroid structures. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 29(25). <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1919803>
37. Yang L, Mertens R et al (2019) Continuous graded gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: design, manufacturing and mechanical properties. *Materials and Design* 162:394-404. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.12.007>
38. Yang E, Leary M et al (2019) Effect of geometry on the mechanical properties of Ti-6Al-4V Gyroid structures fabricated via SLM: A numerical study. *Materials and Design* 184:108165. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108165>
39. Skoratko A, Szatkiewicz T, Katzer J, Jagoda M (2022) Mechanical properties of mortar beams reinforced by gyroid 3D printed plastic spatial elements. *Cement and Concrete Composites* 134:104809. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104809>
40. Samykano M, Selvamani SK et al (2019) Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102:2779–2796. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03313-0>
41. Abbott AC, Tandon GP et al (2018) Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication. *Additive Manufacturing* 19:29-38. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.002>
42. Dul S, Fambri L, Pegoretti A (2018) Filaments production and fused deposition modelling of abs/carbon nanotubes composites. *Nanomaterials* 8(1):49. <https://doi.org/10.3390/nano8010049>

43. Schwarz HA (1890) *Gesammelte Mathematische Abhandlungen*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50665-9>
44. Gür Y (2024) Deformation behaviour and energy absorption of 3d printed polymeric gyroid structures. *Tehnički vjesnik* 31(5). <https://doi.org/10.17559/TV-20231224001230>
45. American Concrete Institute (ACI) (1999) *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*. ACI 544.2R-89. Farmington Hills, MI: ACI.
46. Khalil E, Abd-Elmohsen M, Anwar AM (2015) Impact resistance of rubberized self-compacting concrete. *Water Science* 29:45-53. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2014.12.002>
47. Ismail MK, Hassan AAA, Lachemi M (2018) Performance of self-consolidating engineered cementitious composite under drop-weight impact loading. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002619](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002619)
48. Abid SR, Abdul-Hussein ML et al (2020) Repeated drop-weight impact tests on self-compacting concrete reinforced with micro-steel fiber. *Heliyon* 6:e03198. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03198>
49. Abid SR, Abdul-Hussein ML et al (2020) Suggested modified testing techniques to the ACI 544-R repeated drop-weight impact test. *Construction and Building Materials* 244:118321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118321>



Farklı yöntemlerle üretilen az tuzlu doğal Gemlik siyah zeytinlerin muhafazası sırasında meyve renginde meydana gelen değişimler

Şahnur Irmak^a, Semih Ötleş^{a,*}

^aBornova Zeytincilik Araştırma Enstitüsü, Üniversite Caddesi No 43, Bornova, İzmir, 35100, Türkiye.

^bEge Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Bornova, İzmir, 35100, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 13 Mayıs 2024

Düzeltilme 3 Eylül 2024

Kabul 19 Aralık 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Doğal siyah zeytin

Zeytin muhafazası

Meyve renk değişimi

Sertlik

ÖZET

Son yıllarda sağlığa olan önemli katkıları nedeniyle zeytin ürünlerine oldukça ilgi artmıştır. Ülkemizde daha çok tüketilen doğal sofralık siyah zeytinin tüketiciye doğal ve koruyucusuz olarak ulaşmasını sağlayabilmek için bu proje tasarlanmıştır. Aynı zamanda az tuzlu olarak üretilen doğal sofralık siyah zeytinlerin daha uzun süre raflarda sağlıklı bir şekilde bulunabilmesi için çalışılmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmada, fermantasyon süresince ve depolama sırasında zeytinlerde meydana gelen bazı fizikokimyasal değişimler değerlendirilmiştir. İşleme tekniklerinin L^* , a^* , b^* ve sertlik değerleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak işleme teknikleriyle beraber tuz miktarı, ambalaj tipi, ışın uygulaması ve depolamanın birlikte sofralık siyah zeytinlerin Sertlik, L^* , a^* ve b^* değerleri üzerinde etkilerinin $p<0,05$ düzeyinde önemli olduğu çalışmamızda tespit edilmiştir.

Changes in fruit color during storage of low-salt natural Gemlik black olives produced by different methods

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 May 2024

Received in revised form 3 Sept 2024

Accepted 19 Dec 2024

Available online

Keywords:

Natural black table olive,

Olive storage,

Fruit color change,

Hardness

ABSTRACT

In recent years, interest in olive products has increased due to their important contributions to health. This project was designed to ensure that natural table black olives, which are consumed more in our country, reach the consumer naturally and without preservatives. Additionally, efforts have been made to ensure that natural table black olives, produced with low salt, can be found on the shelves in a healthier way for a longer period of time. In the study conducted for this purpose, some physicochemical changes occurring in olives during fermentation and storage were evaluated. It has been observed that processing techniques have a significant impact on L^* , a^* , b^* and hardness values. Overall, it was determined in our study that the salt content, packaging type, irradiation application, and storage, in conjunction with processing techniques, have significant effects on the hardness, L , a , and b values of table black olives at a $p<0.05$ level.

I. GİRİŞ

Zeytin, tarım sektörümüzde büyük bir yer kaplar ve hem tarım alanlarının genişliği hem de üretim değeri açısından önemlidir [1]. Son yıllarda, zeytin ve zeytinyağının sağlık faydaları daha iyi anlaşılmış ve dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de zeytin ve zeytinyağı talebinde artışa neden olmuştur [2]. Bu nedenle, zeytin fidanlarının dikimi ülkemizin dört bir yanında yoğunlaşmış ve zeytin yetiştiriciliği alanında hızlı bir büyüme yaşanmaktadır.

Özellikle, son yıllarda dikilen zeytin fidanlarının çoğu Gemlik çeşididir ve bu çeşidin kullanımı büyük oranda artmıştır [3].

Ülkemizdeki zeytin ağacı varlığı UZZK tarafından 2023-2024 sezonunda yapılan rekolte çalışmasına göre, yaklaşık 195 milyon olduğu belirtilmektedir. 2023-2024 sezonunda 1.352.000 ton zeytin hasadı beklenmektedir. Bu zeytin varlığının 913 bin tonu zeytinyağı, 440 bin tonu ise sofralık zeytin üretiminde değerlendirileceği tahmin edilmektedir. %20*25 'inin yeşil, %75-80 'inin ise siyah sofralık üretime gideceği tahmin edilmektedir [4].

Gemlik tipi zeytinler genellikle sofralık olarak kullanılır ve üretimi geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilir. Bu yöntemler arasında salamura, sele, yuvarlama ve teneke tipi işleme teknikleri bulunur. Bu işlemlerde kullanılan siyah zeytinler yüksek tuz içeriğiyle işlenir ve bu sayede muhafaza edilir. Örneğin, salamura siyah zeytinler, geleneksel üretim yöntemine uygun olarak tuzla baskı altına alınır ve ardından belirli oranlarda tuzlu salamuralarda saklanır. Yuvarlama yöntemiyle üretilen doğal siyah zeytinler ise kendi suyunda %8 tuz içinde çevrilerek acılığını kaybeder ve muhafaza edilir. Sonuç olarak, bu işlemler sonucunda elde edilen siyah zeytinler yüksek tuz içeriğiyle bilinir.

Sofralık zeytinler, besinsel açıdan son derece zengin ve çeşitlilik gösteren bir gıda maddesidir. Zeytinin şekli ve rengi çeşidine göre değişiklik gösterirken, besin değeri oldukça yüksektir [5, 6]. Ürünün kalitesi, hammadde kalitesi, kullanılan işleme teknolojisi, içerdiği besin maddeleri ve duyu özellikler gibi çeşitli faktörler tarafından belirlenir. Bu faktörlerin kombinasyonu, zeytinin son kalitesini ve besin değerini belirler [7, 8].

Zeytin meyvesindeki en önemli çözünebilir bileşikler arasında şekerler bulunur ve metabolik süreçler için gerekli olan enerjinin sağlanmasında kritik bir rol oynarlar. Olgunlaşma ve fermantasyon süreçleri sırasında zeytin meyvesinde şekerlerde çeşitli dönüşümler meydana gelir. Ayrıca, meyvenin dokusal yapısına bağlı olarak, şekerler hücre duvarının temel bileşenlerinden birini oluştururlar [9].

Modifiye atmosfer paketleme (MAP) tekniği, Avrupa'da eski zamanlardan beri bilinen ancak ticari olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde 1940'larda başlayan ve günümüzde hızla yayılan bir koruma yöntemidir. Ülkemizde ise özellikle 2000'li yıllardan itibaren kullanımı hızla artmıştır [10]. MAP, ürünleri soğuk ortamda muhafaza etmekten daha uzun süre ve daha kaliteli bir şekilde saklayarak raf ömrünü uzatır. Aynı zamanda, su kaybını da önler [10]. Vakum paketleme bir tür pasif modifiye atmosfer yöntemidir. Bu işlemde paket içerisindeki hava vakumla boşaltılır ve kapatılır. Bu yöntem genellikle et ürünlerinin muhafazasında kullanılmaktadır. Son yıllarda pek çok ürün için vakum paketleme oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Vakum paketlemede vakum içerisinde çok az da olsa bir miktar oksijen kalır. Ancak paket kalan düşük orandaki oksijen kısa sürede aerobik ve mikroaerofilik mikroorganizmalarca kullanılır ve karbondioksit üretilir [11, 12].

MAP'in temel amacı, ürünü saran atmosferin bileşimini değiştirmek, özellikle ortamdaki oksijen miktarını azaltmak ve böylece baskın mikrofloranın metabolizmasını yavaşlatmak, ürünün solunum hızını düşürmek, enzimatik ve oksidatif bozulma reaksiyonlarını azaltmak ve/veya mikrobiyolojik bozulmaları geciktirmektir [13].

Sofralık zeytinlerin ticari işlem ve muhafazası sürecinde, tüketici güvenliğini ve ürün kalitesini sağlamak için belirli standartlar ve sınırlar bulunmaktadır. Bu standartlar, pH değeri, serbest asitlik ve tuz konsantrasyonu gibi faktörlerdir ve bu değerler, ticari işleme ve muhafaza sürecinde uyulması gereken limitleri belirler [14, 15].

Gıda ışınlama teknolojisi, dünya genelinde gelişmiş ve gelişmekte olan pek çok ülkede gıda korunması ve kalitesinin artırılması için geleneksel yöntemlere alternatif olarak benimsenmiştir. Bu yöntem, ısı pastörizasyonu,

konserve ve dondurma gibi fiziksel gıda işleme yöntemlerine benzer. Işınlama, gıdaların raf ömrünü uzatma, mikrobiyal yükü azaltma, üreme önleme ve mikroorganizma faaliyetlerini durdurma gibi önemli işlevleri yerine getirir [16, 17].

2011 yılında Sağlık Bakanlığı tarafından hazırlanan "Türkiye Aşırı Tuz Tüketiminin Azaltılması Programı", dünyadaki en önemli halk sağlığı sorunlarından biri olan kronik hastalıkların ülkemizdeki artan ölüm oranlarının ana nedeni olduğunu vurgulamaktadır. Bu program, birçok kronik hastalığın temelinde yer alan aşırı tuz tüketiminin, değiştirilebilir bir sağlıksız beslenme alışkanlığı olduğunu belirtmektedir [18].

Hipertansiyon, dünyada önlenebilir ölüm nedenleri arasında birinci sıraya yerleşmiş önemli bir risk faktörüdür ve aşırı tuz tüketimi bu hastalığın oluşumunda belirleyici bir etkidir. Yapılan araştırmalar, ülkemizde tuz tüketiminin Dünya Sağlık Örgütü'nün önerdiği değerin yaklaşık üç katı olduğunu göstermektedir. Bu fazla tuz alımı, yüksek kan basıncına yol açar ve bu da kalp hastalıklarının ve ölümlerinin önde gelen nedenlerinden biridir. Ayrıca, aşırı tuz tüketimi sadece yüksek kan basıncıyla ilişkili değildir; günümüzde önemli sağlık sorunları haline gelen mide kanseri, osteoporoz ve böbrek hastalıklarının gelişimiyle de yakından ilişkilidir [18].

Dünya Sağlık Örgütü'nün araştırmasına göre, Türkiye'de kişi başına günlük 18 gram tuz tüketildiği belirlenmiştir ve bu miktarın 5 gram seviyesine düşürülmesi önerilmektedir. Ülkemizde sofralık zeytin üretiminin %80'i siyah sofralık zeytinlerden oluşmaktadır ve tüketicilerin genellikle siyah zeytinleri tercih etmesi, bu projenin oluşumunda etkili olmuştur [18].

Bu proje kapsamında, az tuzlu doğal siyah zeytinlerin pazarda kalitesini kaybetmeden daha uzun süre dayanabilmesi için zeytinlerin muhafazasında tuz miktarı (%2-4), ambalaj şekli (vakum ve modifiye atmosfer - %60 N ve %40 CO₂), ve soğuk pastörizasyon tekniği olan ışınlama (1,3,5 kGy) gibi uygulamalar test edilmiş ve uygun yöntemler belirlenmeye çalışılmıştır.

II. DENEYSEL METOT / TEORİK METOD

II. Deneysel Metot

2.1 Malzemeler ve Hazırlama Teknikleri

Zeytincilik Araştırma İstasyonu Bornova yerleşkesi ve Kemalpaşa yetiştirme sahasında bulunan Gemlik çeşidi zeytin ağaçlarından elde edilen siyah zeytinler araştırmada materyal olarak ele alınmıştır. Kasım ve Aralık aylarında denemeler için gerekli olan siyah zeytinler, genel olarak 5 olgunluk indeksinde (Oİ), ayrılan zeytin ağaçlarından rastgele ve ağaçların her yerinden olacak şekilde elle hasat edilmiştir. Hasat edilen zeytinler 25 kg'lık plastik kasalarda Zeytincilik Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü işleme tesislerine getirilmiştir.

2.1.1 Ambalaj

Fermentasyonu biten ürünlerin ambalajlaması Tablo 1'de belirtilen özellikleri taşıyan paketlerle yapılmıştır. Modifiye Atmosfer Paketleme için azot (%60) + karbondioksit (%40) karışımı kullanılmıştır.

Tablo 1. Ambalaj maddesinin özellikleri

Ürün adı	İncelik μ	O ₂ - Geçirgenliği cc/24h/m ² /atm	N ₂ - Geçirgenliği cc/24h/m ² /atm	Su buharı geçirgenliği g/24h/m ²
OPA+PE Vakum paket	90±3	30	130	100

2.2 Metot

Zeytincilik Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü işleme tesislerine getirilen zeytinler boylama makinesinde büyüklüklerine göre boylanmış ardından seçme bandında seçme işlemine tabi tutularak yaralı, bereli ve böcek hasarlı daneler ayrılmıştır. Ayrıca aynı olgunluk indeksinde zeytinler işlemeye alınacağı için yeşil ve pembe renkli zeytinler ayıklanmıştır. Dane üzerinde bulunan yabancı maddelerin uzaklaştırılması için tazyikli içilebilir nitelikte su ile ön yıkama işlemi yapılmıştır.

2.2.1 Gemlik salamura siyah zeytin işleme yöntemi

Yıkama işlemi biten zeytinler ayrı ayrı gıda işlemeye uygun fiberglas tanklara alınmıştır, içine havalandırma aparatları yerleştirilmiştir. Tuz ile zeytin katlanarak doldurulmuştur. İşlemede zeytin ağırlığının %2 ve %4 'ünü geçmeyecek kadar tuz kullanılmıştır. Zeytinlerin salamura yüzeyine çıkmasını engellemek için tankların üzeri kapakla kapatılmıştır. Zeytin ağırlığının %20-25 'i kadar ağırlık baskı amacıyla kullanılmıştır. İki gün baskı altında tutulan zeytinler, içilebilir nitelikte su ilave edildikten sonra sirkülasyon pompası vasıtasıyla tuz ve salamuranın iyice karışması amacıyla sirkülasyon yapılmıştır. Zeytinler ortam sıcaklığında, salamurada fermantasyona bırakılmıştır. Tuz konsantrasyonu fermantasyon süresince %2 ve %4 'te sabit tutulmuştur. İşleme süresince salamurada 15 günde bir pH, asitlik ve tuz kontrolleri yapılmış, yüzeyde gelişen oksidatif maya ve küfler temizlenmiştir. Fermantasyon süresince zeytinlere günde 2 saat blower (sıcak hava fanı) vasıtasıyla hava verilerek aerobik fermentasyonun gelişmesi sağlanmıştır [19].

2.2.2 Gemlik çevirme siyah zeytin işleme yöntemi

Zeytinler uygun olgunluk indeksinde (5,3 Oİ) hasat edilmiş ve yıkanmıştır. Zeytinler fermantasyon için gıda işlemeye uygun plastik bidonlara aktarılmış ve üzerine %6 tuz ilave edilmiştir. Kapların kapakları hava almayacak şekilde sıkıca kapatıldıktan sonra fermantasyonun sağlanması için zeytin kapları iki günde bir çevrilmiştir. Zeytinler fermantasyon sonuna kadar kendi suyunda bekletilmiştir [19].

2.2.3 Zeytinlerin ambalajlanması

Zeytinlerin fermantasyonu sağlandıktan sonra vakum ve MAP ambalajlama ile paketlenmiş ve ışın uygulanmasına geçilmiştir.

2.2.4 Zeytinlere Gama Işını uygulanması

Gamma ışınlaması, Tekirdağ Çerkezköy'deki Gamma-Pak Sterilizasyon Şirketi'nde otomatik bir Tote Box Işınlama (JS 9600, IR-185, Kanada) ile gerçekleştirildi. Sofralık zeytin paketleri alüminyum-çelik ışınlama

kutularına konuldu ve otomatik bir konveyörle ışınlama odalarına aktarıldı. Işınlama odalarında zeytinler, 101 Petabecquerel'e (PBq) kadar yükleme kapasitesine sahip metalik formdaki çift kapsüllü Kobalt-60 radyoaktif ışınlama kaynağından çıkan gama ışınlarına, kaynak etrafında pnömatik pistonlarla hareket ettirilerek maruz bırakıldı. Sofralık zeytinlere 1, 3, 5 kGy ışınlama dozları uygulandı. Radyasyon dozu, maruz kalma süresine göre hesaplandı.

2.3 Analizler

Olgunluk indeksi için, elle hasat edilerek işletmeye getirilen zeytinlerden değerlendirmeler sonucunda rastgele 100 adet zeytin alınmış ve kategorilere göre sınıflandırılarak olgunluk indeksi belirlenmiştir [14]. Kalibre için; hasat edilen zeytinlerden rastgele 100 g tartılmış ve zeytinler sayıldıktan sonra 10 ile çarpılarak kilogramdaki dane sayısı belirlenmiştir [15]. Et/çekirdek oranının belirlenmesi için rastgele seçilmiş zeytinlerden 100 g tartıldıktan sonra meyve eti çekirdekten ayrılmıştır. Çekirdekler iyice temizlenmiş ve sonrasında tartılmıştır. Toplam ağırlıktan çekirdek ağırlığı çıkarılarak et ağırlığı tespit edilmiş ve çekirdek ağırlığı et ağırlığı ile kıyaslanarak et/çekirdek oranı belirlenmiştir [15].

Zeytinlerin renk ölçümüne ait L^* , a^* ve b^* değerleri, Minolta CR-300 model chromameter (Japonya) cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler Ege Üniversitesi Bahçe Bitkileri Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Doku (sertlik) ölçümü, el penetrometresi kullanılarak mN cinsinden Mitutoyo Shore A shoremetre cihazı ile (sertlik skala aralığı 0-100 Shore A, ölçüm aralığı 10-90 Shore A ve uç çapı 0.79 mm) yapılmıştır. Zeytin örneği için sertlik, mN delme kuvveti olarak belirlenmiştir. Zeytinler ele alındıktan sonra gösterge sıfırlanmış ve üç noktadan ölçüm yapılmıştır. 15 adet zeytinde yapılan ölçümün ortalamaları alınarak zeytinlerin sertlik değerleri hesaplanmıştır.

İstatistiksel analiz, deneme tesadüf parselleme desenine göre faktöriyel düzende, 2 tekrarlı 3 paralel olarak gerçekleştirilmiştir. İncelenen faktörlerin (ambalaj, ışın dozları, depolama süresi) etkilerinin anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için varyans analizi yapılmıştır. Anlamlı çıkan faktörler çoklu karşılaştırma için Duncan testi kullanılarak karşılaştırılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Projenin çalışılmasında tuz miktarı, ambalaj tipi, ışın dozu miktarına göre verilen numune kodları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Örnek kodları ve açıklamaları

Paketleme Teknikleri	Vakum Paket (V)				Modifiye Atmos. Pak. (MAP)			
	0	1	3	5	0	1	3	5
İşılama dozları								
Çevirme Zeytin (A)	AV0	AV1	AV3	AV5	AMP0	AMP1	AMP3	AMP5
Çevirme Zeytin (B)	BV0	BV1	BV3	BV5	BMP0	BMP1	BMP3	BMP5
Salamura zeytin (C)	CV0	CV1	CV3	CV5	CMP0	CMP1	CMP3	CMP5
Salamura zeytin (D)	DV0	DV1	DV3	DV5	DMP0	DMP1	DMP3	DMP5

*AC: %2 tuzlu zeytin BD: %4 tuzlu zeytin 0: Kontrol grupları

Çalışmada, öncelikle ham madde ve fermantasyon döneminin sonunda sofralık salamura siyah zeytinlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Ham değerlere ait veriler Tablo 3'te, fermantasyon sonunda elde edilen veriler ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 3. Gemlik zeytinlerinin başlangıç (0.gün) fiziksel ve kimyasal parametre değerleri

Özellikler	Değerleri
Olgunluk indeksi	5,02
Et/Çekirdek oranı	6,45
Kalibre (dane adeti/kg)	304
Yağ miktarı (%)	34,81

Tablo 4. Fermantasyon dönemi sonunda fiziksel ve kimyasal parametre değerleri

Parametreler	A	B
Nem (%)	49,57	49,63
Tuz (%)	1,76	2,27
İndirgen şeker (%)	0,69	0,63
Serbest asitlik (%)	0,82	0,75
pH	4,55	4,70
Yağ (%)	33,84	33,19

3.1 L^* değeri

Çalışma süresince tespit edilen L^* değeri ölçümlerine ait ortalama veriler ve bu verilere ait standart sapma değerleri salamura ve çevirme zeytin örnekleri için de Tablo 5 ve 6'da sunulmuştur. Araştırmamızda ham zeytinlerde tespit edilen 27,33 L^* değeri, Kutlu ve Şen'in [24] ham Gemlik zeytinlerin 25,17; Alvarez ve ark. [25] Arauco zeytin çeşidinde 21,21 olarak tespit ettikleri L^* değerlerinden yüksek; Romeo ve ark. [26]'nın 30,31 olarak tespit ettikleri L^* değerlerinden düşük bulunmuştur. Esti ve ark. [27] tarafından yapılan çalışmada, Gentile (Colletorto) zeytin çeşidinde 4,9 olgunluk indeksinde L^* değerinin 29,3 olduğu, Leccino çeşidinde ise 4,8 olgunluk indeksinde 28,4 olarak ölçüldüğü belirlenmiştir. Araştırmacılar, olgunluk arttıkça L^* değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu farklılıkların çeşit özellikleri ve hasat zamanına bağlı olarak değişebileceği düşünülmektedir. Fermantasyon ve depolama süresinin sonunda, salamura yöntemiyle hazırlanan zeytin örneklerinde tespit edilen L^* değerlerinin, çevirme yöntemiyle hazırlananlara kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 5 ve 6). İstatistiksel analiz sonuçlarına göre zeytin örneklerinin L^* değerlerine işleme yöntemlerinin etkili olduğu tespit edilmiştir (Tablo 7).

Farklı salamuralardaki siyah zeytinler üzerinde yapılan bir çalışmada, fermantasyonun sonunda L^* değerlerinin en düşük 23,46 ile 28,27 arasında, en yüksek ise 45,57 ile 52,79 arasında değiştiği belirlenmiştir [28]. İlgili çalışmanın sonuçlarına göre, L^* ve b^* değerlerinde fermantasyonun ardından azalma, a^* değerinde ise artış gözlenmiştir [29]. Benzer şekilde, yürütülen araştırmada her iki işleme yönteminde de fermantasyonun sonunda L^* değerlerinde azalma olduğu ancak bu azalmanın çevirme zeytinlerinde daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, fermantasyonun salamurasız ortamda gerçekleşmesi nedeniyle çevirme zeytinlerinde bulunan suda çözünebilir renk maddelerinin kaybının yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir.

%2 ve %4 tuz konsantrasyonlarında işlenen zeytin örneklerinde fermentasyon sonu ve depolama süresince L^* değerlerinin tespit edildiği bir araştırmada, çevirme yöntemiyle işlenen zeytinlerde fermentasyon sonu L^* değerinin %2 tuz konsantrasyonu uygulanan örneklerde %4 tuzlu örneklerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, salamura zeytinlerinde de L^* değerinin %2 tuz konsantrasyonundaki örneklerde %4 tuzlu örneklere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 5, 6). Çevirme ve salamura zeytinlerin her iki grubunda da, tuz

miktarına bağlı olarak L^* değerlerinde farklılıklar olmasına rağmen, zeytin işleme yöntemlerine göre ayrı ayrı gruplandırılarak yapılan varyans analizi sonuçlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık tespit edilmemiştir (Tablo 7).

Tablo 5. Çevirme zeytinlerde L^* değerleri

Tuz (%)	Ambalaj / Işın	Analiz dönemleri									
		Ham	Fermente	Depolama süresi (Ay)							
				1	2	3	4	5	6	7	8
2	V.0	27,33	22,24	22,71	23,98	21,76	21,74	22,43	24,42	24,42	25,64
	V.1	27,33	22,24	22,74	21,97	22,08	22,52	22,13	25,04	25,06	25,7
	V.3	27,14	22,34	23,02	23,32	23,3	22,46	22,88	26,08	25,05	25,93
	V.5	27,33	22,24	23,01	22,71	22,37	21,71	22,11	25,14	25,72	26,51
	MAP.0	27,33	22,24	23,18	24,52	22,77	21,73	22,61	23,18	24,8	25,76
	MAP.1	27,33	22,24	23,07	24,33	19,81	22,32	22,13	24,17	26,2	26,98
	MAP.3	27,33	22,24	23,55	23,55	20,84	22,62	23,07	24,57	26,14	25,86
	MAP.5	27,33	22,24	23,06	24,24	22,99	23,41	24,14	24,68	24,79	25,38
4	V.0	27,33	21,7	22,93	23,59	21,78	22,84	22,62	25,94	25,67	25,41
	V.1	27,33	21,7	22,97	23,65	22,1	21,92	22,85	25,37	24,67	24,38
	V.3	27,33	21,7	22,28	23,6	21,73	22,52	23,21	25,77	25,53	26,05
	V.5	27,33	21,7	22,23	24,15	22,28	22,35	23,11	25,85	24,81	24,66
	MAP.0	27,33	21,7	23,32	23,37	23,3	21,85	22,56	26,06	26,02	25,94
	MAP.1	27,33	21,7	23,02	24,28	21,71	23	22,95	25,82	25,94	25,47
	MAP.3	27,33	21,7	23,31	25,05	22,78	21,91	22,54	26,75	24,99	24,89
	MAP.5	27,33	21,7	22,11	24,1	22,96	22,53	23,09	25,9	25,49	25,9

Çevirme ve salamura yöntemleriyle işlenmiş her iki zeytin grubunda %2 ve %4 tuzlu örneklerin depolama süresinin sonunda, MAP ambalajlı örneklerin vakum ambalajlı örneklerden daha yüksek L^* değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, ambalaj tekniklerinin karşılaştırılmasında önemli bir bulgu olarak ortaya çıkmıştır. Zeytin işleme yöntemlerine göre ayrı ayrı değerlendirilen verilere göre, çevirme ve salamura zeytin grupları için her ikisinde de ambalaj tekniğinin L^* değeri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu tespit edilmiştir ($p < 0,05$). Sığır bifteklerinin hava ve MAP+CO₂ ile ambalajlanması üzerine yapılan çalışmada, en düşük L^* değerlerinin vakum paketli ürünlerde olduğu belirlenmiştir [30]. Bu bulgu, benzer şekilde, düşük L^* değerlerinin vakum paketli ürünlerde tespit edilen çalışmayla uyumlu bir şekilde ortaya konmuştur.

Tablo 6. Salamura zeytinlerde L^* değerleri

Tuz (%)	Ambalaj / Işın	Analiz dönemleri									
		Ham	Fermente	Depolama süresi (Ay)							
				1	2	3	4	5	6	7	8
2	CV.0	27,33	24,62	23,94	23,64	24,97	24,31	24,04	28,35	26,03	26,66
	CV.1	27,33	24,62	23,59	23,92	25,07	24,56	24,65	27,75	28,18	28,47
	CV.3	27,33	24,62	23,79	23,80	24,89	24,92	24,26	27,93	27,83	28,70
	CV.5	27,33	24,62	24,41	25,40	25,72	24,77	25,04	26,97	26,85	27,74
	CMP.0	27,33	24,62	23,45	23,64	25,48	24,99	25,15	28,09	28,30	29,28
	CMP.1	27,33	24,62	24,14	25,42	25,11	25,23	25,34	27,35	28,07	28,86
	CMP.3	27,33	24,62	25,22	26,17	24,70	24,99	24,88	28,41	27,81	28,59
	CMP.5	27,33	24,62	24,52	25,61	25,89	24,57	24,59	27,89	27,80	28,05
4	DV.0	27,33	24,30	24,06	25,00	24,55	23,77	24,16	28,12	24,62	26,41
	DV.1	27,33	24,30	24,62	25,56	25,09	24,20	24,85	26,13	27,75	27,94
	DV.3	27,33	24,30	24,19	24,36	24,87	23,78	24,27	28,75	27,83	28,28
	DV.5	27,33	24,30	23,22	24,15	25,00	24,01	24,57	28,53	26,24	27,46
	DMP.0	27,33	24,30	24,41	24,95	25,35	24,37	25,04	28,44	28,62	30,73
	DMP.1	27,33	24,30	24,25	24,42	25,18	24,42	25,46	26,48	28,50	29,34
	DMP.3	27,33	24,30	24,39	25,52	25,31	24,62	24,35	26,72	27,97	28,80
	DMP.5	27,33	24,30	24,29	25,38	25,25	25,70	24,81	28,22	28,25	28,46

Zeytin örneklerinin L^* değeri üzerindeki ışın uygulamasının etkisini belirlemek amacıyla, fermantasyon sonrası ışın uygulanmayan ve farklı dozlarda ışın uygulanan (1, 3 ve 5 kGy) gruplar şeklinde farklı ambalaj (vakum ve MAP) teknikleri ile paketlenerek depolandı. Çevirme zeytin örneklerinin %2 tuzlu vakum ambalajlı ürünleri hariç diğer gruplarında, ışın uygulaması yapılmayan ya da düşük dozlarda ışın uygulanan örneklerde, yüksek dozda ışın uygulanan örneklerle karşılaştırıldığında L^* değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak %2 tuzlu vakum ambalajlı ürünlerde, diğer gruplardan farklı olarak ışın uygulamasının L^* değerini artırıcı bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Tablo 5, 6, 7, 8). Salamura zeytin örneklerinin vakum ambalajlı %2 ve %4 tuzlu ürünlerinde uygulanan ışın dozunun L^* değerini artırıcı bir etkiye sahip olduğu, ancak MAP ambalajlı %2 ve %4 tuzlu ürünlerinde ise L^* değerini azaltıcı bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5, 6).

Tablo 7. L^* değerlerinde istatistiki farkları önemli bulunan uygulamalar

Varyasyon kaynakları	Kareler top.	Ser. der.	Kareler ort.	F	Önem
İşleme Yöntemi	1439,187	1	1439,187	225,214	0,000
Ambalaj	96,071	1	96,071	15,034	0,000
Zaman	3067,069	9	340,785	53,328	0,000
İşleme Yöntemi * Işın Dozu	52,445	3	17,482	2,736	0,043
İşleme Yöntemi * Zaman	341,2	9	37,911	5,933	0,000
İşleme Yöntemi * Tuz * Zaman	122,49	9	13,610	2,130	0,025
Tuz * Işın Dozu * Zaman	11,337	3	3,779	4,876	0,002

Zeytin işleme yöntemlerine göre ayrı ayrı gruplandırılan L^* değerleri üzerinde yapılan varyans analizinde, sadece salamura zeytin örnekleri için istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmuştur ($p < 0,05$). Yüksek bir ışın dozu olan 14 kGy'nin Lycium meyve örneklerinin L^* , a^* ve b^* değerlerinde hafif bir azalmaya neden olduğu belirtilmiştir. Ancak, ışın dozları arasındaki farkın ve depolama süresinin önemli bir etkisinin bulunmadığı ifade edilmiştir [31]. Öte yandan, çilek ve ahududu meyveleri üzerinde yapılan çalışmada, ışın uygulamasının depolama sırasında renk değerleri üzerinde etkili olmadığı belirtilmiştir [32]. MAP + CO₂ uygulamasının ışın dozlarına bakılmaksızın L^* ve a^* değerini yükselttiğini, sadece vakum ambalajların etkin bir şekilde düşük L^* değeri göstermiştir [33]. Araştırmamızda da çevirme zeytinlerde ışın uygulamasının etkisinin görülmediği ancak salamura zeytinlerde ışın uygulamasının etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. Bu durumun salamura zeytinlerde nem miktarının daha fazla olmasından kaynaklanabileceği kanaatine varılmıştır. Araştırmamızda kullanılan ışın dozlarının sadece salamura zeytinler için L^* değeri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki yarattığı, bu da sadece salamura zeytinler için uygulanan doz miktarının L^* değerini belirleyici bir faktör olduğunu düşündürmektedir. İstatistiksel olarak, depolama sürecinin L^* değeri üzerinde etkili olduğu, işleme yöntemlerine göre yapılan varyans analizlerinde $p < 0,05$ düzeyinde anlamlılık belirlenmiştir.

HHP (High Hydrostatic Pressure) uygulamasının ardından 12 aylık depolama sürecinde L^* değerinde hafif bir azalma ve örneklerin daha koyu renge sahip olduğu belirtilmiştir [33]. Ancak, bu bulgu, araştırmamızın sonuçlarıyla uyumlu değildir. Hammadde de 30,31 olan L^* değerinin, %12 tuzlu salamura içinde bekletilmesi sırasında 52,66'ya yükseldiği belirtilmiştir [26]. Araştırmamızda sofralık zeytinlerin depolama sürecinde ambalaj içinde oksijensiz koşullarda saklanması renkte bir açılma, başka bir ifade ile L^* değerlerinde artışa neden olduğu görülmüştür. Bu durum, Romeo ve ark.'nın (2012) [26] çalışmasının sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir.

Tüm zeytin örneklerinden elde edilen L^* değeri verilerine göre, depolama süresince meydana gelen değişimin, her bir zeytin işleme yöntemi, tuz konsantrasyonu ve ışın uygulaması ile uygulanan doz miktarı düzeyinde farklılık gösterdiği belirlenmiştir (Tablo 7).

Tablo 8. Salamura zeytinlerde L^* değeri üzerinde etkili olan ışın uygulamaları

Işın Dozu	N	Subset	
		1	2
Duncana,b	0	160	25,7505
	5	160	25,8643
	1	160	25,9733
	3	160	26,575
Sig.			0,562
			0,06

Homojen alt gruplarda grupların ortalaması gösterilmiştir. Hata kareler ortalaması=10,256. a. Örneklem büyüklüğü= 160. b. Alfa= 0,05

3.2 a^* değerleri

Deneme süresince tespit edilen a^* değerleri ölçümlerine ait ortalama veriler ve bu verilere ait standart sapma değerleri çevirme ve salamura zeytin örnekleri için sırasıyla Tablo 9 ve 10'de sunulmuştur. Zeytin örneklerinin a^* değerlerine ait varyans analiz sonuçları ise Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 9. Çevirme zeytinlerde a^* değerleri

Tuz (%)	Ambalaj / Işın	Analiz dönemleri		Depolama süresi (Ay)							
		Ham	Fermente	1	2	3	4	5	6	7	8
2	V.0	4,05	8,36	4,89	4,52	4,02	5,47	6,46	5,5	8,44	7,41
	V.1	4,05	8,36	5,49	5,78	4,17	5,02	6,28	5,92	8,6	6,67
	V.3	4,02	8,53	6,03	5,52	4,52	5,48	5,77	6,79	8,15	6,65
	V.5	4,05	8,36	5,02	5,43	4,02	4,93	4,99	5,47	8,61	6,66
	MAP.0	4,05	8,36	5,57	5,57	3,79	5,39	6,13	4,89	9,26	7,13
	MAP.1	4,05	8,36	5,75	5,51	4,67	4,84	5,95	5,67	9,81	6,77
	MAP.3	4,05	8,36	5,95	5,97	4,21	5,02	5,51	5,5	8,1	6,8
	MAP.5	4,05	8,36	5,42	5,22	4,33	4,67	4,25	5,47	8,77	6,49
	V.0	4,05	8,03	5,14	5,76	4,45	4,68	4,84	6,27	8,77	7,72
	V.1	4,05	8,03	4,95	4,45	4,27	4,76	5,01	5,7	7,84	6,31
4	V.3	4,05	8,03	5,6	5,3	5,84	5,09	4,44	5,78	8,22	6,64
	V.5	4,05	8,03	5,48	4,38	4,22	4,21	4,85	5,8	9,13	7,76
	MAP.0	4,05	8,03	5,17	5,66	4,37	6,01	4,63	5,37	8,75	7,89
	MAP.1	4,05	8,03	6,21	5,41	4,61	4,64	4,43	4,43	8,3	6,67
	MAP.3	4,05	8,03	5,76	4,83	4,33	5	4,64	5,41	9,19	6,23
	MAP.5	4,05	8,03	5,69	5,64	4,37	4,58	4,49	5,27	8,17	7,59

Araştırmamızda ham zeytinlerde 4,05 olarak tespit edilen a^* değeri, diğer bazı araştırmacıların [24-26, 34] tespit ettikleri değerlerden düşük olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, farklı zeytin çeşitleri üzerinde, olgunlaşma sürecinin a^* değerini önemli ölçüde etkilediği rapor edilmiştir. Çalışmadaki belirlenen değerlerdeki farklılığın, muhtemelen hasat zamanı ve çeşit özelliklerinden kaynaklanabileceği belirtilmektedir [35]. Fermantasyon sonunda belirlenen a^* değerleri ile depolama süresinin sonunda ölçülen a^* değerleri, salamura yöntemiyle işlenen zeytin örneklerinde çevirme yöntemiyle işlenenlere kıyasla daha yüksek düzeylerde bulunmuştur (Tablo 9 ve 10). İşleme yöntemlerine göre a^* değerlerinde gözlemlenen farklılıklar, işleme yöntemlerinin a^* değeri üzerindeki etkisini göstermektedir. Zeytin işleme yöntemlerine bağlı olarak tespit edilen a^* değerlerindeki değişim, tüm zeytin örnekleri için yapılan varyans analiziyle de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Tablo 11).

Tablo 10. Salamura zeytinlerde a^* değerleri

Tuz (%)	Ambalaj/ Işın	Analiz dönemleri									
		Ham	Fermente	Depolama süresi (Ay)							
				1	2	3	4	5	6	7	8
2	CV.0	4,05	9,56	7,44	7,24	4,6	5,96	7,08	6,38	8,86	8,34
	CV.1	4,05	9,56	7,22	6,3	4,5	6,61	7,66	6,85	8,99	9
	CV.3	4,05	9,56	7,06	6,17	5,82	6,64	6,22	7,06	7,97	7,3
	CV.5	4,05	9,56	7,06	6,98	6,05	6,72	6,78	7,22	8,23	8,47
	CMP.0	4,05	9,56	6,7	8,03	4,47	6,81	6,98	6,43	8,69	8,04
	CMP.1	4,05	9,56	6,52	7,52	5,28	7,01	7,25	7,19	8,25	8,33
	CMP.3	4,05	9,56	6,38	6,34	5,55	7,08	6,75	7,26	8,26	8,03
	CMP.5	4,05	9,56	7	8,24	5,67	6,25	6,44	7,01	8,16	8,27
	4	DV.0	4,05	8,43	6	6,26	4,08	5,54	5,29	5,53	6,56
DV.1		4,05	8,43	5,3	5,77	4,46	5,61	4,76	5,44	6,72	8,6
DV.3		4,05	8,43	4,89	4,95	4,22	6,09	5,85	5,03	6,9	8,61
DV.5		4,05	8,43	4,45	4,79	4,31	4,18	4,87	5,22	7,88	9
DMP.0		4,05	8,43	5,49	5,7	5,68	5,53	4,82	5,07	7,7	8,78
DMP.1		4,05	8,43	5,95	6,72	5,14	5,39	4,8	4,45	7,29	9,07
DMP.3		4,05	8,43	5,55	6,46	5,21	5,64	5,22	4,74	7,28	9,11
DMP.5		4,05	8,43	5,85	7,04	4,97	5,21	4,64	5,52	7,42	9,34

Farklı salamuralarda fermantasyon periyodu sonunda siyah zeytinlerin ortalama a^* değerleri, 10,21 ile 15,31 arasında belirlenmiştir [28]. Diğer bir çalışmada ise depolama sürecinde a^* değerinde bir artış olduğu belirtilmektedir [29]. Örneğin, siyah zeytinlerin %7 tuzlu salamurada 30 ile 90 gün bekletilmesi sırasında, a^* değerinin hafif bir artış gösterdiği ve sırasıyla 9,27 ile 8,29 olarak ölçüldüğü bildirilmiştir [26]. Benzer şekilde, çalışmamızda da her iki işleme yönteminde fermantasyon sonunda a^* değerlerinde artış gözlenmiştir.

Tablo 11. a^* değerlerinde istatistiki farkları önemli bulunan uygulamalar

Varyasyon kaynakları	Kareler top.	Ser.der.	Kareler ort.	F	Önem
İşlemeYöntemi	138,891	1	138,891	62,982	0
Zaman	2620,807	9	291,201	132,049	0
İşlemeYöntemi * Zaman	129,83	9	14,426	6,541	0
Tuz * Zaman	43,896	9	4,877	2,212	0,019

Farklı tuz konsantrasyonlarında işlenen zeytin örneklerinde tuz miktarının a^* değeri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla fermantasyon sonu ve depolama süresince a^* değerleri ölçülmüştür. Çevirme yöntemi ile işlenen zeytinlerde, fermantasyon sonu a^* değeri %2 tuz konsantrasyonu uygulanan örneklerde %4 tuz konsantrasyonu uygulanan örneklerden daha yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde, salamura zeytinlerde de a^* değeri %2 tuz konsantrasyonundaki örneklerde %4 tuz konsantrasyonu uygulanan örneklerden daha yüksek ölçülmüştür. Her iki işleme yönteminde, tuz miktarına bağlı olarak a^* değerlerinde farklılıklar gözlenmiş olmasına rağmen, tüm zeytin örneklerinden elde edilen veriler ile zeytin işleme yöntemlerine göre ayrı ayrı gruplandırılarak yapılan varyans analizinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Depolama süresinin sonunda, ambalaj teknikleri açısından karşılaştırıldığında, çevirme yöntemi ile işlenmiş %2 ve %4 tuzlu her iki ürün tipinde vakum ambalajlı örneklerin MAP ambalajlı örneklerden daha yüksek a^* değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Salamura yöntemleri ile işlenmiş %2 tuzlu ürünlerde ise vakum ambalajlı örneklerin, %4 tuzlu ürünlerde ise MAP ambalajlı örneklerin yüksek a^* değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ambalaj farklılığına bağlı olarak a^* değerlerinde gözlenen bu değişimler, tüm zeytin örneklerinden elde edilen verilerle istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Üzümsü meyveler üzerinde yapılan çalışmada, MAP ve farklı oksijen geçirgenliğine sahip filmlerle paketlenen ürünlerde depolama sürecinde a^* değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Bu azalmanın, pigmentlerin bozunmasına ve polifenol oksidaz enziminin aktivitesine bağlı olduğu belirtilmektedir [36]. Benzer şekilde, bu çalışmada da bu

bulgulara ulaşılmış olup, bazı gruplarda depolama sürecinin ilk aylarında a^* değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Ancak, depolama sürecinin ilerleyen aşamalarında bir artış meydana gelmiştir.

Çevirme zeytin örneklerinde, %4 tuzlu vakum ambalajlı ürünler dışındaki gruplarda, ışın uygulaması yapılmayan veya düşük dozlarda ışın uygulanan örneklerde, yüksek dozda ışın uygulanan örneklere kıyasla a^* değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. %4 tuzlu vakum ambalajlı ürünlerde ise diğer grupların aksine, ışın uygulamasının a^* değerini artırıcı bir etki gösterdiği tespit edilmiştir. Salamura zeytinlerin hem vakum hem de MAP ambalajlı her iki grubunda da %2 ve %4 tuzlu ürünlerde, ışın uygulamasının veya uygulanan ışın dozunun a^* değerini artırıcı bir etkiye sahip olduğu Tablo 10'da görülebilmektedir. Sığır eti örnekleri üzerinde yapılan çalışmada, ambalajlama yöntemlerinin ve ışın uygulamasının a^* değerini belirgin şekilde etkilediği görülmüştür. Işın uygulaması yapılmayan örneklerde daha yüksek a^* değeri tespit edilirken, MAP uygulanan örneklerin diğer gruplardan daha yüksek a^* değerine sahip olduğu belirlenmiştir [24]. Ayrıca, depolama sürecinde ışın + MAP uygulanan paketlerin diğer paketlerden önemli ölçüde farklılık gösterdiği ve bu kombinasyonun önemli avantajlar sağladığı belirtilmiştir. Bu bulgular, Chanloy ve ark. tarafından yapılan çalışmanın sonuçları ile de benzerlik göstermektedir, onlar da ışınlamanın a^* değeri üzerinde artırıcı bir etki yarattığını ifade etmişlerdir [37].

14 kGy gibi yüksek ışın dozunun L^* , a^* ve b^* değerlerinde hafif bir azalmaya sebebiyet verdiğini ancak ışın dozları arasındaki fark ile depolama süresinin etkisinin a^* değeri için önemli olmadığı belirtilmektedir [31]. Işın dozları uygulamasının çilek ve ahududu meyvelerinin renk değerleri üzerinde etkili olmadığını ve depolama sırasında rengin sabit kaldığını bildirmektedirler [32]. Araştırmamızda da 1, 3 ve 5 kGy gibi nispeten daha düşük dozlarda ışın uygulaması yapıldığından ışın uygulamasının a^* değerleri üzerindeki etkisinin yapılan bu çalışmalarla benzer olarak önemsiz olduğu değerlendirilebilir. Işın uygulamasının farklı dozlarının ve uygulanmayan grupların a^* değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı, Duncan çoklu karşılaştırma analizi ile desteklenmiştir (Tablo 12). Ancak, depolama sürecinin a^* değerleri üzerinde etkili olduğu ve bu etkinin tüm zeytinlerden elde edilen a^* değerleri için uygulanan varyans analizi ile $p < 0,05$ düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir (Tablo 11). Ayrıca, tüm zeytin örneklerinden elde edilen a^* değerleri verilerine göre, depolama süresince her bir zeytin işleme yöntemi ve her bir tuz konsantrasyonu düzeyinde farklılık gösterdiği, bu farklılıkların da $p < 0,05$ düzeyinde önemli olduğu saptanmıştır (Tablo 11).

3.3 b^* değerleri

Ham dane, fermente ürün, ambalajlama sonrası depolama süresince zeytin örneklerinde tespit edilen b^* değerleri, çevirme ve salamura zeytin örnekleri için Tablo 13 ve 14'te verilmiştir. Çalışmamızda, ham zeytinlerin b^* değeri 0,91 olarak belirlenmiştir. Bu değer, diğer çalışmalarda belirtilen b^* değerlerinden farklılık göstermektedir. Örneğin, bazı araştırmacılar [24, 25] Gemlik çeşidi zeytinlerde -1,40 ve Arauco çeşidi zeytinlerde -3,56 olarak belirlemişlerdir. Bir başka araştırmada ise 2,96 b^* değeri tespit edilmiştir [26]. Toker ve Aksoy'un yaptığı çalışmada ise Ayvalık çeşidi siyah zeytinlerin b^* değerleri -0,21 ve -0,63 olarak bulunmuştur [34]. Bu farklılıkların hasat zamanı ve çeşit farklılıklarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Tablo 13. Çevirme zeytinlerde b^* değerleri

	Tuz (%)	Ambalaj / Işın	Analiz dönemleri		Depolama süresi (Ay)							
			Ham	Fermente	1	2	3	4	5	6	7	8
2		V.0	0,91	4,95	5,85	8,48	9,59	9,37	7,71	10,79	7,37	9,62
		V.1	0,91	4,95	6,74	7,48	6,92	9,18	10,59	11,35	7,32	9,48
		V.3	0,91	4,95	5,78	6,82	7,2	7,05	8,18	9,09	7,4	8,52
		V.5	0,91	4,95	6,28	7,09	6,21	6,21	7,12	7,44	10,09	8,7
		MAP.0	0,91	4,95	7,09	5,87	6,97	5,72	7,5	8,59	8,69	9,83
		MAP.1	0,91	4,95	5,16	7,31	5,56	6,23	8,13	10,14	9,92	9,3
		MAP.3	0,91	4,95	5,33	5,53	5,93	8,19	10,48	8,88	9,82	8,93
		MAP.5	0,91	4,95	5,28	5,19	6,73	9,82	9,67	9,4	8,19	8,56
4		V.0	0,91	4,16	7,52	7,6	7,47	8,68	9,83	7,43	7,61	8,9
		V.1	0,91	4,16	5,87	6,04	6,91	7,13	10,73	8,01	7,83	8,97
		V.3	0,91	4,16	6	4,77	9,51	6,77	9,57	8,5	9,68	9,15
		V.5	0,91	4,16	6,28	5,81	7,48	7,02	8,85	7,04	9	9,57
		MAP.0	0,91	4,16	7,59	9,08	7,18	7,15	8,86	8,19	7,98	8,84
		MAP.1	0,91	4,16	7,76	6,32	7,91	7,79	9,36	7,71	8,56	10,05
		MAP.3	0,91	4,16	7,78	6,21	6,41	7,35	9,71	5,89	9,29	9,51
		MAP.5	0,91	4,16	7,2	7,66	5,88	7,47	7,62	5	12,57	12,07

Fermantasyonun sonunda ve depolama sürecinin sonunda elde edilen b^* değerleri, salamura işlemi uygulanan zeytin örneklerinde çevirme yöntemiyle işlenenlere göre daha yüksek seviyelerde bulunmuştur (Tablo 13 ve 14). İşleme yöntemlerine bağlı olarak b^* değerlerindeki bu farklılıklar, işleme yöntemlerinin b^* değerini etkilediğini göstermektedir. Zeytin işleme yöntemlerine göre belirlenen b^* değerlerindeki değişim, tüm zeytin örneklerinden elde edilen veriler üzerinde uygulanan varyans analizi ile de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Tablo 15).

Tablo 14. Salamura zeytinlerde b^* değerleri

	Tuz (%)	Ambalaj / Işın	Analiz dönemleri		Depolama süresi (Ay)							
			Ham	Fermente	1	2	3	4	5	6	7	8
2		CV.0	0,91	4,23	6,91	5,97	7,3	8,5	9,13	8,38	10,64	10,79
		CV.1	0,91	4,23	6,53	7,75	7,97	10,3	9,49	9,2	11,15	11,18
		CV.3	0,91	4,23	6,2	6,25	8,29	8,79	8,45	8,34	11,26	11,2
		CV.5	0,91	4,23	7,54	7,46	7,86	8,83	9,04	9,82	9,53	10,5
		CMP.0	0,91	4,23	6,94	5,63	6,73	9,5	10,97	9,56	10,43	11,1
		CMP.1	0,91	4,23	7,51	6,88	7,23	11,24	8,2	6,95	9,38	9,47
		CMP.3	0,91	4,23	5,91	5,44	8,69	9,86	10,23	7,18	9,28	9,69
		CMP.5	0,91	4,23	6,9	6,2	10,17	8,51	8,82	7,22	9,92	10,73
4		DV.0	0,91	6,96	7,1	6,41	10,69	9,49	10,3	5,26	11,54	11,17
		DV.1	0,91	6,96	7,86	9,1	7,93	10,74	11,37	5,72	10,02	10,95
		DV.3	0,91	6,96	6,25	5,9	10,94	8,78	10,73	11,52	9,83	10,38
		DV.5	0,91	6,96	7,21	5,86	11,35	8,25	10,37	8,1	10,01	11,23
		DMP.0	0,91	6,96	7,7	7,43	7,98	9,9	8,61	10,95	9,9	11,11
		DMP.1	0,91	6,96	8,7	7,21	10,67	11,61	9,43	11,22	10,69	10,84
		DMP.3	0,91	6,96	8,16	6,53	11,33	8,71	9,84	9,93	9,6	10,44
		DMP.5	0,91	6,96	7,66	6,11	9,45	9,36	8,82	10,44	9,87	10,76

Siyah zeytinlerin farklı salamuralarındaki fermantasyon sonundaki b^* değerleri, 1,09 ile 23,46 arasında değişkenlik gösterirken, maksimum değerlerinin 22,45 ile 48,21 arasında olduğu bildirilmiştir [28]. Diğer bir araştırma [29] ise fermantasyon sonrası L^* ve b^* değerlerinde azalma, a^* değerinde ise artma olduğunu belirtmektedir. Çalışmamızdaki sonuçlar, %7 tuzlu salamura içinde bekletilen siyah zeytinlerin b^* değerlerinde artış gösterdiği yönündeki önceki çalışmayla uyumludur [26]. Her iki işleme yönteminde de fermantasyon sonunda b^* değerlerinde meydana gelen artışın benzerliği göz önüne alındığında, salamura zeytinlerinde daha belirgin bir artışın salamuranın nispeten daha yüksek asitliğiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir.

Tablo 13'ten anlaşılacağı üzere, çevirme yöntemiyle işlenen zeytinlerde, fermantasyon sonu b^* değerleri %2 tuz konsantrasyonu uygulanan örneklerde, %4 tuz konsantrasyonu uygulanan örneklerden daha yüksek olarak

belirlenmiştir. Salamura zeytinlerinde ise b^* değerleri, %4 tuz konsantrasyonundaki örneklerde, %2 tuz konsantrasyonu uygulanan örneklere göre daha yüksek bulunmuştur (Tablo 14). Çevirme ve salamura yöntemleriyle işlenmiş zeytinlerde, tuz miktarına bağlı olarak b^* değerlerinde farklılıklar tespit edilmiştir. Ancak, tüm zeytin örnekleri için yapılan varyans analizi sonuçlarına göre, sadece salamura zeytinlerinde bu farklılıklar istatistiki olarak anlamlı bulunmuştur (Tablo 15).

Tablo 15. b^* değerlerinde istatistiki farkları önemli bulunan uygulamalar

Varyasyon kaynakları	Kareler top.	Ser. der.	Kareler ort.	F	Önem
İşlemeYöntemi	275,705	1	275,705	80,701	0,000
Tuz	45,798	1	45,798	13,405	0,000
Zaman	8513,178	9	945,909	276,874	0,000
İşlemeYöntemi * Tuz	51,175	1	51,175	14,979	0,000
İşlemeYöntemi * Zaman	149,976	9	16,664	4,878	0,000
Tuz * Zaman	97,746	9	10,861	3,179	0,001
İşlemeYöntemi * Tuz * Zaman	147,893	9	16,433	4,81	0,000
İşlemeYöntemi * Ambalaj * Zaman	67,623	9	7,514	2,199	0,020
İşlemeYöntemi * IşınDozu * Zaman	168,195	27	6,229	1,823	0,007
Tuz * Ambalaj * Zaman	80,161	9	8,907	2,607	0,006
İşlemeYöntemi * Tuz * Ambalaj * Zaman	59,292	9	6,588	1,928	0,045

Depolama süresinin sonunda, ambalaj teknikleri açısından yapılan karşılaştırmada, çevirme yöntemiyle işlenmiş %2 tuzlu ürünlerde vakum ambalajlı örneklerin; %4 tuzlu ürünlerde ise MAP ambalajlı örneklerin daha yüksek b^* değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, salamura yöntemleriyle işlenmiş %2 ve %4 tuzlu her iki grup üründe de vakum ambalajlı örneklerin yüksek b^* değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir (Tablo 14). Ambalaj türüne bağlı olarak b^* değerlerinde görülen değişiklikler, tüm zeytin örneklerinden alınan veriler ve işleme yöntemlerine göre ayrı ayrı gruplandırılan verilerle değerlendirildiğinde istatistiki olarak anlamlı bulunmamıştır (Tablo 15). Sığır eti örneklerinde yapılan çalışmada, aerobik, vakum ve modifiye atmosfer ambalajlarında ışın uygulaması yapıldığında, b^* değerlerinin L^* ve a^* değerlerine göre daha az etkilendiği, her bir örnek grubunda (hem vakum hem de MAP ambalajlı) 4 haftalık depolama süresince b^* değerlerinde hafif bir artış gözlemlendiği belirtilmiştir [30]. Benzer şekilde, yaptığımız çalışmada da, depolama süresi boyunca hem vakum hem de MAP ambalajlı örneklerde b^* değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

Çevirme zeytin örneklerinin %2 tuzlu vakum ve MAP ambalajlı ürünlerinde, ışın uygulaması yapılmayan veya düşük dozlarda ışın uygulanan örneklerde, yüksek dozda ışın uygulanan örneklerle kıyaslandığında b^* değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak %4 tuzlu vakum ve MAP ambalajlı ürünlerde, %2 tuzlu ürünlerin aksine, ışın uygulaması ve uygulanan doz miktarının b^* değerini artırıcı yönde etki ettiği gözlemlenmiştir (Tablo 13). Salamura zeytinlerinde ise, %4 tuzlu vakum ambalajlı ürünler haricinde, diğer tüm salamura zeytin gruplarında, ışın uygulaması veya uygulanan doz miktarının b^* değerini azaltıcı yönde etkili olduğu görülmüştür (Tablo 14). İstatistiki olarak, ışın uygulamasının ve uygulanan ışın dozu miktarının b^* değeri üzerinde etkili olmadığı, tüm zeytin örneklerinde ayrı ayrı gruplandırılarak yapılan b^* değeri analizlerinde belirlenmiştir (Tablo 16).

14 kGy gibi yüksek ışın dozlarının kullanıldığı bir çalışmada, örneklerin L^* , a^* ve b^* değerlerinde hafif bir azalma meydana geldiği ancak ışın dozları arasındaki farkın ve depolamanın etkisinin önemli bulunmadığı belirtilmiştir [31]. Başka bir çalışmada ise çilek ve ahududu meyvelerinde ışın dozlarının renk değerleri üzerinde depolama sırasında etkili olmadığı gözlemlenmiştir [32]. Araştırmamızda ise nispeten daha düşük dozlarda (1, 3 ve 5 kGy) ışın uygulaması yapıldığından, b^* değerleri üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu belirlenmiştir. Farklı dozlarda ışın uygulanan gruplar ile ışın uygulaması yapılmayan gruplar arasında, b^* değerleri üzerinde ışın

uygulanmasının veya uygulanan ışın dozu miktarlarının istatistiki olarak önemli olmadığı, Duncan çoklu karşılaştırma analizi ile de desteklenmiştir (Tablo 16). Araştırmamızda kullanılan ışın dozlarının çevirme ve salamura zeytinlerin her iki grubunda da b^* değeri miktarına etki ettiği ancak uygulanan ışın dozu miktarının istatistiki olarak önemli bir etki yaratmadığı görülmektedir.

Depolama süresince, analize alınan zeytin örneklerinden elde edilen sonuçlar göstermektedir ki depolama süreci b^* değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Tablo 15). İstatistiki olarak, depolama sürecinin b^* değeri üzerinde etkili olduğu ve bu etkinin tüm zeytinlerden elde edilen b^* değerlerine ait veriler için uygulanan varyans analizi ile $p < 0,05$ düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir. HHP uygulamasının ardından yapılan bir çalışmada, 335 günlük depolama sürecinde örneklerin renklerinde hafif bir degradasyon olduğu, ancak b^* değerinin etkilenmediği belirtilmiştir [33]. Bu bulgular, kendi araştırmamızda elde ettiğimiz sonuçlarla uyumlu değildir. Başka bir çalışmada ise, hammadde olarak kullanılan zeytinlerin %7 tuzlu salamura içinde 90 gün bekletilmesi sonucunda b^* değerinde bir artış gözlemlendiği bildirilmiştir [26]. Çalışmamızda da benzer bir şekilde, depolama sürecinde elde edilen sofralık zeytinlerin b^* değerlerinde artış gözlenmiştir,

Zeytin işleme yöntemlerine göre yapılan istatistiksel değerlendirme sonucunda, çevirme zeytinlerde depolama süresine bağlı olarak b^* değerinde meydana gelen değişimlerin, her bir tuz konsantrasyonu, ambalaj çeşidi ve ışın uygulaması ile doz miktarı düzeyinde; salamura zeytinlerde ise her bir tuz konsantrasyonu ve ambalaj çeşidi düzeyinde istatistiksel olarak ($p < 0,05$) anlamlı olduğu belirlenmiştir (Tablo 15). Depolama süresinin sonunda en yüksek b^* değerleri çevirme zeytinlerde, %2 ve %4 tuzlu örneklerde MAP ambalajlı ürünlerde ve ışın uygulanmamış veya 5 kGy dozda ışın uygulanmış örneklerde ölçülmüştür. En düşük değerler ise %2 ve %4 tuzlu vakum ambalajlı örneklerde saptanmıştır (Tablo 13). Salamura zeytinlerde ise en yüksek b^* değeri, %2 ve %4 tuzlu vakum ambalajlı ürünlerde ve 3 ve 5 kGy dozda ışın uygulanmış örneklerde ölçülmüştür. En düşük b^* değerleri ise %2 tuzlu ürünlerin MAP ambalajlı ve %4 tuzlu ürünlerin vakum ambalajlı örneklerinde belirlenmiştir (Tablo 14). Çevirme zeytin örnekleri için, ham daneden itibaren başlayan süreçte 0,91 olan b^* değeri, fermantasyonun sonunda %2 tuzlu örneklerde 4,95'e, %4 tuzlu örneklerde ise 4,16'ya yükselmiştir. Ayrıca, fermantasyon sonrası depolama süresinin 8. ayına kadar her iki tuz grubunda da b^* değerinde artış gözlenmiştir (Tablo 13 ve Tablo 14). Salamura zeytinler için ise ham danede belirlenen 0,91 b^* değeri, fermantasyon sonunda %2 tuzlu örneklerde 4,23'e, %4 tuzlu örneklerde ise 6,96'ya yükselmiştir. Benzer şekilde, fermantasyon sonrası depolama süresinin 8. ayına kadar her iki tuz grubunda da b^* değerinde artış tespit edilmiştir (Tablo 13 ve Tablo 14).

3.4 Sertlik Değeri

Deneme süresince tespit edilen sertlik değerleri ölçümlerine ait ortalama veriler ve bu verilere ait standart sapma değerleri salamura zeytin örnekleri için de Tablo 16 ve 17'de sunulmuştur. Çevirme yöntemiyle işlenen zeytin örneklerinde fermantasyon sonunda belirlenen sertlik değerleri ile depolama sürecinin sonunda tespit edilen değerler, salamura yöntemiyle işlenen örneklerden daha yüksek seviyelerde olmuştur (Tablo 16 ve 17).

İşleme yöntemlerine bağlı olarak belirlenen sertlik değerlerindeki farklılıklar, işleme yöntemlerinin meyvenin tekstürü üzerindeki etkisini göstermektedir. Tüm zeytin örneklerinden elde edilen sertlik değerleri üzerinde yapılan varyans analizi, bu farklılıkların istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermektedir (Tablo 18). Sofralık zeytin

işleme süreçlerinde, tuz kullanımı, proses koşulları, pH, asitlik ve tuz konsantrasyonu gibi faktörler meyvenin tekstüründe belirleyici rol oynamaktadır. Yeşil zeytinlerde alkali uygulamasının (et pH'sı 11-12) tekstürde önemli bir artışa neden olduğu bilinmektedir, ancak bu etkinin pH 3-4 seviyesindeki fermantasyon sonrasında minimal olduğu gözlemlenmektedir. Bir çalışmada [38] siyah zeytinlerin tekstür gelişiminin salamura işleminden sonra gerçekleştiğini belirtirken, başka bir araştırma [25] Manzanilla zeytinlerinde fermantasyonun meyve sertliği üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu etkinin çeşitlere göre değiştiği ve bazı zeytin türlerinde fermantasyonun başlangıcında yüksek tuz konsantrasyonunun meyve sertliğine olumlu katkı sağladığı ifade edilmektedir. Ancak, bu etkinin her çeşitte aynı olmadığı ve bazı durumlarda sertliği artırmak için CaCl₂ ilavesi ve hava verilmesinin kullanıldığı belirtilmektedir [25].

Çevirme siyah zeytin yönteminde ve salamura zeytinlerinde de fermantasyonun ilk aşamalarında hafif bir sertlik kaybı yaşanmasına rağmen, tuzun su kaybıyla birlikte tekstür gelişimine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Salamura zeytinlerinde, işleme sürecinde uygulanan baskı ve hava verilmesi, fermantasyon sonrası sertlik kaybını telafi ederek tekstür gelişimine yardımcı olmuştur. Çevirme yöntemiyle işlenen zeytinlerde, fermantasyon sonrası sertlik değerleri %4 tuz konsantrasyonu uygulanan örneklerde %2 tuz konsantrasyonu uygulanan örneklerden daha yüksek bulunmuştur. Salamura zeytinlerinde ise sertlik değerleri %2 ve %4 tuz konsantrasyonu uygulanan örnekler arasında benzer düzeylerde ölçülmüştür (Tablo 16 ve Tablo 17). Tuz miktarına bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişimler, tüm zeytin örnekleri için ayrı ayrı gruplandırılarak yapılan istatistiksel analizlerde p<0,05 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 16. Çevirme zeytinlerde Sertlik değerleri (mN)

Tuz (%)	Ambalaj / İşin	Analiz dönemleri									
		Ham	Fermente	Depolama süresi (Ay)							
				1	2	3	4	5	6	7	8
2	V.0	18,06	14,14	16,89	16,97	17,75	15,71	16,73	15,31	15,76	16,28
	V.1	18,06	14,14	16,13	17,56	16,74	16,23	15,82	15,3	15,32	15,28
	V.3	18,06	14,14	16,1	17,2	16,16	16,03	15,63	14,58	14,97	14,91
	V.5	18,06	14,14	16,08	16,88	16,57	15,47	15,9	15,51	15,19	15,06
	MAP.0	18,06	14,14	16,59	16,45	16,92	15,46	16,11	15,49	15,34	15,29
	MAP.1	18,06	14,14	16,16	17,78	17,87	17,32	16	15,04	15,32	15,28
	MAP.3	18,06	14,14	16,4	17,2	16,29	16,57	15,68	16,03	15,7	15,48
	MAP.5	18,06	14,14	16,77	17,74	17	17,34	16,35	16,37	15,62	15,54
4	V.0	18,06	15,49	19,14	18,21	17,93	17,73	16,89	16,3	16,2	15,93
	V.1	18,06	15,49	19,15	18,32	17,79	17,14	16,82	16,87	16,55	15,97
	V.3	18,06	15,49	19,8	17,43	18,58	17,85	16,93	16,46	16,46	16,22
	V.5	18,06	15,49	18,05	17,75	17,57	16,5	15,63	16,24	15,81	15,77
	MAP.0	18,06	15,49	19,05	18,14	17,6	17,19	16,76	16,21	15,89	16,11
	MAP.1	18,06	15,49	18,58	17,99	17,32	16,87	16,52	15,91	15,87	15,62
	MAP.3	18,06	15,49	18,87	15,94	16,89	16,55	16,4	15,28	15,39	15,24
	MAP.5	18,06	15,49	19,51	15,37	17,42	17,21	15,45	15,83	15,43	15,29

Depolama süresinin sonunda, çevirme yöntemiyle işlenmiş %2 ve %4 tuzlu zeytin örneklerinde vakum ambalajlı ürünlerin, MAP ambalajlı ürünlere kıyasla daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu Tablo 16'dan görülebilir. Salamura yöntemiyle işlenmiş zeytinlerde ise %2 ve %4 tuzlu örneklerin her iki grubunda da MAP ambalajlı ürünlerin sertlik değerlerinin, vakum ambalajlı ürünlere oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Tablo 17).

Ambalaj farklılığına bağlı olarak sertlik değerlerinde gözlenen bu değişimler, tüm zeytin örneklerinden elde edilen verilerin istatistiksel analizlerinde p<0,05 düzeyinde önem bulmuştur. Ambalaj değişikliğinden kaynaklanan sertlik değerlerindeki farklılıkların, tüm zeytin örneklerinde tespit edilen sertlik değerlerine uygulanan varyasyon analizlerinde, her bir tuz seviyesi için p<0,05 düzeyinde önemli olduğu sonucuna da varılmıştır (Tablo 18).

Ambalaj değişikliğinden kaynaklanan sertlik değerlerindeki farklılıkların, çevirme ve salamura tekniğiyle işlenmiş zeytinlerin her iki grubu için de sadece tuz konsantrasyonu farklılığına bağlı olarak değerlerde istatistiksel olarak önemli değişimler meydana geldiği ve bu değişimlerin $p < 0,05$ düzeyinde önemli olduğu belirlenmiştir (Tablo 18). İşleme sürecinin zeytin eti üzerindeki etkileri incelendiğinde, öncelikle mekaniksel özelliklerin değiştiği görülmektedir. İşlenmiş zeytinlerde dokunun ham zeytinlere kıyasla 4-5 kat daha sert olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, sele tipi işleme yönteminin pektik polisakaritler üzerinde güçlü bir etkisi olduğu vurgulanmıştır [38]. Hücre duvarında bulunan polisakaritlerin olgunlaşma ve işleme sürecinde meyve eti dokusundaki değişimlerde önemli bir rol oynadığı ifade edilmektedir. İşleme süreci, özellikle zeytin etindeki pektik polisakaritlerin çözünürlüğünü artırarak doku sertliğinde azalmaya neden olmaktadır. Bu nedenle, işleme sürecinin zeytin meyve etinin dokusundaki değişimlere önemli katkı sağladığı belirtilmektedir [38]. Çalışmamızın sonuçları, her iki tuz miktarında da meyve sertliğinin değiştiğini göstermektedir. Fermantasyon sürecinin ardından, başlangıçtaki meyve sertliği değerlerine kıyasla bir azalma meydana gelmiştir. Bu azalmanın, daha sonra hafif su kaybıyla ve bekletme sürecinde tuzun dokudaki etkisiyle birlikte, dokunun korunduğu ve tekstürün geliştiği belirlenmiştir. Zaman içinde ise meyve etinde sertlik kaybının özellikle depolamanın sonuna doğru arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, Fadda ve ark. [39] ile Tassou ve ark. [40] tarafından belirtilen sonuçlarla uyumludur. Bu çalışmalarda da zamanla NaCl 'ün etkisiyle meyve tekstürünün geliştiği ancak pektik maddelerde meydana gelen bozunma ile birlikte sertlikte azalma olduğu bulguları ortaya konmuştur.

Tablo 17. Salamura zeytinlerde Sertlik değerleri (mN)

Tuz, (%)	Ambalaj / Işın	Analiz dönemleri									
		Ham	Fermente	Depolama Süresi (Ay)							
				1	2	3	4	5	6	7	8
2	V.0	18,06	14,82	16,24	16,15	15,52	14,8	14,5	14,62	14,69	14,48
	V.1	18,06	14,82	15,14	17,1	15,88	15,23	14,42	14,74	14,64	14,52
	V.3	18,06	14,82	15,87	15,33	14,73	14,89	14,31	14,85	14,71	14,79
	V.5	18,06	14,82	14,6	15,98	14,64	14,45	14,7	14,21	14,61	14,33
	MAP.0	18,06	14,82	15,12	15,37	15,42	14,88	15,3	14,86	15	14,7
	MAP.1	18,06	14,82	14,8	14,97	16,04	14,54	14,79	14,94	14,96	14,81
	MAP.3	18,06	14,82	15,49	15,74	15,29	15,1	14,55	14,52	14,51	14,23
	MAP.5	18,06	14,82	17,62	16,44	14,66	16,68	16,48	15,4	15,51	15,43
	4	V.0	18,06	14,64	18,18	18,49	17,21	16,93	15,34	14,91	14,68
V.1		18,06	14,64	16,66	17,96	16,41	15,53	15,26	14,98	14,89	14,72
V.3		18,06	14,64	17,73	17,94	16,65	16,37	15,69	15,16	14,8	14,98
V.5		18,06	14,64	17,54	15,64	16,81	15,88	15,7	15,1	15,14	15,01
MAP.0		18,06	14,64	16,67	17,21	15,1	15,33	15,31	14,48	14,63	14,59
MAP.1		18,06	14,64	15,93	17,41	16,23	15,99	15,17	14,59	14,62	14,47
MAP.3		18,06	14,64	15,26	17,18	15,69	15,09	15,06	14,97	14,77	14,77
MAP.5		18,06	14,64	16,58	17,65	14,92	15,14	14,9	14,66	14,86	14,71

Çevirme zeytin örneklerinde, %2 tuzlu MAP ambalajlı ürünler dışındaki gruplarda, ışın uygulanmayan veya düşük dozlarda ışın uygulanan örneklerde sertlik değerinin, yüksek dozda ışın uygulanan örneklerden daha yüksek düzeylerde olduğu belirlenmiştir (Tablo 16). Ancak, %2 tuzlu MAP ambalajlı ürünlerde, diğer gruplardan farklı olarak, ışın uygulamasının tersine bir etki gösterdiği ve sertlik değerini artırıcı bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir (Tablo 16). Tablo 17'ye göre, salamura zeytin örneklerinin %2 tuzlu vakum ambalajlı ürünlerinde, ışın uygulamasının veya uygulanan ışın dozunun sertlik değeri üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak, MAP ambalajlı ürünlerde, uygulanan doz miktarına bağlı olarak sertlik değerinde bir artışın gözlemlendiği tespit edilmiştir. %4 tuzlu salamura zeytinlerde ise, vakum ambalajlı ürünlerde ışın uygulamasının veya uygulanan ışın dozunun doz miktarına bağlı olarak sertlik değerini artırdığı, MAP ambalajlı ürünlerde ise azalttığı gözlemlenmiştir.

Elma dilimlerinde yapılan bir çalışmada, 0,34 kGy'nin üzerindeki ışın uygulamalarının sertlik üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [41]. Benzer şekilde, ıspanaklar üzerinde yapılan bir başka çalışmada, 4°C'de 7 gün depolama sonrasında sertliğin azaldığı gözlemlenmiştir [42]. Mango ve üzümü meyvelerde yapılan bir çalışmada ise 1,5 ve 3,1 kGy dozlarında ışın uygulamasının depolama süresinde sertlikte önemli bir azalmaya neden olduğu rapor edilmiştir [43]. Çalışmamızda da benzer şekilde, ışın miktarının sertlik üzerinde azaltıcı bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, bu etkinin oluşmasında zamanın ve depolamanın da etkisinin bulunabileceği düşünülmektedir.

Tablo 18. Sertlik değerlerinde istatistiki farkları önemli bulunan uygulamalar

Varyasyon kaynakları	Kareler toplamı	Ser. Der.	Kareler ortalaması	F	Önem
İşleme yöntemi	258,93	1	258,93	334,071	0,000
Tuz	120,854	1	120,854	155,925	0,000
Ambalaj	4,145	1	4,145	5,348	0,021
ZAMAN	1240,864	9	137,874	177,885	0,000
İşleme Yöntemi * Tuz	6,836	1	6,836	8,819	0,003
İşleme Yöntemi * ZAMAN	78,582	9	8,731	11,265	0,000
Tuz * Ambalaj	33,891	1	33,891	43,726	0,000
Tuz * Işın Dozu	11,337	3	3,779	4,876	0,002
Tuz * ZAMAN	82,81	9	9,201	11,871	0,000
Ambalaj * Işın Dozu	18,877	3	6,292	8,118	0,000
İşleme Yöntemi * Tuz * ZAMAN	46,86	9	5,207	6,718	0,000
Tuz * Ambalaj * Işın Dozu	12,133	3	4,044	5,218	0,001
Tuz * Ambalaj * ZAMAN	13,725	9	1,525	1,968	0,040
İşleme Yöntemi * Tuz * Ambalaj * Işın Dozu	9,844	3	3,281	4,234	0,006

İstatistiksel analizlerimiz, ışın uygulamasının ve uygulanan ışın dozlarının sertlik değeri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Tüm zeytin örneklerine ait sertlik değerlerine uygulanan varyans analizi sonuçlarına göre, ışın uygulaması ve uygulanan doz miktarlarına bağlı olarak sertlik değerlerinde gözlenen değişiklikler, her bir tuz seviyesi ve her bir ambalaj çeşidi için istatistiksel olarak ($p < 0,05$) anlamlıdır (Tablo 18). Duncan çoklu karşılaştırma analizi, ışın uygulaması yapılmayan gruplar ile farklı dozlarda ışın uygulanan gruplar arasında sertlik değeri üzerindeki etkileri karşılaştırmak için uygulanmıştır. Tablo 19'dan da görüldüğü üzere, ışın uygulaması yapılmayan örnekler ile farklı dozlarda ışın uygulanan örnekler arasında sertlik değerinde önemli farklılıklar belirlenmiştir. Özellikle, ışın uygulaması yapılmamış olan örnekler ile 3 kGy dozda ışın uygulanan örneklerin sertlik değerleri, 1 ve 5 kGy dozda ışın uygulanan örneklerden farklılık göstermiştir. Çevirme zeytinlerin %2 tuzlu MAP ambalajlı ürünlerinde, ışın uygulamasının sertlik değerini artırıcı, ancak diğer ürünlerde azaltıcı etkisi olduğu belirlenmiştir. Salamura zeytinlerin %2 tuzlu MAP ve %4 tuzlu vakum ambalajlı ürünlerinde ise ışın uygulamasının sertlik değerlerini artırıcı etkide olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmamızda kullanılan ışın dozlarının, çevirme ve salamura zeytinlerin her iki grubunda da sertlik değerine istatistiki anlamda önemli bir etki yarattığı görülmüştür. Bu bulgular, ışın uygulamasının ve uygulanan ışın dozu miktarının zeytinlerdeki sertlik değerini belirleyici yönde önemli bir faktör olduğunu düşündürmektedir.

Depolama süresi boyunca, zeytin işleme yöntemi, tuz konsantrasyonu, ambalajlama tekniği ve ışın uygulaması gibi faktörlerin varlığının, sertlik değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Araştırma bulguları, depolama sürecinin ilerleyen aylarında bu faktörlerin sertlik değerlerindeki değişimi belirlemede kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur (Tablo 16, 17). Depolama sürecinin sertlik değerlerini etkilediği istatistiksel olarak belirlenmiş ve bu etkinin zeytin örneklerinden elde edilen sertlik verileri için yapılan varyans analizi ile

$p < 0,05$ düzeyinde önemli olduğu saptanmıştır (Tablo 18). Zeytin örneklerinden elde edilen sertlik değeri verilerine dayanarak, depolama süresince gözlemlenen değişikliklerin her bir zeytin işleme yöntemi, her tuz konsantrasyonu ve her ambalaj çeşidi için farklılık gösterdiği belirlenmiş ve bu farklılıkların $p < 0,05$ düzeyinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur (Tablo 18). Depolama süresi ve 3 yıllık raf ömrü boyunca zeytinlerin başlangıçtaki sertlik değerlerine kıyasla %35 ila %52 arasında bir kayıp yaşandığı belirtilmektedir [44]. Siyah zeytinlerde yapılan çalışmalar, kabuktaki sertliğin salamura süresince arttığını ve tuz miktarının aslında meyve etinin sertliğini etkilemediğini, ancak salamura süresince 180 gün boyunca önemli bir azalma gözlemlendiğini göstermektedir [39, 40]. Bu bulgular, çalışmamızda da depolama süresi boyunca sertliğin azaldığına dair elde edilen bulgularla uyumludur.

Tablo 19. Sertlik değeri üzerinde etkili olan ışın uygulamaları

Işın Dozu	N	Subset	
		1	2
Duncana,b	3	320	
	5	320	
	1	320	
	0	320	
	Sig.		
		0,148	0,113

Homojen alt gruplarda grupların ortalaması gösterilmiştir. Hata kareler ortalaması=,775. a. Örneklem büyüklüğü= 320. b. Alfa= 0,05

IV. Sonuç

Sertlik ve renk, sofralık zeytinlerin tüketiciler tarafından satın alınma kararının verilmesinde etkili parametrelerdir. Araştırma sonuçlarına göre, işleme tekniklerinin sertlik, L^* , a^* ve b^* değerleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak işleme teknikleriyle beraber tuz miktarı, ambalaj tipi, ışın uygulaması ve depolamanın birlikte sofralık siyah zeytinlerin Sertlik, L^* , a^* ve b^* değerleri üzerinde etkilerinin önemli olduğu çalışmamızda tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM) desteği ile Zeytincilik Araştırma Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir. Bakanlığımıza ve TAGEM'e destekleri için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Tunaloğlu R (2009) Türkiye'de zeytincilik ve pazarlama politikaları: 2000-2010. Zeytin ve Zeytinyağı Sempozyumu, Yaşar Üniversitesi, İzmir, 29 Mayıs.
2. Gezerel Ö, Özgüven AI, Yılmaz C (2003) Çukurova koşullarına adapte olmuş bazı önemli zeytin çeşitlerinde periyodisite ile karbonhidrat, hormon ve bitki besin maddeleri arasındaki ilişkiler. Türkiye Tarımsal Araştırma Projesi, Proje No: Tübitak- Tarp-1990, Adana.
3. Irmak Ş (2015) Gemlik çeşidi sofralık siyah zeytinlerin muhafazasında yararlanılan farklı yöntemlerin raf ömrü ve kalite üzerine etkileri. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 451s.
4. Anonim (2024) www.uzzk.org. Erişim 4 Kasım 2013.
5. Garrido-Fernández A (2008) Revalorización Nutricional de la Aceituna de Mesa. II Jornadas Internacionales de la Aceituna de Mesa, Dos Hermanas, Sevilla, Spain. 26-27 March.
6. Fernandez AG, Diez MJF, Adams M (1997) Table olives: production and processing. Chapman&Hall, London ss 481.

7. Lanza B (2012) Nutritional and sensory quality of table olives. Olive germplasm—The olive cultivation, table olive and olive oil industry in Italy, 343-372.
8. Lanza B, Di Serio MG, Iannucci E (2013) Effects Of Maturation And Processing Technologies On Nutritional And Sensory Qualities Of Itrana Table Olives. *Grasas Y Aceites* 64 (3):272-284.
9. Jimenez A, Guillen R, Sanchez C, Fernandez-Bolanos J, Heredia A (1995) Changes in texture and cell wall polysaccharides of olive fruit during spanish green olive processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 43:2240-2246.
10. Şen F (2014) Meyve ve Sebze Depolanması ve İhracatında Kullanılan Modifiye Atmosfer Ambalajlarındaki Gelişmeler. http://ebiltem.ege.edu.tr/ABGida/sunumlar/Fatih_Sen.pdf. Erişim 28 Haziran 2014.
11. Gökten D (1990) Gıdaların Mikrobiyel Ekolojisi; Cilt 1 Et Mikrobiyolojisi. Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İzmir, Türkiye.
12. Ünlütürk A, Turantaş F (1998) Gıda mikrobiyolojisi. Mengi Tan Basımevi, İzmir, Türkiye.
13. Üçüncü M (2000) Gıdaların Ambalajlanması. Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
14. Anonim (2014) International Olive Council (IOC). www.internationalolivecouncil.org. Erişim 28 Haziran 2014.
15. Romero-Gil V, Bautista Gallego J, Rodriguez Gomez F, Garcia-Garcia P, Jimenez-Diaz R, Garrido-Fernandez, A, Arroyo-Lopez FN (2013) Evaluating the individual effects of temperature and salt on table olive related microorganisms. *Food Microbiol* 33:178-184.
16. Lawless A (2007) Food Irradiation, What's the big deal? *Food Regulation in the United States*, <http://www.gao.gov/new.items/rc00217.pdf>. Erişim 4 Kasım 2013.
17. Kume T, Fruta M, Todoriki S, Uenoyama N, Kobayashi Y (2009) Status of Food Irradiation in the World, *Radiation Phy and Chem* 78(3):222-226.
18. Anonim (2011) Türkiye Aşırı Tuz Tüketiminin Azaltılması Programı 2011-2015. T.C. Sağlık Bakanlığı Temel Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü Beslenme ve Fiziksel Aktiviteler Daire Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
19. Irmak Ş, Kadiroglu P, Ötles S (2017) Evaluation of olive preservation methods on bioactive constituents and antioxidant properties of olive oils. *Journal of American Oil Chemistry Society* 94(4):595-609. <https://doi.org/10.1007/s11746-017-2971-5>
20. Öztürk Güngör F (2010) Farklı yörelerde yetiştirilen gemlik zeytininden sofralık siyah zeytin elde edilmesi sırasında temel bileşenlerinde meydana gelen değişimler üzerine araştırmalar. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
21. Uylaşer V, Tamer C E, İncedayı B, Vural H, Çopur U (2008) The quantitative analysis of some quality criteria of Gemlik variety olives. *Journal of Food Agriculture and Environment* 6:26-30.
22. Anonim (2003) TS/774 Sofralık Zeytin Standardı. Türk Standartları Enstitüsü, Türkiye.
23. Uylaşer V, Başoğlu F (2000) Gıda analizleri I-II uygulama kılavuzu. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Uygulama Kılavuzu, Bursa, 9, ss 119.
24. Kutlu E, Şen F (2011) Farklı Hasat Zamanlarının Gemlik Zeytin (*Olea europea L.*) Çeşidinde Meyve ve Zeytinyağı Kalitesine Etkileri. *Ege Üniv Ziraat Fak Derg* 48(2):85-93.
25. Álvarez DME, López A, Lamarque AL (2014) Industrial improvement for naturally black olives production of Manzanilla and Arauco cultivars. *Journal of Food Processing and Preservation* 38(1):106-115.
26. Romeo FV, Piscopo A, Poiana M (2012) Effect of Drying, Chemical And Natural Processing Methods on Black Biancolilla Olives. *Grasas Y Aceites* 63(2):223-230.
27. Esti M, Cinquanta L, La Nott E (1998) Phenolic Compounds in Different Olive Varieties. *J Agric And Food Chemistry* 46:32-35.
28. Gazouli M, Kanavouras A, Tzouveleakis L, Petrakis C (2005) Evaluation of black table olives in different brines. *Grasas y aceites* 56(2):106-115.
29. Piscopo A, De Bruno A, Zappia A, Poiana M (2014) Antioxidant activity of dried green olives (Carolea cv.). *LWT-Food Science and Technology* 58(1):49-54.
30. Kusmider EA, Sebranek JG, Lonergan SM, Honeyman MS (2002) Effects of carbon monoxide packaging on color and lipid stability of irradiated ground beef. *Journal of Food Science* 67(9):3463-3468.
31. Wen HW, Chung HP, Chou FI, Lin IH, Hsieh PC (2006) Effect of gamma irradiation on microbial decontamination, and chemical and sensory characteristic of lycium fruit. *Radiation Physics and Chemistry* 75(5):596-603.
32. Verde SC, Trigo MJ, Sousa MB, Ferreira A, Ramos AC, Nunes I et al (2013) Effects of gamma radiation on raspberries: Safety and quality issues. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 76(4-5):291-303.
33. Pradas I, Del Pino B, Peña F, Ortiz V, Moreno-Rojas JM, Fernández-Hernández A, García-Mesa JA (2012) The use of high hydrostatic pressure (HHP) treatments for table olives preservation. *Innovative food science & emerging technologies* 13:64-68.

34. Toker C, Aksoy U (2013) Kuzey Ege agroekolojik şartlarında yetişen Ayvalık çeşidi zeytin meyvesinin kalite özellikleri. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi* 8(3):51-57.
35. Gümüšoğlu G (2005) Seçilmiş Zeytin Çeşitlerinin Mekanik Hasadına Yönelik Bazı Özelliklerin Saptanması, Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana, Türkiye.
36. Li J, Song W, Margaret Barth M, Zhuang H, Zhang W, Zhang L, Wang L, Lu W, Wang Z, Han X, Li Q (2015) Effect of modified atmosphere packaging (MAP) on the quality of sea buckthorn berry fruits during postharvest storage. *Journal of Food Quality* 38(1):13-20.
37. Chanloy N, Uthairatanakij ., Jitareera, P, Photchanachai S, Vongcheeree S (2005) Effects of irradiation doses on ripening process of ‘Kluai Khai’banana International Symposium “New Frontier of Irradiated food and Non-Food Products” September 22-23. Bangkok, Thailand.
38. Cardoso SM, Mafra I, Reis A, Georget DM, Smith AC, Waldron KW, Coimbra MA (2008) Effect of dry-salt processing on the textural properties and cell wall polysaccharides of cv. Thasos black olives. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88(12):2079-2086.
39. Fadda C, Del Caro A, Sanguinetti AM, Piga A (2014) Texture and antioxidant evolution of naturally green table olives as affected by different sodium chloride brine concentrations. *Grasas y Aceites*, 65(1), e002.
40. Tassou CC, Katsaboxakis CZ, Georget DM, Parker ML, Waldron KW, Smith AC, Panagou EZ (2007) Effect of calcium chloride on mechanical properties and microbiological characteristics of cv. Conservolea naturally black olives fermented at different sodium chloride levels. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87(6):1123-1131.
41. Gunes G, Hotchkiss JH, Watkins CB (2001) Effects of gamma irradiation on the texture of minimally processed apple slices. *Journal of food science* 66(1):63-67.
42. Fan X, Sokorai KJ (2011) Changes in quality, liking, and purchase intent of irradiated fresh-cut spinach during storage. *Journal of food science* 76(6):S363-S368.
43. Moreno Tinjaca MA (2007) Effect of electron beam irradiation on quality and shelf-life of Tommy Atkins mango (*Mangifera indica* L.) and blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). Doctoral dissertation, Texas A&M University.
44. Sánchez-Gómez AH, García-García P, Garrido Fernández A (2013) Spanish-style green table olive shelf-life. *International Journal of Food Science and Technology* 48(8):1559-1568.



Araştırma Makalesi

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Yüksek performanslı betonun basınç dayanımının farklı makine öğrenimi algoritmaları ile tahmin edilmesi

Muhammet Gökhan Altun^a, Ahmet Hakan Altun^b

^aÇanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Çanakkale, 17100, Türkiye.

^bBursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Bursa, 16059, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Eylül 2024

Düzeltilme 20 Aralık 2024

Kabul 20 Ocak 2025

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Beton

Basınç dayanımı

Makine öğrenimi

ÖZET

Betonun basınç dayanımı, beton bileşenlerinin miktarları ve özellikleri, yaşı, ortam koşulları, deneysel koşullar gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla makine öğrenimi algoritmaları alternatif bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yüksek performanslı betonun basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla 1030 satırlık açık veri seti üzerinde altı farklı makine öğrenimi modeli kullanılmıştır. Ayrıca mevcut veri setine türetilen yeni öznitelikler ilave edilerek betonun basınç dayanımını tahmin etme süreçlerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda yeni özniteliklerin algoritmaların performansına olan katkısı değerlendirilmiş ve hangi algoritmaların en iyi sonuçları verdiği analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre doğru tahmin etme yeteneği ve süre açısından en iyi sonucu XGBoost ve LightGBM algoritmaları göstermiştir. Buna ilaveten, veri setine iki yeni öznitelik daha eklenmesi kullanılan makine öğrenimi algoritmalarının doğru tahmin etme yeteneğini arttırmıştır.

Prediction of high performance concrete compressive strength with different machine learning algorithms

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 Sep 2024

Received in revised form 20 Dec 2024

Accepted 20 Jan 2025

Available online

Keywords:

Concrete

Compressive strength

Machine learning

ABSTRACT

Compressive strength of concrete is influenced by various factors including the amount and properties of concrete components, age, environmental conditions and experimental conditions. Machine learning algorithms are emerging as an alternative method for determining the compressive strength of concrete which is one of its most critical properties. In this study six different machine learning models were employed to predict the compressive strength of high-performance concrete using an open dataset of 1030 samples. Additionally the impact of incorporating newly derived features into the existing dataset on the prediction process was examined. The contribution of these new features to the performance of the algorithms was evaluated and the algorithms yielding the best results were analyzed. According to the results XGBoost and LightGBM demonstrated the best performance in terms of prediction accuracy and computational efficiency. Moreover, adding two new features to the dataset improved the predictive accuracy of the employed machine learning algorithms.

I. GİRİŞ

Dünya’da ve ülkemizde en çok kullanılan yapı malzemesi olan beton, temelde çimento, su, iri ve ince agregadan oluşmaktadır. Binalar, köprüler, barajlar, yollar, altyapı sistemleri başta olmak üzere hemen hemen her yapıda kullanılabilir. Betonun diğer yapı malzemelerine kıyasla bu kadar popüler olması, sahip olduğu birçok avantajdan kaynaklanmaktadır. Mukavemetinin yüksek olması, yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı olması, zararlı

çevresel etkilere karşı dayanıklı olması ve ekonomik olması en önemli avantajları arasındadır [1, 2]. Öte yandan betonun tasarımı değiştirilerek veya farklı malzemeler ilave edilerek betonun birçok özelliği geliştirilebilmekte veya ihtiyaca yönelik özel betonlar üretilebilmektedir. Tek tip iri agrega tane çapı kullanılarak ve boşluk oranı yüksek tutularak geçirimli beton üretilebilmekte [3], çökme değeri sıfır olacak şekilde tasarım yapılarak silindir ile sıkıştırılabilen beton üretilebilmektedir [4]. Su azaltıcı katkının kullanımı ile sabit su/bağlayıcı oranında daha yüksek işlenebilirlik sağlanarak yüksek dayanımlı beton [5] ve kendiliğinden yerleşen beton [6] üretilebilmektedir. Öte yandan sürdürülebilir beton üretmek amacıyla uçucu kül, silis dumanı, cüruf gibi alternatif malzemeler çimento ile ikame edilmektedir. Söz konusu malzemeler betonun dayanımı, dayanıklılığı ve işlenebilirliği gibi bazı özelliklerini geliştirmektedir. Küresel CO₂ emisyonunun %5-7'sini oluşturan çimento endüstrisinde sağlanacak her bir tasarruf ekonomik avantajın yanında çevresel açıdan da önemli katkı sağlamaktadır [1, 7-9]. Ayrıca çeşitli lifler kullanılarak betonun dayanımı, tokluğu, darbe direnci gibi birçok mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir [10, 11].

Oldukça geniş kullanım alanına sahip beton teknolojisi gerek yeni malzemelerin geliştirilmesi gerekse farklı tekniklerin uygulanması ile her geçen gün gelişmeye ve genişlemeye devam etmektedir. Beton gibi karmaşık bir malzemenin özelliklerini belirlemek, bileşenleri ve çevresel koşullar başta olmak üzere tüm parametreler ve bunlar arasındaki etkileşimleri anlamak amacıyla doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon, genetik programlama gibi farklı matematiksel modelleme teknikleri ile yüksek performans sergileyen farklı yapay zeka modelleri geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan yapay zeka modelleri, bir sistemdeki girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki karmaşık ilişkileri düşük hata oranlarında belirleyebilmektedir [12, 13].

Yeh [14] tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımları regresyon analizi ve yapay sinir ağları (ANN) ile modellenmiştir. ANN ile yapılan modelin çok daha kesin sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan veriseti UCI Machine Learning Repository' de açık veri olarak yayınlanmaktadır. Aynı veriseti kullanılarak Nguyen-Sy ve diğ. [15] tarafından yapılan çalışmada, basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla ANN haricinde destek vektör makineleri (SVM) ve aşırı gradyan artırma (XGB) makine öğrenimi modelleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, XGB metodunda eğitirken geçen sürenin daha az, doğru tahminlerin ise daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yine aynı veriseti kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada, Nguyen ve diğ. [2] SVM, XGB, çok katmanlı algılayıcılar (MLP) ve gradyan artırma regresörü (GBR) modellerini kullanmış olup GBR ve XGB modellerinin daha iyi performans sergilediğini ifade etmişlerdir. Yörübulut ve diğ. [16] tarafından yapılan çalışmada, tahribatlı (karot) ve tahribatsız yöntemler (beton test çekici ve ultrasonik test cihazı) aracılığıyla veriler temin edilmiştir. Tahribatsız yöntemle temin edilen veriler kullanılarak ANN ve regresyon analizi ile betonun basınç dayanımı tahmin edilmiş ve karot numunelerinin basınç dayanımları ile oldukça benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Topçu ve diğ. [17] tarafından yapılan çalışmada, çelik gömülü uçucu kül içeren beton numunelere korozyon akımları verilerek veri kaydedici yardımıyla beş dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Korozyon akımları ANN kullanılarak modellenmiş, elde edilen sonuçlar ortalama karekök hata, ortalama mutlak yüzde hata ve korelasyon katsayısı kriterleri açısından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak ANN kullanılarak doğru modelleme sonuçlarının elde edilebileceği ifade edilmiştir. Boğa ve diğ. [18] tarafından yapılan çalışmada ise, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve kalsiyum nitrit bazlı korozyon önleyici kullanımının betonun mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen veriler ANN ve uygulamalı sinirsel bulanık çıkarım

sistemi (ANFIS) yöntemleri kullanılarak eğitilmiştir. Yöntemler, her parametre için diğer 42 numune ile test edilmiştir. Üretilen betonlarda kür sürelerinin uzatılması ve hava kürü yerine su kürü uygulanması betonun mekanik özelliklerinde ve klorür iyonu geçirgenliğinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. Ayrıca deneysel verilerin ANN ve ANFIS modelleri aracılığıyla oldukça yakın bir ölçüde tahmin edilebileceği belirlenmiştir. Ofuyatan ve diğ. [19] tarafından yapılan çalışmada, silis dumanı ve polietilen tereftalat (PET) plastik atık kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özellikleri tepki yüzeyi metodolojisi (RSM) ve ANN (Levenberge-Marquardt) modelleri ile tahmin edilmiştir. Hammoudi ve diğ. [20] tarafından yapılan çalışmada ise geri kazanılmış iri agrega içeren betonların 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları ANN ve RSM modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Her iki çalışmada da ANN modelinin RSM modeline kıyasla daha doğru tahminlerde bulunduğu bildirilmiştir.

Açıkgenç ve diğ. [21] tarafından yapılan çalışmada, çelik lifli betonun karışım oranlarını tahmin etmek amacıyla literatürden toplanan veriler kullanılarak ANN modeli geliştirilmiştir. Model altı girdi ve beş çıktıdan oluşmaktadır. Dayanım, kıvam sınıfı, maksimum agrega tane çapı, çelik lif kullanım oranı, çelik lif uzunluğu ve çelik lif çapı girdileri oluştururken, çimento dozajı, su miktarı, iri agrega miktarı, ince agrega miktarı ve kimyasal katkı miktarı ise çıktıları oluşturmaktadır. Sonuç olarak, ANN'nin çelik lifli betonların karışım oranlarını tahmin etmede güçlü bir potansiyele sahip olduğu, deneme karışımları ve zaman kaybı olmadan, istenen işlenebilirlik ve mekanik özelliklere sahip bir tasarımın mümkün olduğu ifade edilmiştir. Hossain ve diğ. [22] tarafından yapılan çalışmada, ultra yüksek çelik lifli betonun basınç dayanımı ANN ile tahmin edilmiştir. Veri seti %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test kümesi olmak üzere üçe ayrılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bu yöntemin basınç dayanımı tahmininde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Köksal ve diğ. [23] tarafından yapılan çalışmada ise çelik lifli betonda bulanık mantık çıkarım sistemi kullanılmış olup tahmin yeteneği yüksek bu yöntemin alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Özetle, geleneksel veya özel betonlarda kullanılan malzemeler ile betonun dayanımı ve dayanıklılığı arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla çeşitli istatistiksel yöntemler ve yapay zeka modelleri kullanılmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmalarda laboratuvar koşullarında üretilen, literatürden derlenen veya açık veri olarak yayımlanan verisetleri kullanılmaktadır. Doğru tahmin yeteneği en yüksek ve hata oranı en düşük modeli belirlemek amacıyla çeşitli yapay zeka ve makine öğrenimi modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Yeh [14] tarafından yayınlanmış veri seti kullanılmıştır. Aynı veri setinin kullanıldığı çalışmalardan farklı olarak hem çeşitli algoritmalar kullanılmış hem de veri setindeki özniteliklere ilave yeni öznitelikler türetilerek tahminlemedeki etkisi belirlenmiş ve literatürdeki diğer çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında, rastgele orman (RF), destek vektör regresörü (SVR), XGBoost, adaptif arttırma (AdaBoost), kategorik arttırma (CatBoost) ve hafif gradyan arttırma (LightGBM) olmak üzere altı farklı makine öğrenimi modeli kullanılmıştır.

II. METODOLOJİ

Çalışma kapsamında eğitim ve değerlendirme süreçleri Google Colab platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Colab çeşitli makine öğrenimi ve veri analizi görevleri için sunucu tabanlı bir ortam sağlayarak kullanıcıların merkezi işlemci birimi (CPU), grafik işlemci birimi (GPU) ve tensör işlemci birimi (TPU) kaynaklarına erişimini sağlamaktadır. Bu çalışmada Google Colab'in sağladığı sanal makinelerde kullanılan CPU tercih edilmiştir. Programlama dili olarak Python kullanılmıştır. Veri analizi iki farklı senaryo için gerçekleştirilmiştir. İlk

senaryoda Yeh [14] tarafından yayımlanan 8 girdi ve 1 çıktıdan oluşan veri seti kullanılmıştır. İkinci seneryoda iki farklı öznitelik daha ilave edilerek girdi sayısı 10'a çıkartılmıştır. Her iki durum için de 6 farklı makine öğrenimi algoritması kullanılarak tahminleme yapılmıştır.

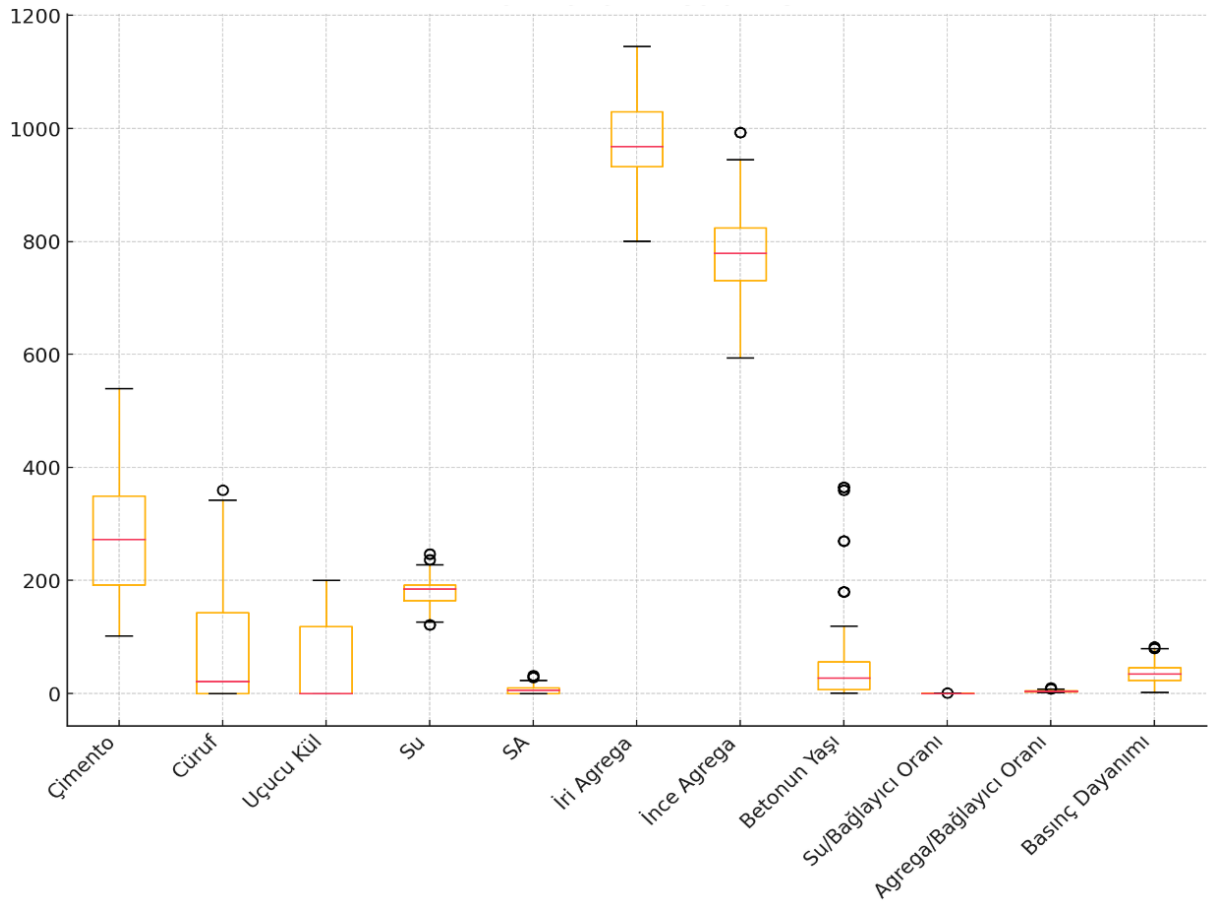
Çalışmada veriyi anlamlandırmak amacıyla ilk olarak istatistiksel veri analizi yapılmıştır. Ardından veriler standartlaştırılarak eğitim ve test kümesi olarak ikiye ayrılmıştır. Eğitim kümesi olarak belirlenen toplam verinin %80'i makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak eğitilmiştir. Eğitilen modellerle test kümesi (%20) verileri tahmin edilmiştir. Makine öğrenimi modellerini, verileri eğitmek için kullanmadan önce ön işleme yapılmıştır. Öznitelikler tek tip bir ölçekte olmadığından, eğitim sürecinde bir veya birkaç özelliğin etkisinin fazla olmasını önlemek için standartlaştırma işlemi uygulanmıştır. Bu bağlamda, eğitimden önce öznitelikler ortalama 0 ve standart sapma 1 olacak şekilde standartlaştırılmıştır. Bu işlem verilerin her bir özelliğinin kendi ortalamasından sapmalarını ve standart sapma cinsinden değişimlerini dikkate alarak daha dengeli ve etkili bir eğitim süreci sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Modeller normalleştirilmiş veriler kullanılarak eğitildikten sonra, çıktı özelliklerinin tahmine dayalı sonuçları, test aşamasında orijinal ölçüğe geri döndürülmüştür [2, 13].

2.1 Veri Seti ve İstatistiksel Analiz

Bu çalışmada, Yeh [14] tarafından yayınlanmış, UCI Machine Learning Repository'den alınan veri seti kullanılmıştır. Veri seti betonun basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla çeşitli öznitelikleri içeren toplam 1030 satırdan oluşmaktadır. Her bir satır beton karışımının bileşenlerini ve betonun yaşını temsil eden sekiz temel özniteliği içermektedir. Bu öznitelikler çimento miktarı, cüruf miktarı, uçucu kül miktarı, su miktarı, süper akışkanlaştırıcı (SA) miktarı, iri agrega miktarı, ince agrega miktarı ve betonun yaşıdır. Beton karışım hesapları yapılırken içerisinde kullanılan bileşenlerin miktarlarına ilaveten su/bağlayıcı oranı ve agrega/bağlayıcı oranı da doğrudan dikkate alınan parametrelerdendir. Bundan dolayı veri setine mevcut öznitelikler kullanılarak hesaplanan ve betonun dayanımı ile doğrudan ilişkili olan su/bağlayıcı oranı ve agrega/bağlayıcı oranı olmak üzere iki yeni öznitelik daha eklenmiştir. Su/bağlayıcı oranı beton basınç dayanımı ile ters orantılı olup su miktarı arttıkça betonun dayanımı düşmektedir. Buna ilaveten agrega, bağlayıcı gibi beton bileşenlerinin miktarları ve birbirlerine oranları da betonun dayanımını önemli ölçüde etkileyen parametrelerdendir [24-26]. Su/bağlayıcı oranı, beton karışımındaki su miktarının bağlayıcı malzemelere (çimento, cüruf ve uçucu kül) oranını, agrega/bağlayıcı oranı ise, toplam agreganın (iri ve ince agrega) bağlayıcı malzemelere oranını ifade etmektedir. Bu ilave öznitelikler beton karışımlarının performansını daha hassas bir şekilde değerlendirmeyi mümkün kılmakta ve basınç dayanımını etkileyen faktörlere dair daha derinlemesine analizler yapma olanağı sağlamaktadır.

Veri setini eğitmeden önce kullanılacak verileri daha iyi anlamak ve analiz etmek amacıyla istatistiksel analiz yapılmıştır. Verilere ait istatistiksel dağılım ve aykırı değerler Şekil 1'de, verilerin minimum, maksimum, ortalama, standart sapma ve varyans değerleri ise Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'den görüldüğü üzere bileşenler ağırlıkça kullanılmış olup veri setinde çimento miktarı 102-540 kg/m³, cüruf miktarı 0-359 kg/m³, uçucu kül miktarı 0-200 kg/m³, su miktarı 122-247 kg/m³, süper akışkanlaştırıcı miktarı 0-32 kg/m³, iri agrega miktarı 801-1145 kg/m³, ince agrega miktarı 594-993 kg/m³, betonun yaşı 1-365 gün, su/bağlayıcı oranı 0,24-0,90 ve agrega/bağlayıcı oranı 2,38-9,85 aralığındadır. Söz konusu bileşenler kullanılarak hazırlanan karışımların basınç dayanımları 2-83 MPa aralığındadır.

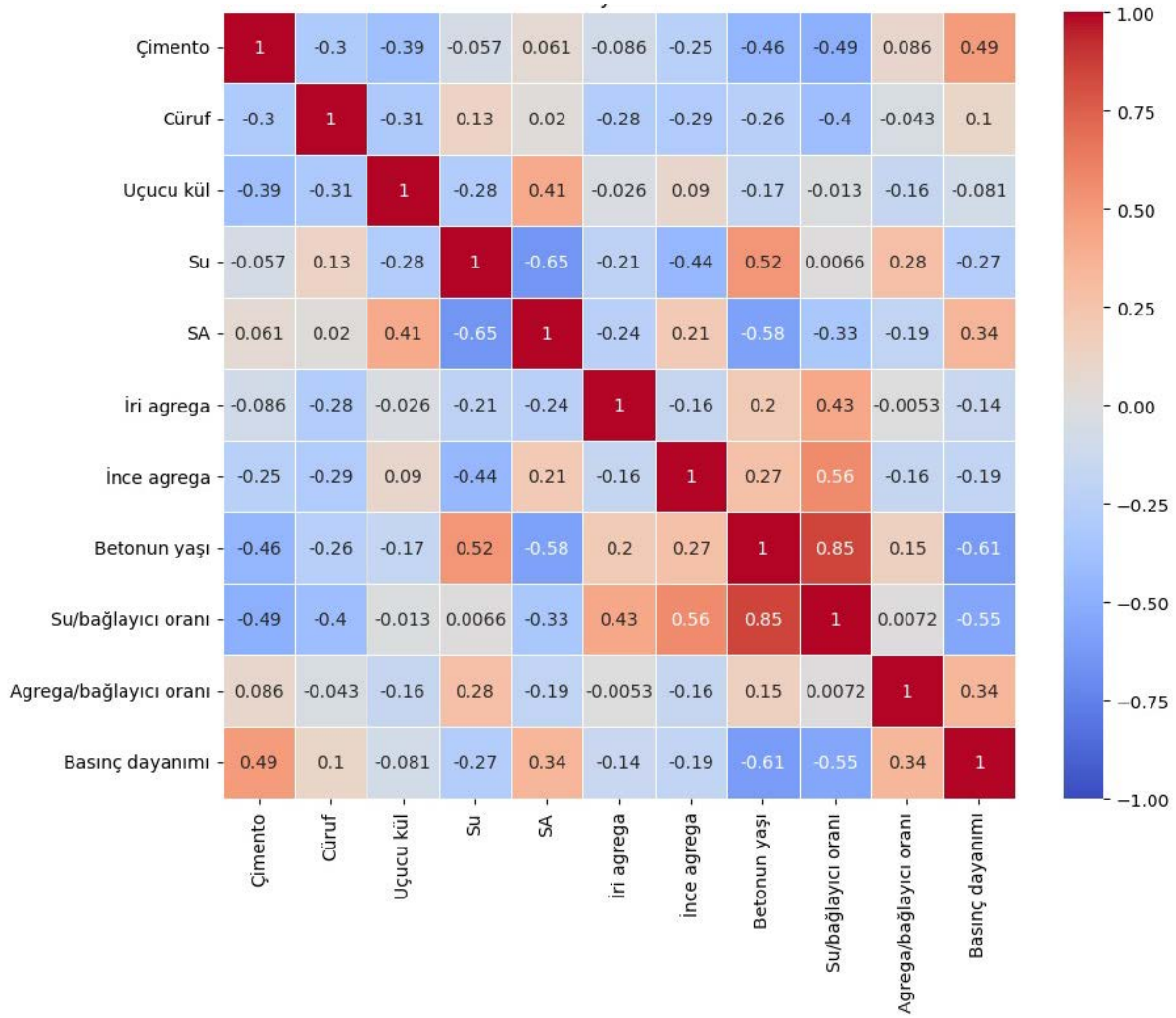
Veri setindeki tüm girdi ve çıktılar arasındaki ilişkileri daha iyi anlamak amacıyla özelliklerin korelasyonları analiz edilmektedir. Böylece bir özelliikle diğerleri arasındaki ilişki gözlemlenebilmekte ve kullanılacak tahmin modeli için fayda sağlanabilmektedir. Korelasyon katsayısı 0'a yaklaştıkça özellik çiftleri arasındaki ilişki zayıflamakta, -1 veya 1'e yaklaştığında ise güçlenmektedir. Diğer bir ifadeyle 0 değeri ilişkinin olmadığını, 1 değeri mükemmel derecede bir korelasyon olduğunu, -1 ise mükemmel derecede negatif bir korelasyon olduğunu göstermektedir [15, 27]. Örneğin su/bağlayıcı oranı ile betonun basınç dayanımı arasında ters orantılı bir ilişki söz konusudur. Karışımdaki su miktarı arttıkça betonun basınç dayanımı düşmektedir [24-26]. Betonun basınç dayanımı ile çimento miktarı arasında ise paralel bir ilişki söz konusudur. Karışımdaki çimento miktarı arttıkça sabit işlenebilirlikte betonun basınç dayanımı artmaktadır [24-26]. Veri setine ait korelasyon matrisi (ısı haritası) Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Verilerin istatistiksel dağılımı ve aykırı değerler

Tablo 1. Veri setine ait istatistiksel detaylar

Öznitelik	Tanım	Min	Mak	Ortalama	Standart sapma	Varyans
Çimento (kg/m ³)	Girdi	102	540	279	104	10888
Cüruf (kg/m ³)	Girdi	0	359	72	86	7425
Uçucu kül (kg/m ³)	Girdi	0	200	56	64	4123
Su (kg/m ³)	Girdi	122	247	182	21	455
SA (kg/m ³)	Girdi	0	32	6	6	35
İri agregat (kg/m ³)	Girdi	801	1145	974	78	6019
İnce agregat (kg/m ³)	Girdi	594	993	773	80	6454
Betonun yaşı (gün)	Girdi	1	365	46	64	4062
Su/bağlayıcı oranı	Girdi	0,24	0,90	0,47	0,13	0,02
Agregat/bağlayıcı oranı	Girdi	2,38	9,85	4,56	1,23	1,52
Basınç dayanımı (MPa)	Çıktı	2	83	35	16	264



Şekil 2. Korelasyon matrisi (ısı haritası)

2.2 Makine Öğrenimi Algoritmaları

Bu çalışmada, betonun basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla çeşitli makine öğrenimi algoritmaları kullanılmıştır. Sırasıyla her bir algoritmanın temel prensipleri ve uygulama detayları bu bölümde özetlenmiştir. SVR, veriyi en iyi şekilde modellemek için bir hiper düzlem bulmayı amaçlar. SVR hata terimlerini belirli bir eşğin altında tutarak modelin genelleme kapasitesini artırır. Bu çalışmada SVR'nin C ve ϵ hiperparametreleri kullanılarak çeşitli kombinasyonları test edilmiştir. Kernel fonksiyonu olarak lineer, polinomial ve Radial Basis Function (RBF) kernel seçenekleri değerlendirilmiştir [28, 29]. RF, birçok karar ağacının bir araya gelerek tahminlerde bulunmasını sağlayan bir topluluk yöntemidir. Her bir ağaç, eğitim veri setinin rastgele bir alt kümesi üzerinde eğitim alır ve final tahmini ağaçların tahminlerinin ortalaması veya çoğunluk oyuyla belirlenir. Bu yöntem modelin aşırı uyum riskini azaltır ve genellikle yüksek performans sağlar. Bu çalışmada farklı ağaç sayısı ve maksimum derinlik parametreleri ile modelin performansı değerlendirilmiştir [30]. XGBoost, yüksek performanslı bir gradyan artırma yöntemidir. XGBoost karar ağaçlarını ardışık olarak inşa ederken her bir ağacın önceki ağaçların hatalarını düzeltmesini sağlar. Bu yöntem hem doğruluk hem de hesaplama verimliliği açısından güçlüdür. Modelde öğrenme oranı, maksimum derinlik ve ağaç sayısı gibi hiperparametrelerin farklı kombinasyonları test edilmiştir [31, 32]. AdaBoost, zayıf öğrenicileri bir araya getirerek güçlü bir tahminci oluşturur. AdaBoost her bir zayıf öğrenicinin önceki öğrenicilerin hatalarını düzeltmeye odaklanmasını sağlar. Bu

çalışmada AdaBoost'un temel sınıflayıcı olarak karar ağaçları kullanarak model performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca öğrenme oranı ve ağaç sayısı gibi hiperparametrelerin etkileri incelenmiştir [33, 34]. CatBoost, kategorik verilerle başa çıkma yeteneği ile bilinen bir gradyan artırma algoritmasıdır. CatBoost verileri kategorik özelliklerle en iyi şekilde işlemek için özel bir kodlama yöntemine sahiptir ve aşırı uyumu önlemek için çeşitli teknikler kullanır. CatBoost temel olarak sınıflandırma görevleri için geliştirilmiş olsa da gradyan artırma tabanlı yapısı sayesinde regresyon problemlerinde de etkili bir şekilde kullanılabilir. Bu çalışmada CatBoost'un öğrenme oranı, maksimum derinlik ve ağaç sayısı gibi hiperparametreleri ile modelin performansı gözlemlenmiştir [35, 36]. LightGBM, büyük veri setleriyle verimli ve hızlı çalışabilen bir gradyan artırma algoritmasıdır. LightGBM ağaçları histogram tabanlı bir yaklaşım kullanarak inşa etmekte ve bu sayede hem eğitim süresini kısaltmakta hem de bellek kullanımını optimize etmektedir [37, 38].

2.3 Değerlendirme Metrikleri

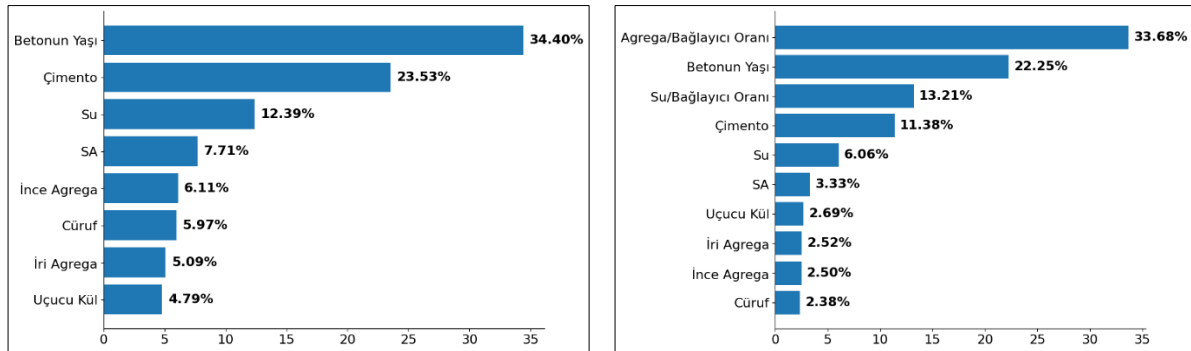
Çalışmada kullanılan makine öğrenimi algoritmalarının performanslarını değerlendirmek amacıyla doğrusal korelasyon katsayısı (R2), ortalama kare hata (MSE), ortalama karekök hatası (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) metrikleri dikkate alınmıştır.

R2 değeri, modelin açıklama gücünü ölçen bir metriktir ve modelin hedef değişkenin varyansını ne kadar iyi açıkladığını belirtmektedir. Diğer bir ifade ile modelin veriye ne kadar iyi uyum sağladığının bir ölçüsüdür. Model performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır. MSE değeri, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasıdır. Modelin tahminlerindeki ortalama hata karelerini ve hataların büyüklüğünü ölçmek için kullanılmaktadır. RMSE değeri, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının kareköküdür. Tahminlerin ne kadar iyi olduğunu değerlendirmek için yaygın olarak kullanmakta ve modelin ortalama hata boyutunu standart bir birimde sunmaktadır. MAE değeri, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasıdır. Modelin tahminlerindeki ortalama mutlak hatayı ölçmekte ve her hata miktarını eşit şekilde değerlendirmektedir. MAPE değeri, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki mutlak yüzdelik farkların ortalamasıdır. R2 değerinin 1'e yakın olması modelin doğru tahmin yeteneğinin yüksek olduğu ifade etmektedir. Buna ilaveten MSE, RMSE, MAE ve MAPE hata değerlerinin düşük olması da daha iyi tahmin eden modele ulaşıldığını göstermektedir. Diğer bir ifade ile R2 ne kadar 1'e yakınsa ve MSE, RMSE, MAE ve MAPE hata oranları ne kadar düşükse kullanılan modelin tahmini o kadar iyidir [13, 39, 40].

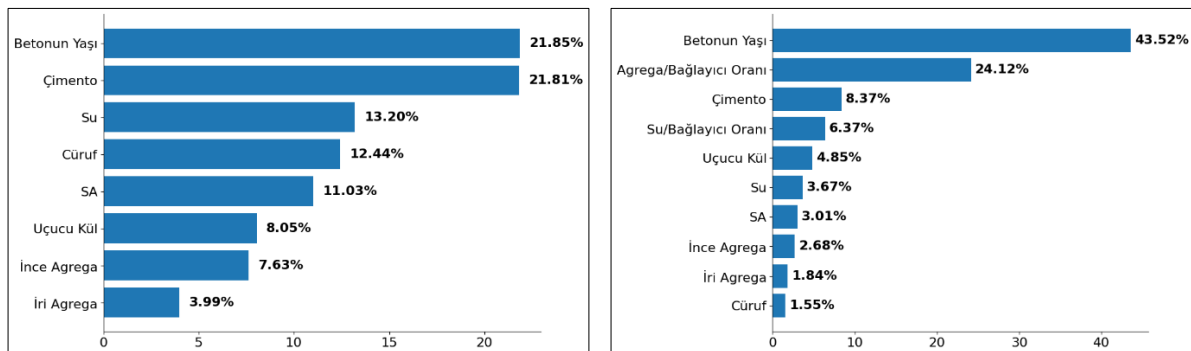
III. ANALİZ SONUÇLARI

Yüksek performanslı betonun basınç dayanımı, beton bileşenlerinden ve betonun yaşından oluşan veri seti kullanılarak farklı makine öğrenimi modelleri (RF, SVR, XGBoost, CatBoost, AdaBoost ve LightGBM) yardımıyla tahmin edilmiştir. Şekil 3-7'da sırasıyla her iki senaryo için de RF, XGBoost, CatBoost, AdaBoost ve LightGBM modellerine ait öznitelik önem grafikleri verilmiştir. Bu grafikler bir öznitelik modelin tahminleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Öznitelik öneminin belirlenmesi, ağaç tabanlı yöntemlerde her bir düğümdeki bölünme iyileştirmelerinin ağırlıklı toplamını alarak ve bu toplamları tüm ağaçlar üzerinde ortalayarak yapılır. Bölünme iyileştirmesi, ağaç tabanlı yöntemlerde bir düğümde yapılan bölünmenin modelin tahmin performansına olan katkısını ölçen bir metriktir. Bu süreç her bir düğümdeki bölünme iyileştirmelerinin hesaplanmasını ve bu

iyileştirmelerin özelliklere göre toplanmasını içermektedir. Özellikle her bir düğümdeki bölünme iyileştirmesi düğümdeki safsızlık azalmasının ağırlıklı toplamı olarak hesaplanmaktadır. Bu iyileştirmeler tüm ağaçlar üzerinde ortalanarak her bir özelliğin önem skoru elde edilmektedir. Bu yöntem özneliklerin gerçek tahmin gücünü daha doğru bir şekilde yansıtmakta ve yanlışlığı azaltmaktadır [41]. Mevcut veri setinin kullanıldığı ilk senaryoda RF, XGBoost, CatBoost ve AdaBoost modellerinde ilk sıralarda betonun yaşı ve çimento yer alırken, LightGBM modelinde ise iri agrega ve çimento ilk sıralarda yer almıştır. Mevcut veri setine iki yeni özneliğin eklendiği ikinci senaryoda ise eklenen yeni öznelikler tüm modellerde üst sıralarda yer almıştır. Agregabağlayıcı oranı RF ve CatBoost modellerinde ilk sırada, XGBoost ve AdaBoost modellerinde ikinci sırada, LightGBM modelinde ise üçüncü sırada yer almıştır. Genel olarak grafiklerden su/bağlayıcı oranı ve agrega/bağlayıcı oranının tüm modellerde önemli bir role sahip olduğu anlaşılmaktadır. SVR modelinde ise doğrudan öznelik önemi skorlarını desteklemediği için grafiği çizdirilememiştir. Özneliklerin önemini dolaylı yoldan değerlendirmek amacıyla Recursive Feature Elimination (RFE) yöntemi kullanılmıştır. RFE, genellikle lineer kernel ile çalışan modellerde daha etkili sonuçlar verir. SVR modelinin kernel fonksiyonu GridSearchCV ile optimize edilirken en iyi sonuç rbf kernel ile elde edilmiştir. Bu nedenle, bu yöntem kullanılamamıştır [42].



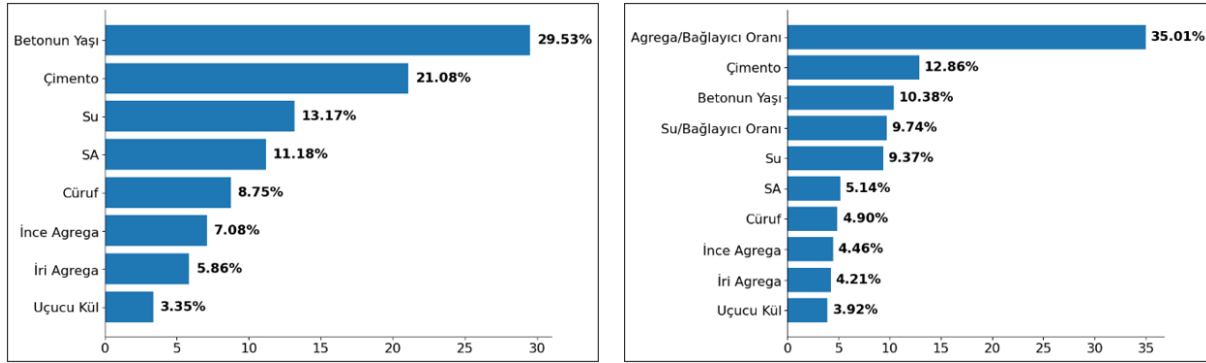
Şekil 3. RF modeline ait öznelik önem grafikleri



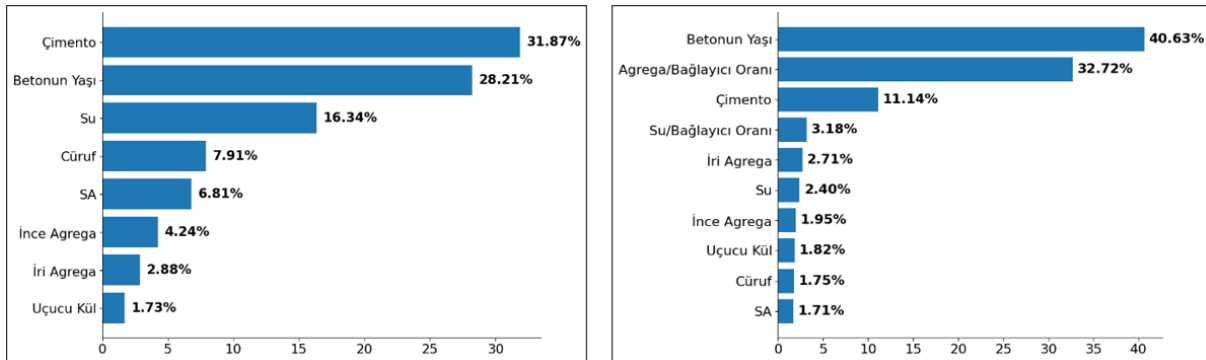
Şekil 4. XGBoost modeline ait öznelik önem grafikleri

Her iki senaryo üzerinde altı farklı makine öğrenimi algoritmasının regresyon sonuçları Şekil 8-13'te gösterilmiştir. Şekillerdeki her bir grafik ilgili algoritmanın tahmin ettiği değerlerin gerçek değerlere göre dağılımını göstermektedir. Grafiklere bakıldığında tüm algoritmaların tahmin değerleri gerçek değerlere yakın bir

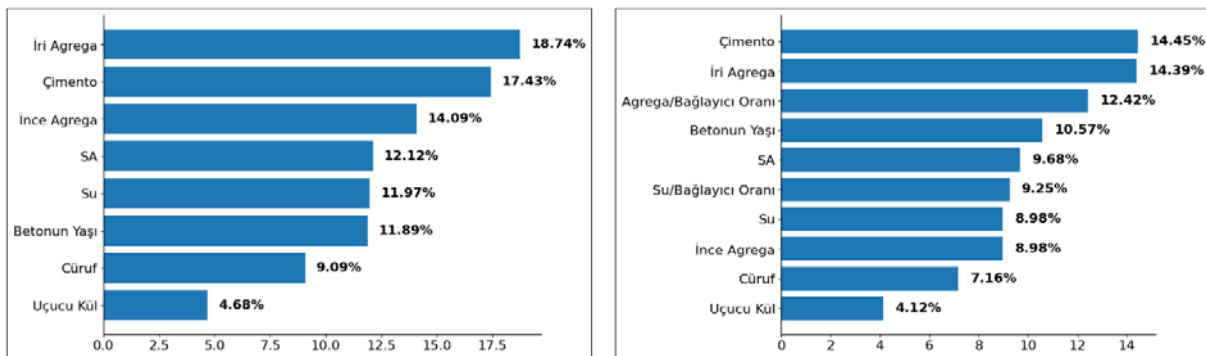
dağılım göstermektedir. Ancak XGBoost ve LightGBM algoritmaları diğer algoritmalara göre daha sıkı bir dağılım sergileyerek gerçek değerlere daha yakın tahminler üretmiştir. Özellikle bu iki algoritmada veri noktalarının büyük bir kısmı $x=y$ doğrusuna oldukça yakın bir konumda yer almaktadır. İkinci senaryolardaki dağılımlar incelendiğinde tüm modellerde ilk senaryoya göre aykırı değerlerde ufakta olsa azalmalar gözlemlenmiştir. Diğer bir ifadeyle yeni özneliklerin eklenmesi ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum bu algoritmaların modelin karmaşık yapısını daha iyi yakaladığını ve dolayısıyla daha iyi genelleme performansı sergilediğini göstermektedir.



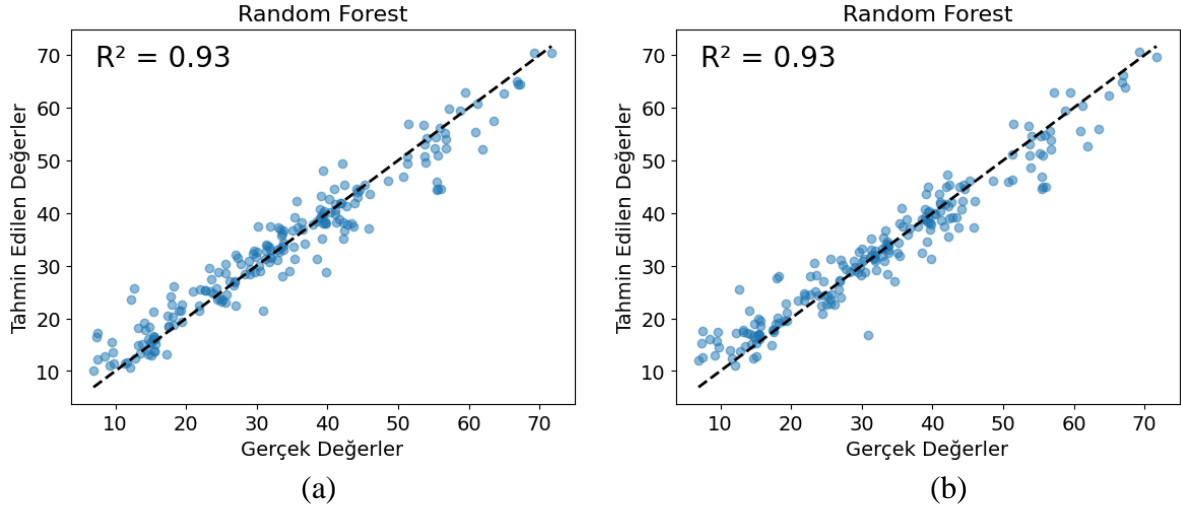
Şekil 5. CatBoost modeline ait öznelik önem grafikleri



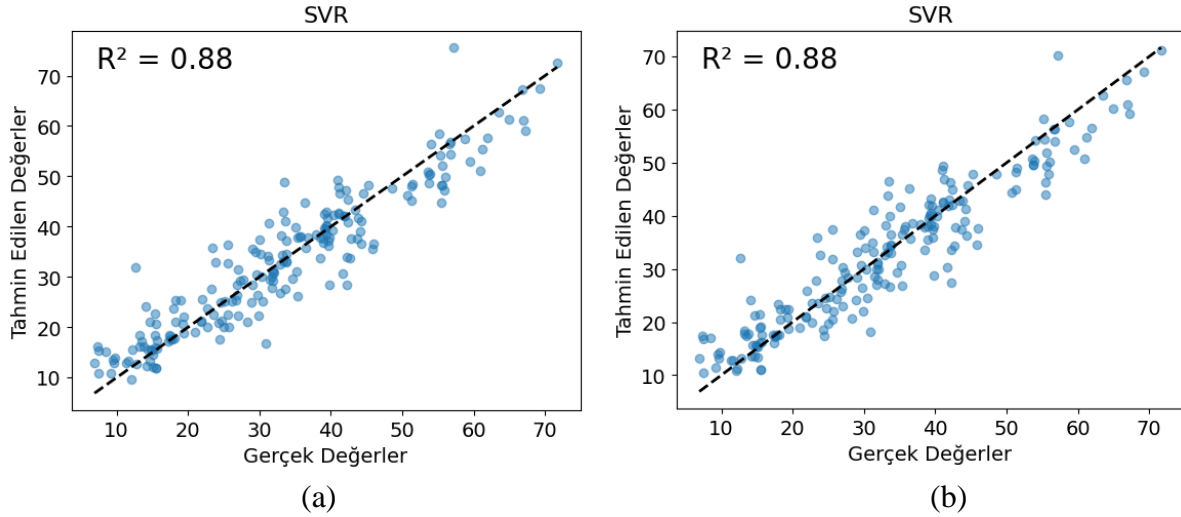
Şekil 6. AdaBoost modeline ait öznelik önem grafikleri



Şekil 7. LightGBM modeline ait öznelik önem grafikleri



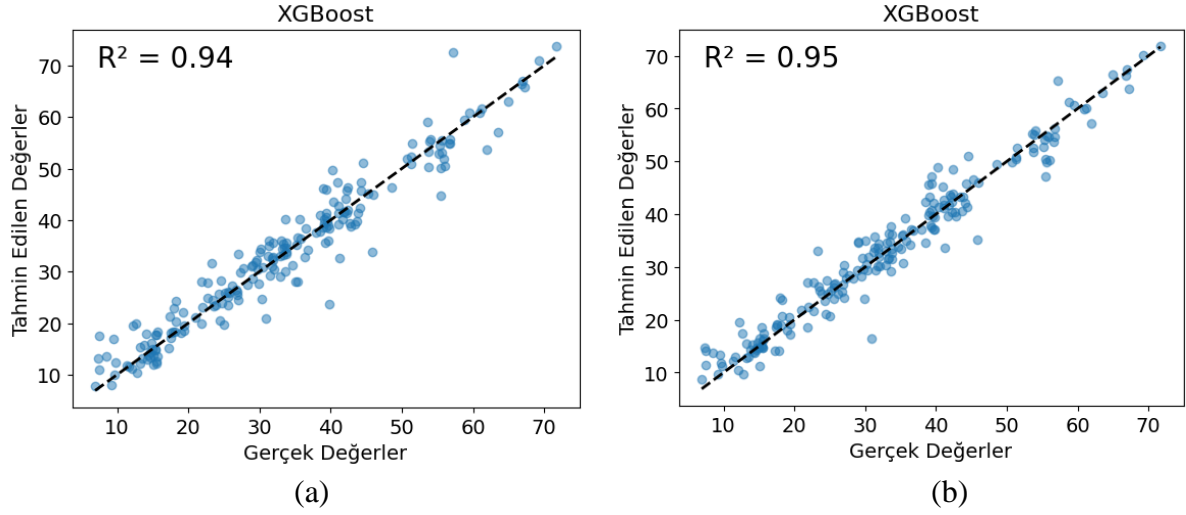
Şekil 8. RF modeline göre gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişki; a) ilk veri seti, b) yeni özniteliklerin eklendiği veri seti



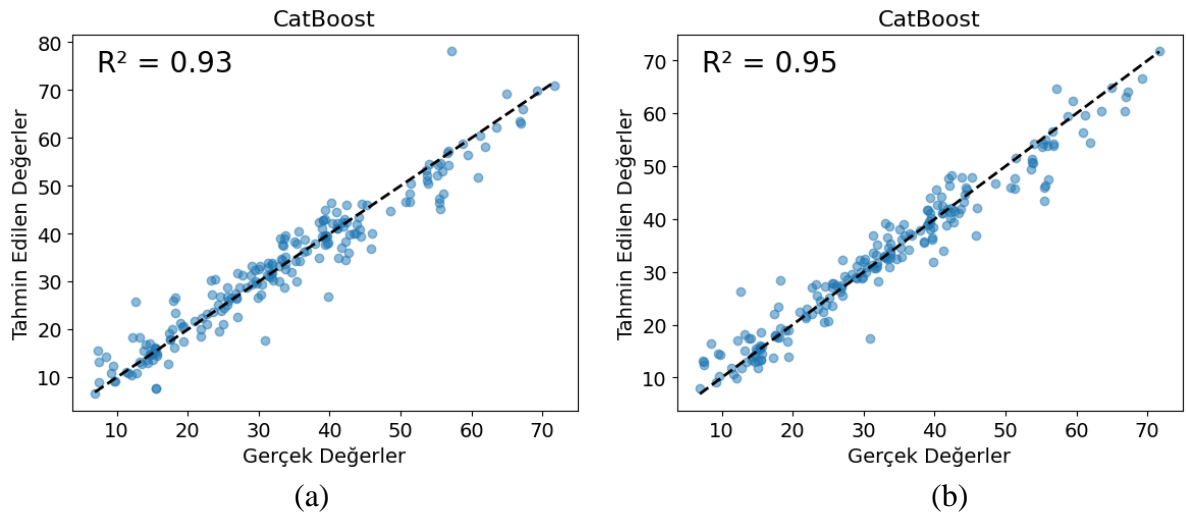
Şekil 9. SVR modeline göre gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişki; a) ilk veri seti, b) yeni özniteliklerin eklendiği veri seti

Basınç dayanımı tahminlemede çalışma kapsamında kullanılan makine öğrenimi algoritmalarının performansları Tablo 2’de verilmiştir. Her iki senaryo içinde R2 değerleri 0,87 - 0,95 arasında, MSE değerleri 10,47 - 29,00 arasında, RMSE değerleri 3,23 - 5,39 arasında, MAE değerleri 2,31 - 4,23 arasında, MAPE değerleri ise 0,09 - 0,17 arasında çıkmış olup doğru tahmin etme yeteneği açısından en iyi sonuçları XGBoost ve LightGBM algoritmaları göstermiştir. En düşük performansı ise AdaBoost ve SVR algoritmaları göstermiştir. Bu algoritmaların başarısı geniş hiperparametre seçenekleriyle veri setinin karmaşıklığını anlamaları, gürültüye dayanıklılıkları ve büyük veri setlerinde hız avantajı sağlamalarından gelmektedir. XGBoost, paralel işlem desteği ve düzenleme (L1, L2) yetenekleriyle model karmaşıklığını dengede tutarken LightGBM, histogram tabanlı öğrenme ve bellek verimliliğiyle özellikle büyük veri setlerinde üstün performans sergilemektedir. Bu özellikler, her iki algoritmanın karmaşık ve büyük veri setlerinde daha iyi sonuçlar elde etmesini sağlar. Diğer yandan AdaBoost ve SVR, yapılarına bağlı kısıtlamalar nedeniyle daha düşük performans göstermiştir. AdaBoost, her iterasyonda yanlış sınıflandırılan örnekleri aşırı vurguladığı için gürültüye karşı hassastır. SVR ise kernel ve

hiperparametre ayarlarına oldukça bağımlıdır. Bu nedenle veri setindeki gürültü ve yüksek boyutluluk durumlarında performansları düşebilmektedir. Bu nedenle veri setinin yapısı ve algoritmanın özellikleri performans üzerinde belirleyici olmuştur [43-46].



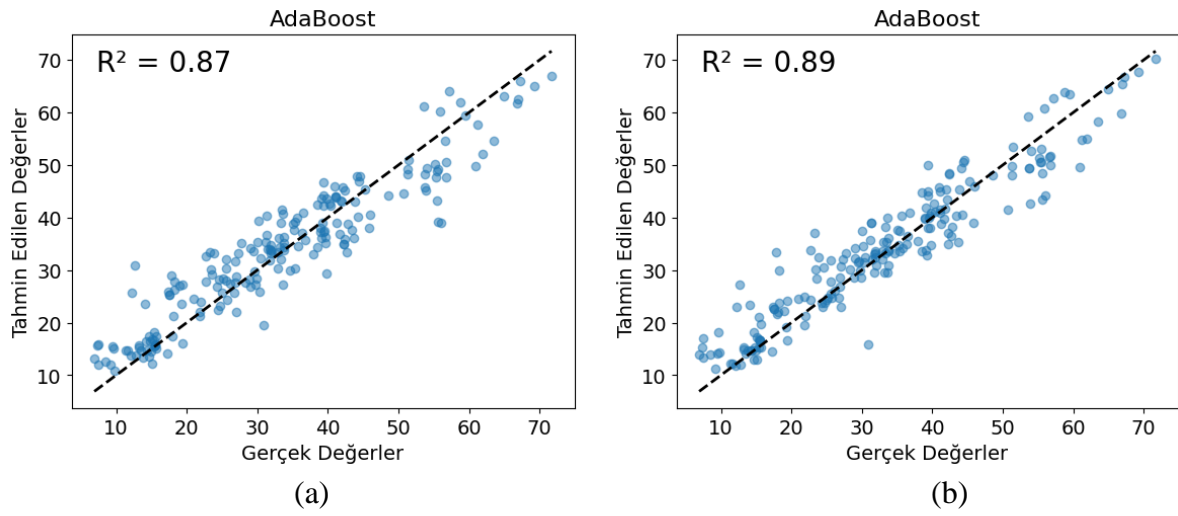
Şekil 10. XGBoost modeline göre gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişki; a) ilk veri seti, b) yeni özneliklerin eklendiği veri seti



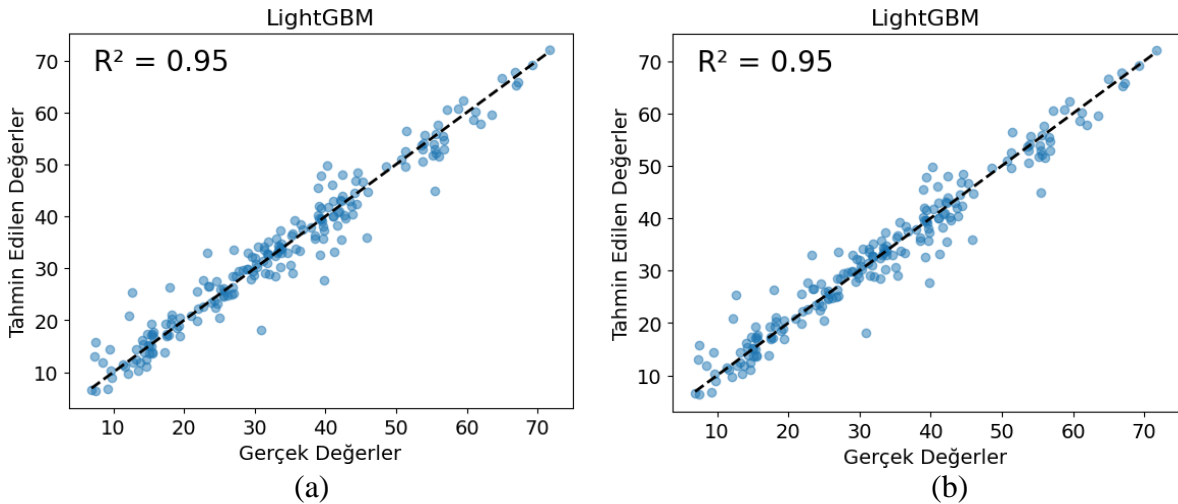
Şekil 11. CatBoost modeline göre gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişki; a) ilk veri seti, b) yeni özneliklerin eklendiği veri seti

Zaman açısından bakıldığında her iki senaryo içinde analiz süreleri 1-59 dakika arasındadır. Süre açısından en iyi sonucu SVR, ardından sırasıyla AdaBoost, LightGBM, XGBoost ve CatBoost algoritmaları vermiştir. Analiz süresi en uzun olan algoritma ise RF algoritmasıdır. Gradyan artırma yöntemi kullanan algoritmalar her iterasyonda hatayı iyileştirmeye çalıştığından dolayı daha hızlı sürmektedir. RF modelinde, ağaçların sayısı arttıkça iyileşme görülmektedir. Yani kendi kendini optimize etmemektedir. Bundan dolayı analiz süresi uzayabilmektedir. XGBoost ve LightGBM, hata metrikleri (R^2 , MSE, RMSE, MAE, MAPE) ve işlem süresi açısından en iyi performansı göstermiştir. Her iki algoritma da en yüksek R^2 değerine (%0,95) ulaşmış ve en düşük hata oranlarını sağlamıştır. LightGBM, işlem süresi açısından daha hızlı çalışarak özellikle büyük veri setleri için

avantajlıdır. Diğer algoritmalarından AdaBoost, hatalı örneklere odaklanması nedeniyle daha yüksek hata oranlarına sahiptir; SVR, hızlı çalışmasına rağmen doğruluk oranı ve hata metriklerinde zayıf kalmıştır. CatBoost, hata metriklerinde XGBoost ve LightGBM'e yakın olsa da işlem süresi oldukça uzundur. Bu üstünlükler XGBoost ve LightGBM'in esnek hiperparametre ayarları, güçlü düzenleme mekanizmaları ve verimli hesaplama yöntemlerinden kaynaklanmaktadır [43-46]. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde süre ve hata metrikleri açısından en iyi sonucu XGBoost ve LightGBM algoritmaları göstermiştir. Nguyen ve diğ. [2] tarafından yapılan çalışmada aynı veriseti üzerinde SVM, XGBoost, MLP ve GBR olmak üzere dört farklı algoritma kullanılmış, GBR ve XGBoost modellerinin daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Feng ve ark. [47] tarafından yapılan başka bir çalışmada SVM, ANN, RF ve XGBoost algoritmaları arasından en iyi sonucu XGBoost algoritmasının verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 12. AdaBoost modeline göre gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişki; a) ilk veri seti, b) yeni özneliklerin eklendiği veri seti



Şekil 13. LightGBM modeline göre gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişki; a) ilk veri seti, b) yeni özneliklerin eklendiği veri seti

Tablo 2. Basınç dayanımı tahminlemede farklı makine öğrenimi algoritmalarının performansları

		RF	SVR	XGBoost	CatBoost	AdaBoost	LightGBM
R²	v1	0,93	0,88	0,94	0,93	0,87	0,94
	v2	0,93	0,88	0,95	0,95	0,89	0,95
MSE	v1	15,58	27,73	14,25	16,23	29,00	13,42
	v2	15,39	27,37	10,47	12,42	24,29	11,64
RMSE	v1	3,95	5,27	3,78	4,03	5,39	3,66
	v2	3,92	5,23	3,23	3,52	4,93	3,41
MAE	v1	2,84	3,92	2,63	2,77	4,23	2,60
	v2	2,82	3,90	2,31	2,45	3,71	2,38
MAPE (%)	v1	12	15	10	11	17	11
	v2	12	15	9	10	15	10
Zaman (sn)	v1	180	36	180	240	60	180
	v2	180	42	240	300	60	180

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, yüksek performanslı betonun basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla RF, SVR, XGBoost, CatBoost, AdaBoost ve LightGBM olmak üzere altı farklı makine öğrenme algoritması kullanılmıştır. Çalışma, aynı veri seti ile iki farklı senaryoda yapılmıştır. İlk senaryoda mevcut veri seti kullanılmış, ikinci senaryoda ise mevcut veri setindeki öznitelikler kullanılarak iki yeni öznitelik daha türetilmiştir. Her iki durumda da XGBoost ve LightGBM algoritmaları hem zaman açısından hem de yüksek doğruluk - düşük hata oranı açısından en iyi performansı göstermiştir. Veri setine iki yeni öznitelik daha eklenmesi kullanılan makine öğrenimi algoritmalarının doğru tahmin etme yeteneğini arttırmıştır.

Farklı makine ve derin öğrenme algoritmaları ile daha geniş veri setleri kullanılarak çalışmaların yapılması, çok daha hızlı ve doğru tahmin yeteneği olan uygulamaların geliştirilmesi, beton teknolojisi ve inşaat mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Buna ilaveten topluluk öğrenme modelleri kullanılması da doğru tahmin yeteneğinin artırılması konusunda alternatif oluşturabilir. Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımının haricinde farklı mekanik ve durabilite özelliklerinin, yine benzer şekilde farklı özel beton türlerinin özelliklerinin makine öğrenimi algoritmaları ile tahmin edilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

Öte yandan Dünya’da yıllık tüketimi yaklaşık 35 milyar ton olan betonun sektör hacmi en büyük alanlardan birisidir. Beton tasarım, üretim ve kalite kontrol aşamalarını etkili ve verimli bir şekilde yönetmek, deneysel numune sayılarını minimize ederek doğal kaynak tüketimini azaltmak, iş gücü ve zamandan tasarruf ederek ve yine aynı şekilde standart sapmayı minimize ederek ekonomik kazanç sağlamak ve en nihayetinde insan kaynaklı hataları azaltarak ekonomik ve ekolojik kazançların haricinde büyük felaketlerde yaşanabilecek can ve mal kayıplarını engellenmek amacıyla yapay zeka ve istatistik tabanlı beton kalite tahminlemelerin yapılması oldukça önemlidir.

KAYNAKLAR

1. Kandiri A, Golafshani EM, Behnood A (2020) Estimation of the compressive strength of concretes containing ground granulated blast furnace slag using hybridized multi-objective ANN and salp swarm algorithm. Construction and Building Materials 248:118676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118676>

2. Nguyen H, Vu T, Vo TP, Thai HT (2021) Efficient machine learning models for prediction of concrete strengths. *Construction and Building Materials* 266:120950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120950>
3. AlShareedah O, Nassiri S (2021) Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. *Journal of Cleaner Production* 288:125095. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125095>.
4. Mardani-Aghabaglou A, Bayqra SH, Özen S, Altun MG, Faqiri ZA, Ramyar K (2020) Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının tasarım yöntemleri ve yapılan çalışmalar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 26(3):419-431. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.93530>.
5. Han Q, Gui C, Xu J, Lacidogna G (2019) A generalized method to predict the compressive strength of high-performance concrete by improved random forest algorithm. *Construction and Building Materials* 226:734-742. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.315>.
6. Elemam WE, Abdelraheem AH, Mahdy MG, Tahwia AM (2020) Optimizing fresh properties and compressive strength of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials* 249:118781. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118781>.
7. Mardani-Aghabaglou A, Tuyan M, Yılmaz G, Arıöz Ö, Ramyar K (2013) Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials* 47:1020-1025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.105>
8. Mardani-Aghabaglou A, Sezer Gİ, Ramyar K (2014) Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials* 70:17-25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.089>
9. Aydogmus HY, Erdal HI, Karakurt O, Namli E, Turkan YS, Erdal H (2015) A comparative assessment of bagging ensemble models for modeling concrete slump flow. *Computers and Concrete*. 16(5):741-757. <https://doi.org/10.12989/cac.2015.16.5.741>.
10. Banthia N, Sheng J (1996) Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites* 18:251-269. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00030-5](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00030-5).
11. Altun MG, Oltulu M (2020) Effect of different types of fiber utilization on mechanical properties of recycled aggregate concrete containing silica fume. *Journal of Green Building* 15(1):119-136. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.15.1.119>.
12. Güneyisi E, Gesoglu M, Özbay E (2009) Evaluating and forecasting the initial and final setting times of self-compacting concretes containing mineral admixtures by neural network. *Materials and Structures* 42:469-484. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9395-5>.
13. Avcı E, Altun MG, (2023) Betonun çökme ve basınç dayanımının makine öğrenmesi modelleri kullanılarak tahmin edilmesi. ICSHSR 4th International Conference on Health, Engineering and Applied Sciences.
14. Yeh IC (1998) Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks. *Cement and Concrete Research* 28:1797-1808. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00165-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00165-3).
15. Nguyen-Sy T, Wakim J, To QD, Vu MN, Nguyen TD, Nguyen TT (2020) Predicting the compressive strength of concrete from its compositions and age using the extreme gradient boosting method. *Construction and Building Materials* 260:119757. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119757>.
16. Yörübulut S, Dogan O, Erdugan F, Yörübulut S (2019) Tahribatsız Yöntem Verileri Kullanılarak Yapay Sinir Ağı ve Regresyon Yöntemi ile Beton Basınç Dayanımının Tahmin Edilmesi. *International Journal of Engineering Research and Development* 12(2):769-776. <https://doi.org/10.29137/umagd.734655>
17. Topçu İB, Boğa AR, Hocaoğlu FO (2009) Modeling corrosion currents of reinforced concrete using ANN. *Automation in Construction* 18(2):145-152. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.07.004>.
18. Boğa AR, Öztürk M, Topçu İB (2013) Using ANN and ANFIS to predict the mechanical and chloride permeability properties of concrete containing GGBFS and CNI. *Composites:Part B* 45:688-696. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.054>.
19. Ofuyatan OM, Agbawhe OB, Omole DO, Igwegbe CA, Ighalo JO (2022) RSM and ANN modelling of the mechanical properties of self compacting concrete with silica fume and plastic waste as partial constituent replacement. *Cleaner Materials* 4:100065. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100065>.
20. Hammoudi A, Moussaceb K, Belebchouche C, Dahmoune F (2019) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 209:425-436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119>.
21. Açikgenç M, Ulaş M, Alyamaç KE (2015) Using an artificial neural network to predict mix compositions of steel fiber-reinforced concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering* 40:407-419. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1549-x>
22. Hossain MM, Uddin MN, Hossain MAS (2023) Prediction of compressive strength ultra-high steel fiber reinforced concrete (UHFRFC) using artificial neural networks (ANNs). *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.409>

23. Köksal F, Şahin Y, Beycioğlu A, Gencel O, Brostow W (2012) Estimation of fracture energy of high-strength steel fibre-reinforced concrete using rule-based Mamdani-type fuzzy inference system. *Science and Engineering of Composite Materials* 19(4):373-380. <https://doi.org/10.1515/secm-2012-0017>
24. Neville AM (1997) *Properties of Concrete*. London: Wiley
25. Mehta PK, Monteiro P (1997) *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing.
26. Baradan B, Türkel S, Yazıcı H, Ün H, Yiğiter H, Felekoğlu B, Tosun K, Aydın S, Yardımcı MY, Topal A Öztürk AU (2012) *Beton*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi No:334, İzmir, Türkiye.
27. Daemen J, Rijmen V, Daemen J, Rijmen V (2020). Correlation matrices. The design of Rijndael: the advanced encryption standard (AES), 91-113.
28. Awad M, Khanna R, Awad M, Khanna R (2015) Support vector regression. *Efficient learning machines: Theories, concepts, and applications for engineers and system designers*, pp. 67-80.
29. Parbat D, Chakraborty M (2020) A python based support vector regression model for prediction of COVID19 cases in India. *Chaos, Solitons & Fractals*, 138, 109942.
30. Biau G, Scornet E (2016) A random forest guided tour. *Test*, 25:197-227.
31. Chen T, Guestrin C (2016) Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 785-794).
32. Brownlee J (2016) *XGBoost With python: Gradient boosted trees with XGBoost and scikit-learn*. Machine Learning Mastery.
33. Collins M, Schapire RE, Singer Y (2002) Logistic regression, AdaBoost and Bregman distances. *Machine Learning* 48:253-285.
34. Gao R, Liu Z (2020) An improved adaboost algorithm for hyperparameter optimization. In *Journal of Physics: Conference Series* 1631(1), 012048. IOP Publishing.
35. Beskopylny AN, Stel'makh SA, Shcherban EM, Mailyan LR, Meskhi B, Razveeva I, Beskopylny N (2022) Concrete strength prediction using machine learning methods CatBoost, k-nearest neighbors, support vector regression. *Applied Sciences* 12(21), 10864. <https://doi.org/10.3390/app122110864>.
36. Xiang W, Xu P, Fang J, Zhao Q, Gu Z, Zhang Q (2022) Multi-dimensional data-based medium-and long-term power-load forecasting using double-layer CatBoost. *Energy Reports* 8:8511-8522. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.063>.
37. Al-Kasassbeh M, Abbadi MA, Al-Bustanji AM (2020) LightGBM algorithm for malware detection. In *Intelligent Computing: Proceedings of the 2020 Computing Conference* 3:391-403. Springer International Publishing.
38. Ju Y, Sun G, Chen Q, Zhang M, Zhu H, Rehman MU (2019) A model combining convolutional neural network and LightGBM algorithm for ultra-short-term wind power forecasting. *Ieee Access* 7:28309-28318. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2901920>
39. Tatachar AV (2021) Comparative assessment of regression models based on model evaluation metrics. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* 8(9):853-860.
40. Chicco D, Warrens MJ, Jurman G (2021) The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj Computer Science* 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
41. Zhou Z, Hooker G (2021) Unbiased measurement of feature importance in tree-based methods. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)* 15(2):1-21.
42. Jeon H, Oh S (2020) Hybrid-recursive feature elimination for efficient feature selection. *Applied Sciences* 10(9), 3211. <https://doi.org/10.3390/app10093211>
43. Chen T, Guestrin C (2016) Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining* (pp 785-794).
44. Chen C, Zhang Q, Ma Q, Yu B (2019) LightGBM-PPI: Predicting protein-protein interactions through LightGBM with multi-information fusion. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 191:54-64. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2019.06.003>.
45. Solomatine DP, Shrestha DL (2004) AdaBoost. RT: a boosting algorithm for regression problems. In *2004 IEEE international joint conference on neural networks (IEEE Cat. No. 04CH37541)* (Vol 2, pp 1163-1168). IEEE.
46. Awad M, Khanna R, Awad M, Khanna R (2015) Support vector regression. *Efficient learning machines: Theories, concepts, and applications for engineers and system designers*. Springer Nature. pp 67-80.
47. Feng J, Zhang H, Gao K, Liao Y, Gao W, Wu G (2022) Efficient creep prediction of recycled aggregate concrete via machine learning algorithms. *Construction and Building Materials* 360,129497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129497>.



Original Paper

Journal of Innovative Engineering
and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Design of flameproof and waterproof natural textile fabrics

Turdimuhammad Abdullah^{a,b*}, Levent Babayiğit^a, Aleyna Turanlı^a, Recep Furkan Turan^a,
 Cemil Dizman^{a,b*}

^a*İzel Kimya Research and Development Center, Dilovası, Kocaeli, Türkiye*^b*Department of Metallurgical & Materials Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye*

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 August 2024

Received in revised form 28 November 2024

Accepted 14 December 2024

Available online

Keywords:

Bio-based

Coating

Flame-retardant

Hydrophobic

Natural fabrics

Photocurable

ABSTRACT

Natural fabrics, particularly linen and cotton are widely used in the textile industry due to their desirable properties, including breathability, durability, and comfort. However, their hydrophilic nature and inherent flammability pose limitations on their applications in various areas, such as residential settings, automotive vehicles, offices, and protective clothing. In these contexts, flame-retardant and hydrophobic properties are of crucial importance. To address this issue, we have applied UV-curable coatings on the surface of linen and cotton fabrics by employing two distinct acrylic polymer synthesis strategies. In the first approach, a methacrylated phenolic lipid was combined with n-alkyl methacrylate and copolymerized under UV exposure resulting in a hydrophobic and flame-retardant surface. In the second approach, 3-Aminopropyltriethoxysilane is coated on the natural fabric, and then 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO) is applied above the 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) surface prior to UV curing. A comprehensive study was conducted to evaluate the wetting behavior and flame retardancy of the fabric both before and after coating. This was done by employing water contact angle and limiting oxygen index testing. The findings of this study demonstrate that the hydrophobicity and flame retardancy of the fabric can be substantially enhanced through UV coating. Furthermore, the initial ratio between the applied monomers can be adjusted to fine-tune these properties. It is noteworthy that all the chemicals utilized in these investigations are derived from renewable bioresources, thereby ensuring sustainability and biocompatibility. This aspect holds significant importance for the textile industry, aligning with the growing demand for environmentally friendly and socially responsible manufacturing practices.

I. INTRODUCTION

The global textile fabrics market, valued at \$920 billion in 2018, is projected to expand to \$942.8 billion by 2024, with a projected compound annual growth rate (CAGR) of 5% [1]. Natural textiles, particularly cotton and linen are cornerstones of the textile industry, offering a myriad of features. For instance, cotton is the most significant natural fiber used in textiles, accounting for approximately 38% of the total fiber market in 2023 [2]. It is a popular choice for clothing and home textiles because it absorbs moisture well, is breathable, and is comfortable to wear. Linen, which comes from the flax plant, is another important natural textile fiber. Compared to cotton, linen is about 2-3 times stronger [3]. However, hydrophilic nature and flammability of these natural textiles present significant challenges that limit their potential applications [3,4]. These limitations have spurred efforts to develop treatments and finishes that enhance properties of natural textiles, including water repellency and flame retardancy, thereby broadening their application range [5,6]. However, it is crucial to consider the environmental and health implications of such treatments [7,8].

*Corresponding author. Tel.: +90-506-688-9493; e-mail: cemil.dizman@izelkimya.com.tr and turdimuhammad.abdullah@izelkimya.com.tr

Photocurable coatings offer a state-of-the-art method for enhancing the properties of natural fabrics, particularly in the areas of flame retardancy and water repellency [8]. Characterized by rapid, low-temperature curing and solvent-free composition, this technology not only saves energy, but also reduces environmental impact by eliminating volatile organic compounds [9,10]. Its versatility and cost-effectiveness make it a top choice for industries seeking efficient, high-performance coating solutions for a wide range of substrates. On the other hand, the increasing adoption of bio-based materials in coating applications is driven by their environmental sustainability and superior performance attributes. Derived from renewable resources, they reduce reliance on finite fossil fuels and exhibit low volatile organic compound emissions, promoting both environmental and human [11,12]. Additionally, their biodegradability and enhanced performance characteristics, such as superior barrier properties and durability, make them an appealing choice for industries seeking environmentally sustainable and high-performance coating solutions [13].

Despite the advantages that biobased acrylates present for photocurable textile coatings, research in this area is still in its infancy. Only a limited number of studies have specifically addressed the potential use of these acrylics in textiles. In a related study, Wu et al. [14] investigated the potential of bio-based furanic di(meth)acrylates as reactive diluents for UV-curable coatings. They highlighted the renewable nature of these materials and suggested that they could possess unique properties that could improve textile coating performance. However, these materials remain understudied regarding their use in textile-specific applications, thus creating a need for further research into their potential for enhanced functionality. Similarly, Seker et al. [15] investigated fully bio-based thiol-ene photocured thermosets, providing insights into alternative systems that could potentially replace or complement traditional acrylate-based coatings. The findings indicated that these biobased coatings demonstrated comparable performance to that of petroleum-based coatings; however, research specific to textile applications remains limited. Lin et al. [16] underscored the importance of understanding the stability and interactions between biobased acrylates and substrates. However, their work primarily focused on general coating applications, thereby underscoring the need for textile-centered studies. In a recent study, Liu et al. [17] demonstrated the effectiveness of acrylated soybean oil as a monomer for photocurable coatings. They noted the ability of this monomer to undergo photopolymerization, producing coatings with desirable mechanical properties. Nevertheless, the study does not address the broader range of biobased acrylates with multifunctionality, such as water-repellant and flame-retardant properties that could be further investigated for their potential use in photocurable applications.

In this study, an effort was undertaken to enhance the properties of natural fabrics including linen and cotton by applying photocurable coatings derived from bio-based renewable materials. This endeavor involved two distinct strategies for synthesizing photosensitive polymers. In the first method, methacrylated phenolic lipid was combined with n-alkyl methacrylate, initiating copolymerization under UV exposure. This process yielded a surface that was not only hydrophobic but also exhibited flame-retardant properties. In the second approach, the fabric was coated with 3-aminopropyltriethoxysilane, followed by the application of acrylated 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide before UV curing. Subsequently, a comprehensive evaluation of the fabric's wetting behavior and flame retardancy was conducted, both pre- and post-coating, utilizing water contact angle (WCA) and Limiting Oxygen Index Testing (LOI).

II. EXPERIMENTAL METHOD

2.1 Materials

Linen (Color: light yellow, purity:100%, Pattern: Closely-Woven, weight per unit area: 122 g/m²) and cotton (Color: grey, purity:100%, pattern: Pile Weave, weight per unit area: 179 g/m²) fabrics were purchased from Bursa fabric market. 9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO) was obtained from MCT CHEM, while Cardanol NX 2026 was sourced from Cardolite Corporation, India. BASF supplied various alkyl-acrylates (C12 and C18), and 1-Hydroxycyclohexylphenyl ketone (Irgacure 184) was purchased from Ciba Specialty Chemicals. Glycidyl methacrylate (GMA) (99% min), triethylamine (TEA), and hydroquinone (HQ) were procured from ATAMAN KIMYA, Türkiye. Hydrogen peroxide was obtained from Tekkim Kimya, while 3-(Aminopropyl)triethoxysilane (APTES) was sourced from Wacker Chemie. Dimethylbenzyl amine and n-hexane were acquired from Sigma Aldrich.

2.2 Synthesis of photo-sensitive acrylics

2.2.1. Modification of Cardanol with GMA (CGM)

Cardanol was modified with GMA according to previously applied procedure [18]. TEA as catalyst and hydroquinone as inhibitor were added to a mixture of cardanol and GMA in a molar ratio of 1:1 in a flask and the reaction was stirred at 60-70 °C for 5-6 hours. After cooling, the product was diluted with ethyl acetate and was washed with a solution of NaOH to remove unreacted components.

2.2.2. Modification of DOPO with GMA (DOPO-GMA)

DOPO reacted with ethanol and hydrogen peroxide, followed by recrystallization and drying to yield a white solid (DOPO-OH) [19]. The DOPO adduct was then reacted with glycidyl methacrylate in presence of N,N-dimethylbenzyl amine as catalyst in tetrahydrofuran solvent to produce DOPO-glycidyl methacrylate (DOPO-GMA).

2.3 Performing coating via UV curing

In the first approach, the synthesized CGM was prepared by mixing different ratios of C12/C18 monomers in acrylic monomer. The fabric surfaces of linen and cotton were dipped by adding with Irgacure 184 (PI) and TMPTA (CL) to the mixture. After filtering, the fabrics were cured in the UV cabinet for 30 minutes.

In the second approach, the fabric surface was first modified with APTES, then the synthesized DOPO-GMA was mixed with irgacure 184 (3%) and TMPTA (2%) was applied on top of the APTES before UV curing for 30 minutes. The list of the coating samples is shown in the table below:

Table 1. The composition of prepared resin for UV curable resin

Resin	CGM	C12	C18	DOPO-GMA	PI	CL
A	95	-	-	-	3	2
B	55	40	-	-	3	2
C	35	60	-	-	3	2
D	15	80	-	-	3	2
E	60	17.5	17.5	-	3	2
F	-	-	-	95	3	2

2.4 Characterization

The synthesis of photocurable chemicals were confirmed via One-Hertz nuclear magnetic resonance (^1H NMR) spectra obtained by an Agilent VNMRS spectrometer operating at 500 MHz spectra with dichloromethane (CDCl_3) serving as the solvent. The modification of DOPO was traced by FTIR test, with spectra obtained in the region $4000\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ using a JASCO FT/IR-4200 spectrometer, at a resolution of 4 cm^{-1} with 16 scans. The hydrophobic properties of prepared coatings were determined by WCA measured in a Biolin Scientific Attension Theta Lite Model Optical Tensiometer. The flame retardancy of the chemicals were determined by the LOI values of the prepared films in the size of $50 \times 10 \times 1\text{ mm}^3$ using a LOI (Devotrans) type instrument, in accordance with ASTM D2863-08 standards.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 CGM-based photocurable coating

Figure 1 shows the ^1H NMR of CGM where the hydroxyl proton can be observed at a shift of 3.29 ppm. When we examined the ^1H NMR peaks, the peak at 6.9 ppm indicated the protons of phenolic structure. Due to the ring activating feature of the cardanol substituting group, the b protons appear at a higher level at 6.6 ppm. c, d, e in the range of 6-4.7.5 ppm indicated double bond protons.

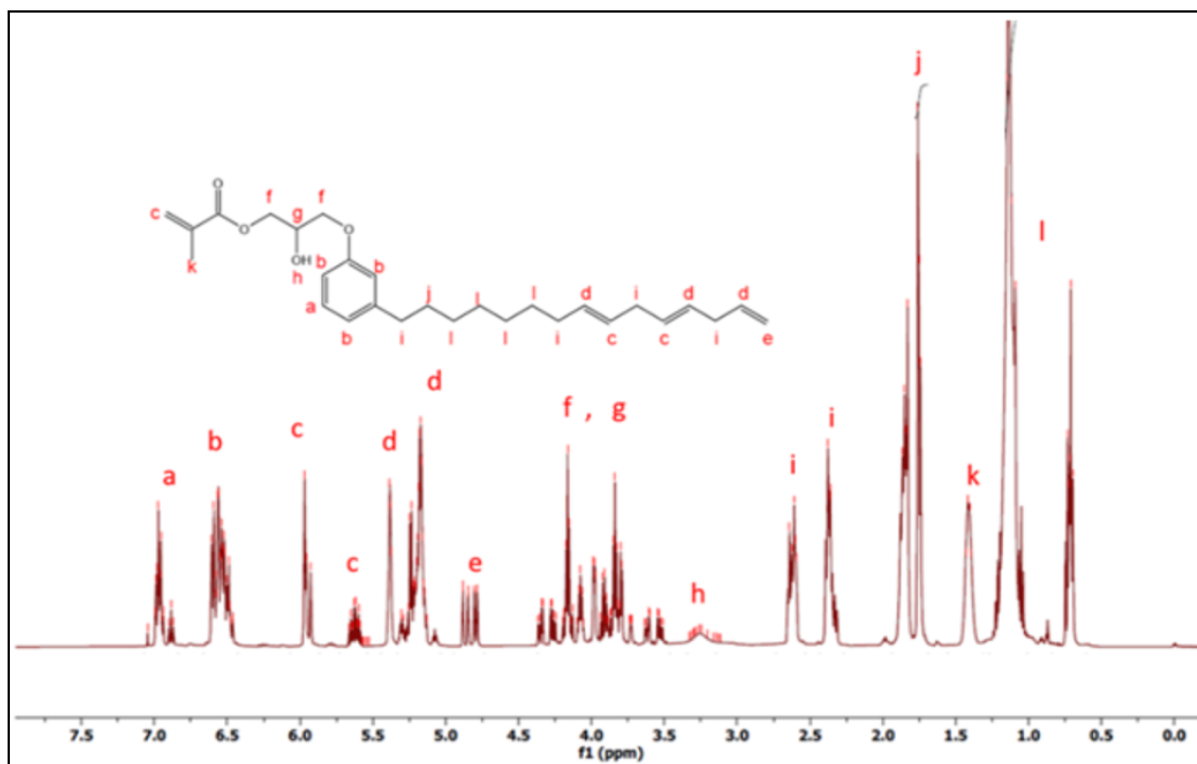


Figure 1. ^1H NMR result of CGM monomer

The acrylation of DOPO is evidenced by Attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) as shown in Figure 2. Typical peaks observed at 1242 cm^{-1} (P=O) and 910 cm^{-1} (P-O-phenyl) are characteristic of DOPO. The peaks within the $1580\text{--}1610\text{ cm}^{-1}$ range originate from the aromatic rings inherent in

the DOPO structure. Moreover, in DOPO-GMA, an absorption band emerges near 1650 cm^{-1} , indicative of the stretching vibration of the vinyl C=C bond, a hallmark of acrylated chemical structures.

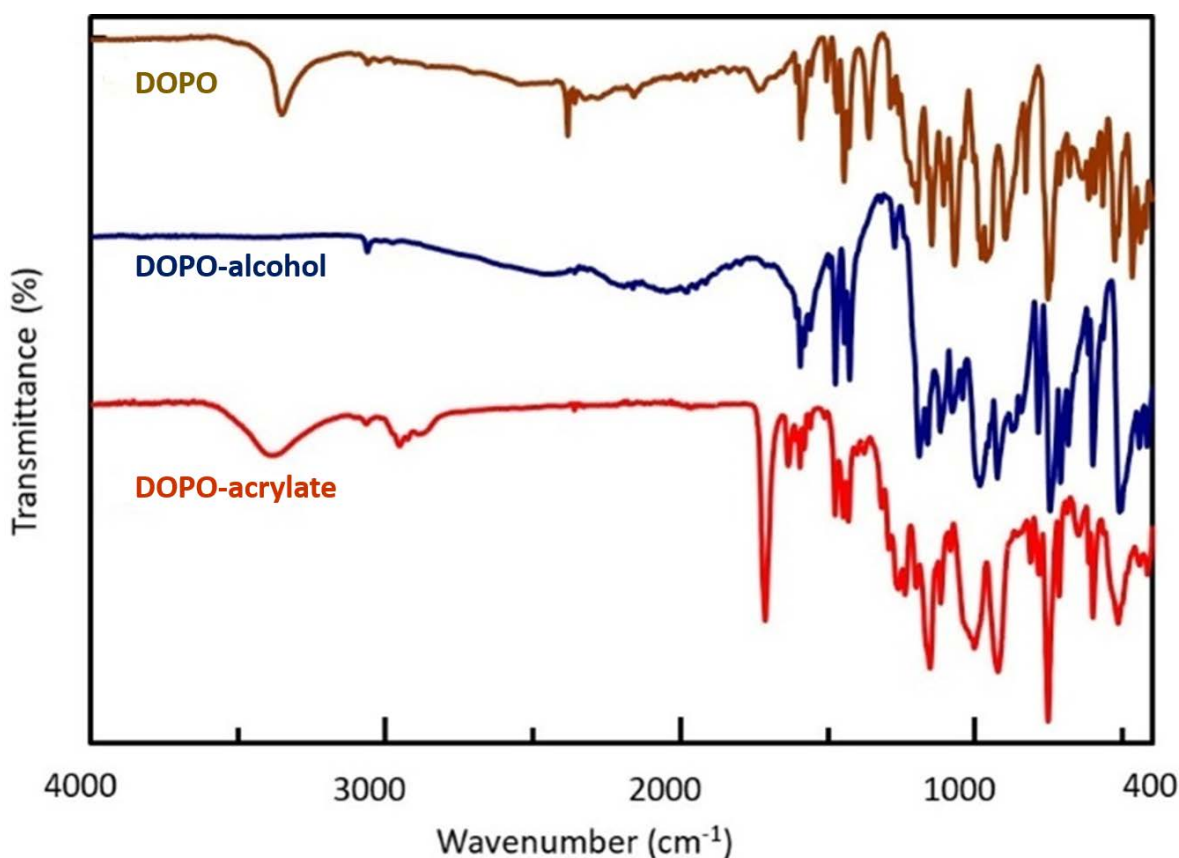


Figure 2. FTIR spectra showing the acrylation reaction of DOPO

Figure 3 illustrates the WCA of linen and cotton prior to and following the application of a variety of compositions derived from UV-curable resins. Pure linen exhibited a WCA of 38° , with the addition of CSM having only a modest effect on enhancing the hydrophobicity of linen. While cardanol possesses certain hydrophobic properties due to its long alkyl chain, it also contains polar groups, such as the hydroxyl group (-OH), which contribute to its overall hydrophilic nature. The incorporation of alkyl acrylate (C12/C18), particularly longer ones, into CSM enhances hydrophobicity by introducing a long hydrophobic alkyl chain. For instance, the addition of 17.5% C18 resulted in a WCA of 98.5° . This is because the hydrophobic alkyl chain reduces the affinity of the material for water molecules, making it more water-repellent. The steric hindrance created by the bulky alkyl chain further prevents water molecules from interacting with the material's surface. Additionally, the methacrylate groups in C12/C18 allow for copolymerization with cardanol, resulting in tailored copolymers with improved hydrophobicity. The results also demonstrate that the hydrophilicity of linen can be markedly enhanced by coating with DOPO-GMA, due to the presence of nonpolar hydrocarbon groups in its structure, which impede the interaction between water molecules and the material's surface. The trend of an increase in WCA for cotton after coating was found to be analogous to the observed phenomenon for linen. Nevertheless, the WCA for cotton remained inferior to that of linen due to intrinsic fibre differences. The smoother surface and higher hydrophilicity of cotton permit greater water absorption, whereas the rougher texture and higher lignin content of linen trap air,

thereby promoting hydrophobicity [20]. The effectiveness of the coating is also contingent upon its interaction with said fiber that the coarser structure of linen may provide superior adhesion and hydrophobic enhancement than cotton, which is in alignment with the findings regarding surface chemistry and coating compatibility.

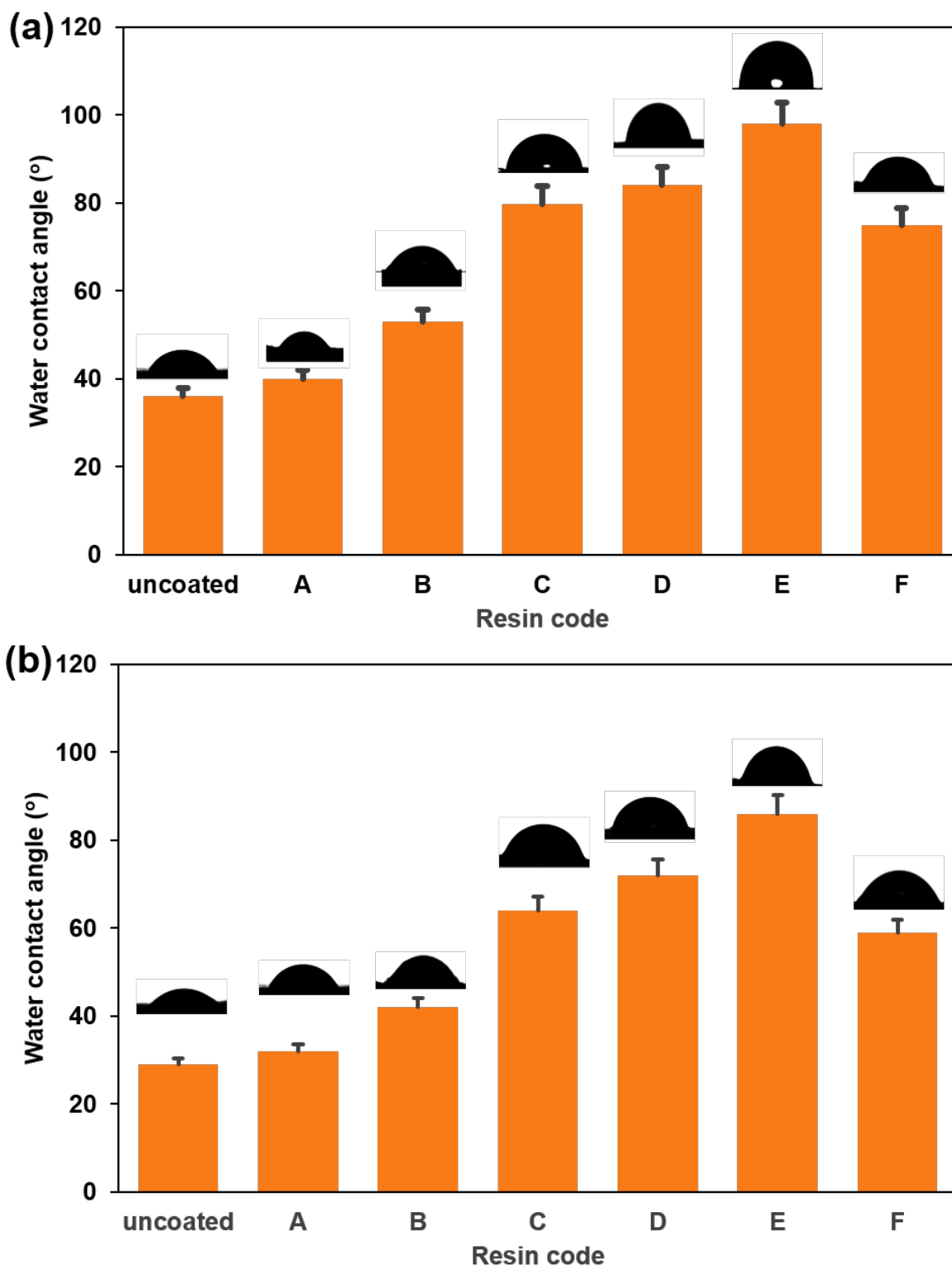


Figure 3. WCA of linen (a) and (b) cotton before (noted as uncoated) and after coating with UV-curable resins

As demonstrated in Table 2, the LOI values of textiles prior to and following the application of UV-curable resins highlight the influence of varying resin formulations on flame resistance. The combination of alkyl acrylate and CSM resulted in a modest increase in LOI, whereas a more pronounced enhancement was observed with DOPO-GMA (Resin F). In particular, the LOI values of linen and cotton fabrics coated with the DOPO-acrylate mixture increased to 25.9% and 24.4%, respectively, in comparison to their baseline values of approximately 18%. This notable enhancement illustrates the efficacy of DOPO-based formulations in augmenting the flame-retardant attributes of natural fabrics, rendering them safer for applications where fire resistance is paramount. DOPO is a widely used flame retardant that has been demonstrated to reduce the flammability of materials through the interference of combustion reactions and the formation of a protective char layer. This layer acts to delay or inhibit the spread of flames, making it a highly preferred additive in the textile industry for enhancing fire safety.

Table 2. LOI of linen (a) and (b) cotton before (noted as uncoated) and after coating with UV-curable resins

Textile type	Linen LOI value (%)	Cotton LOI value (%)
Uncoated	18.0	18.4
A	18.0	18.2
B	19.0	18.7
C	19.6	19.0
D	20.2	19.7
E	20.0	20.6
F	25.9	24.4

IV. CONCLUSIONS

In conclusion, the water repellency and flame retardancy of linen and cotton were enhanced through the application of photocurable coatings utilizing newly developed resins derived from bio-based renewable materials. The results of this study demonstrate notable progress in the development of multifunctional protective coatings for natural fabrics via UV-curing systems. The combination of methacrylated phenolic lipids, n-alkyl methacrylate, and DOPO represent a novel approach to the development of protective fabric treatments. The WCA of 98.5° was achieved by means of the synergistic effect of alkyl acrylate and CSM, which aligns with previous studies by Jain et al. [21] and Bhuiyan et al.[22]. In their studies, the WCA ranged from 88° to 101° and was obtained using different hydrophobic coating systems. However, our method offers the advantage of a simpler, one-step UV curing process in comparison to the multi-step approaches described in previous studies.

The modification of DOPO with glycidyl methacrylate (resin F) followed by UV curing produced notably favourable outcomes with respect to flame retardancy, with LOI values increasing to 25.9% for linen and 24.4% for cotton, in comparison to the untreated fabrics with LOI values of approximately 18%. These findings are comparable to the work of An et al. [23], who previously developed textile fabrics with flame retardancy by depositing graphene, casein, and ammonium polyphosphate on their surface via layer-by-layer assembly. The UV-cured DOPO-GM system exhibited comparable flame-retardant properties while markedly reducing processing time and energy consumption. The vertical flame test results demonstrated enhanced char formation and a reduction in post-ignition glow time in comparison to the phosphorus-based flame retardants documented in the literature.

In conclusion, this new approach to fabric treatment represents a significant step forward in the development of more efficient and effective protective coating systems. By combining hydrophobicity and flame retardancy in a single coating, it addresses a major gap in the current literature on protective fabric treatment. However, further optimization and durability studies are needed to fully realize the potential of this new system for commercial applications. Firstly, a systematic investigation is required in order to determine the optimal parameters for UV curing, specifically in terms of exposure time, intensity, and photoinitiator concentration. This will enable the coating performance to be maximized. Secondly, the potential for synergistic effects between different acrylate compounds must be investigated in order to further enhance both hydrophobicity and flame retardancy. Previous studies have primarily focused on optimizing either property independently, thus making our proposed combined approach a novel contribution to the field. Moreover, although the preliminary results indicate encouraging durability, long-term stability studies under diverse environmental conditions are essential to substantiate the practical viability of the coating. Future work will also examine the scalability of this coating system for industrial applications, as current UV-curing methods in textile finishing frequently encounter difficulties in maintaining uniform coverage over extensive surface areas.

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by İzel Kimya A.Ş.

REFERENCES

1. Chand S, Chand S, Raula B (2023) Textile and apparel industries waste and its sustainable management approaches. *J Mater Cycles Waste Manag* 25:3132–3143. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01761-1>
2. GVR Report cover Textile Market Size, Share & Trends Report Textile Market Size, Share & Trends Analysis Report By Raw Material (Wool, Chemical, Silk), By Product (Natural Fibers, Polyester), By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030. Grand View Research
3. Mukhopadhyay A, Vinay Kumar M (2008) A review on designing the waterproof breathable fabrics part I: Fundamental principles and designing aspects of breathable fabrics. *Journal of Industrial Textiles* 37:225–262. <https://doi.org/10.1177/1528083707082164>
4. Papaspyrides CD, Pavlidou S, Vouyiouka SN (2009) Development of advanced textile materials: Natural fibre composites, anti-microbial, and flame-retardant fabrics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 223(2):91–102. <https://doi.org/10.1243/14644207JMDA200>
5. Ling C, Guo L, Wang Z (2023) A review on the state of flame-retardant cotton fabric: Mechanisms and applications. *Ind Crops Prod* 194:116264. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116264>
6. Saridewi N, Adinda AR, Nurbayti S (2022) Characterization and Antibacterial Activity Test of Green Synthetic ZnO Nanoparticles Using Avocado (*Persea americana*) Seed Extract. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi* 25:116–122. <https://doi.org/10.14710/jksa.25.3.116-122>
7. Faheem S, Nahid N, Wiener J, Tomková B, Pechočiaková M, Militký J, Mazari A (2023) Flame Retardancy of Textiles—New Strategies and Mechanisms. In: Militký, J., Venkataraman, M. (eds) *Advanced Multifunctional Materials from Fibrous Structures*. *Advanced Structured Materials*, vol 201. Springer, Singapore pp 279–317. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6002-6_12
8. Qi P, Chen F, Li Y, Li H, Gu X, Sun J, Zhang S (2023) A Review of Durable Flame-Retardant Fabrics by Finishing: Fabrication Strategies and Challenges. *Advanced Fiber Materials* 5:731–763. <https://doi.org/10.1007/s42765-023-00255-x>
9. Yildiz Z (2023) Green Photocurable Phosphorus Containing Coatings on Cotton Fabrics. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* 28:645–664. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1258916>
10. Liang S, Xu K, Liu H, Gui X, Zhang T (2019) Preparation and characterization of dimer fatty acid epoxy-acrylate resin hybrid emulsion for photocurable coatings. *Colloid Polym Sci* 297:1199–1211. <https://doi.org/10.1007/s00396-019-04534-1>

11. Irmouli Y, George B, Merlin A (2012) Artificial ageing of wood finishes monitored by IR analysis and color measurements. *J Appl Polym Sci* 124:1938–1946. <https://doi.org/10.1002/app.34797>
12. Kaikade DS, Sabnis AS (2023) Recent Advances in Polyurethane Coatings and Adhesives Derived from Vegetable Oil-Based Polyols. *J Polym Environ* 31:4583–4605. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02920-z>
13. Braish T, Tinel L, Depelchin L, Gaudion V, Andres Y, Caudron C, Antczak E, Brachelet F, Locoge N (2023) Evaluation of the seasonal variation of VOC surface emissions and indoor air concentrations in a public building with bio-based insulation. *Build Environ* 238, 110312. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110312>
14. Wu J, Qian Y, Sutton CA, La Scala JJ, Webster DC, Sibi MP (2021) Bio-Based Furanic Di(meth)acrylates as Reactive Diluents for UV Curable Coatings: Synthesis and Coating Evaluation. *ACS Sustain Chem Eng* 9:15537–15544. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05588>
15. Şeker H, Çakmakçı E (2020) Fully bio-based thiol-ene photocured thermosets from isosorbide and tung oil. *Journal of Polymer Science* 58(8):1105–1114. <https://doi.org/10.1002/pol.20190291>
16. Lin Z, Zhang Y, Ober CK, Goddard JM (2018) Facile Preparation of Epoxide-Functionalized Surfaces via Photocurable Copolymer Coatings and Subsequent Immobilization of Iminodiacetic Acids. *ACS Appl Mater Interfaces* 10(47):40871–40879. <https://doi.org/10.1021/acscami.8b15716>
17. Liu M, Liu Y, Wang P, Ying W, Liu Q, Ding G, Chen S (2023) Synthesis and Properties of a Photocurable Coating Based on Waste Cooking Oil. *Coatings* 13(9), 1553. <https://doi.org/10.3390/coatings13091553>
18. Dizman C, Eral S, Babayiğit L, Apohan NK (2024) Salt Spray Resistant Acrylic Copolymers Containing Bio-based Cardanol Molecules with Hybrid Thermoplastic-Thermoset Characteristics. *J Polym Environ* 32:6029–6044. <https://doi.org/10.1007/s10924-024-03358-7>
19. Yu L, Chen L, Dong LP, Li LJ, Wang YZ (2014) Organic–inorganic hybrid flame retardant: preparation, characterization and application in EVA. *RSC Advances*, 4(34):17812–17821. *RSC Adv* 4:17812–17821. <https://doi.org/10.1039/c4ra00700j>
20. Hoque MT, Benrui T, Grethe T, Mahltig B (2023) Evaluation of chitosan based pretreatment for cotton and linen dyeing with direct dyes and reactive dyes. *Communications in Development and Assembling of Textile Products* 4(2):187–200. <https://doi.org/10.25367/cdatp.2023.4.p187-200>
21. Jain AK, Tesema AF, Haile A (2018) Development of multifunctional cotton using fluorocarbon resin. *Journal of Textiles and Fibrous Materials* 2018, 1. <https://doi.org/10.1177/2515221118786052>
22. Bhuiyan MAR, Wang L, Shanks RA, Ding J (2019) Polyurethane–superabsorbent polymer-coated cotton fabric for thermophysiological wear comfort. *J Mater Sci* 54:9267–9281. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03495-8>
23. An W, Ma J, Xu Q, Fan Q (2020) Flame retardant, antistatic cotton fabrics crafted by layer-by-layer assembly. *Cellulose* 27:8457–8469. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03356-7>



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Aeroelastic analysis of single-ply aramid and glass woven composite wing structures: numerical and experimental approaches

Mehmet Emre Oz^{a,*}, Bülent Ekici^a, Oguz Eryilmaz^b,

^aMechanical Engineering, Marmara University, 34854, Istanbul, Turkey.

^bTextile Engineering, Marmara University, 34854, Istanbul, Turkey.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 September 2024

Received in revised form 22 December 2024

Accepted 24 January 2025

Available online

Keywords:

Aeroelasticity

Composite wing

Fluid-structure interaction

Wind tunnel

ABSTRACT

Aeroelasticity involves the study of the interaction among aerodynamic, inertial, and elastic forces, where flutter manifests as a dynamic phenomenon, and divergence poses a static problem. Lightweight composite structures, that are lighter and stronger, have been studied in the current aviation industry for decades. In this study, aramid and glass plain woven single-ply composite wing structures were used in order to investigate aeroelastic interactions. The experimental and numerical comparisons of the aeroelastic responses of the wing structures were performed. Moreover, Ansys ACP was utilized to design the composite wing structure. The Fluid-Structure Interaction analysis was performed by using Ansys Fluent and Mechanical. The bending frequency responses of the wings were compared with each other at a different angle of attack (AoA) and different velocities (0 – 40 m/s). Operational Modal Analysis (OMA) was studied, and aerodynamic tests were performed using a subsonic wind tunnel to obtain the structural response of the composite wings. The flutter speed index (FSI) was determined for wings depending on the bending frequency. The aeroelastic results of computational and experimental methods for different composite wing structures were compared. The results show that the bending frequency of the aramid wing is higher than the glass wing. Also, the flutter speed index results for the aramid wing are in a safer region than the glass wing for different operational conditions.

I. INTRODUCTION

Composite materials are highly used in the aircraft industry because of their high strength-weight ratio, and they have different structural characteristics [1-4]. Various forms of composites exist, each with distinct mechanical and thermal properties [5-9]. Furthermore, modification processes are available for redesigning these material properties [10-12]. Alongside reconfiguration and using known fibers (e.g. glass, aramid, carbon) laminating composite structures is a crucial process for determining mechanical characteristics [13-15]. Renowned for their high strength-to-weight ratio and design flexibility, composite materials have transformed the aerospace industry, facilitating the development of advanced structures. However, the dynamic interaction between composite materials and aerodynamic forces during flight introduces the complex phenomenon of aeroelasticity. In the aviation industry, there's an expectation for rapid solutions to aeroelastic analysis, yielding design results. Aeroelasticity involves the interaction among aerodynamic, inertial, and structural forces acting upon and within flight vehicle structures [16-18]. All structures deform when external loads are applied, but the loads and deformation interaction create aeroelastic problems, allowing separate analyses of static and dynamic behaviors [19-21]. Dynamic aeroelasticity or flutter involves the coupled solution of load and deformation occurring simultaneously [22]. Aeroelastic flutter is a hazardous phenomenon, potentially leading to a structure's total collapse. Predicting and eliminating aeroelastic flutter is crucial during the design and testing of aircraft and other structures. Various approaches, such as wind tunnel testing, computational simulations, and flight testing, are employed to determine flutter speed and flutter boundary, ensuring structural stability and

*Corresponding author. Tel.: +90-216-777-3730; e-mail: mehmetemreoz@gmail.com

safety [23, 24]. Applications for software like FLUENT and NASTRAN are crucial in the latest developments in aeroelasticity, simplifying and expediting processes compared to analytical approaches. Aeroelastic test techniques include airstream and non-airstream tests [25]. Non-airstream tests like ground vibration modes examine the dynamic behavior of the structure and forces acting on it at single or multiple points. Vibration modes are measured by scanning responses under different angle of attack (AoA) and free stream velocities, with natural frequencies changing based on loading conditions [26]. Several methods, including Operational Modal Analysis (OMA), are used to measure the natural frequency of a wing in a wind tunnel test. Operational Modal Analysis (OMA) is a method of determining the natural frequencies, or modal properties, of a structure by analyzing its response to operational loads [27], such as wind or vibration. OMA involves analyzing the wing's response to wind tunnel conditions, such as airflow, to determine natural frequencies. Frequency Domain Decomposition (FDD), a method of performing OMA, analyzes frequency content to extract modal properties [28]. The critical flutter speed ratio, sometimes referred to as the flutter speed ratio, quantifies the relationship between a structure's critical flutter speed and flutter speed. The crucial flutter speed is the lowest velocity where flutter speed becomes independent of structural damping, while flutter speed is the minimum velocity at which aeroelastic flutter occurs in the structure [29]. In aerospace engineering, the Flutter Speed Index (FSI) is a dimensionless number and a critical parameter that represents the ratio of the aircraft's operating speed to its flutter speed. It is used to evaluate the safety margin against aeroelastic instability. The flutter boundary is determined using subsonic flutter solution methods, such as the V-g method or the P-K method [18]. The airflow velocity at which flutter occurs is identified as the flutter speed, and the ratio of operating speed to flutter speed is referred to as the boundary. In this study, dynamic behavior is compared through both numerical simulations and experimental investigations.

This study involves experimental and numerical comparisons of aeroelastic responses in aramid and glass single-ply composite wing structures. Ansys ACP was used to design the composite wing structure, and Ansys Fluent and Mechanical conducted Fluid-Structure Interaction analysis. Bending frequency responses of the wings were compared at various angles of attack (AoA) and velocities (0–40 m/s). Operational Modal Analysis (OMA) and aerodynamic tests in a subsonic wind tunnel were performed to capture structural responses.

II. EXPERIMENTAL METHOD

2.1 Materials

In this study, a single-ply composite structure was employed to assess and compare the aeroelastic behavior of the composite wing. The internal construction part underwent standard investigation, while the wing surface was analyzed experimentally and numerically. The composite structure comprised two fundamental elements: the wing's internal part and the wing surface, which were composed of glass and aramid woven fabric for this study. Aramid composites generally exhibit higher stiffness characteristics compared to glass fiber composites [18]. Vacuum infusion is highly preferred by the aviation industry because of the applicable production process for different structural parts for instance wing, airframe, nosecone, and internal elements [19]. The composite wings in this study were manufactured using the vacuum infusion process (VIP). The wing molds, designed symmetrically, and the cestamite mold were crafted using CNC machining (Figure 1). The Torayca T300 Datasheet provides information on the fabric's volumetric mass. Polymer resin epoxy material properties were sourced from

the Ansys Datasheet, indicating a density of 1160 kg/m³. The wing's surface area measures 0.012 m², and both the aramid and the glass wing surfaces weigh 2.4 g and 2.52 g, respectively.

Table 1. Fabric properties for the construction of wings

Wing material	Aramid	Glass
Fabric Type	Plain woven fabric	Plain woven fabric
Weight (g/m ²)	200	210
Thickness (mm)	0.23	0.23



Figure 1. Mold system and vacuum infusion process of the wings

In the matrix system utilized for wing production, MGS L 160 epoxy resin and MGS H 160 hardener from HEXION company were chosen. The recommended mixing ratio of epoxy resin to hardener was 100:25 by weight, according to the manufacturer's instructions. Following the production of the composite wings, one surface of the aramid wing weighed 3.52 grams, while the glass wing weighed 3.57 grams (Figure 2). The volume of fibers within a composite volume is termed the fiber volume fraction, a crucial factor enhancing the composite's tensile characteristics. By considering the weights of the fibers and composite, along with the densities of the fibers and matrix, one can calculate this fraction using the "Rule of Mixture" [30]. The fiber volume fraction (FVF) of the wing structures is calculated from Equation (1).

$$v_f = \frac{\left(\frac{m_f}{d_f}\right)}{\left(\frac{m_f}{d_f}\right) + \left(\frac{m_r}{d_r}\right)} \tag{1}$$

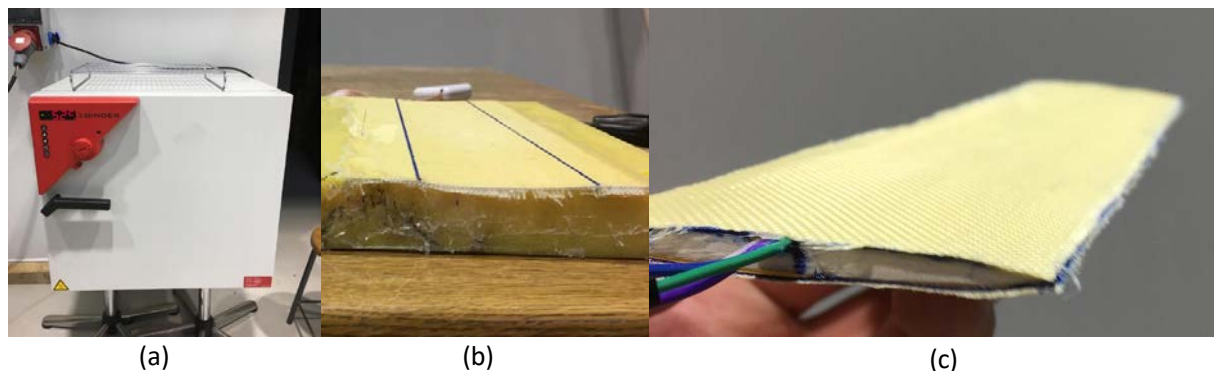


Figure 2. Composite wing manufacturing steps for the study (a) curing process (b) cutting process of surface (c) integration of upper and bottom wing surfaces

Where v_f is the fiber volume fraction (FVF), m_f is the weight of the fiber, d_f is the density of the fiber, m_r is the weight of the resin and d_r is the density of the resin. FVF is 0.68 for the aramid wing and 0.70 for the glass wing. Different methods exist for determining the fiber volume fraction (FVF) of a composite material, which is directly influenced by the processing method. In this study, the FVF exceeds 0.6 due to the use of a single-ply approach.

Table 2. Composite wing properties

Wing material	Aramid	Glass
Surface area of composite wing (m ²)	0.012	0.012
Fiber volume fraction	0.68	0.70

The wing structure consists of upper and bottom composite surfaces. Mechanical properties of the single-ply composite structures were obtained by using ASTM D3039 specimen dimensions. The mechanical properties are given in Table 3.

Table 3. Mechanical properties of aramid and glass for analyses

Material Type	Aramid	Glass
E_1 [GPa]	33.1	29.97
E_2 [GPa]	33.1	29.97
ν_{12}	0.28	0.225
ν_{21}	0.28	0.225
G_{12} [GPa]	3.61	4.98
G_{23} [GPa]	2.76	3.1
G_{13} [GPa]	2.76	3.1
ρ [kg/m ³]	1451	1930

Balsa was used the material of the wing construction elements and its mechanical properties are given in Table 4 [31]. Furthermore, balsa wood is inherently an orthotropic material; however, in this study, it is treated as an isotropic material due to the specific dimensions of the part being analyzed.

Table 4. Isotropic material properties

Material	Balsa	Epoxy
E [GPa]	3	4.3
G [GPa]	1.15	1.59
ν	0.3	0.35
ρ [kg/m ³]	130	1160

Geometrical parameters are important to investigate the flutter characteristics. In this study, NACA65A004 airfoil is analyzed, and it is a symmetrical airfoil, which does not produce the lifting force at zero angle of attack. The aeroelastic characteristics of the wing can be analyzed analytically.

A tapered leading-edge wing has been designed, with the geometrical dimensions outlined in Figure 3. These dimensions (AR= 4.44, λ =0.71) were selected considering wind tunnel testing conditions and constraints. Although the AGARD 445.6 wing is commonly preferred by aeroelasticians, its geometrical dimensions are not consistent for wind tunnel testing. To address this, a material with reduced torsional and bending stiffness, like balsa, was chosen. This choice was made due to stiffness considerations and experimental observations, as the flutter mechanism is significantly affected. Thus, balsa was selected as the material for spars and ribs. The configuration of the spars and ribs remained constant for each wing, while the composite wing surface was varied and compared in the study.

Internal support elements were bonded to the wing surface using pre-cured epoxy to complete the operation. The wing consists of two symmetrical upper and bottom surfaces, as shown in Figure 4. An accelerometer was positioned on the wing tip, and electronic signal cables were aligned along the wing ribs, nested for cable dimension.

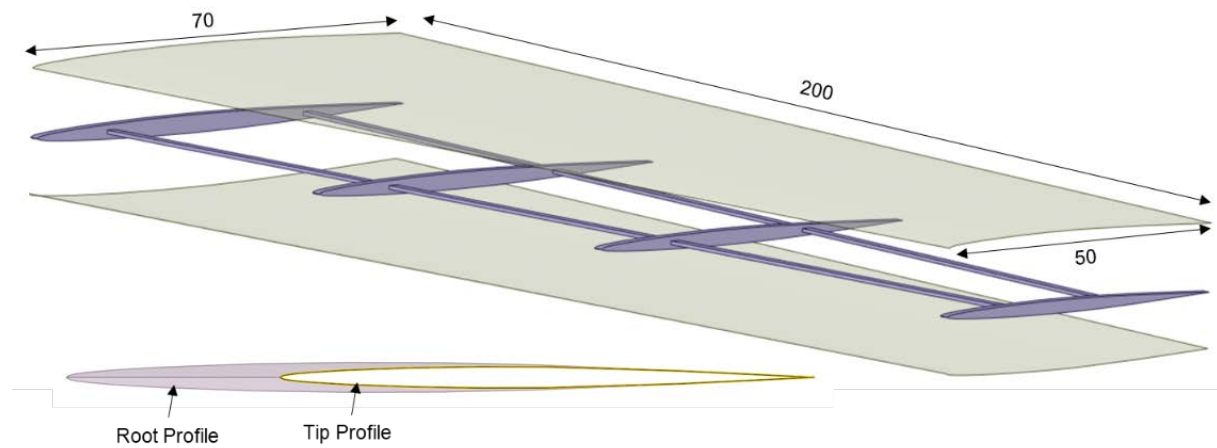


Figure 3. The dimensions and elements of the wing structure

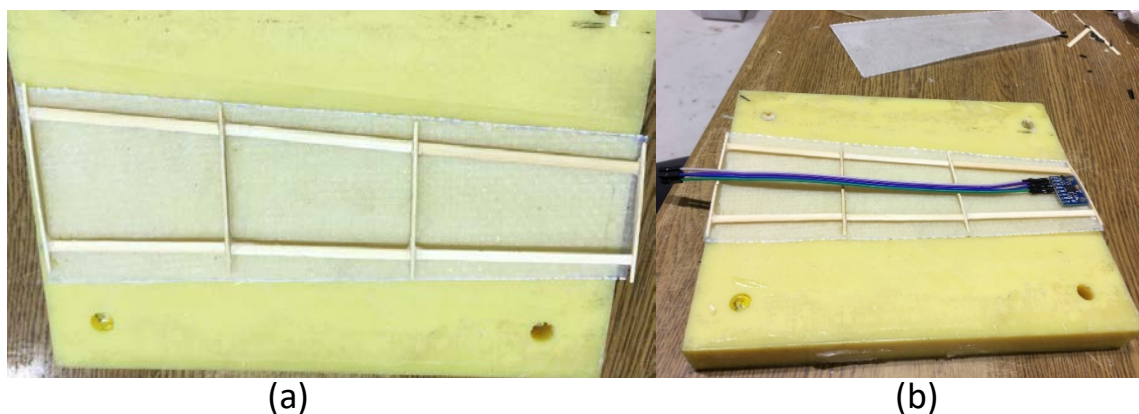


Figure 4. Wing structure (a) Rib-Spar Construction (b) Sensor integration

2.2 Computational method

Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were conducted using Ansys Fluent and Mechanical. The flow field around the wing was analyzed at a specific angle of attack and freestream velocity through Fluid-Solid Interaction analysis. Modal analysis was employed to identify the natural frequencies and mode shapes of the wing structure, utilizing pressure distribution on the wing surface obtained from the CFD study as a loading condition [22]. This facilitated a comprehensive Fluid-Structure Interaction analysis, providing significant insights into how the wing's structural response to aerodynamic loads influences fluid flow [23, 24]. Additionally, the performance and stability of two composite wing structures were compared under various aerodynamic conditions. The natural frequency and flutter behavior of both wings were analyzed using modal frequencies derived from the modal analysis [25]. To validate the simulation, findings were cross verified with results from wind tunnel tests.

Composite wing surface layers were designed in Ansys ACP, considering fiber orientation's direct impact on structure stiffness [26]. The wing's vibration characteristics were studied in a subsonic wind tunnel, aligning the aerodynamic model with experimental conditions and flow considerations such as flow separation and intensity. The Reynolds Number was 5×10^5 , indicating turbulent flow in the aerodynamic experiment. Pressure-based CFD analysis utilized the k- ω SST viscosity model for the ideal gas representing air. A fine mesh was employed near the wing, while a coarse mesh optimized solution time for regions farther from the wing-body. The dynamic characteristics of the wing, specifically its behavior under aerodynamic load, were investigated, with a focus on flutter phenomena—the non-damped oscillations of an aerostructure caused by aerodynamic forces [25]. Numerical analysis of wing responses under different airspeeds and angles of attack was carried out using fluid-structure interaction. The computational model of the composite structure in Ansys provided structural frequencies under airflow. Pressure data was transferred to the structural model, treating the wing materials as fluid-structure, and modal analysis was conducted with pre-stress. Frequency responses were investigated in harmonic analysis using transferred modal and structural environments. The mechanical and fluid models are coupled and solved simultaneously. A time step of 0.01 seconds is used for each model's overlapping solution period. In this solution, the computational system operates at a frequency of 100 Hz, ensuring that the natural frequency remains within the required range.

The mode shapes for each wing exhibited similar characteristics in structural analysis. An example of mode shapes (bending, twisting, or coupled) for the aramid composite wing is provided in Figure 5, with both calculated natural frequencies shown in Table 5.

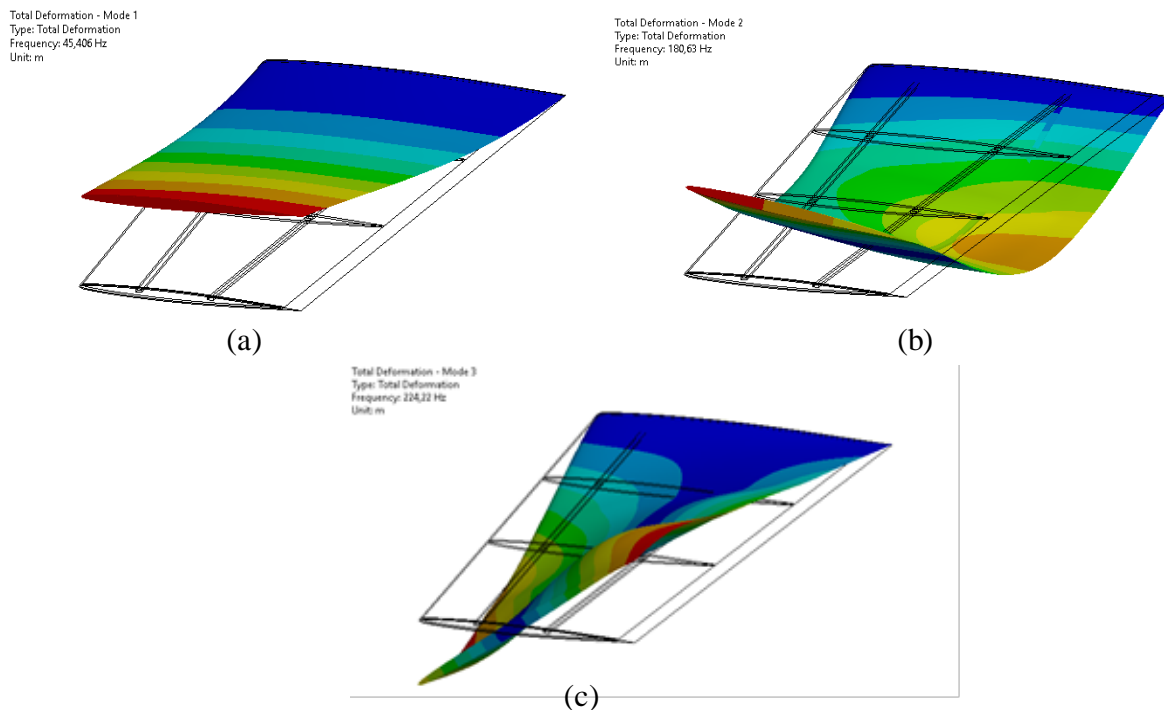


Figure 5. Composite wing calculated natural frequencies (a) Mode 1, first bending (b) Mode 2, second bending (c) Mode 3, first twisting

Table 5. The natural frequencies of aramid and glass wings

Mode	Aramid (Hz)	Glass (Hz)
1	45.648	39.076
2	180.63	167.07
3	224.22	262.08

The natural frequencies of the wing structures reveal the characteristics of their bending and twisting modes. Figure 5 illustrates the mode shapes and corresponding natural frequencies of the aramid wing. A comparable trend is observed in the frequency variations of both wings.

The flutter boundary serves as a criterion for the system's response when it becomes neutrally stable, signifying neutral response occurrence. When the speed index falls below the critical value on the flutter boundary, both displacements and lift coefficient decay, indicating a damped response [32]. The typical behavior of the flutter boundary is illustrated concerning the Mach number. The system exhibits neutral oscillation response when the flutter speed index (FSI) closely approaches the critical value of the boundary [33]. The system is stable when FSI is below the critical value. Otherwise, the response of the system is diverge periodically when FSI is beyond the critical value [34].

$$FSI = \frac{U_{\infty}}{b\omega\sqrt{\mu}} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{m}{\pi b^2 \rho l} \quad (3)$$

FSI is calculated as U_{∞} is free stream velocity, b is half-chord length, ω is structural frequency, μ is the mass ratio, m is wing mass, ρ is the density of free stream, l is the length of the wing. For the composite wing structures, flutter index numbers were obtained by using Equation 2 and 3 [34]. In the experiment, fluid flow was incompressible. The flutter point was then measured in air at a Mach number less than 1 M, with the corresponding flutter calculation based on the mass and stiffness properties of the model tested and on the experimental values of Mach number and flow density [35].

2.3. Experimental method

The aeroelastic behavior of two composite wing structures was examined in a subsonic wind tunnel, covering various speeds and angles of attack (AoA). Accelerometers were attached to the tips of each wing to monitor their responses during wind tunnel tests. Operational Modal Analysis (OMA), specifically Frequency Domain Decomposition (FDD), was employed to gain insights into how the structures behaved under different operational conditions. Frequency Domain Decomposition (FDD) is a technique used to transform collected acceleration data from the time domain into the frequency domain. This method is applied to experimental datasets to determine natural frequencies through Operational Modal Analysis (OMA), a technique for identifying modal parameters. To understand the modal characteristics of the wings across varying wind speeds and AoAs, accelerometer data were collected and analyzed using FDD, providing accurate estimations of natural frequencies and modal

parameters. Given the potential for structural failure during testing, which could harm both the tunnel mechanism and test devices, the experimental conditions were carefully controlled. The operational conditions that could lead to flutter states causing damage within the tunnel were avoided. Specifically, to prevent instability and excessive deflection due to total pressure on the wing, the freestream velocity was restricted for AoA values of 5° and 10° , mitigating potential structural issues. The primary objective of the aeroelastic test was to validate the dynamic behavior of an elastic mechanical system under aerodynamic conditions. Figure 6 illustrates the experimental setup and the subsonic wind tunnel used for these investigations.

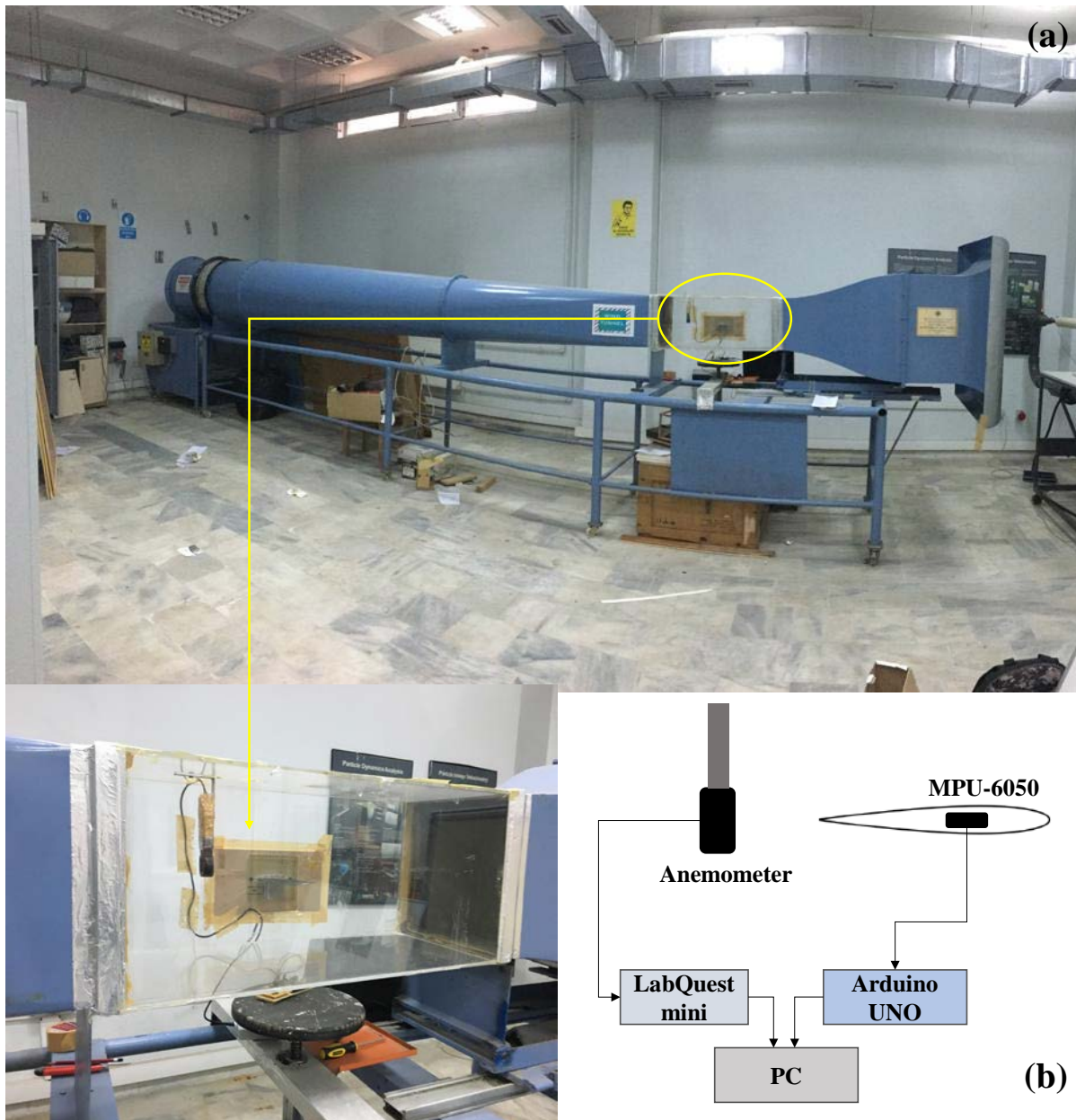


Figure 6. (a) Subsonic wind tunnel used for the study and (b) experimental setup of the data collection

During the wind tunnel test, accelerometer data were acquired from the MPU 6050, equipped with three linear axes and three rotational axes. Bending motion data of the wing was recorded in the time domain. The test was repeated

five times, with each iteration lasting sixty seconds and including the acceleration dataset. The accelerometer operated at a frequency of 50 Hz. Aerodynamic tests were conducted at various angles of attack, recognizing that aerodynamic load increases with flow velocity. However, there are conditions where the combination of angle of attack and structural resistivity of the wings might not be sufficient to withstand external loads. In such cases, aero tests were concluded within the range of wing structural capabilities. Testing was carried out up to 20 m/s and 15 m/s for $AoA = 5^\circ$ and $AoA = 10^\circ$, respectively. In this study, the Frequency Domain Decomposition (FDD) method for Operational Modal Analysis (OMA) was employed to gather response data from a composite wing structure using an accelerometer. To discern the modal characteristics of the wing under various freestream velocities and angles of attack, acceleration measurements were taken at a single location on the structure. The data, formatted for recognition by the Arduino, was transferred to MATLAB for the subsequent FDD analysis.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Bending Frequencies

The experimental and computational behavior of the composite wing was scrutinized, and the system's response was obtained in the frequency domain. A comparative analysis between numerical and experimental results has been visually presented, revealing a noticeable correlation in the frequency trends. Figure 7 illustrates the bending frequencies for the aramid wing, providing a clear representation of the concordance between numerical predictions and experimental observations.

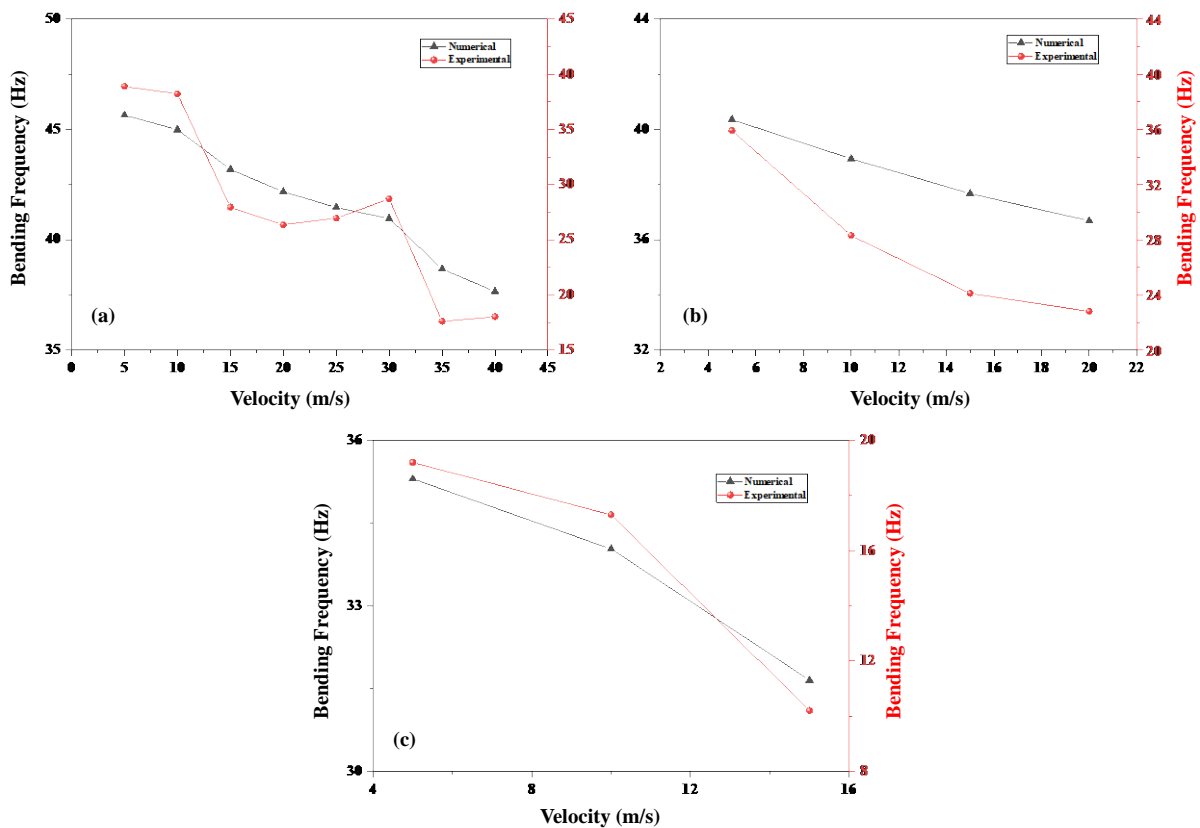


Figure 7. Bending frequencies of aramid wing at (a) $AoA=0^\circ$, (b) $AoA=5^\circ$, and (c) $AoA=10^\circ$

A variance in numerical frequencies was noted, primarily due to the negligible impact of external factors on the structural system. The freestream velocity range exhibited subtle changes, resulting in an expected small variation in natural frequencies for the aerodynamically loaded wing [36]. There is not a difference between numerical and experimental frequency outcomes which is not much. However, after 15 (m/s) this difference increased by about a factor of 2. The maximum numerical bending frequencies were identified as 45.648 Hz and 39.076 Hz, while the maximum experimental frequencies were recorded at 38.89 Hz and 32.50 Hz for the aramid and glass wings, respectively. At $AoA = 0^\circ$, the numerical decrement is approximately 17.51% and 21.44% for the aramid and glass wings, respectively. This rises to 9.09% and 15.15% at $AoA = 5^\circ$, and further to 10.34% and 10.75% at $AoA = 10^\circ$ for the aramid and glass wings, respectively. On the other hand, the experimental analysis shows more variations at $AoA = 0^\circ$ (53.68% and 60.15%), $AoA = 5^\circ$ (36% and 51.28%), and $AoA = 10^\circ$ (46% and 33%) for aramid and glass wings, respectively. The experimental results align with the anticipated trends observed in numerical simulations. For the aramid wing, a consistent decrease in bending frequency is noted with increasing freestream velocity. The frequency remains stable between 5 and 25 m/s for $AoA = 0^\circ$ in the numerical analysis results. However, in the experimental analysis, a steady behavior is observed from 15 to 25 m/s, with a deviation in frequencies between 10 and 15 m/s. Similar downward trends are apparent at $AoA = 5^\circ$ and 10° in both numerical and experimental results. The choice of accelerometer and measurement points significantly influences frequency determination. Limited data collection at the wing's tip in this study may have contributed to observed differences and impacted experimental results.

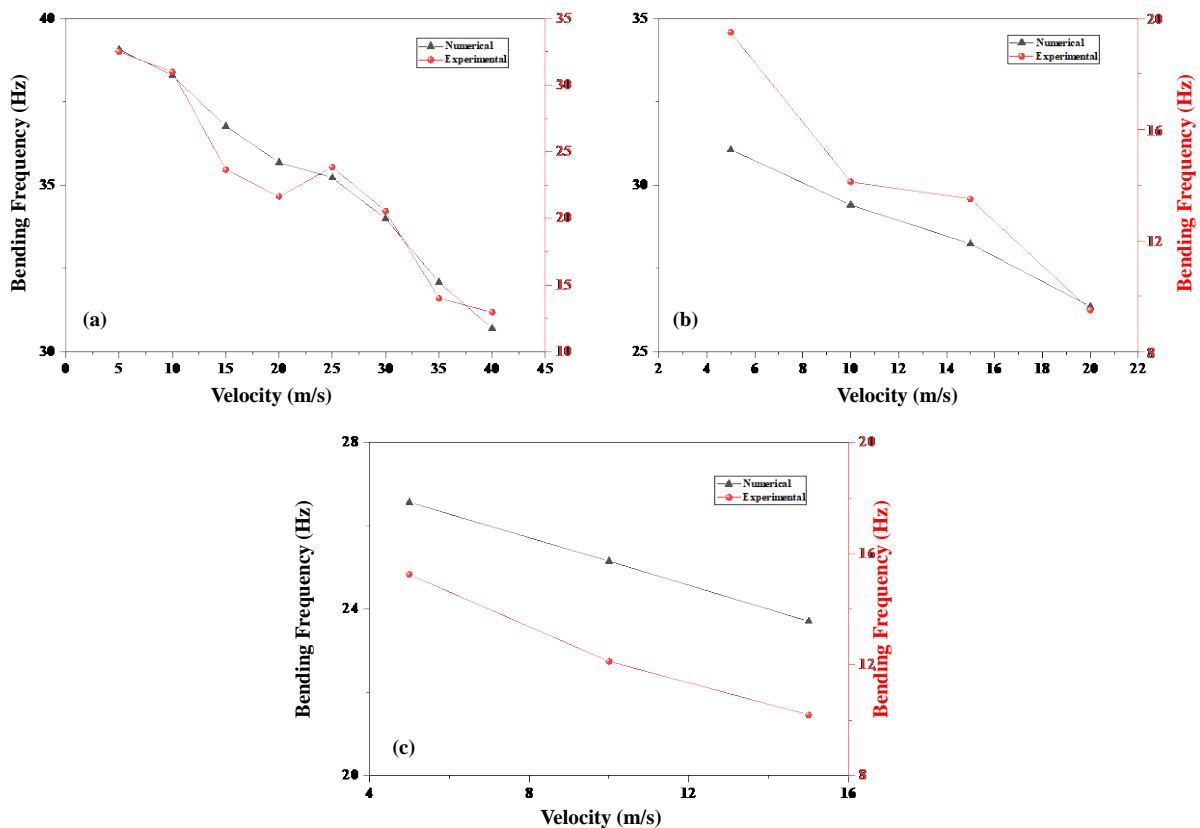


Figure 8. Bending frequencies of glass wing at (a) $AoA=0^\circ$, (b) $AoA=5^\circ$, and (c) $AoA=10^\circ$

The bending frequencies of the glass wing, under different angles of attack ($AoA = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$), are illustrated in Figure 8, comparing numerical and experimental results. At $AoA = 0^\circ$, a frequency decrease is evident in both numerical and experimental outcomes. The decrement rate continues for $AoA = 5^\circ$ and 10° , with the change in aerodynamic loading exerting a more pronounced influence. The bending frequency maintains a steady behavior at $AoA = 0^\circ$ between 10 and 30 m/s, where numerical and experimental frequencies exhibit concordant decreases at the same freestream velocities. However, a degree of irregularity is observed in the numerical result at $AoA = 0^\circ$, which contrasts with the steadier trend observed at $AoA=5^\circ$ and 10° . This suggests that the aerodynamic effects were more ideal in the computational model, while structural deformities and irregularities in the flow caused frequency deviations in the aerodynamic load [37]. The bending frequency is contingent on external load, nodal mass, and stiffness properties of the structure, decreasing as both the angle of attack and freestream velocity increase [32]. Behaviors at different operational angles of attack and velocities are depicted in Figure 9 and 10.

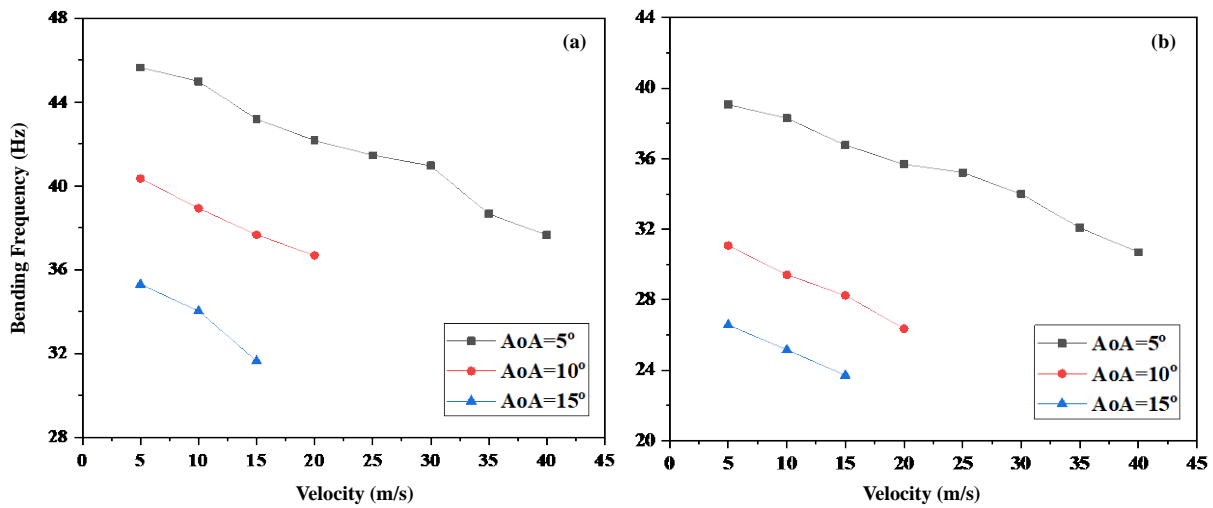


Figure 9. Numerical bending frequency results; (a) aramid wing (b) glass wing

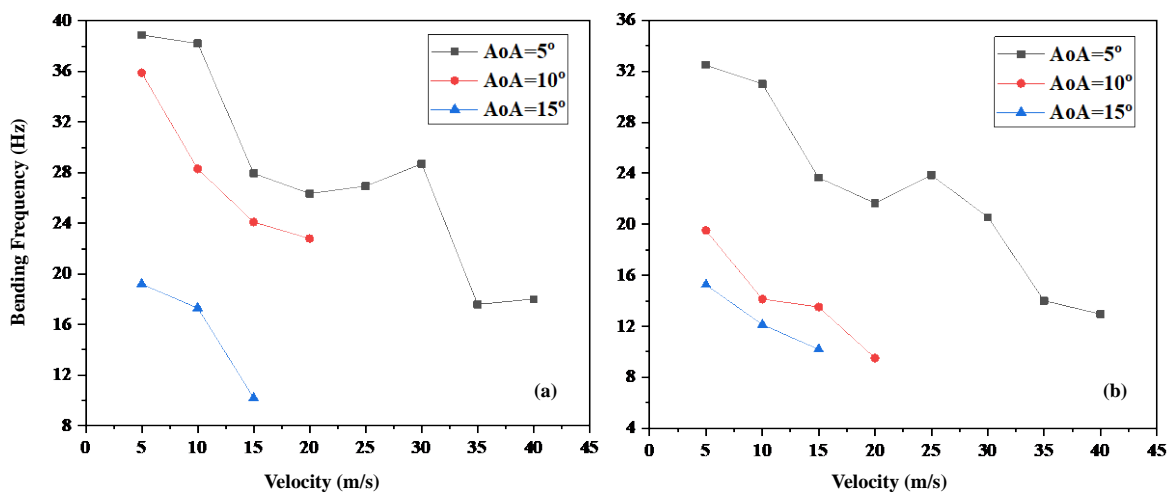


Figure 10. Experimental bending frequency results: (a) aramid wing (b) glass wing

In the numerical results for both wing structures, the bending frequency tends to remain steady up to 30 m/s at $AoA = 0^\circ$. The experimental results, as shown in Figure 10 up to 30 m/s, indicate that the frequency resists continuous decline. However, a specific frequency decrease is observed in both wings within the range of 10 to 15 m/s. This may be attributed to the operating frequency of the flow-generating motor at those speeds in the wind tunnel. The slope of the bending frequency increases relatively with the angle of attack. At an angle of attack of 5° , the aramid wing experiences a less dramatic decline in bending frequency compared to the glass wing, which undergoes a considerable drop at 20 m/s, both numerically and experimentally. Between an angle of attack of 5° and 10° , a higher drop rate is observed in the aramid wing, while the drop rate is lower in the glass wing.

3.2 Flutter Speed Index

Flutter Speed Index (FSI) values were calculated for different wing structures with bending frequencies (Figure 11) in terms of flutter characteristics of the wing structure.

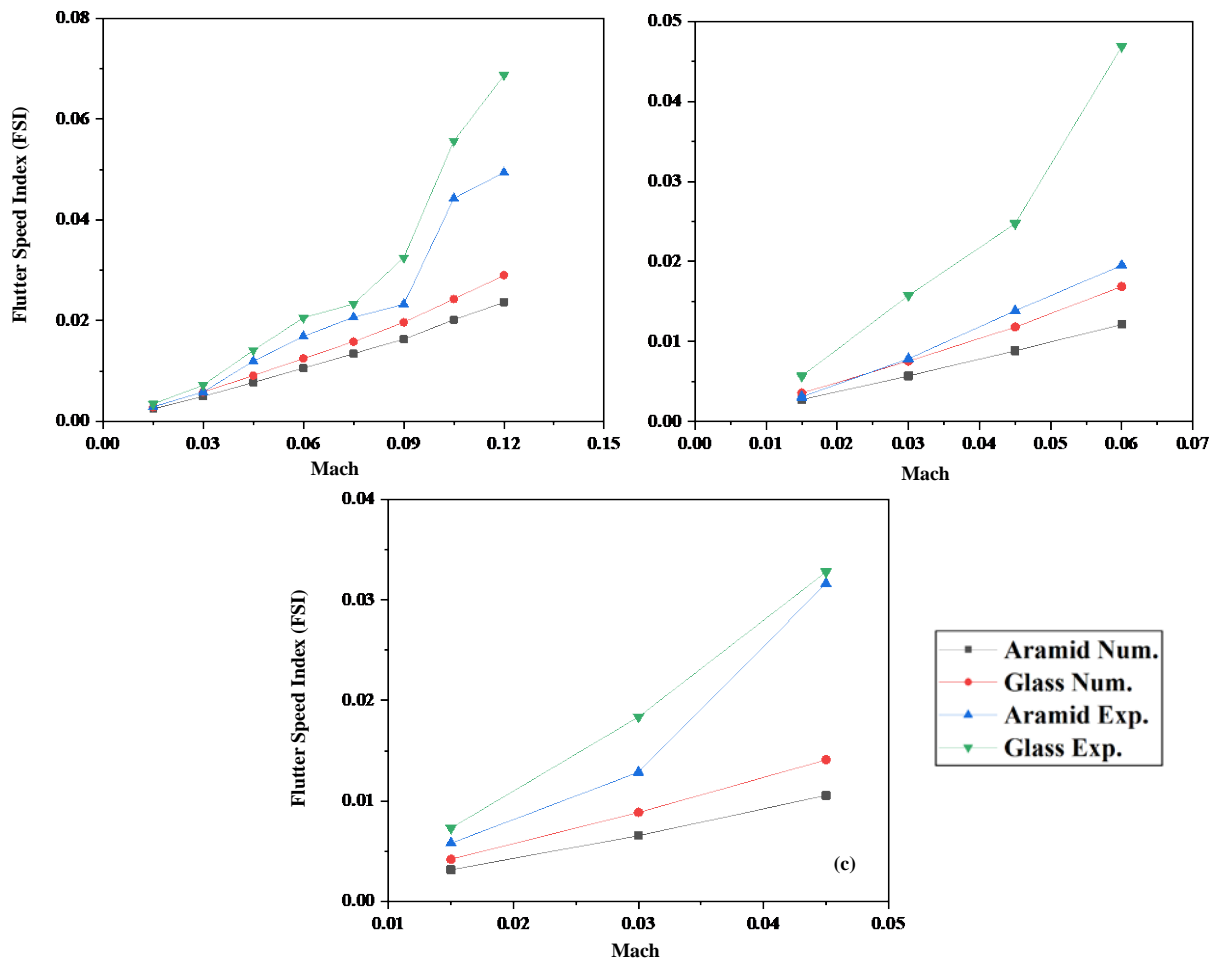


Figure 11. Numerical FSI results of at (a) $AoA=0^\circ$, (b) $AoA=5^\circ$, and (c) $AoA=10^\circ$

The FSI values being far from the flutter boundary indicates that the wing structures are in a safe zone for operational flight conditions. In this study, FSI values are below the flutter boundary. A key finding is that the

aramid wing provides lower FSI values than the glass wing in both numerical and experimental methods. In the numerical analysis results, linear behavior in FSI values is observed. However, the experimental analysis results of FSI values exhibit non-linear behavior due to the fluctuation and sudden change in bending frequencies. In contrast to experimental results, computational outcomes are free from defects and imperfections. Experimental limitations arise due to assumptions, manufacturing processes, testing conditions, and data processing, leading to variations in the amplitude of experimental results. Additionally, the experimental analysis results are higher than the numerical analysis results, as the bending frequencies in the experimental results are lower than the numerical results of the FSI number, exhibiting a sixfold difference between them. In conclusion, considering the response of the wing in the experiment, the flutter characteristics of the wing structure, based on bending frequency consideration, do not show a decrement in the FSI in both experimental and computational methods. Therefore, the structure is stable for aeroelastic test conditions. Comparatively, the NACA0012 Benchmark model studied by Rivera in the NASA Technical Report for subsonic flight conditions demonstrated a downtrend in bending frequency from 4.56 Hz to 4.07 Hz with increasing velocity [38]. Similar methodologies were employed by Khatir, T., et al. [39], indicating a downtrend in bending frequency concerning increasing freestream velocities in the subsonic range (up to 40 m/s).

IV. CONCLUSIONS

Composite wing structures, reinforced with aramid and glass fibers and featuring the NACA65A004 section profile, underwent modeling to validate their natural frequencies. An aeroelastic experiment was conducted in a subsonic wind tunnel to explore the structure's response to aerodynamic loading. With the primary goal of comparing composite wings, other material parameters (cohesive and internal elements) were held constant. The analysis focused on discerning frequency behavior based on the surface material of the wing. The general trends of the bending frequency in both numerical and experimental results are correlated. As the initial angle of attack increases, bending frequencies of the composite wings, both numerically and experimentally, decrease. This decrease is also observed with an increase in the angle of attack, influenced by changes in aerodynamic loads and turbulent flow on the wing surface. Also, it needs to be taken account that the choice of accelerometer for collecting bending acceleration, and the number of measurement points influence frequency determination. In this study, data collected from a single point at the wing's tip might have contributed to the observed subtle differences and decreases in experimental analysis results. Furthermore, there is a decrease in bending frequency with an increase in freestream velocity. The bending frequency of the aramid wing is consistently higher than that of the glass wing for different angles of attack ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, and $\alpha=10^\circ$). In terms of the flutter speed index (FSI), the aramid wing results in a safer region than the glass wing, as the bending frequency of the aramid wing is higher than that of the glass wing. Additionally, it was observed that as velocity increased in both numerical and experimental scenarios, the margin between the flutter regions of aramid and glass wings increased. The performance of the aramid wing structure is deemed more reliable due to the greater bending stiffness of aramid compared to glass. The longitudinal elasticity modulus of the orthotropic material could affect stiffness, and this can be optimized by changing the orientation of the fiber lamination. Verification and validation are essential in aerospace engineering design. Experimental data plays a critical role in analyzing aircraft components and validating numerical models. With the

rising use of low speed unmanned aerial vehicles (UAVs), the demand for aeroelastic experimental data is increasing. Future research will prioritize creating dynamic models of wing structures using experimental datasets.

ACKNOWLEDGMENT

This study has been supported and funded by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) 2209-A Program. The authors would like to acknowledge the support provided by Marmara University Faculty of Engineering and Technology as well as Thermo-Fluid Testing Laboratory.

REFERENCES

1. Eryılmaz O, Sancak E (2021) Effect of silane coupling treatments on mechanical properties of epoxy based high-strength carbon fiber regular (2 x 2) braided fabric composites. *Polymer Composites* 4212:6455-6466. <https://doi.org/10.1002/pc.26311>
2. Eryılmaz O et al (2024) FEA and experimental ultimate burst pressure analysis of type IV composite pressure vessels manufactured by robot-assisted radial braiding technique. *Int Journal of Hydrogen Energy* 50:597-612. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.302>
3. Eryılmaz O, Kocak ED, Sancak E (2023) 8-Braided natural fiber preforms. Mohamad M (ed) *Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites*. Woodhead Publishing, pp 221-237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95329-0.00007-7>
4. Yıldız Z, Eryılmaz O, (2023) 12-Preimpregnated natural fiber preforms. Mohamad M (ed) *Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites*. Woodhead Publishing, pp 327-340. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95329-0.00003-X>
5. Eryılmaz O (2024) Revalorization of cellulosic fiber extracted from the waste stem of Brassica oleracea var. botrytis L. (cauliflower) by characterizing for potential composite applications. *Int Journal of Biological Macromolecules* 266:131086. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131086>
6. Eryılmaz O et al (2020) Investigation of the Water-Based Ink Hold onto the Thermoplastic Composites Reinforced with Sisal Fibers. *Journal of Textile Science Fashion Technology* 53. <https://dx.doi.org/10.33552/JTSFT.2020.05.000612>
7. Sen M, Eryılmaz O, Bakir B (2024) Micro drilling characterization of the carbon and carbon-aramid (hybrid) composites. *Polymer Composites* 456:5449-5459. <https://doi.org/10.1002/pc.28138>
8. Öz M, Yıldırım Y, Eryılmaz O (2021) Investigation of Spacer Fabric as Vibration Reduction Material in Rocket Avionic Systems by Using Finite Element Method. in 8. *International Fiber and Polymer Research Symposium* (8. ULPAS). Eskişehir.
9. Sen M, Eryılmaz O, Bakir B (2024) Multi-objective Process Optimization of Micro-drilling Parameters on Carbon and Carbon-Aramid (Hybrid) Fabric Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09616-z>
10. Eryılmaz O, Ovalı S (2024) Investigation and Analysis of New Fiber from Allium fistulosum L. (Scallion) Plant's Tassel and its Suitability for Fiber-Reinforced Composites. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 291:51-66. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1410520>
11. Ovalı S, Eryılmaz O (2024) Physical and Chemical Properties of a New Cellulose Fiber Extracted from the Mentha pulegium L. (Pennyroyal) Plant's Stem. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 391:211-220. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1460444>
12. Ovalı S, Eryılmaz O, Uyanık S (2024) Exploring the potential of sustainable natural cellulosic fiber from Sorghum bicolor (Sorghum vulgare var. technicus) stem for textile and composite applications. *Cellulose* 31:3289-3302. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05800-4>
13. Eryılmaz O (2022) Havaçılık taşıtlarındaki uygulamalar için karbon lif takviyeli kompozit yüksek basınç/yakıt tankı tasarımı ve üretimi. Dissertation, Marmara University.
14. Eberhardt B et al (2022) Inline contactless optical measuring of glass fiber properties and retrofitting an adaptive cooling system for glass fiber production. in *Aachen Reinforced*. Aachen, Germany
15. Eryılmaz O et al (2020) Elyaf Sarma Yöntemi ile Üretilmiş Cam Lifi Takviyeli Kompozit Roket Gövdasının Paraşüt Mekanizmasının FR Kumaşlar ile Yalıtılması. in *Uşak Üniversitesi TTO 1.Ar-Ge ve Tasarım Proje Pazarı*. Uşak, Türkiye
16. Mukhopadhyay V (2003) Historical Perspective on Analysis and Control of Aeroelastic Responses. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 265:673-684. <https://doi.org/10.2514/2.5108>

17. Irani S, Sazesh S (2013) A new flutter speed analysis method using stochastic approach. *Journal of Fluids and Structures* 40:105-114. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.03.018>
18. Eryilmaz O, Öz M (2023) Aeroelastic Analysis of the Composite Wing Reinforced with Carbon Fiber. in Çankaya International Congress on Scientific Research. Ankara
19. Fagley C, Seidel J, McLaughlin T (2016) Cyber-physical flexible wing for aeroelastic investigations of stall and classical flutter. *Journal of Fluids and Structures* 67:34-47. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2016.07.021>
20. Scanlan RH (2000) Motion-Related Body-Force Functions in Two-Dimensional Low-Speed Flow. *Journal of Fluids and Structures* 141:49-63. <https://doi.org/10.1006/jfls.1999.0252>
21. Peters DA (2008) Two-dimensional incompressible unsteady airfoil theory—An overview. *Journal of Fluids and Structures* 243:295-312. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.09.001>
22. Murua J, R Palacios, JMR Graham (2012) Applications of the unsteady vortex-lattice method in aircraft aeroelasticity and flight dynamics. *Progress in Aerospace Sciences* 55:46-72. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.06.001>
23. Chai Y et al (2021) Aeroelastic analysis and flutter control of wings and panels: A review. *International Journal of Mechanical System Dynamics* 11:5-34. <https://doi.org/10.1002/msd2.12015>
24. Li W et al (2007) Thermal flutter analysis of large-scale space structures based on finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 695:887-907. <https://doi.org/10.1002/nme.1793>
25. Sundresan M et al (2012) Review of Aeroelasticity Testing Technology. *Procedia Engineering* 38:2297-2311. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.276>
26. Pagani A et al (2021) Static and dynamic testing of a full-composite VLA by using digital image correlation and output-only ground vibration testing. *Aerospace Science and Technology* 112, 106632. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106632>
27. Aenlle ML, Brincker R (2013) Modal scaling in operational modal analysis using a finite element model. *International Journal of Mechanical Sciences* 76:86-101. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.09.003>
28. Jianghua G et al (2018) Dynamic analysis of laminated doubly-curved shells with general boundary conditions by means of a domain decomposition method. *International Journal of Mechanical Sciences* 138:139:159-186. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.02.004>
29. Gallman JW, Batina JT, Yang TY (1988) Computational transonic flutter boundary tracking procedure. *Journal of Aircraft* 253:263-270. <https://doi.org/10.2514/3.45587>
30. Noroozi M, A Zajkani, M Ghadiri (2021) Dynamic plastic impact behavior of CNTs/fiber/polymer multiscale laminated composite doubly curved shells. *International Journal of Mechanical Sciences* 195, 106223. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106223>
31. Rumayshah KK, Prayoga A, Agoes Moelyadi M (2018) Design of High Altitude Long Endurance UAV: Structural Analysis of Composite Wing using Finite Element Method. *Journal of Physics: Conference Series* 10051, 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1005/1/012025>
32. Yuan W, Sandhu R, Poirel D (2021) Fully coupled aeroelastic analyses of wing flutter towards application to complex aircraft configurations. *Journal of Aerospace Engineering* 342, 04020117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001232](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001232)
33. Marques AN et al (2020) Multifidelity Method for Locating Aeroelastic Flutter Boundaries. *AIAA Journal* 584:1772-1784. <https://doi.org/10.2514/1.J058663>
34. Chaitanya J et al (2017) Vibrational characteristics of AGARD 445.6 wing in transonic flow. in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. India.
35. Dowell E H et al (1989) Unsteady transonic aerodynamics and aeroelasticity. Howard C (ed) *A modern course in aeroelasticity*. Springer Netherlands:Dordrecht, pp 443-501. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7858-5_9
36. Theodorsen T (1979) *General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter*. NASA Ames Research Center Classical Aerodynamics Theory pp 291-302.
37. Jan R et al (2014) *Aeroelasticity and Loads Models*. Jan R (Ed) *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*, pp 465-474. <https://doi.org/10.1002/9781118700440.ch21>
38. Rivera J et al (1992) NACA 0012 benchmark model experimental flutter results with unsteady pressure distributions. in 33rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Dallas.
39. Khatir T et al (2017) Experimental and numerical investigation of flutter phenomenon of an aircraft wing (NACA 0012). *Mechanics* 234:562-566. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.23.4.15175>



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Properties of poly(2-ethyl aniline)/graphene oxide (PEAn/GO) nanocomposites: influence of a synthesis method and polymerization time

 Duygu Anaklı^a
^aSivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, 58140 Sivas, Turkey

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 Nov 2024

Received in revised form 5 Jan 2025

Accepted 26 Jan 2025

Available online

Keywords:

Graphene oxide

Poly(2-ethyl aniline)

Nanocomposite

Polymerization

Electrical conductivity

ABSTRACT

In this work, the in situ polymerization of 2-ethyl aniline (2-EAn) in the presence of graphene oxide (GO) as an oxidant was carried out to synthesize conductive GO-poly(2-ethyl aniline) (PEAn) nanocomposites (GO-g-PEAn). GO-assisted GO-PEAn composite (GO-g-PEAn) refers to the chemical bonding and crystallisation of PEAn with a unique structure. The three different polymerization times, 48 h, 120 h and 240 h, were applied to analyze the effect of the reaction time on the polymerization of the composites. GO-PEAn nanocomposites were also synthesized by in situ polymerization of 2-EAn with the oxidant ammonium persulfate (APS), termed APS-GO-PEAn. GO-g-PEAn nanocomposites prepared at 120 h (5-day GO-g-PEAn) were selected as the most suitable composite based on evaluation of both scanning electron imaging and electrical conductivity characterization results. The 5-day GO-g-PEAn nanocomposites were compared with APS-GO-PEAn nanocomposites using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analysis. The Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrum confirmed the polymerisation of 2-ethyl aniline in the absence of conventional oxidants such as ammonium persulfate, potassium dichromate and potassium permanganate. XRD patterns indicate the presence of a crystalline phase of PEAn, resulting in higher conductivity in GO-g-PEAn nanocomposites than in APS-GO-PEAn nanocomposites. GO-g-PEAn nanocomposites showed promising conditions for their use as an electromagnetic interference (EMI) shielding materials.

I. INTRODUCTION

Due to their synergistic and superior physical and chemical properties (such as mechanical properties, electrical properties), graphene oxide/polyaniline (GO/PANI) composites have demonstrated applications in supercapacitors, sensors, adsorbents, solar cells, conductive dyes, electromagnetic interference (EMI) shielding materials and tissue engineering [1–8]. PANI is one of the most used conductive polymers to form composite materials and studied widely due to its promising features. For example, it exhibits better capacitance, flexibility, low cost, a wide range of electrical properties controlled by varying the doping levels and environmental stability [9, 12]. Although PANI has promising properties, it also has poor capabilities such as mechanical instability and early degradation [13]. The use of aniline derivatives to synthesize PANI polymers increases its potential to use in various application areas [12, 14]. For example, a derivative form of PANI, namely known as poly (2-ethyl aniline) (PEAn), enhanced poor solvent solubility and poor processability of PANI polymers as well as improved electrical conductivity with good chemical and oxidative stability [12, 15, 16].

A decision of suitable materials to make composite with PANI and their derivative forms mainly depends on desired properties for each application designed and new electronic properties expected based on morphological modifications or electronic interactions between the components [13, 17, 18]. Among the potential suitable materials (layered silicates, metal nanoparticles, ceramics) to form composites with PANI, graphene oxide (GO) has been widely employed as a graphene based starting material for the preparation of composites due to the

*Corresponding author. Tel.: +90-505-499-6765; e-mail: danakli@cumhuriyet.edu.tr

presence of many oxygen-containing functional groups [19]. In addition, its low production cost, improved mechanical stability, hydrophilic properties and ease of mass production have generated considerable interest in its potential applications in various scientific and industrial fields [20, 21]. The excellent properties of GO-assisted PANI composites have allowed them to exhibit improved characteristics, such as better energy density and performance, augmented strength, and superior durability. The obtained nanostructured composites also demonstrate excellent capacitance performance and good life cycles. Furthermore, the addition of GO has resulted in the improvement of the various electrical properties of the conductive PANI polymers [13].

There are several methods, including interfacial polymerization [22], electro-polymerization [19, 23] and in situ oxidative polymerization [24, 25] for various applications to produce PANI/GO composites. For example, in situ polymerization of aniline in the presence of GO sheets when ammonium persulfate (APS) used as a strong oxidant has been performed for preparation of GO-PANI nanocomposites due to its ease-going synthesis procedure and rapid oxidative reaction. Each PANI based nanocomposite preparation technique results in composites with different properties such as electrical conductivity, depending on the type of bonding structures formed between GO and PANI [26]. Zhao et al. [27] observed that the in situ polymerization of aniline by using GO nanosheets introduced a charge transfer from the interaction between the aniline and the graphene oxide, and also improved the electrical conductivity in the GO-PANI composite forms compared to pristine PANI. However, it is still a challenge to prepare the composites in a preferred state and specifications at low cost. Mutalib et al. 2021 prepared PANI/GO nanocomposites by a solution method with different weight percent of GO. The electrical conductivity of composites decreased with increasing GO loading and the highest electrical conductivity reached up to $1.83 \times 10^{-10} \text{ S cm}^{-1}$ with the 50 wt % GO loading [8]. Moghadam et al., 2014 prepared GO-PANI nanocomposites by in situ polymerization of aniline in the presence of GO as oxidant. The synthesized GO-PANI composites obtained by using GO oxidant exhibited higher electrical conductivity of 5.83 S cm^{-1} compared to 0.203 S cm^{-1} for GO-PANI obtained by APS assisted polymerization [26].

In the present work, 2-ethyl aniline was used instead of aniline, which was used in the study by Moghadam et al. (2014). The other difference is the polymerization time, 120 h was found to be sufficient for polymerization, which was less than the 240 h used. The use of GO as an oxidant for the synthesis of GO-g-PEAn nanocomposites by in situ polymerization of 2-ethyl aniline has not been studied so far. Thus, the present research work investigates the production of GO assisted GO-PEAn (GO-g-PEAn) nanocomposites by changing the duration of polymerization during a GO-g-PEAn nanocomposite synthesis process to discern alterations in their properties. In addition, GO-PEAn nanocomposites were also synthesized using a conventional oxidant APS via in situ polymerization for a comparison view. Structural and surface morphology, and electrical properties of the nanocomposite samples achieved are examined by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction analysis (XRD), and scanning electron microscopy (SEM) and are evaluated. Moreover, the electrical conductivity behaviour of the resultant nanocomposites was analyzed and assessed.

II. EXPERIMENTAL METHOD

2.1 Materials

Graphite flakes (+100 mesh ($\geq 75\%$ min)) and sulphuric acid (H_2SO_4) (95-97%) were supplied from Sigma-Aldrich (Saint Louis, MO, USA). Phosphoric acid (H_3PO_4) (65%), potassium permanganate (KMnO_4), hydrochloric acid

(HCl) (37% fuming), and hydrogen peroxide (H_2O_2) were purchased from Merck. These starting materials were used to prepare graphene oxide nanosheets. For poly(2-ethyl aniline) (PEAn) polymer synthesis and subsequently, its preparation as a nanocomposite material, 2-ethyl aniline (2-EAn, Merck) monomer, an oxidant material, ammonium persulfate (APS, $(NH_4)_2S_2O_8$, 98 wt %) and nitric acid (HNO_3) (65%) liquid were provided by Sigma-Aldrich. All the experiments in this research work were performed using deionized (DI) water (18 M Ω). All chemicals were used as received without any treatment or further purification.

2.2 Preparation Techniques

2.2.1. Preparation of graphene oxide (GO) nanosheets

Graphene oxide (GO) nanosheets were synthesized from commercially received graphite flakes in aqueous solution using the Modified Hummers' method [28]. 30% hydrogen peroxide was added to the mixture to reduce residual permanganate. The graphite oxide was thoroughly washed several times with pure DI water to remove residual strong organic acids and other reagents such as sulfate and phosphate ions. This process continued until pH=7.0 and then dried under vacuum at 60 °C overnight. The graphite oxide was dried, resuspended in DI water, and exfoliated into GO nanosheets.

In order to confirm successful synthesis of graphene oxide nanosheets, FTIR, XRD and SEM investigations were carried out.

2.2.2. Preparation of poly(2-ethyl aniline) PEAn polymer

Pure PEAn polymer was synthesized by an oxidative chemical polymerization of 2-EAn monomer by following the polymerization route addressed in [29]. FTIR analysis was carried out to confirm the synthesis of poly (2-ethyl aniline) polymer.

2.2.3. In situ synthesis of APS-GO-PEAn nanocomposites and GO-g-PEAn nanocomposites

Ammonium persulfate-assisted GO enriched PANI polymerization (APS-GO-PANI) has been described previously [26]. In the present study, APS assisted GO enriched PANI derivative "PEAn" based nanocomposites were prepared first time within an in situ polymerization of 2-EAn and the traditional oxidant ammonium persulfate (APS). 1.37 mL of 2-EAn was dissolved in 1 M HCl and mixed in a magnetic stirrer for 30 min. This mixture was then added to an aqueous GO solution (1 mg ml⁻¹) prepared in an ultrasonic bath. Approximately 0.625 g of APS was dissolved in 10 mL of 1 M HCl. It was then added drop by drop to the reaction vessel containing 2-EAn and GO. After two hours of polymerization, the product was filtered and washed three times with DI water and 1 M HCl to give APS-GO-PEAn.

On the other hand, synthesis of GO-g-PEAn nanocomposites was carried out according to the method applied by Moghadam et al. [26]. 1.37 ml of 2-EAn and 1 mg ml⁻¹ of aqueous GO solution were used as for the GO-g-PEAn synthesis. The procedure was performed by changing polymerization duration as of 48 h, 120 h and 240 h in the the reaction environment where samples left at room temperature. The resulting mixtures were centrifuged and washed with DI water and 1 M HCl. The products were kept at room temperature overnight to prepare the GO-g-

PEAn nanocomposite. In order to determine the effect of the reaction time on the polymerization of the nanocomposites as well as their features, polymerization duration was adjusted. A schematic representation of the synthesis procedure of the achieved nanocomposites is shown in Figure 1. The structure, crystallinity and morphological properties of these composites formed were characterized by couple of analytical techniques, including FTIR, XRD analysis and SEM imaging investigation.

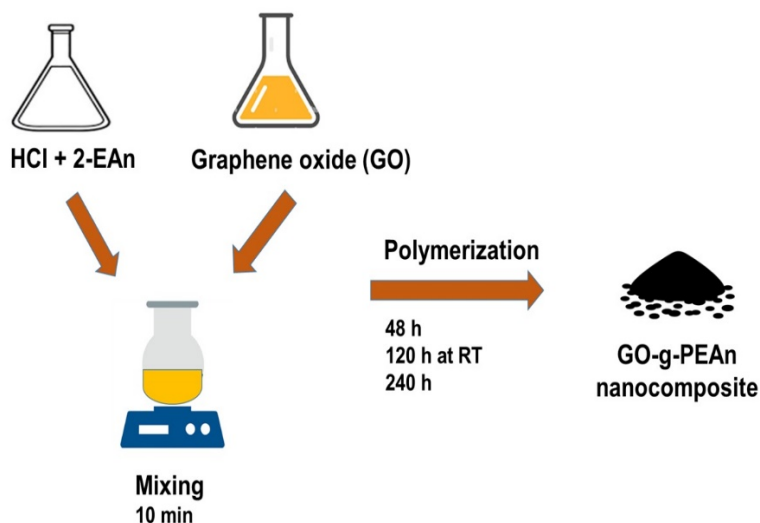


Figure 1. Schematic representation of the fabrication process of Graphene-g-PEAn nanocomposites (Color figure online)

2.3 Physicochemical Characterizations

ATR-FTIR measurements were performed on the starting materials, GO-g-PEAn and APS-GO-PEAn composites prepared using a Bruker Alpha 1003271/06 IR spectrometer (Bruker, Karlsruhe, Germany). Spectrums were recorded with a resolution of 1 cm^{-1} and 20 scans per spectrum in the wavenumber range from 400 cm^{-1} to 4000 cm^{-1} . Peaks were assigned and compared to specific chemical bonds based on previously examined studies of similar materials. The XRD spectrum of GO and the composites was obtained using a Rigaku Miniflex 600 X-ray diffractometer (Rigaku, Tokyo, Japan) to describe the structural characterization of the samples, including the phase composition, crystallinity of the materials and identification of interlayer changes in the materials. The analysis was performed using $\text{CuK}\alpha$ radiation ($\lambda = 1.5405\text{ \AA}$) at a voltage of 40 kV and a current of 15 mA. Samples were scanned from 2° to 80° at a scan rate of 5 min^{-1} . Morphological features were conducted using a field emission scanning microscope (FE-SEM, Tescan Mira3 XMU, Czech Republic). Prior to SEM analysis, the samples were coated with a thin gold layer to make them conductive for getting better resolution.

2.4 Electrical Conductivity Performance Tests of Samples

The electrical conductivity features of the samples produced were described using a digital multimeter (UNIT, UT70B), the two-probe method at room temperature environment. The two electrodes of the multimeter device system were placed over the sample to measure the resistance of the resultant samples by adjusting ten different points and performing these measurements seven times per sample. Subsequently, the electrical conductivity was

calculated by using data collected [30]. Initially, the specimens for electrical conductivity measurement were prepared with making them pellet form. To form the nanocomposite pellets, nanocomposite powders were compressed into a pellet form with a diameter of 1.13 cm and a thickness of 1.0 mm by using an 8-ton hydraulic press.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Characterization of Graphene Oxide

Graphene oxide nanosheets were successfully synthesized using the Modified Hummers' method. The brown colour obtained is evidence of the oxygen functional groups in the GO nanosheets and is shown in Figure 2a. The surface morphology of the GO nanosheets was examined by field emission scanning electron microscopy (FESEM) to confirm the sheet-like structure, while X-ray diffraction (XRD) was used to verify the purity, structural information and formation of the GO nanosheets. A typical FESEM image of the prepared GO is shown in Figure 2b, which shows GO nanosheets with wrinkled surfaces [31].

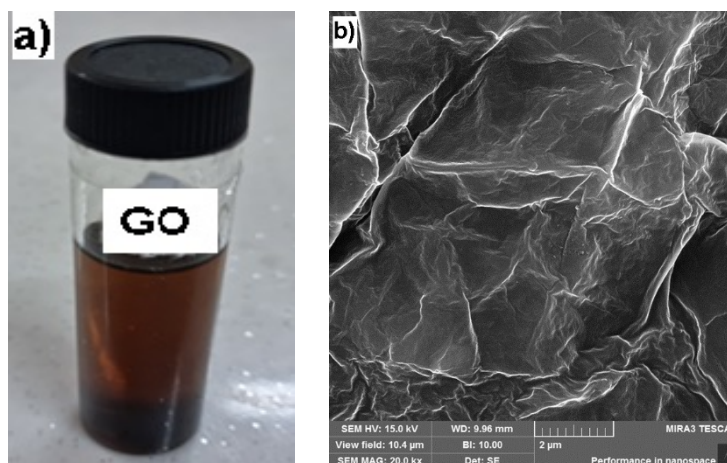


Figure 2. (a) Digital picture of GO nanosheets and (b) FESEM image of GO nanosheets achieved from the Modified Hummers' method in this work

The XRD measurement (Figure 3) showed a typical peak at 10.19° corresponding to the (002) basal plane with a d-spacing of 8.6730 \AA and an FWHM of 0.721 degrees. The high d-spacing indicates the successful of exfoliation of graphite sheets and this main peak proves the formation of sheets with oxygen containing functional groups, such as epoxy, hydroxy, carbonyl and carboxyl groups. The prepared GO also gives peaks at $2\theta = 20.25^\circ$ and 42.48° . The absence of peaks at about 26° proves the conversion of all graphite sheets into graphene oxide nanosheets [32, 33]. Based on the above-mentioned results, the GO nanosheets synthesized were used to produce GO enriched nanocomposite structures in this research work.

GO-g-PEAn nanocomposites were successfully prepared by in situ polymerization of 2-EAn using GO as an oxidant. In the literature, GO-g-PANI nanocomposites have been prepared for 240 h under room temperature conditions. In order to determine whether a shorter polymerization time would be sufficient for polymerization,

the reaction vessels were left at room temperature for 48 h, 120 h and 240 h. The optimum polymerization time was determined from the SEM images and electrical conductivity data. The results of the analyses demonstrated that the GO-g-PEAn nanocomposites prepared at 120 h (5-day GO-g-PEAn) were selected as the most suitable nanocomposites.

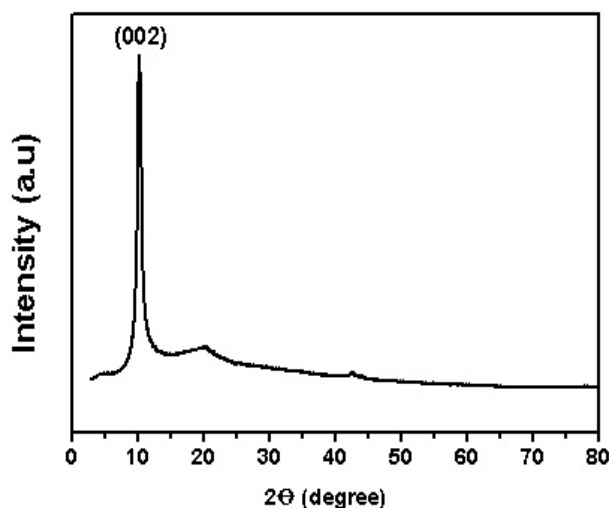


Figure 3. XRD pattern of GO nanosheets achieved from the Modified Hummers' method in this work

3.2. Estimation of Polymerization Time Effect on GO-g-PEAn Nanocomposite Preparation

The dashed area in the SEM images shows only the graphene oxide layers (Figure 4a). For the 2-day GO-g-PEAn nanocomposites, a small amount of polymer was seen on the surfaces of the graphene oxide layers, indicating insufficient polymerization, resulting in the lowest electrical conductivity compared to other nanocomposites. Figure 4b shows that the GO layers appeared smooth and undamaged. 2-EAn monomer was polymerized on the GO layers and integrated between these layers to form a sandwich structure. Figure 4c shows the PEAn polymer bridging on the surface of the graphene oxide layers. This PEAn polymer bridges between the GO sheets, resulting in an interconnected network with higher electrical conductivity.

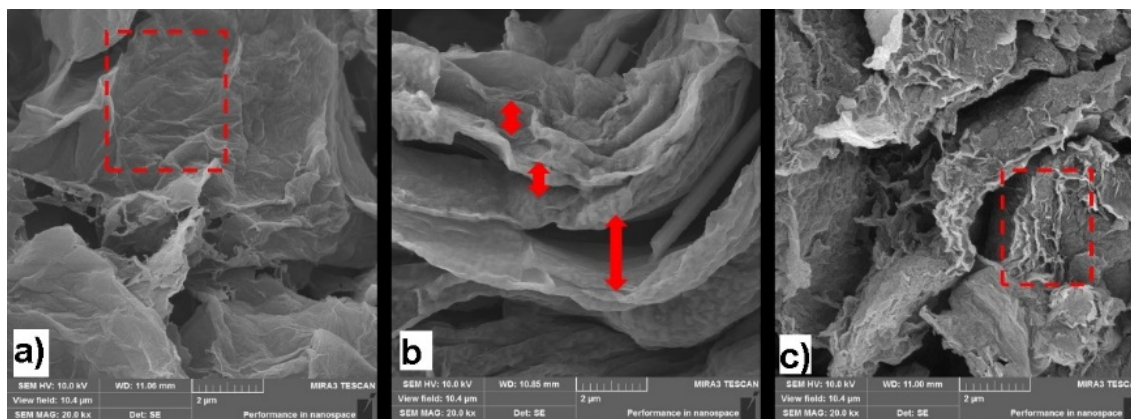


Figure 4. SEM images, (a) 2-day GO-g-PEAn, (b) 5-day GO-g-PEAn and (c) 10-day GO-g-PEAn

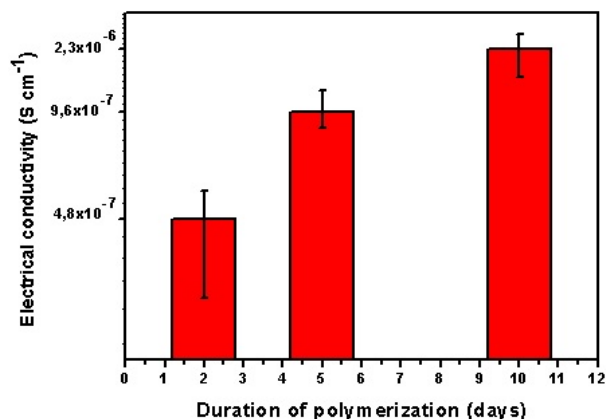


Figure 5. Electrical conductivity of the prepared GO-g-PEAn nanocomposites at different duration of polymerizations applied

As shown in Figure 5, it was observed that the composites with the highest conductivity among the GO-g-PEAn nanocomposites prepared at different polymerisation times were the 10 days GO-g-PEAn nanocomposites ($2.33 \times 10^{-6} \text{ Scm}^{-1}$). Since the electrical conductivity values obtained from the 2-day GO-g-PEAn nanocomposite were quite low ($4.83 \times 10^{-7} \text{ Scm}^{-1}$) and close to the pure PEAn value ($3.5 \times 10^{-7} \text{ Scm}^{-1}$), it was suggested that the 2-day polymerization time was insufficient for the composite preparation. After 10 days polymerization time applied which is quite long and 2 days polymerization duration appears insufficient for composite preparation, and the electrical conductivity value of 5 days GO-g-PEAn nanocomposites ($9.62 \times 10^{-7} \text{ Scm}^{-1}$) is nearby to 10 days GO-g-PEAn nanocomposites, 5 days polymerisation time was considered sufficient for GO-g-PEAn nanocomposite preparation.

From both the SEM images captured and the electrical conductivity performance results collected, the best GO-g-PEAn nanocomposite with enhanced features could be prepared by 5 days polymerization processed specimens. These nanocomposite specimens were then compared with the APS-GO-PEAn nanocomposites by using data collected by FTIR, XRD, and SEM investigations.

3.3. Comparison of GO-g-PEAn with APS-GO-PEAn Nanocomposites Prepared

The ATR-FTIR spectra of PEAn, GO, GO-g-PEAn, and APS-GO-PEAn are shown in Figure 6, together with the chemical structure of the samples. In Figure 6a, the characteristic peaks of PEAn polymer appeared at 1587 cm^{-1} and 1496 cm^{-1} correspond to the C=N and C-N stretching of the quinoid and benzenoid rings of PEAn, respectively. The peak at 1261 cm^{-1} is attributed to the polaron structure of PEAn resulting from the C-N⁺ stretching vibration. The band at 813 cm^{-1} is associated with the out-of-plane deformation of C-H in the 1,4-disubstituted benzene ring. The C-H bending vibrations appeared at 2930 cm^{-1} and the peak at 1120 cm^{-1} is attributed to the in-plane aromatic C-H bending vibrations. The successful synthesis of the PEAn polymer was confirmed with evidence received by an ATR-FTIR spectral measurement. The results were similar to those reported in the literature [34-37]. For GO nanosheets, the broad peak observed between the wavelengths of 3000 and 3500 cm^{-1} is assigned to the -OH stretching vibrational mode, indicating the presence of hydroxyl groups in the structure (Figure 6b). One of the characteristic peaks of GO nanosheets is observed at 1726 cm^{-1} due to the C=O stretching vibrations of the carbonyl

and carboxylic groups. The unoxidized graphitic region (C=C stretching) is observed at 1620 cm^{-1} . The epoxy or alkoxy C–O stretching peak is also present at 1040 cm^{-1} [26, 31, 38, 39].

Polymerization of 2-EAn was indicated by the appearance of characteristic peaks of both PEAn and GO nanosheets in the spectrum of GO-g-PEAn and APS-GO-PEAn nanocomposites. The absence of the peak of GO nanosheets at 1620 cm^{-1} in the nanocomposites indicates the reduction of unstable graphitic double bonds during polymerization. However, the peak intensities in the nanocomposites have decreased compared to PEAn, indicating an increased stability of the prepared nanocomposites [40]. On the other hand, a significant increase in peak intensities was observed in the FTIR spectrum of the GO-g-PEAn nanocomposite compared to that of the APS-GO-PEAn nanocomposites. This indicated that the delocalisation of electrons resulted in an enhancement in the electrical conductivity of the GO-g-PEAn nanocomposites, as evidenced by previous studies [16, 18].

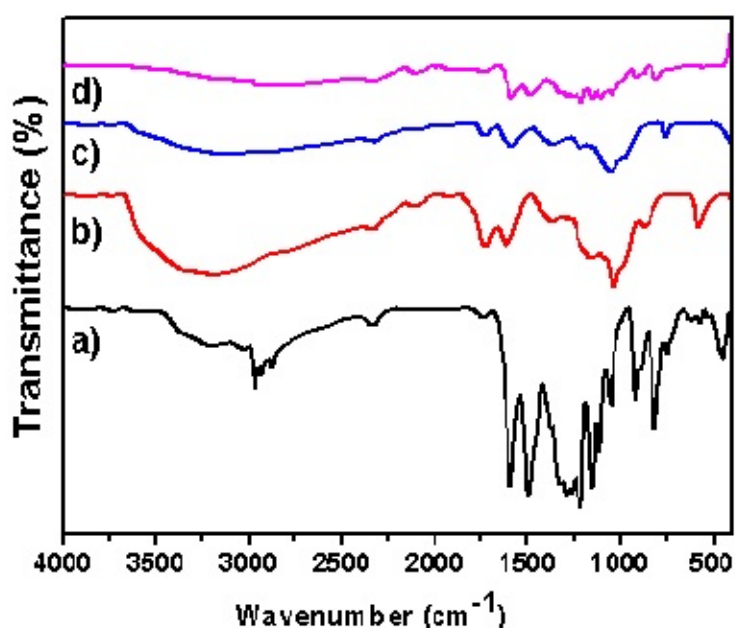


Figure 6. FTIR spectra of PEAn (a), GO (b), GO-g-PEAn (c), and APS-GO-PEAn (d)

The crystallinity of the GO-g-PEAn and APS-GO-PEAn nanocomposites achieved was determined from the XRD patterns obtained. The GO-g-PEAn nanocomposites (Figure 7a) show sharper peaks than the APS-GO-PEAn nanocomposites produced at 10.09° and 42.45° . In the XRD pattern of GO-g-PEAn there is a small amorphous phase related to PEAn, and with the other peaks indicating the presence of PEAn and GO in the structure. The diffraction peaks at 10.09° , 20.79° , 27.42° , 31.71° corresponds to (001), (100), (111) and (020) planes, respectively. The diffraction peaks for PEAn appeared at $2\theta = 14.05^\circ$ and 24.3° , corresponding to the (011) and (200) planes of the polymer in its emeraldine salt, respectively. In the XRD pattern of APS-GO-PEAn (Figure 7b), there is a more pronounced amorphous phase associated with PEAn than in the GO-g-PEAn structure. This difference is due to the newly ordered structure of PEAn in GO-g-PEAn compared to APS-GO-PEAn. The structure in GO-g-PEAn probably shows that polymer chain growth would form on the GO sheets, leading to crystallization [26].

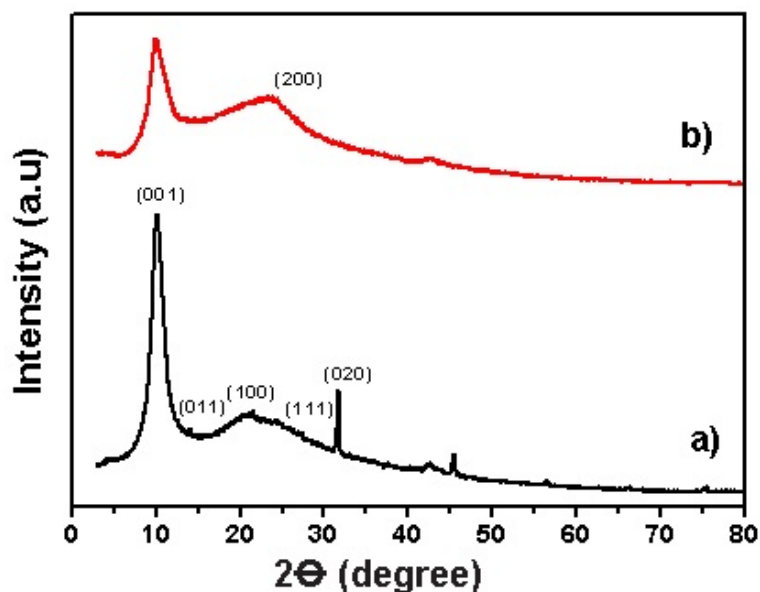


Figure 7. XRD patterns of GO-g-PEAn nanocomposite (a) and APS-GO-PEAn nanocomposite (b)

The SEM image (Figure 8a) shows that the PEAn particles are aligned on the surfaces of the GO nanosheets and intercalated between the GO layers. This composite structure was obtained with wide and layered GO sheets and granular PEAn polymer, inducing a crystalline structure with high electrical conductivity. The arrows in Figure 8a indicate the wide and smooth GO sheets. For the APS-GO-PEAn nanocomposite, the GO nanosheets were unevenly distributed uniformly within the PEAn matrix. The PEAn particles aligned in a disordered manner on the surfaces of the GO sheets, and agglomerations and aggregates of PEAn polymer were seen, resulting in low conductivity compared to GO-g-PEAn nanocomposites. The dashed area indicates the agglomerations of PEAn polymer and the arrows represent the GO sheets (Figure 8b).

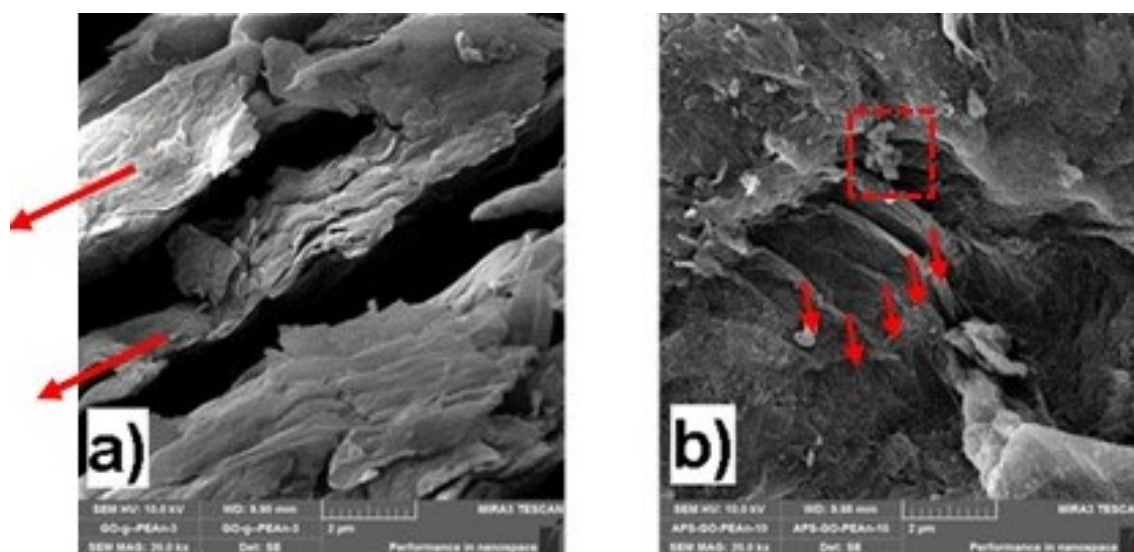


Figure 8. SEM images, (a) GO-g-PEAn nanocomposites and (b) APS-GO-PEAn nanocomposites

The schematic has been drawn to explain the composite structure in composites as shown in Figure 9. Both composites show intercalated structure and PEAn polymer aligned on graphene oxide layers.

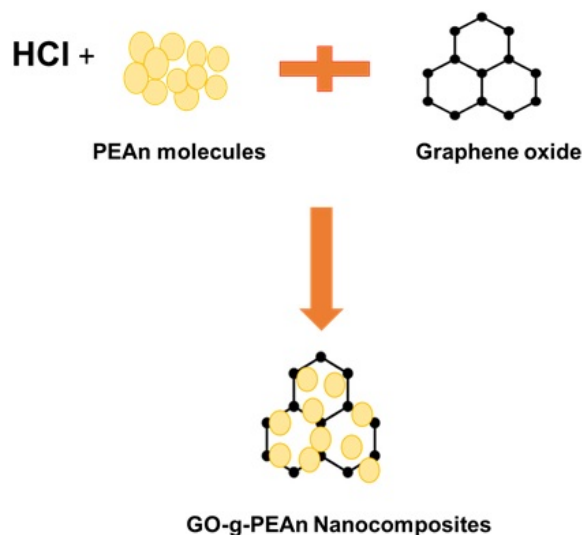


Figure 9. The schematics showing the composite structure in GO-g-PEAn nanocomposites.

The electrical conductivity of pure PEAn, GO-g-PEAn and APS-GO-PEAn composites were determined by measuring the resistivity of the samples using the two-probe method. Due to the insulating nature of GO with a low conductivity of $4.57 \times 10^{-8} \text{ S cm}^{-1}$, the addition of PEAn, which has an electrical conductivity of $3.5 \times 10^{-7} \text{ S cm}^{-1}$, to the GO structure resulted in an improvement in the conductivity of the resulting composite [41, 42]. However, the electrical conductivity of the APS-GO-PEAn nanocomposite is $5.03 \times 10^{-7} \text{ S cm}^{-1}$, which is significantly lower than that of the 5-day GO-g-PEAn nanocomposites of $9.62 \times 10^{-7} \text{ S cm}^{-1}$. This finding indicates that the electrical conductivity of the 5-day GO-g-PEAn nanocomposite has increased by approximately 0.5 order compared to the APS-GO-PEAn nanocomposite. Mutalib et al. 2021 [8], prepared GO/PANI composites with high GO (50 wt%) and showed an electrical conductivity of $1.83 \times 10^{-10} \text{ S cm}^{-1}$. This value was lower than that of the electrical conductivity of the nanocomposites prepared in this study, despite the use of PEAn polymer, which has a lower conductivity than PANI.

IV. CONCLUSIONS

As a new approach, highly conductive GO-PEAn nanocomposite materials (GO-g-PEAn) supported by GO nanosheets were successfully obtained. In this synthesis method, the nanocomposite material was obtained by in situ polymerization of 2-ethyl aniline in the presence of GO nanosheets as an oxidant. The favourable polymerization conditions also induced high crystallinity, alignment and chemical bonding between the PEAn and GO nanosheet structures. In the FTIR spectrum of GO-g-PEAn nanocomposites, a significant increase in peak intensities was observed compared to that of APS-GO-PEAn nanocomposites. The increase in electrical conductivity of GO-g-PEAn nanocomposites appears to be due to electron delocalisation. The electrical conductivity value of the GO-g-PEAn nanocomposites obtained within 5 days of polymerization time ($9.62 \times 10^{-7} \text{ S cm}^{-1}$) is significantly higher than the electrical conductivity value of both components and the prepared APS-GO-PEAn nanocomposites ($5.03 \times 10^{-7} \text{ S cm}^{-1}$) which could be caused by the delocalization of electrons. The GO-g-PEAn nanocomposites show high electrical conductivity, which supports the FTIR results, because of the higher

crystallinity and/or chemical grafting of the PEAn polymer onto the GO nanosheets. It has been demonstrated that GO-g-PEAn nanocomposites have the capacity to be utilised as EMI shielding materials.

ACKNOWLEDGMENT

This study was financially supported by Sivas Cumhuriyet University Scientific Research Project (CUBAP), project number M-2021-820.

REFERENCES

1. Yan X, Chen J, Yang J, Xue Q, Miele P (2010) Fabrication of free-standing, electrochemically active, and biocompatible graphene oxide-polyaniline and graphene-polyaniline hybrid papers. *ACS Appl Mater Interfaces* 2:2521–2529. <https://doi.org/10.1021/am100293r>
2. Wang H, Hao Q, Yang X, Lu L, Wang X (2009) Graphene oxide doped polyaniline for supercapacitors. *Electrochem. Commun* 11:1158–1161. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2009.03.036>
3. Yu H, Wang T, Wen Bo, Lu M, Xu Z, Zhu C, Chen Y, Xue X, Sun C, Cao M (2012) Graphene/polyaniline nanorod arrays: synthesis and excellent electromagnetic absorption properties. *J Mater Chem* 22:21679–21685. <https://doi.org/10.1039/C2JM34273A>
4. Hsu YC, Chen G L, Lee RH (2014) Graphene oxide sheet-polyaniline nanocomposite prepared through in-situ polymerization/deposition method for counter electrode of dye-sensitized solar cell. *J Polym Res* 21, 440. <https://doi.org/10.1007/s10965-014-0440-5>
5. Hong X, Fu J, Liu Y, Li S, Wang X, Dong W, Yang S (2019) Recent progress on graphene/polyaniline composites for high-performance supercapacitors. *Materials* 12, 1451. <https://doi.org/10.3390/ma12091451>
6. Shakir MF, Khan AN, Khan R, Javed S, Tariq A, Azeem M, Riaz A, Shafqat A, Cheema HM, Akram MA, Ahmad I, Jan R (2019) EMI shielding properties of polymer blends with inclusion of graphene nano platelets. *Results Phys* 14, 102365. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102365>
7. Cai X, Lai L, Shen Z, Lin J (2017) Graphene and graphene-based composites as Li-ion battery electrode materials and their application in full cells. *J Mater Chem A* 5:15423–15446. <https://doi.org/10.1039/C7TA04354F>
8. Mutalib TNABTA, Tan SJ, Foo KL, Liew YM, Heah CY, Abdullah MMAB (2021) Properties of polyaniline/graphene oxide (PANI/GO) composites: effect of GO loading. *Polymer Bulletin* 78: 4835–4847. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03334-w>
9. Dhawan SK, Kumar D, Ram MK, Chandra S, Trivedi DC (1997) Application of conducting polyaniline as sensor material for ammonia. *Sens Actuators B* 40:99-103. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(97\)80247-X](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(97)80247-X)
10. Song E, Choi JW (2013) Conducting polyaniline nanowire and its applications in chemiresistive sensing. *Nanomaterials* 3:498–523. <https://doi.org/10.3390/nano3030498>
11. Goswami S, Maiti UN, Maiti S, Nandy S, Mitra MK, Chattopadhyay KK (2011) Preparation of graphene–polyaniline composites by simple chemical procedure and its improved field emission properties. *Carbon* 49:2245–2252. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.01.055>
12. Sebastian J, Samuel JM (2020) Recent advances in the applications of substituted polyanilines and their blends and composites. *Polym Bull* 77:6641–6669. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-03081-7>
13. Balboa-Palomino A, Páramo-García U, Melo-Banda JA, Verde-Gómez JY, Gallardo-Rivas NV (2024) Effect of Graphene Oxide addition on the properties of electrochemically synthesized polyaniline–graphene oxide films. *Polymers* 16(12):1677. <https://doi.org/10.3390/polym16121677>
14. Bissessur R, White W (2006) Novel alkyl substituted polyanilines/molybdenum disulfide nanocomposites. *Mater Chem Phys* 99:214–219. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.10.012>
15. Thanokiang J, Sakunpongpitorn P, Direksilp C, Choichom P, Phasuksom K, Paradee N, Sirivat A (2019) Synthesis and characterization of conducting poly(2-ethylaniline) nanoparticle: Effect of surfactant template on morphology and electrical conductivity. *Synth Met* 256. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.116142>
16. Luo J, Jiang S, Wu Y, Chen M, Liu XJ (2012) Synthesis of stable aqueous dispersion of graphene/polyaniline composite mediated by polystyrene sulfonic acid. *Polym Sci Part A: Polym Chem* 50:4888–4894. <https://doi.org/10.1002/pola.26316>

17. Gao Z, Wang F, Chang J, Wu D, Wang X, Wang X, Xu F, Gao S, Jiang K (2014) Chemically grafted graphene-polyaniline composite for application in supercapacitor. *Electrochim Acta* 133:325–334. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.04.033>
18. Elnaggar EM, Kabel KI, Farag AA, Al-Gamal AG (2017) Comparative study on doping of polyaniline with graphene and multi-walled carbon nanotubes. *J Nanostructure Chem* 7:75–83. <https://doi.org/10.1007/s40097-017-0217-6>
19. Wei H, Zhu J, Wu S, Wei S, Guo Z (2013) Electrochromic polyaniline/graphite oxide nanocomposites with endured electrochemical energy storage. *Polymer* 54:1820–1831. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.01.051>
20. Li J, Zeng X, Ren T, Van der Heide E (2014) The preparation of graphene oxide and its derivatives and their application in bio-tribological systems. *Lubricants* 2:137–161. <https://doi.org/10.3390/lubricants2030137>
21. Raji M, Zari N, Abou el Kacem Qaiss RB (2019) Chemical preparation and functionalization techniques of graphene and graphene Oxide, in functionalized graphene nanocomposites and their derivatives, Elsevier, Amsterdam, ss 1–20.
22. Nguyen VH, Tang L, Shim J-J (2013) Electrochemical property of graphene oxide/polyaniline composite prepared by in situ interfacial polymerization. *Colloid Polym Sci* 291:2237–2243. <https://doi.org/10.1007/s00396-013-2940-y>
23. Jiang X, Lou S, Chen D et al (2015) Fabrication of polyaniline/graphene oxide composite for graphite felt electrode modification and its performance in the bioelectrochemical system. *J Electroanal Chem* 744:95–100. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.03.001>
24. Moon Y-E, Yun J, Kim H-I (2013) Synergetic improvement in electromagnetic interference shielding characteristics of polyaniline-coated graphite oxide/ γ -Fe₂O₃/BaTiO₃ nanocomposites. *J Ind Eng Chem* 19:493–497. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.09.002>
25. Zheng J, Ma X, He X et al (2012) Preparation, characterizations, and its potential applications of PANI/graphene oxide nanocomposite. *Procedia Eng* 27:1478–1487. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.611>
26. Mohamadzadeh Moghadam MH, Sabury S, Gudarzi MM, Sharif F (2014) Graphene oxide-induced polymerization and crystallization to produce highly conductive polyaniline/graphene oxide composite. *J Polym Sci Part A Polym Chem* 52:1545–1554. <https://doi.org/10.1002/pola.27147>
27. Zhao Y, Tang G-S, Yu Z-Z, Qi J-S (2012) The effect of graphite oxide on the thermoelectric properties of polyaniline. *Carbon* 50:3064–3073. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.03.001>
28. Hummers WS, Offeman RE (1958) Preparation of Graphitic Oxide. *J Am Chem Soc* 80(6), 1339. <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>
29. Zhao X, Gnanaseelan M, Jehnichen D, Simon F, Pionteck J (2019) Green and facile synthesis of polyaniline/tannic acid/rGO composites for supercapacitor purpose. *J Mater Sci* 54:10809–10824. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03654-x>
30. Jun YS, Um JG, Jiang G, Yu A (2018) A Study on the effects of graphene nano-platelets (GnPs) sheet sizes from a few to hundred microns on the thermal, mechanical, and electrical properties of polypropylene (PP)/GnPs composites. *Express Polym Lett* 12:885–897. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2018.76>
31. Anaklı D, Erşan M (2024) Optimization of reduced graphene oxide yield using response surface methodology. *Diamond Relat Mater* 148. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111524>
32. Mohammed LA, Majeed AH, Hammoodi OG, Prakash C, Alheety MA, Buddhi D, Dadoosh SA, Mohammed IK (2023) Design and characterization of novel ternary nanocomposite (rGO-MnO₂-PoPDA) product and screening its dielectric properties. *Int J Interact Des Manuf* 17:2387–2401. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01020-x>
33. Aksoy C, Anakli D (2019) Synthesis of Graphene Oxide Through Ultrasonic Assisted Electrochemical Exfoliation. *Open Chemistry* 17:581–586. <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0062>
34. Anaklı D, Çetinkaya S (2010) Preparation of poly(2-ethyl aniline)/kaolinite composite materials and investigation of their properties. *Curr Appl Phys* 10:401–406. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2009.06.037>
35. Anaklı D (2024) Influence of graphene concentration on the properties of the composite prepared with poly(2-ethyl aniline) by mechanochemical method. *Int J Mater Res* 115:208–220. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2023-0098>
36. Blinova NV, Stejskal J, Trchová M, Prokeš J, Omastová M (2007) Polyaniline and polypyrrole: A comparative study of the preparation. *Eur Polym J* 43:2331–2341. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.03.045>
37. Lamichhane P, Dhakal D, Jayalath IN, Baxter L, Chaudhari S, Vaidyanathan R (2022) Polyaniline and graphene nanocomposites for enhancing the interlaminar fracture toughness and thermomechanical properties of carbon fiber/epoxy composites. *arXiv preprint arXiv:2207.09500*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.09500>

38. Hidayah NMS, Liu WW, Lai CW, Noriman NZ, Khe CS, Hashim U, Lee HC (2017) Comparison on graphite, graphene oxide and reduced graphene oxide: Synthesis and characterization. AIP Conference Proceedings 1892. <https://doi.org/10.1063/1.5005764>
39. Sudesh Kumar N, Das S, Bernhard C, Varma GD (2013) Effect of graphene oxide doping on superconducting properties of bulk MgB₂. Supercond Sci Technol 26(9). <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/9/095008>
40. Rajagopalan B, Hur SH, Chung JS (2015) Surfactant-treated graphene covered polyaniline nanowires for supercapacitor electrode. Nanoscale Res Lett 10:183. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0888-1>
41. Mahla DK, Rahaman M, Khastgir D (2015) Composition-dependent electrical and dielectric properties of Polyaniline/Graphene composites produced by in situ polymerization technique. Polym Compos 36:445–453. <https://doi.org/10.1002/pc.22959>
42. Jaafar E, Kashif M, Sahari SK, Ngaini Z (2018) Study on morphological, optical and electrical properties of graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (rGO). Materials Science Forum 917:112-116. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.917.112>



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

From blueprint to reality: how digital twins are shaping the architecture, engineering, and construction landscape

 Aslıhan Şenel Solmaz^{a*}^aDokuz Eylül University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, İzmir, 35110, Turkey.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 September 2024

Received in revised form 16 December 2024

Accepted 30 January 2025

Available online

Keywords:

Digital Twin

Building Information Modelling

Architecture Engineering and Construction

Smart Building System

Digital Technologies

ABSTRACT

Digital Twin (DT) technologies are reshaping the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry by bridging physical and digital domains to enable real-time data integration, advanced simulations, and predictive analytics. This study systematically investigates the role of DT technologies in addressing persistent industry challenges such as inefficiencies, cost overruns, and sustainability goals. Through a detailed literature review of 95 publications spanning 2019 to 2024, the research identifies key contributions, barriers, and gaps in DT applications across lifecycle phases and scales, ranging from individual buildings to urban infrastructure. The findings emphasize DT's transformative potential in enhancing operational efficiency, predictive maintenance, energy optimization, and sustainability. A comprehensive framework is proposed to guide the integration of DTs, addressing technical, economic, and knowledge-based challenges while highlighting opportunities to leverage complementary technologies such as IoT, BIM, AI, and blockchain. The study concludes with actionable recommendations for advancing DT adoption in the AEC industry, paving the way for smarter, more sustainable built environments.

I. INTRODUCTION

The Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry faces persistent challenges like cost overruns, project management inefficiencies, sustainability issues, and complex data handling, which demand more advanced technological solutions. While Building Information Modeling (BIM) and data-driven tools have streamlined many workflows, they struggle to manage real-time dynamic data effectively. Recent studies emphasize that Digital Twin (DT) technology can address these limitations by enhancing multiple lifecycle phases, such as BIM and facilities management, and supporting decision-making with real-time insights [1]. Moreover, a state-of-the-art review highlights how integrating DT into construction lifecycle management offers a framework for addressing key industry needs and improving efficiency, innovation, and sustainability [2]. Notably, research trends point to emerging challenges in data interoperability and the integration of Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) technologies during the design and construction phases, suggesting that broader adoption of DT could further optimize processes and outcomes across the AEC industry [3,4].

The concept of DT has evolved significantly since its introduction by Michael Grieves in 2002 [5], where it was first described as a comprehensive virtual counterpart to a physical product, capturing all its properties from microscopic to macroscopic levels. Initially applied in aerospace and aeronautics by NASA and the U.S. Air Force to optimize vehicle performance and predict maintenance needs [6], DT technology has since expanded into various industries. In manufacturing, DTs are integral to Industry 4.0, facilitating design validation, process

*Corresponding author. Tel.: +90-232-301-8494; e-mail: aslihan.senel@deu.edu.tr

optimization, predictive maintenance, and lifecycle management [7], helping detect early design flaws and saving time and cost in production.

AEC industry has also started leveraging DT technology to address challenges like data overload and project management inefficiencies. DTs streamline communication among stakeholders such as architects, engineers, and contractors, improving collaboration throughout the lifecycle of construction projects-from design to demolition. By enabling real-time monitoring, simulation, and predictive analysis, they enhance decision-making and efficiency across different construction phases, making the industry more agile and connected [8].

Beyond construction, DT technology is expanding into sectors like healthcare, energy, and smart cities [9]. In smart cities, DTs are used for urban planning, infrastructure management, and disaster response, simulating real-world scenarios to help evaluate risks and improve sustainability. They are a key tool for improving city infrastructure and services, contributing to the creation of more resilient and efficient urban environments [10]. As DT continues to evolve, its cross-industry applications will drive innovation, collaboration, and sustainability, transforming industries undergoing digital transformation [11].

Despite their wide applicability, DTs face challenges such as system interoperability and real-time data synchronization, particularly in industries like AEC [12]. However, the consensus remains that this technology is essential for reducing costs and time, increasing productivity, improving maintenance, supporting decision-making, and promoting sustainability across multiple sectors [13]. Research has highlighted their transformative potential in improving operational efficiency, sustainability, and stakeholder collaboration. However, despite their advantages, DT implementations are often hindered by interoperability issues, high costs, and knowledge gaps among AEC professionals. Addressing these challenges requires a structured, industry-specific approach that aligns technological innovation with practical needs.

This study aims to systematically explore the role of DT technologies in the AEC industry by analyzing their applications, benefits, and limitations. It examines how these technologies enhance lifecycle management, operational efficiency, and sustainability while addressing key barriers to adoption, such as interoperability and cost challenges. Furthermore, the study proposes a conceptual framework to guide the integration of DTs across various scales and lifecycle phases, ultimately offering a roadmap to foster innovation and sustainability in the built environment.

II. METHOD

This section outlines the systematic approach adopted to explore and analyze the role of DT technologies in the AEC industry. The methodology employed ensures a comprehensive and rigorous synthesis of the existing literature, enabling actionable insights into key contributions, barriers, and gaps associated with these applications.

2.1 Research Approach

This study employs a systematic review methodology, concentrating on peer-reviewed journal articles and selected conference proceedings. The objective is to highlight the key contributions of twin technologies in the buildings, identify barriers and gaps in the existing body of knowledge, and propose a conceptual framework to guide future DT implementations.

2.2 Data Collection

2.2.1. Literature Search

A targeted search was conducted on established academic databases, including Web of Science, Scopus, and Google Scholar, to gather relevant literature. Keywords such as “Digital Twin”, “AEC”, “BIM” and “digital technologies” were utilized to ensure a broad yet focused retrieval of articles.

2.2.2. Criteria for Inclusion and Exclusion

To ensure a rigorous and relevant literature selection process, clearly defined inclusion and exclusion criteria were applied. Articles eligible for inclusion were those published between 2019 and 2024, focusing specifically on DT applications within AEC industry or closely related fields. Only peer-reviewed journal articles, conference proceedings, and review papers were considered. Studies that did not explicitly address DT technologies or related advancements were excluded, as were non-peer-reviewed sources such as blog posts, white papers, and editorials. Additionally, articles published in languages other than English were omitted to maintain consistency and accessibility.

The selection process began with a broad search of abstracts, keywords, and titles to identify potentially relevant studies. This was followed by a more detailed review of the full texts to confirm their alignment with the study’s objectives. After applying these criteria, a total of 95 articles were identified as meeting the inclusion requirements and were subsequently analyzed in depth for their contributions, challenges, and gaps in DT applications.

2.3 Data Analysis

2.3.1. Categorization and Coding

To gain a thorough understanding of the contributions made by each selected article, a systematic approach was employed to analyze and categorize the literature across multiple dimensions. These included the primary research objectives of each study, the methodologies utilized, and the specific technologies explored, such as BIM, IoT, and AI. Particular attention was given to the lifecycle phase addressed by each article whether in design, operation, or maintenance, and the scale of application, which ranged from individual buildings to urban scale projects. Furthermore, the analysis identified each study’s key contributions to the existing body of knowledge, alongside the barriers and challenges encountered in implementing twin technologies. The research also highlighted significant gaps in literature, offering a foundation for addressing these shortcomings. Finally, the relevance of each article to the present study and its primary outcomes was critically assessed to extract actionable insights that would inform the development of a robust and forward-looking conceptual framework.

2.3.2 Quantitative and Qualitative Analysis with Visualization

The data extracted from the selected literature was subjected to both quantitative and qualitative analysis to ensure a comprehensive understanding of trends, contributions, and gaps in digital twin research within the AEC. Statistical methods were employed to quantify key patterns, such as the frequency of lifecycle phases addressed (e.g. design, operation, maintenance), the distribution of technologies mentioned (e.g. BIM, IoT, AI), and temporal

trends in DT research and applications over the past decade. Additionally, a thematic analysis was conducted to identify recurring themes across the extracted data, focusing on “Key Contributions”, “Barriers/Challenges” and “Gaps Identified”. These thematic insights informed us about the development of actionable recommendations and the conceptual framework presented in this study. To enhance clarity and facilitate interpretation, key findings were visualized using graphs. These visualizations provide a clear representation of statistical trends and thematic patterns, offering an evidence-based foundation for the study’s conclusions and proposed framework.

2.4 Framework Development Process

The insights gained from the literature analysis were synthesized to develop a conceptual framework aimed at advancing the adoption of DT technologies in buildings. This framework provides a phased roadmap for integrating these significant technologies across the various stages of the building lifecycle, from design and construction to operation and maintenance. It also includes practical recommendations for overcoming critical challenges such as interoperability issues, data privacy concerns, and the high implementation costs associated with DT adoption. Furthermore, the framework outlines strategies for leveraging emerging technologies, including AI, IoT, and blockchain to enhance the functionality and effectiveness of these systems. This comprehensive framework is intended to guide practitioners and researchers in implementing DT solutions more efficiently and sustainably.

2.5 Research Limitations and Future Validation Opportunities

The findings and insights presented in this study were derived from a comprehensive analysis of the selected literature, ensuring a systematic and robust synthesis of existing knowledge. While efforts were made to align the results with established trends and challenges in the AEC industry, this study relies primarily on academic literature, which may not fully capture emerging technologies or undocumented practices in the field. The proposed framework has not yet undergone empirical testing or external validation, leaving its practical application open for further research. Future work could involve collaborating with industry practitioners and integrating feedback to refine and validate the framework in real world scenarios.

III. LITERATURE REVIEW: DIGITAL TWIN TECHNOLOGIES AND THEIR IMPACT ON THE AEC INDUSTRY

This section reviews the current state of DT technologies in the buildings and construction. It explores their conceptual foundations, applications across lifecycle phases, and the challenges and gaps hindering widespread adoption. Synthesizing insights from the literature, this review highlights the transformative potential of these technologies and establishes the foundation for the proposed framework. The section is organized into four subsections: an overview of digital twin technologies (Section 3.1), their applications in AEC (Section 3.2), barriers and gaps in the literature (Section 3.3), and findings from a systematic review of 95 research articles (Section 3.4).

3.1 Overview of Digital Twin Technologies

DT technologies bridge the gap between the physical and digital worlds by creating dynamic, real-time models of physical entities and systems. These digital replicas are continuously synchronized with their real-world counterparts through real-time data streams [14]. By enabling enhanced visualization, real-time monitoring, and predictive analytics, DT technologies empower data-driven decision-making across a building's lifecycle.

Expanding on standard DTs, virtual twins offer advanced simulation capabilities to predict future scenarios and assess outcomes prior to physical implementation. Originally developed for industries such as aerospace, manufacturing, and healthcare, DT technologies have gained significant traction in the AEC industry. Their ability to optimize workflows improving design coordination, construction efficiency, and decision-making—makes them a transformative tool for modern projects. By delivering actionable insights, DTs enable stakeholders to make informed decisions, enhancing performance and sustainability throughout a project's lifecycle [15].

While DT technologies have broad applications across multiple industries, their implementation in the AEC industry presents unique opportunities and challenges. The following section examines how DTs are applied in building design, construction, and lifecycle management, with specific examples illustrated in Figures 1 and 2.

3.2 Applications of Digital Twin Technologies in AEC

DT technologies are transforming the building and construction industry by enabling seamless interaction between the physical and digital realms throughout the building lifecycle. These systems are structured around three interconnected zones: the physical zone, the digital zone, and the connection/integration zone (Figure 1) [16]. The physical zone represents the real-world building, where IoT sensors and devices continuously track environmental conditions, energy consumption, and system performance. The data collected forms the basis for creating accurate digital representations. The digital zone comprises a highly detailed virtual model that mirrors the physical asset, leveraging real-time data to simulate, predict, and optimize building operations. Connecting these two zones is the integration zone, which ensures continuous data exchange and feedback, enabling dynamic monitoring, simulation, and optimization across the building's lifecycle [17, 18].

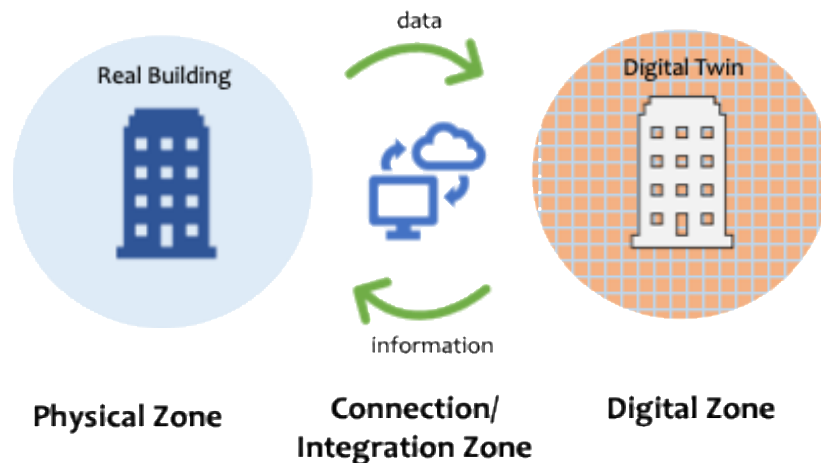


Figure 1. General framework of DTs in AEC (developed by the author)

As illustrated in Figure 1, DT systems enable a continuous, bidirectional flow of information between physical assets and their digital counterparts. By leveraging IoT enabled data collection and cloud-based platforms, DTs ensure real-time synchronization, facilitating enhanced monitoring, predictive analytics, and data-driven decision-making across the design, construction, and operational phases of the building lifecycle. Building on this, Figure 2 provides a detailed perspective of the layered architecture of DT systems, highlighting the core components involved in data collection, processing, and interaction. These interconnected layers form the backbone of DT functionality, empowering stakeholders to collaborate effectively and optimize building performance at every stage of the lifecycle.

DT technologies have significantly impacted architecture and building design, offering a structured, multi layered framework to enhance the entire building lifecycle. Each layer builds upon foundational technologies, enabling seamless integration and functionality. At their core, DTs merge physical models and real-time information flows to create a dynamic, iterative process of optimization. This approach reduces design time, minimizes errors, and helps avoid costly rework. In the construction phase, twins provide real-time progress tracking, while in the design and engineering stages, they enhance inception, briefing, design development, and technical planning. Figure 2 outlines the key layers of this framework, illustrating how data is collected, processed, and applied to continuously refine building performance.

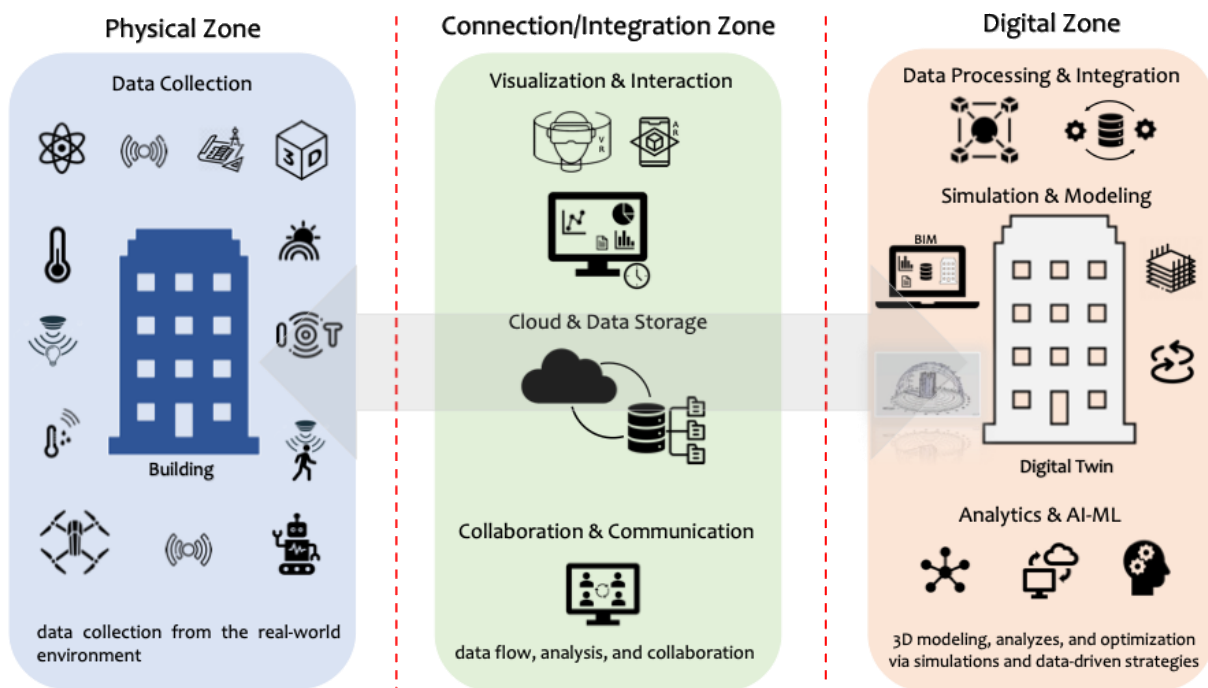


Figure 2. Layers of DT architecture in the context of building design and lifecycle management (developed by the author based on insights from the literature)

At the core of DT architecture is the Data Collection Layer, which gathers real-time information from IoT sensors, RFID tags, drones, and robotics. These tools capture critical data such as temperature, energy usage, and site conditions, which can be unstructured, semi-structured, or structured. This raw data is processed in the Data

Processing & Integration Layer, where edge computing pre-processes large data volumes before transmitting them to cloud servers via 5G technology. This approach ensures seamless system integration, real-time responsiveness, and minimized data leakage [19]. The Simulation & Modeling Layer lies at the heart of the DT, where static and dynamic data merge to create detailed virtual models. These models facilitate scenario testing, enabling architects and engineers to refine designs and optimize performance before implementation. Advanced tools within the Analytics & AI Layer support predictive maintenance and energy optimization, while real-time construction data enhances progress monitoring and resource management, driving building efficiency and sustainability. The Visualization & Interaction Layer provides users with immersive AR/VR tools, enabling real-time interaction with DT. This facilitates continuous monitoring and lifecycle management, ensuring structures remain efficient and sustainable. Supporting these layers are the Cloud & Data Storage Layer, which offers infrastructure for processing and storing data, and the Collaboration & Communication Layer, which fosters real-time cooperation among stakeholders. Together, these interconnected layers empower DTs to simulate, monitor, and optimize building performance throughout the lifecycle.

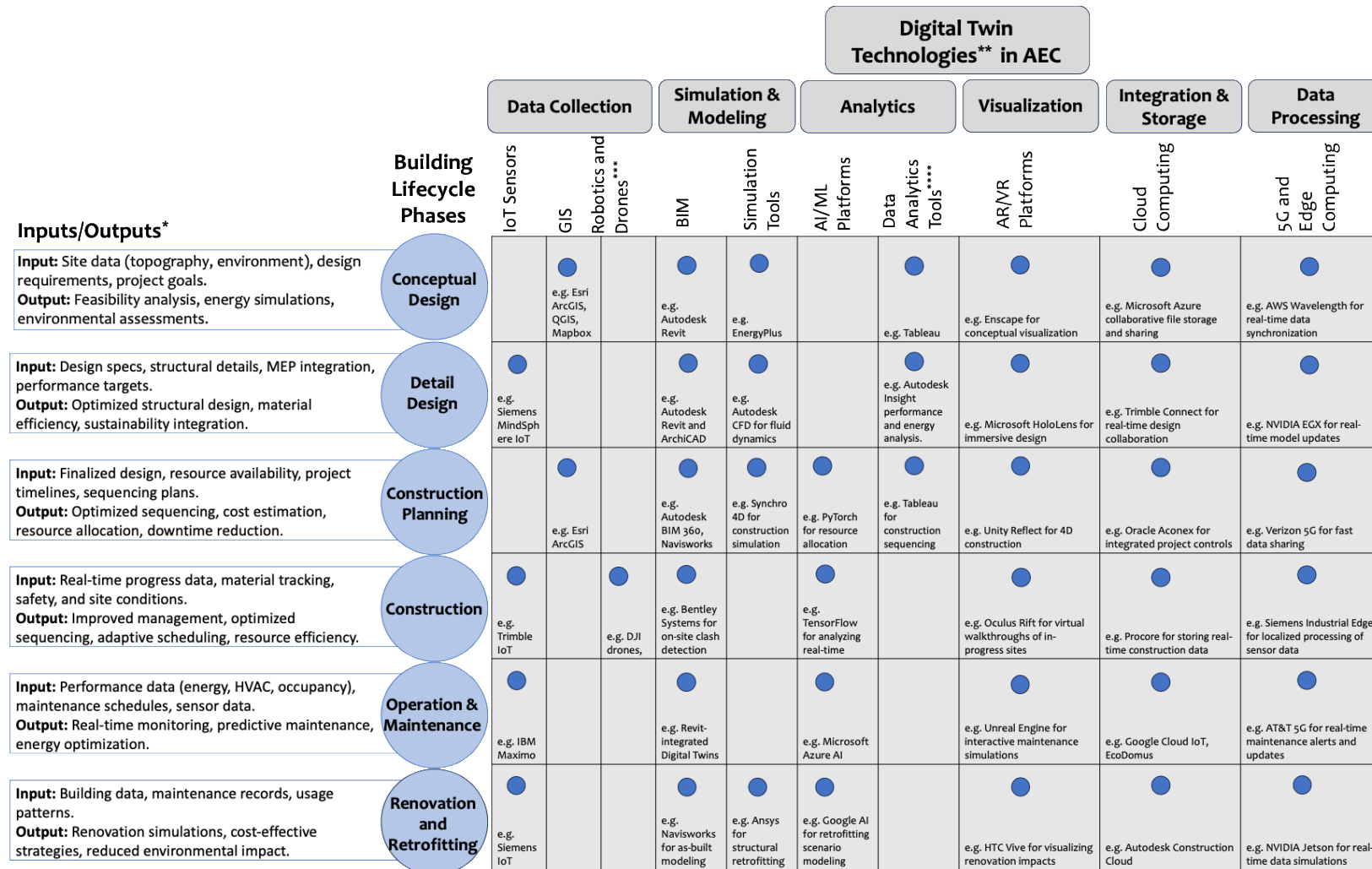
DTs play a critical role throughout the building lifecycle, providing customized applications for each phase. (Figure 3). In the Conceptual Design phase, twins enable the simulation of design concepts and predictive analysis of energy efficiency. By creating virtual prototypes, architects can test various design alternatives early, ensuring alignment with sustainability goals and performance requirements. During the Detailed Design phase, these technologies integrate with structural systems and advanced tools such as Building Information Modeling (BIM). This integration helps optimize structural performance, refine designs, and improve constructability. Digital twins also provide real-time data for iterative design processes, reducing overall design time and avoiding costly rework. In the Construction Planning phase, they simulate project phases and optimize resource allocation, resulting in efficient scheduling. By providing a comprehensive digital representation of the construction process, they enhance planning accuracy and help identify potential risks before physical work begins. Throughout the Construction phase, real-time monitoring enabled by twins allows for tracking progress, identifying deviations, and facilitating effective project management. IoT enabled sensors integrated with these twins provide data on equipment usage, environmental conditions, and worker safety, helping to maintain project timelines and reduce waste. As projects transition to the Operation and Maintenance phase, managing and integrating data from multiple stakeholders become increasingly complex. Although virtual models may accurately represent physical assets, they often lack seamless connectivity [20]. DTs address this challenge by streamlining information flow, enhancing facilities management, predictive maintenance, and energy simulations. Facility managers can leverage twin data to make informed decisions, improving operational efficiency and optimizing energy use [21]. During Renovation and Retrofitting, they simulate proposed modifications and assess their sustainability impacts. These simulations provide cost-effective strategies for upgrades, ensuring compliance with modern standards while minimizing environmental impact. Additionally, DTs allow for scenario testing to evaluate the long-term benefits of retrofitting strategies.

DTs significantly enhance lifecycle management, relying on technologies such as BIM and Wireless Sensor Networks (WSN) [22]. BIM consolidates data into a unified model, improving collaboration and enabling real-time updates, though workflow adjustments are often necessary. When combined with WSN, DTs provide real-time feedback to optimize design, construction, and energy management [23]. While BIM primarily relies on static data, twins utilize real-time information, further enhanced by data analytics and machine learning, to improve

lifecycle decision-making [18]. Despite challenges such as stakeholder integration and research gaps, particularly in demolition and recovery phases, they are driving smarter, more efficient practices in architecture, paving the way for sustainable building performance [1].

When examining Figure 3, it becomes evident that twin technologies are fundamentally transforming the design, construction, and management of buildings by integrating advanced tools and frameworks across the building lifecycle. These technologies enable the creation of dynamic virtual models that continuously reflect the real-world status and behavior of physical assets. During the conceptual design phase, tools such as Autodesk Revit [24], ArchiCAD [25], and Autodesk Insight [26] facilitate detailed 3D modeling, energy simulations, and feasibility assessments. Additionally, geospatial tools like Esri ArcGIS [27], QGIS [28], and Mapbox [29] integrate environmental and site data into early-stage planning. Real-time data from IoT sensors, processed through platforms such as Siemens MindSphere [30] and IBM Watson IoT [31], further enrich the design process by providing operational insights. In the detailed design phase, immersive visualization tools like Enscape [32], Unity Reflect [33], and Microsoft HoloLens [34] enable stakeholders to collaborate effectively. AI and ML platforms, including TensorFlow [35] and PyTorch [36], optimize resource allocation and predict performance outcomes, enhancing material efficiency and sustainability integration. For construction planning, tools such as Synchro 4D [37], Autodesk Navisworks [38], and Oracle Aconex [39] streamline sequencing, cost estimation, and project controls. During construction execution, real-time data is collected using drones (e.g., DJI) and robots (e.g., Boston Dynamics Spot), with platforms like Procore [40] and Trimble Connect [41] enabling seamless on-site collaboration. Technologies such as Verizon 5G [42] and NVIDIA EGX [43] ensure fast data transmission and localized processing of sensor data, supporting adaptive scheduling and improved resource efficiency. In the operation and maintenance phase, cloud platforms such as Microsoft Azure [44], AWS [45], and Google Cloud [46] provide secure data storage and analytics dashboards like Google Data Studio [47] for real-time monitoring, predictive maintenance, and energy optimization. Advanced simulation tools like Autodesk CFD [48] and EnergyPlus [49] further support system performance analysis. Finally, in the renovation and retrofitting phase, tools like Matterport [50] and Ansys [51] enable precise scanning, modeling, and scenario analysis, facilitating sustainable and cost-effective strategies. Figure 3 demonstrates how these interconnected technologies span the entire building lifecycle, enhancing collaboration, efficiency, and sustainability in the AEC industry.

These interconnected technologies collectively form a robust twin ecosystem, enabling real-time data exchange, predictive analytics, and lifecycle optimization across the AEC industry. While their successful implementation in projects like smart cities and net-zero energy buildings highlights their transformative potential, the ever-evolving nature of these tools presents significant challenges. The value of these significant technologies lies not merely in the adoption of individual tools but in their ability to unify disparate technologies into a cohesive, interconnected framework. However, without standardized protocols, seamless integration, and scalable strategies, these tools risk becoming fragmented solutions, limiting the full potential of twins. Addressing these critical issues is essential to unlocking the transformative capabilities of digital twin technologies. The next section delves into the persistent barriers and gaps in literature, providing a detailed exploration of the challenges that must be overcome to fully realize the promise of DT systems.



*Inputs: Data or resources required for each phase. Outputs: Results generated from DT implementation.

**Technologies: Tools and systems that facilitate DT functionalities.

***Robotics: Applied for automated construction tasks and quality inspections during Construction Execution.

****Data Analytics: Used to identify trends in energy consumption and predict maintenance needs during Operation & Maintenance.

Figure 3. DT technologies categorized by functionality (Data Collection, Simulation and Modeling, Analytics and AI, Visualization and Interaction, and Data Storage). Each technology supports specific building lifecycle phases, facilitating data-driven decision-making and optimization across all stages (developed by the author).

3.3 Barriers and Gaps in Literature

Preliminary findings from the systematic review (detailed in Section 3.4) reveal significant barriers and gaps in the research and application of DT technologies within the building and construction industry. These insights underscore persistent technical, economic, and knowledge-based challenges, alongside notable gaps in lifecycle coverage, emerging technology integration, and scalability. Addressing these barriers is critical for advancing both research and practice.

Among the technical challenges, interoperability issues across various DT platforms are prevalent due to the absence of universal standards for data exchange and system integration, which hinder seamless communication between tools such as BIM, IoT devices, and simulation platforms [16]. Additionally, real-time data synchronization between physical and digital environments is often constrained by bandwidth limitations and latency, particularly in large-scale projects [52]. Economically, the high initial investment required for DT implementation-encompassing hardware, software, and training-poses significant barriers, especially for small and medium-sized enterprises (SMEs). Limited access to funding or incentive structures further exacerbates these economic challenges [53]. Skill and knowledge gaps also impede twin adoption, as expertise in advanced technologies like AI, IoT, and BIM is often lacking among AEC professionals [16]. This issue is compounded by resistance to change from traditional workflows, with many stakeholders hesitant to embrace new technologies. Data security and privacy concerns present another critical obstacle [54]. The reliance on IoT sensors and cloud computing raises the risk of unauthorized access to sensitive building information, which undermines confidence in existing security measures. The literature also highlights substantial gaps in the lifecycle coverage of these technologies. While their applications in design and construction phases are well-explored, there is a notable lack of research addressing their roles in operation and maintenance, renovation, and demolition phases [54]. Similarly, studies focusing on the integration of emerging technologies such as blockchain, robotics, and 5G networks remain limited, despite their potential to enhance data integrity, automation, and real-time communication [53]. Validation and scalability represent additional areas of concern, as few case studies empirically validate DT benefits in large-scale projects like urban infrastructure. The lack of global standards for structuring, exchanging, and securing DT data further complicates scalability [52].

Finally, sustainability and cost analysis are underexplored areas, with insufficient research on the long-term economic and environmental benefits of DT technologies. A comprehensive cost-benefit analysis that incorporates sustainability metrics is necessary to strengthen the business case for their adoption [55].

These barriers and gaps emphasize the need for standardized frameworks, empirical validation, and incentive mechanisms to support broader adoption of twin technologies in building design and construction. Addressing these unresolved issues will enable the development of scalable, sustainable, and innovative solutions, as detailed in the systematic review presented in Section 3.4.

3.4 Systematic Review of Digital Twin Technologies in AEC

This section presents the findings from a systematic review of 95 research papers, comprising both original studies and review articles, to investigate the role of DT technologies across various lifecycle phases in the AEC industry. To ensure a structured and comprehensive analysis, the papers were categorized based on several criteria, including

the technologies mentioned (e.g., IoT, BIM, Blockchain), lifecycle phases addressed (e.g., design, operation, and maintenance), scale of application (e.g., building, industry, urban), research objectives, methodologies employed, key contributions to the literature, barriers or challenges identified (e.g., interoperability and data quality issues), and research gaps (e.g., social, legal, and ethical considerations).

The articles for this study were identified through an extensive, systematic literature search using reputable databases, including Web of Science, Scopus, and Google Scholar. Keywords such as “Digital Twin” “AEC” “BIM” and “IoT” were employed to ensure the comprehensive retrieval of relevant studies. Strict inclusion criteria were applied, focusing exclusively on peer-reviewed journal articles addressing DT applications in the AEC industry, along with selected conference papers. To maintain the study’s focus, only sources where these technologies were the main research topic were included. This approach recognizes that many studies discuss related technologies such as AR/VR, IoT, and AI alongside DT. However, to provide a thorough and focused investigation into the current state of DT in AEC and derive robust conclusions, these related technologies were considered secondary and contextual, preventing them from overshadowing the study's main objective. Following these criteria, 95 publications from 2019 to 2024 were selected and analyzed in detail, examining various DT applications where DT served as the central research focus.

The insights from the detailed analysis of 95 publications were synthesized to uncover patterns, trends, and gaps in DT research within the AEC industry. To illustrate the categorization criteria and provide concrete examples, 16 representative studies were selected for in-depth examination, focusing on their relevance, impact, and alignment with the key research themes. These studies were chosen based on their citation impact and their ability to exemplify critical aspects such as lifecycle phases, scales, technologies mentioned, and barriers identified in DT research. This selective approach balances clarity and comprehensiveness while offering a robust framework for the findings. Table 1 below presents a comprehensive breakdown of 16 selected studies, showcasing their contributions, methodologies, and relevance to this study's objectives. A complete list of all 95 reviewed studies, along with detailed insights and analyses, is available in Appendix A (Table 1A).

The selected 16 studies provide valuable insights into the diverse applications and challenges of twin technologies in the buildings. They emphasize key themes, including lifecycle phase integration, scalability, interoperability, and real-world implementation. Methodologies range from systematic literature reviews to innovative frameworks, showcasing the evolving research landscape. Notable contributions include advancements in energy optimization, urban-scale applications, and semantic modeling. However, recurring challenges such as data integration, lack of standardization, and high implementation costs highlight significant barriers to widespread twin adoption. These studies collectively underscore the transformative potential of DTs while identifying critical gaps and pathways for future research.

While the 16 representative studies provide a focused lens on key applications and challenges of twin technologies in the AEC, the broader dataset of 95 publications offers a comprehensive understanding of research trends, gaps, and advancements. Statistical analyses were conducted on this dataset to uncover patterns across various criteria, including research objectives, methodologies, lifecycle phases, scales, and technologies. Frequency analysis was performed to quantify mentions of specific keywords in the table, such as technologies, lifecycle stages, and scales, while trend analysis was applied to examine publication years. Text analysis techniques were also employed to identify recurring barriers, challenges, and gaps in twin implementation. These findings not only contextualize the

Table 1. Detailed Breakdown of 16 Selected Digital Twin Studies in the AEC Industry: Contributions, Methodologies, and Relevance to Study Objectives with Supplementary Insights from 95 Reviewed Articles (Appendix A, Table 1A)

Author(s) and Year	Article Title	Research Objective	Methodology	Technologies Mentioned	Lifecycle Phase	Scale	Key Contributions to Literature	Barriers/Challenges Identified	Gaps Identified
Kaewunruen et al., 2019 [55]	A Digital-Twin Evaluation of Net Zero Energy Building for Existing Buildings	To evaluate the feasibility of achieving Net Zero Energy Buildings (NZEBs) for existing buildings using digital twins and BIM technologies.	Proposed a hierarchical flowchart methodology combined with BIM, energy simulations, and cost analysis to assess NZEB options.	DT, BIM, Photovoltaics, Wind Turbines, Biomass CHP Systems, Energy Simulation Software.	Focused on the operation and maintenance phases while assessing retrofit applications for existing buildings.	Building-level applications with detailed case studies, including a residential building model.	Proposed a novel evaluation framework for NZEB solutions tailored for existing buildings, highlighting their financial and technical feasibility.	High initial investment, limited integration of renewable technologies, and challenges in adapting existing structures.	Lack of uniform standards for NZEBs and inadequate exploration of lifecycle-wide cost implications.
Enders and Hobbach, 2019 [9]	Dimensions of Digital Twin Applications - A Literature Review	To provide a cross-industry overview of DT applications and propose a classification scheme.	Systematic literature review following Webster and Watson's approach.	DT, augmented reality, Industry 4.0, IoT	Various phases including design, production, and operations.	Cross-industry applications from small tools to large-scale infrastructure.	Developed a six-dimensional classification scheme for DT applications.	Limited cumulative research, underrepresentation in IS research, and industry-specific limitations.	Few cross-industry studies; insufficient focus on completeness and connection dimensions.
Boje et al., 2020 [16]	Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research	To propose a framework for transitioning from traditional BIM approaches to Construction Digital Twins (CDTs), addressing semantic integration and interoperability.	Systematic review of 196 studies and development of a conceptual framework for semantic CDTs.	DT, BIM, IoT, Semantic Web, OWL Ontologies, Linked Data, Machine Learning, AI.	Covers design, construction, and operation stages with an emphasis on real-time data integration and lifecycle optimization.	Focused on building and infrastructure levels, with potential scalability to urban environments.	Proposed a three-tier evolutionary model for CDT implementation, highlighting monitoring platforms, intelligent semantic platforms, and socio-technical integration.	Lack of standards, interoperability issues, data integration challenges, and resistance to technological adoption.	Limited implementation of semantic technologies and real-time decision-making capabilities in current CDT models.
Teisserenc and Sepasgozar, 2021 [56]	Adoption of Blockchain Technology through Digital Twins in the Construction Industry 4.0: A PESTELS Approach	To develop a novel conceptual model for integrating blockchain with DTs to improve trust, security, and efficiency in the BECOM industry.	Literature review using a PESTELS approach and technological framework proposal (DDTC model).	Blockchain, DT, IoT, BIM, Industry 4.0	Lifecycle management including design, construction, and operations.	Applications in construction and mining projects within Industry 4.0.	Proposed the decentralized digital twin cycle (DDTC) framework to enhance blockchain integration with digital twins.	High implementation costs, lack of standards, regulatory uncertainties, scalability and energy challenges in blockchain integration.	Insufficient interoperability, lack of standardization, and the need for decentralized identity and storage solutions.
Coupry et al., 2021[54]	BIM-Based Digital Twin and XR Devices to Improve Maintenance Procedures in Smart Buildings: A Literature Review	To evaluate how BIM-based DTs and XR technologies can improve maintenance operations in smart buildings.	Systematic literature review focusing on the integration of BIM, Digital Twins, and XR technologies in maintenance.	DT, BIM, Augmented Reality , Mixed Reality (MR), Virtual Reality (VR), IoT.	Mainly focuses on the O&M phase of smart buildings.	Smart building-level applications, with implications for facility management.	Explored the integration of BIM and XR technologies with DTs to improve maintenance workflows.	Lack of standardization, high implementation costs, challenges in data management, and privacy issues.	Limited real-world implementations and interoperability challenges in combining BIM, Digital Twins, and XR technologies.
Delgado and Oyedele, 2021 [57]	Digital Twins for the Built Environment: Learning from Conceptual and Process Models in Manufacturing	To enhance the understanding of DTs in the built environment by analyzing conceptual and process models from manufacturing.	Systematic literature review of 54 documents (academic and industry), focusing on structural and functional models.	DT, BIM, Cyber-Physical Systems, IoT, Simulation Models.	Focuses primarily on operations and maintenance, but also discusses applications in design and construction.	Built environment scale, with implications for various sectors such as aerospace and manufacturing.	Identified four categories of DT conceptual models (prototypical, model-based, interface-oriented, and service-based) and six categories of process models.	Lack of standardized definitions, limited integration between physical and digital models, and insufficient focus on lifecycle-wide applications.	Need for detailed frameworks to support DT implementation across AECO lifecycle phases; limited practical case studies in the built environment.
Deng et al., 2021[58]	From BIM to Digital Twins: A Systematic Review of the Evolution of Intelligent Building Representations in the AEC-FM Industry	To review the evolution from BIM to DTs in the built environment, propose a classification taxonomy, and identify research gaps.	Systematic review of 123 papers, categorized into a five-level ladder taxonomy representing the transition from BIM to Digital Twins.	DT, BIM, IoT, AI, Machine Learning, Cloud Computing.	Covers all phases of the building lifecycle with emphasis on real-time monitoring, performance prediction, and control strategies.	Building and community-level applications, with potential for city-scale Digital Twin systems.	Proposed a ladder taxonomy and conceptual framework for the ideal DT, addressing data sensing, simulation integration, and automated feedback.	Data loss in sensing, offline simulation methodologies, limited automated control strategies, and interoperability issues.	Need for real-time data-integrated simulations and autonomous feedback systems for operational efficiency.
M. Mazhar Rathore et al., 2021[59]	The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and	To review the integration of AI, machine learning, and big data in digital twins and highlight challenges and future opportunities.	Systematic literature review of 117 articles, patents, and technical reports on AI-enabled digital twinning across multiple industries.	DTs, AI, Machine Learning, Big Data, IoT, Cloud Computing, Edge Computing.	Covers the entire lifecycle including design, manufacturing, operation, and maintenance.	Focused on industrial, urban, and global-scale applications of digital twins.	Developed a big data-driven and AI-enriched reference architecture for digital twins, emphasizing their deployment and challenges.	Interoperability, high computational demands, data integration, and lack of standardization.	Limited real-time applications; need for scalable architectures and frameworks for diverse industries.
Opoku et al., 2021 [1]	Digital Twin Application in the Construction Industry: A Literature Review	To systematically review the state-of-the-art of DT applications in the construction industry, addressing their lifecycle phases, technologies, and potential benefits.	Systematic literature review of 22 academic publications focusing on digital twin applications in construction.	DTs, BIM, IoT, AI, Wireless Sensor Networks, Cloud Computing, 5G.	Covers design and engineering, construction, and operation and maintenance phases. Notes the lack of research in the demolition and recovery phase.	Building and infrastructure scale applications with potential expansion to smart cities.	Proposed a framework linking DTs with lifecycle phases and identified key technologies and gaps for further exploration.	Slow adoption of digital technologies in construction, data integration challenges, lack of standardization, and high initial costs.	Minimal research on digital twin applications in the demolition and recovery phase; need for detailed frameworks in stakeholder collaboration.
Wang et al., 2022 [60]	BIM Information Integration Based VR Modeling in Digital Twins in Industry 5.0	To integrate BIM, VR, and twins into Industry 5.0 frameworks for improving construction efficiency and lifecycle management.	Proposed a novel DT framework incorporating physical construction site modeling (PCSE), virtual body modeling (DTVB), and virtual-reality interaction (VRI) modeling.	DTs, BIM, Virtual Reality (VR), Machine Learning, IoT, Cloud Computing, Revit, Flink, Spark.	Covers all phases of the building lifecycle, with a focus on real-time data management, predictive maintenance, and quality control.	Focused on construction projects with applications in Industry 5.0.	Developed a BIM-based DT framework for construction with enhanced scalability, predictive capabilities, and real-time interaction.	High computational demands, interoperability issues, and data latency concerns.	Limited exploration of edge computing integration for reducing data latency; lack of large datasets for neural network applications.
Pregnoiato et al., 2022 [61]	Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure	To develop and demonstrate a practical workflow for creating DTs tailored to existing infrastructure, with a case study on the Clifton Suspension Bridge.	Developed a five-step workflow integrating Gemini Principles, supported by a case study application on a historical bridge.	DTs, BIM, IoT, Wireless Sensor Networks, Finite Element Models (FEM), Machine Learning.	Primarily focuses on operation and maintenance, but applicable to full lifecycle management.	Infrastructure-scale application for civil engineering, with a focus on existing legacy assets.	Proposed a systematic five-step framework for DT development, highlighting its adaptability to legacy infrastructure.	Lack of standardized procedures, integration difficulties, and high computational requirements.	Need for autonomous decision-making systems and better integration frameworks for existing infrastructure.

Table 1 (Continued). Detailed Breakdown of 16 Selected Digital Twin Studies in the AEC Industry: Contributions, Methodologies, and Relevance to Study Objectives with Supplementary Insights from 95 Reviewed Articles (Appendix A, Table 1A)

Author(s) and Year	Article Title	Research Objective	Methodology	Technologies Mentioned	Lifecycle Phase	Scale	Key Contributions to Literature	Barriers/Challenges Identified	Gaps Identified
Bortolini et al., 2022 [4]	Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review	To review DT applications for building energy efficiency and identify trends, challenges, and research gaps.	Systematic literature review of 87 publications across four key topics: design optimization, occupant comfort, operation and maintenance, and energy consumption simulation.	DT, BIM, IoT, Artificial Intelligence, Machine Learning, Cloud Computing.	Covers full building lifecycle with emphasis on operation, maintenance, and energy optimization.	Building and urban levels, including individual buildings and city-scale systems.	Classified DT applications into four categories and identified methodologies, benefits, and challenges for each.	Lack of standardization, data integration difficulties, and limited interoperability between systems.	Limited research on integrating original building designs into digital twins; challenges in real-time data use and visualization.
Ly et al., 2022 [62]	Smart City Construction and Management by Digital Twins and BIM Big Data in COVID-19 Scenario	To explore the integration of DTs and BIM with big data for smart city construction and management in the context of the COVID-19 pandemic.	Development of data processing methods based on Bayesian Network Structural Learning (BNSL) and Multi-GPU algorithms for handling complex data in smart cities.	DTs, BIM, IoT, Big Data, Machine Learning, Cloud Computing, Multi-GPU Algorithms.	Covers the design, construction, and operational phases of smart city development.	City-scale applications focused on urban infrastructure, traffic management, and public health services.	Proposed a multi-GPU algorithm for complex data fusion and a Bayesian Network-based approach for data classification in smart city scenarios.	High data complexity, lack of standardization, and computational challenges in real-time processing of large-scale urban data.	Limited exploration of multi-source data heterogeneity and integration frameworks for smart city digital twins.
Lei et al., 2023 [63]	Challenges of Urban Digital Twins: A Systematic Review and a Delphi Expert Survey	To identify and categorize the challenges faced in the design and implementation of urban digital twins, using a systematic literature review and a Delphi survey.	Systematic literature review of 34 papers and a multi-round Delphi survey with 29 expert participants.	Urban DTs, 3D city models, IoT, edge computing, semantic interoperability tools.	Challenges mapped across six lifecycle phases: data collection, processing, generating, managing, simulating, and updating.	Urban-scale applications involving cities and neighborhoods with diverse physical assets.	Comprehensive taxonomy of 16 challenges (8 technical, 8 non-technical) affecting urban digital twins.	Technical: data quality, interoperability, data integration, software, hardware. Non-technical: trust, collaboration, financing, regulatory gaps.	Limited consideration of social and legal dimensions in current studies; lack of consistent definitions and standards.
Weil et al., 2023 [64]	Urban Digital Twin Challenges: A Systematic Review and Perspectives for Sustainable Smart Cities	To provide a systematic review of challenges facing Urban Digital Twins (UDTs) and propose solutions for their implementation in sustainable smart cities.	Systematic literature review of 200 papers, analyzing technical, social, and regulatory challenges of UDTs.	Urban DTs, IoT, AI, BIM, Big Data, Edge Computing, Semantic Models.	Covers planning, implementation, operation, and decision-support phases.	Focuses on urban-scale implementations, including city management, transportation, and environmental systems.	Identified 21 challenges under 8 categories, emphasizing interoperability, semantics, infrastructure, and governance.	Interoperability, semantic integration, data quality, regulatory frameworks, governance, and ethical issues.	Limited social, legal, and ethical considerations; fragmented research on governance and standards.
Tuhaise et al., 2023 [65]	Technologies for Digital Twin Applications in Construction	To identify key technologies used in the development of digital twins in construction, highlight research gaps, and propose potential future research directions.	Systematic literature review focusing on technologies supporting DT development.	IoT, BIM, Machine Learning, Artificial Intelligence, Blockchain, Augmented Reality, Virtual Reality, Cloud Computing.	Covers all phases, with emphasis on real-time monitoring and decision-making in the construction lifecycle.	Focused on construction projects and systems integration at various scales, including individual components and entire buildings.	Proposed a DT system architecture comprising five development layers: data acquisition, transmission, digital modeling, data/model integration, and service.	Data integration issues, lack of standards, high costs, and limited interoperability.	Need for advanced solutions in data processing, transmission, and visualization; limited real-world implementations.

contributions of the selected studies but also provide a robust foundation for evaluating the current state of DT research and its trajectory within the AEC industry.

In Figure 4, Between 2019 and 2024, research on these technologies in the AEC demonstrated remarkable growth, totaling 95 publications. Early contributions from 2019 to 2021 comprised 13.68% of the total output, followed by a sharp increase from 2022 to 2024, which accounted for 86.32%, culminating in 35 papers in 2024. This trend, as depicted in Figure 4, highlights the progression of research activity, with a noticeable rise post-2020. While this increase may partially reflect the dataset's starting point, it also coincides with a global surge in interest in digital and remote solutions, largely spurred by the COVID-19 pandemic. The timing underscores the critical role of DT technologies in addressing pandemic-induced challenges, such as enhancing remote collaboration, improving operational efficiency, and promoting sustainability. These trends not only illustrate the growing prominence of DTs within the built environment but also emphasize their potential to transform building and construction practices in response to evolving global demands.

Distribution of Research Publications on Digital Twin Technologies in the AEC Industry

The distribution of 95 total research publications on DT technologies in the AEC across the analyzed years, beginning in 2019, with notable growth post-2020

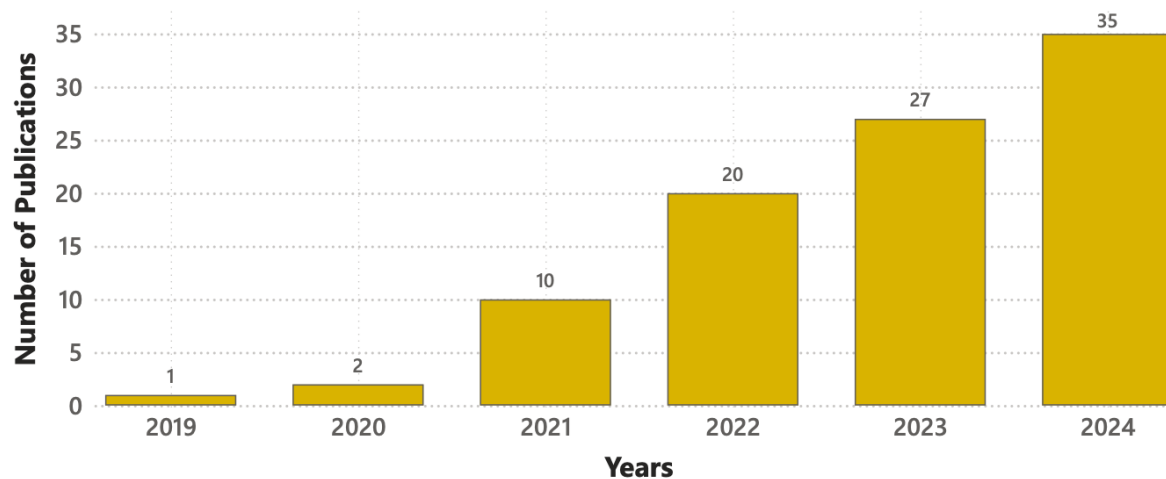


Figure 4. Annual distribution of 95 research publications on DT technologies in the AEC industry, highlighting significant growth in interest and publications post-2020.

In Figure 5, the research objectives of the analyzed publications were categorized into key themes, reflecting the transformative potential of these technologies. The largest share (35.46%) focuses on Technology Integration, highlighting the role of DTs in seamlessly incorporating advanced technologies like AI, IoT, and BIM to enhance processes across the industry [66,67,68]. Lifecycle Applications, encompassing design, construction, and operation, account for 28.37% of the studies, showcasing efforts to improve efficiency and sustainability throughout building lifecycles [16,58,70]. Research on Smart Cities and Infrastructure represents 13.48% of the total, emphasizing urban-scale DT applications aimed at optimizing infrastructure and urban planning [52,70,71]. Studies exploring Energy and Sustainability (12.77%) underscore DTs' contributions to environmental

performance, such as energy optimization and predictive management [72,73,74]. Finally, Monitoring and Real-Time Applications constitute 9.93% of the research, reflecting DT-enabled advancements in progress tracking, operational efficiency, and real-time decision-making [75,76,77]. Together, these findings underscore the central role of DT technologies in fostering innovation, operational excellence, and sustainability across diverse AEC domains.

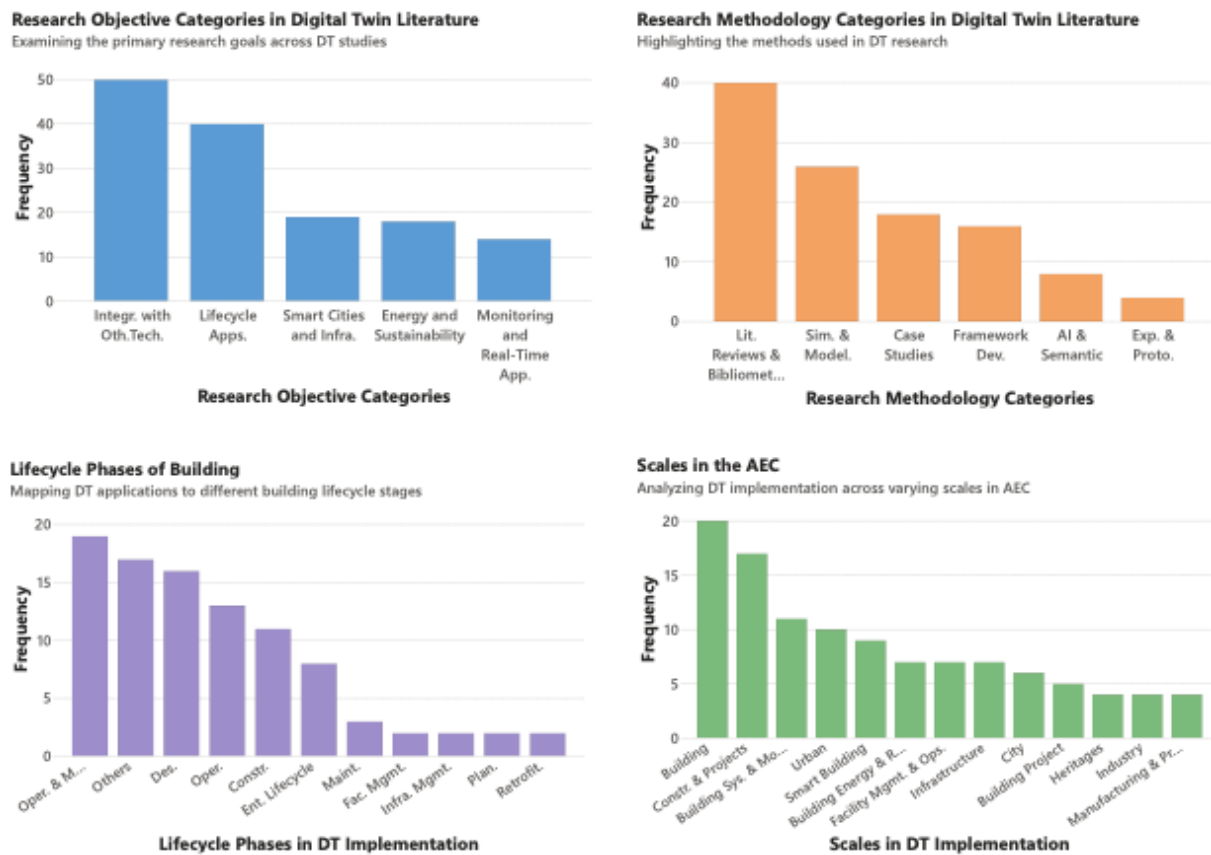


Figure 5. Statistical Analysis of Research Objectives, Methodologies, Lifecycle Phases, and Scales in DT Literature for AEC

The methodologies employed in the analyzed studies significantly shape how twins are explored and applied within the buildings, reflecting a balance between theoretical insights and practical applications. Literature Reviews and Bibliometric Analyses, comprising 35.71% of the studies, synthesize existing research to identify trends, gaps, and opportunities, offering a theoretical foundation but limited empirical insights [78-85]. Simulation and Modeling methods (23.21%) [86-88] explore virtual testing environments, enabling optimization of DT applications; however, these studies often focus on technical aspects, overlooking real-world complexities. Case Studies (16.07%) [89-92] provide valuable insights into real-world twin implementations, uncovering findings related to scalability and stakeholder engagement, though their context-specific nature may limit broader applicability. Research on Framework Development (14.29%) [93-96] contributes structured guidelines for digital twin adoption and integration with technologies like BIM and IoT, offering a theoretical base for future empirical validation. AI and Semantic Technologies (7.14%) [97] emphasize advanced interoperability and decision-making capabilities but remain underexplored in practical scenarios. Finally, Experimental and Prototyping studies (3.57%) [94,98]

demonstrate the feasibility of twin applications in controlled settings, offering tangible evidence of potential outcomes while being constrained by limited scalability. Collectively, these methodologies demonstrate a comprehensive yet evolving exploration of these technologies, underscoring the need for balanced approaches that integrate theoretical rigor with practical validation to address the AEC's complex challenges [99].

The lifecycle phases explored in the analyzed studies reveal the wide-ranging applications of these crucial technologies in the AEC. Operation and Maintenance accounts for 20% of publications [100-105], underscoring DTs' critical role in predictive maintenance, performance optimization, and operational efficiency. Design (16.84%) focuses on enhancing workflows, visualization, and stakeholder integration [106-110], while Operation (13.68%) emphasizes real-time monitoring and optimization [111-113]. Construction (12.64%) highlights DTs' applications in progress tracking and quality control [114-119], and Entire Lifecycle studies (9.20%) demonstrate the potential of DTs to integrate processes across all phases [120-124]. Niche areas, such as Maintenance [125], Infrastructure Management [78], Facility Management [84], Planning, and Retrofitting [126], each at 2.11%, reflect emerging applications. The "Others" category (17.89%) captures innovative uses, indicating an expanding scope. These findings highlight DTs' dominance in operational phases and their potential for comprehensive lifecycle integration

The analyzed studies highlight the diverse scales of these technologies implementation within the AEC industry, showcasing their adaptability across various domains. The "Building" scale accounts for the largest proportion (16.95%) [127], reflecting its widespread use in monitoring [128-130], maintenance, and performance optimization at the structure level. Construction and Projects follow at 14.41%, emphasizing DT applications in planning and execution. Building Systems and Monitoring (9.32%) and Urban applications (8.47%) highlight DTs' role in advancing smart systems and urban-scale analytics. Smart Buildings (7.63%) [131] and studies addressing Infrastructure, Facility Management and Operations, and Building Energy and Retrofitting (each 5.93%) underline DTs' contributions to sustainability, operational efficiency, and resource management. Other scales, including City (5.08%), Building Project (4.24%), and niche areas such as Industry, Heritages [132,133], and Manufacturing and Prefabrication (each 3.39%) [134,135], represent emerging applications, broadening the scope of DT technologies. These findings demonstrate DTs' versatility across scales, from individual buildings to complex urban and infrastructure systems, underscoring their transformative potential in the AEC industry.

In Figure 6, the analysis of 95 studies highlights the critical role of complementary technologies in enhancing the functionality of DTs within the buildings. The analyzed studies demonstrate the broad range of technologies integrated with twins in the AEC, highlighting their interdisciplinary nature. To provide a focused analysis, only technologies with a mention frequency value greater than five were considered, representing the most prominent tools in the dataset. IoT emerged as the most frequently mentioned technology (31.03%), underscoring its critical role in enabling real-time data exchange and connectivity. BIM follows at 26.29%, reflecting its foundational importance in DT applications for creating and managing virtual building representations [136]. AI (15.09%) and ML (4.31%) further demonstrate the integration of predictive analytics and intelligent decision-making. Emerging technologies such as Big Data and Cloud Computing (both 3.88%) support large-scale data processing and scalability, while Simulation and Cyber-Physical Systems (CPS) (both 3.02%) highlight their importance in testing and managing DT applications. Spatial tools like Geographic Information Systems (GIS) (2.59%) and Augmented Reality (AR) (2.59%) facilitate visualization and analytics, while Blockchain [137] and Sensors (both 2.16%)

address security, transparency, and real-world data acquisition. By narrowing the analysis to frequently mentioned technologies, this study emphasizes the key innovations driving digital twin development while acknowledging the broader range of less-represented technologies in the field.

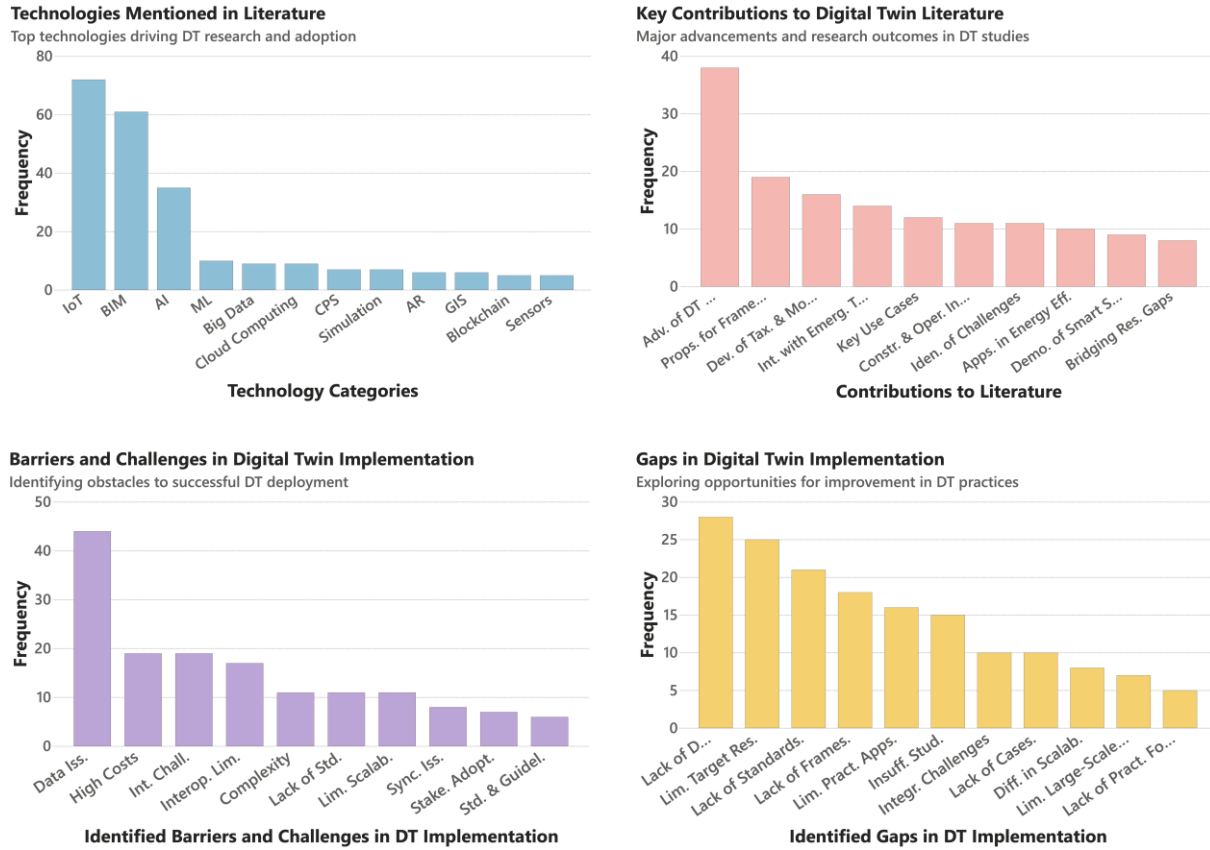


Figure 6. Insights into key technologies, contributions, barriers, and gaps in DT implementation

The analyzed studies offer diverse contributions to advancing research on these technologies in building and construction practices. The most significant contribution (25.68%) lies in the Advancement of DT Frameworks, offering comprehensive structures to guide implementation and integration. Proposals for Frameworks (12.84%) and the Development of Taxonomies and Models (10.81%) highlight efforts to formalize DT knowledge and establish conceptual tools for further exploration. Studies on Integration with Emerging Technologies (9.46%) emphasize DTs’ adaptability to innovations such as AI, IoT, and blockchain, while Key Use Cases (8.11%) illustrate practical applications across diverse scenarios. Contributions addressing the Identification of Challenges and Construction and Operational Insights (both 7.43%) underline DTs’ ability to tackle implementation barriers and enhance lifecycle efficiency. Research on Applications in Energy Efficiency (6.76%) and Demonstrations of Smart Systems (6.08%) showcase DTs’ role in sustainability and intelligent systems. Lastly, studies focused on Bridging Research Gaps (5.41%) highlight areas of unmet needs and emerging opportunities. Collectively, these contributions underline DTs’ transformative potential while identifying critical pathways for future research and application in the AEC industry.

The analyzed studies identify critical barriers and challenges hindering the implementation of these crucial technologies in the AEC. Data Issues, including quality, integration, and management, emerge as the most frequently cited challenge (28.76%), highlighting the foundational role of accurate and accessible data in DT systems [138]. Integration Challenges and High Costs (both 12.42%) underscore the difficulties of merging DTs with existing systems and the significant financial investments required. Interoperability Limitations (11.11%) reflect the need for seamless data exchange across platforms, while Lack of Standards, Complexity, and Limited Scalability (all 7.19%) emphasize the absence of unified guidelines and the technical sophistication of DT adoption. Other barriers, including Synchronization Issues (5.23%), Stakeholder Adoption (4.58%), and the need for Standards and Guidelines (3.92%), further illustrate the multifaceted challenges facing twin implementation. These findings highlight the critical need for addressing these obstacles to fully realize DT technologies' transformative potential in building and construction practices.

The identified research gaps in DT implementation underscore critical areas requiring further investigation to enhance their adoption and impact within the AEC industry. The most significant gap is the Lack of Advanced DT Applications (17.18%), indicating a need for more sophisticated and innovative uses of DT technologies. Limited Targeted Research (15.34%) and the Lack of Standards (12.88%) highlight the absence of focused studies and unified frameworks to guide DT integration. The Lack of Frameworks (11.04%) and Limited Practical Applications (9.82%) point to the need for actionable methodologies and real-world implementations. Other gaps include Insufficient Studies (9.20%), Integration Challenges, and the Lack of Case Studies (both 6.13%), which reveal the scarcity of empirical evidence and integration strategies. Issues such as Scalability Difficulties (4.91%) and Limited Large-Scale Deployments (4.29%) emphasize technical and operational barriers, while the Lack of Practical Focus (3.07%) calls for aligning research with industry needs. Addressing these gaps is essential for advancing DT technologies and maximizing their potential in the building and construction industry.

IV. DIGITAL TWIN FRAMEWORK FOR AEC

The proposed framework for advancing DT integration in the AEC industry addresses critical gaps, challenges, and trends identified through statistical analysis and a systematic review of DT literature. This comprehensive roadmap enables scalable, sustainable, and innovative DT technologies tailored to the industry's unique demands. It simplifies the growing complexity of these systems, adapts to diverse applications across scales and lifecycle phases, and meets the demand for sustainability and operational efficiency. The framework is visually represented in Figure 7, which illustrates the eight interconnected categories and their relationships. Each category is explained in detail below.

The framework comprises eight interconnected categories, each addressing specific aspects of DT integration: Each category addresses specific findings from the analysis. For instance, "Addressing DT Gaps" focuses on foundational issues such as interoperability and scalability limitations, which were identified as barriers in over 60% of reviewed studies. Similarly, "Overcoming Challenges" deals with high costs and stakeholder resistance, concerns highlighted in 40% of the literature. "Solutions for Scales" ensures DT applicability across diverse contexts, reflecting research trends that emphasize urban infrastructure and smart cities, which accounted for over 50% of applications. "Solutions for Lifecycle Phases" aligns DT applications with design, construction, operation, and maintenance stages, supported by 70% of studies focusing on lifecycle efficiency. Cross-cutting categories

like "Improving Methods" address methodological gaps, with 35% of studies calling for more empirical validation and experimental prototypes, while "Leveraging Technologies" highlights IoT, BIM, and AI, cited in over 75% of research as key enablers. Finally, "Incorporating Energy and Sustainability" and "Smart City and Infrastructure Applications" focus on long-term goals, with 45% of studies linking DT to sustainability and urban-scale implementations. Together, these interconnected categories create an iterative framework that addresses current gaps and anticipates future needs. These categories are interdependent, forming a cohesive framework. Foundational elements, such as Addressing DT Gaps and Overcoming Challenges, enable practical applications in Solutions for Scales and Solutions for Lifecycle Phases. Cross-cutting enablers like Improving Methods and Leveraging Technologies refine these solutions, while future-oriented goals in Incorporating Energy and Sustainability and Smart City Applications ensure alignment with industry trends and sustainability objectives. This interconnected structure provides continuous improvement and innovation for DT adoption in the AEC.

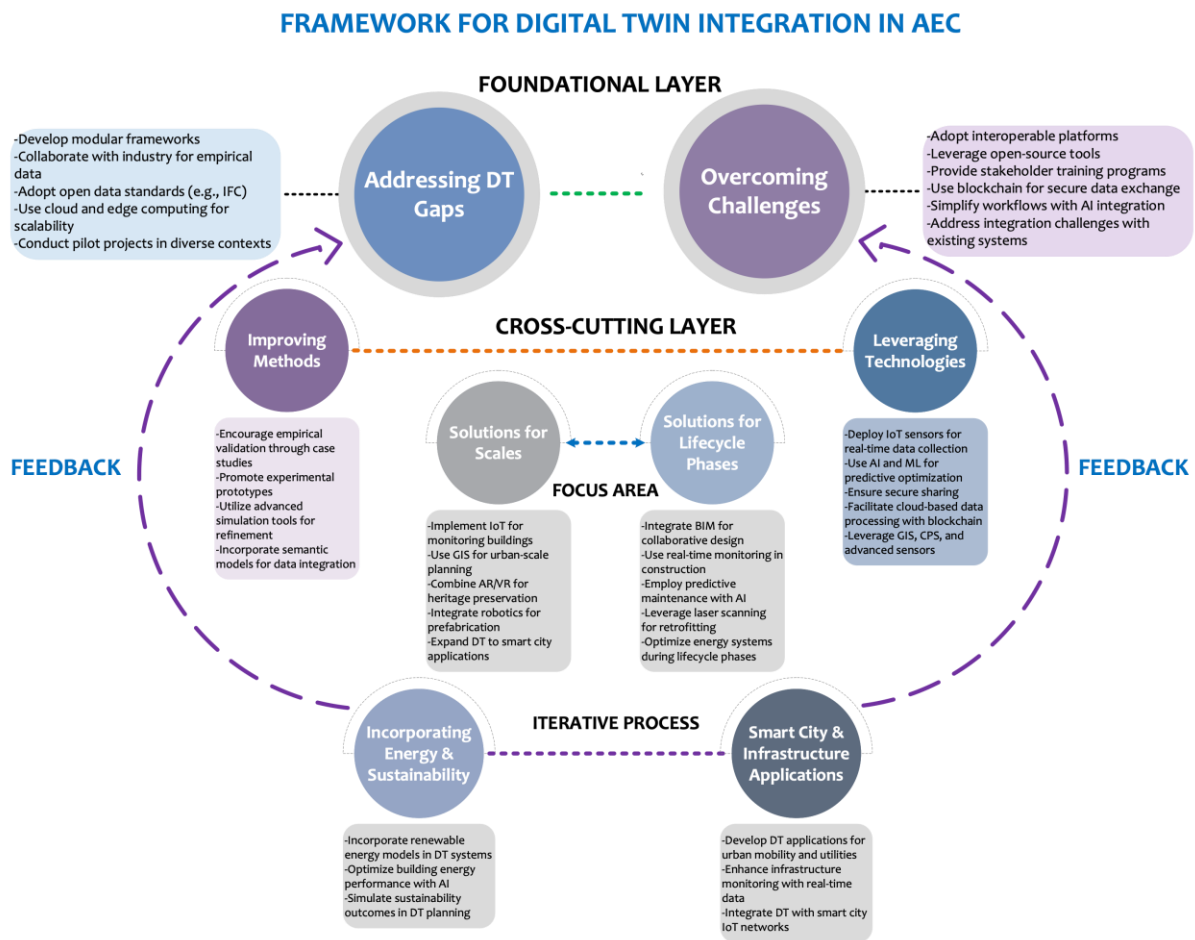


Figure 7. Digital Twin Framework for AEC: The framework illustrates the integration of foundational elements (DT gaps, challenges), application-specific solutions (scales, lifecycle phases), cross-cutting enablers (methods, technologies), and future-oriented goals (sustainability, smart cities), highlighting a dynamic and adaptive approach to advancing the AEC industry (developed by the author)

These categories are interdependent, forming a cohesive framework. Foundational elements, such as Addressing DT Gaps and Overcoming Challenges, enable practical applications in Solutions for Scales and Solutions for

Lifecycle Phases. Cross-cutting enablers like Improving Methods and Leveraging Technologies refine these solutions, while future-oriented goals in Incorporating Energy and Sustainability and Smart City Applications ensure alignment with industry trends and sustainability objectives. This interconnected structure provides continuous improvement and innovation for DT adoption in the AEC industry.

This framework offers a comprehensive guide for implementing these significant technologies in the building and construction practices. By addressing foundational gaps, overcoming challenges, and leveraging advanced technologies, it ensures scalable, sustainable, and innovative solutions. Its adaptability across various scales, lifecycle stages, and industry contexts makes it a valuable tool for advancing digital transformation. Furthermore, its alignment with sustainability and smart city goals positions it as a forward-thinking approach to modernizing the built environment.

V. REAL WORLD APPLICATIONS OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGIES IN ARCHITECTURE

DT technologies are revolutionizing AEC industry by integrating real-time data, enabling advanced simulations, and providing predictive analytics. Their transformative impact on architecture is exemplified through diverse buildings that demonstrate extensive applications and significant benefits. These buildings were chosen based on their pioneering design, sustainability initiatives, operational efficiency, and advanced technological integration (Table 2).

The categorization of buildings into domains reflects the effort to comprehensively represent the wide range of DT applications in the AEC. By selecting examples that demonstrate diverse applications from design optimization to urban planning and sustainability, the intention is to provide a systematic overview of how DTs address unique challenges across different areas of AEC. These domains not only highlight DTs' specialized impact but also ensure that the selected buildings collectively represent the breadth of DT technology's transformative potential throughout the lifecycle of architectural and infrastructural projects.

Digital Twin technologies have been effectively applied in various domains. In design optimization, The Edge in Amsterdam [145] exemplifies the application of DT technologies to achieve unparalleled design optimization by integrating smart lighting and energy-efficient systems, making it one of the world's most sustainable office buildings. DTs were used to simulate building performance during the design stage, allowing architects to refine energy-saving strategies before construction. Similarly, Apple Park [143] in California employed DTs to model the campus's complex energy systems and landscaping, enabling precise calibration of sustainable design elements. During its design phase, the Bosco Verticale (Milan) [148] utilized DTs through IBM's Watson IoT platform to monitor environmental performance, optimize plant growth, and track microclimatic conditions. These cases highlight DTs' role in early-stage decision-making, ensuring both environmental and functional goals are met effectively (Table 2). In construction management, the Hudson Yards (New York) [141], DTs enabled precise coordination among construction stakeholders, integrating prefabrication tracking and real-time updates. This approach reduced delays and allowed teams to address challenges proactively during construction. Similarly, the YTL Arena Complex (UK) [139] leveraged DTs via Vigilant's platform to simulate crowd dynamics, monitor structural components, and adjust lighting and HVAC systems during events. At Battersea Power Station (London)

[140], Siemens' DT platform helped optimize energy system integration and infrastructure during redevelopment, ensuring predictive maintenance and reduced operational costs. These examples emphasize DTs' role in creating

Table 2. Building examples representing the application and benefit of DT technologies in Architecture







Building	Description	Use of DT	Exemplary application of DT
<p>Bristol's YTL Arena Complex [139]</p> 	<p>YTL Arena, built on Bristol's former Filton Airfield, aims to be one of the UK's most sustainable venues.</p> <p><i>Completion Year:</i> Currently under construction; expected to be completed in 2025. <i>Design Team:</i> Feilden Clegg Bradley Studios. Place: Bristol, UK</p>	<p>A DT modeled the building's energy and environmental impacts, ensuring maximum energy efficiency and operational flexibility while simulating crowd flow and safety scenarios.</p>	<p>AI-driven tools like Autodesk BIM 360 optimized the arena's HVAC systems, reducing energy use and improving indoor air quality, while enabling ongoing performance evaluation.</p>
<p>Battersea Power Station, London [140]</p> 	<p>Battersea Power Station's redevelopment into a mixed-use complex required extensive planning and design optimization.</p> <p><i>Completion Year:</i> 2013-2022 <i>Design Team:</i> Architect of Power Station: Wilkinson Eyre.; Interior Designers: Gehry Partners and Foster + Partners Place: London, UK</p>	<p>The DT modeled design options early on, facilitating performance simulations, energy efficiency analysis, and smart technology integration, while providing insights into future users' interactions with the space.</p>	<p>DTs planned for energy use and sustainability, optimizing indoor air quality and natural lighting through AI algorithms and BIM tools that analyze real-time data and simulate environmental scenarios. Post-completion, the digital twin enhances facility management and operational efficiency.</p>
<p>Hudson Yards, New York City [141]</p> 	<p>Hudson Yards is the largest private real estate development in the history of the US and includes commercial buildings, residential units, and public spaces.</p> <p><i>Completion Year:</i> 2019 (Various buildings completed in stages) <i>Design Team:</i> KPF for the main towers, with additional firms for other structures. Place: New York, USA</p>	<p>DT technology at Hudson Yards helped test design alternatives for energy efficiency, optimize building performance, and simulate pedestrian traffic for better planning.</p>	<p>Hudson Yards' DT improved collaboration, optimized resource allocation, managed timelines, and enabled real-time adjustments during construction.</p>
<p>King Abdullah Financial District (KAFD), Riyadh [142]</p> 	<p>KAFD is a high-profile commercial district in Riyadh that incorporates numerous smart city concepts.</p> <p><i>Completion Year:</i> 2019 (Ongoing development) <i>Design Team:</i> HOK and various firms for different components Place: Riyadh, Saudi Arabia</p>	<p>DT technology optimized building performance in extreme climates by simulating environmental and energy systems, enhancing energy use, ventilation, and cooling for desert conditions.</p>	<p>BIM and AI platforms (Autodesk, Siemens' Design CC) optimized design for energy efficiency and sustainability, reducing costs. The digital twin enables real-time monitoring and predictive maintenance.</p>
<p>Apple Park [143]</p> 	<p>Apple Park is a massive campus that emphasizes sustainability and integrates nature with technology.</p> <p><i>Completion Year:</i> 2017 <i>Design Team:</i> Foster + Partners Place: Cupertino, California</p>	<p>DT technology was employed to create a comprehensive model of the campus, including landscaping, energy systems, and building performance. It allows for real-time monitoring and management of various systems.</p>	<p>DT enables predictive maintenance, energy optimization, and efficient resource management across the campus. It also facilitates occupant comfort by adjusting environmental conditions based on real-time data and usage patterns.</p>
<p>Singapore's National University Hospital [144]</p> 	<p>The NUH Medical Centre is a healthcare facility known for its innovative design and operational efficiency.</p> <p><i>Completion Year:</i> 2016 (Part of ongoing developments) <i>Design Team:</i> CPG Consultants. Place: Singapore</p>	<p>A DT simulated energy use, airflow, patient movement, and equipment operation, optimizing building performance and future planning while modeling emergency scenarios for enhanced safety and efficiency.</p>	<p>DT simulations with AI and machine learning optimized the hospital's energy efficiency, patient comfort, and minimized disruptions, including real-time HVAC monitoring, predictive equipment maintenance, and patient flow simulations.</p>

Table 2 (Continued). Building examples representing the application and benefit of DT technologies in Architecture

Building	Description	Use of DT	Exemplary application of DT
<p>The Edge, Amsterdam [145]</p> 	<p>The Edge is often described as the smartest and most sustainable office building in the world, earning the highest-ever BREEAM rating of 98.36%.</p> <p><i>Completion Year:</i> 2014 <i>Design Team:</i> PLP Architecture. <i>Place:</i> Amsterdam, Netherlands</p>	<p>During design, a digital twin used real-time data on occupancy, energy consumption, and environmental factors to optimize energy efficiency, sustainability, and user experience through simulations.</p>	<p>The DT allowed architects and engineers to optimize heating, cooling, lighting, and occupancy systems for energy efficiency, refine flexible workspace design, and integrate renewable energy sources and smart technologies for improved performance.</p>
<p>Nanjing International Youth Cultural Centre [146]</p> 	<p>Zaha Hadid-designed landmark building incorporates twin towers and cultural facilities.</p> <p><i>Completion Year:</i> 2014 <i>Design Team:</i> Zaha Hadid Architects <i>Place:</i> Nanjing, China</p>	<p>A digital twin simulated the building's geometry for structural integrity and environmental efficiency, resolving design challenges and ensuring sustainability goals.</p>	<p>Using Autodesk Revit and ANSYS, the twin model simulated energy use, airflow, and structural resilience, while enabling post-completion performance monitoring to optimize operations.</p>
<p>One World Trade Center [147]</p> 	<p>One World Trade Center is a symbol of resilience and innovation in design, serving as an office and commercial space.</p> <p><i>Completion Year:</i> 2014 <i>Design Team:</i> David Childs (Skidmore, Owings & Merrill) <i>Place:</i> New York City, US</p>	<p>The digital twin of One World Trade Center was developed to enhance operational efficiency, focusing on security, safety, and energy management.</p>	<p>The digital twin supports predictive analytics for maintenance, optimizing HVAC systems, and improving security protocols by simulating various emergency scenarios. Real-time data helps to maintain operational integrity and efficiency.</p>
<p>The Bosco Verticale (Vertical Forest) [148]</p> 	<p>Bosco Verticale features residential towers adorned with trees and vegetation, enhancing biodiversity and sustainability.</p> <p><i>Completion Year:</i> 2014 <i>Design Team:</i> Stefano Boeri Architetti <i>Place:</i> Milan, Italy</p>	<p>A digital twin managed interactions between the building and its natural elements, such as plant growth and energy efficiency.</p>	<p>The digital twin monitors plant health and energy use, optimizes resources, ensures structural integrity, and assesses the environmental impact of green spaces to promote urban biodiversity.</p>

efficient and adaptive construction processes. For facility and asset management, at Singapore’s National University Hospital (NUH) [144], Siemens’ DT platform tracks real-time energy use and air quality, improving patient comfort and operational efficiency. These applications demonstrate how DTs transform facility operations by integrating real-time insights with proactive management strategies.

In urban planning and smart cities, DTs are instrumental in urban-scale projects such as the Smart Dubai Initiative [149], which uses real-time monitoring to manage energy distribution and infrastructure systems. Similarly, Singapore’s Smart Nation [150] integrates DTs to improve urban mobility, optimize traffic flows, and plan infrastructure investments based on predictive models. The King Abdullah Financial District (KAFD) [142] in Riyadh utilizes Autodesk’s DT platform to analyze energy consumption and adjust lighting and HVAC based on occupancy patterns, positioning it as a model for sustainable urban development. These projects illustrate how DTs enhance urban planning by fostering smarter, more efficient cities. For heritage preservation, The Notre Dame Cathedral restoration project [151] highlights the use of DTs to create precise digital replicas, enabling structural analysis and guiding restoration efforts after the 2019 fire. Similarly, DT technologies have been employed at Battersea Power Station [140] to preserve its heritage while incorporating modern energy systems. These examples underscore DTs’ critical role in protecting and maintaining cultural heritage.

Lastly, DTs have driven sustainability and energy efficiency goals. At Nanjing International Youth Cultural Centre (China) [146], DTs optimize HVAC systems, improving energy efficiency and occupant comfort. One World Trade Center in New York [147] employs IBM's Maximo platform to monitor energy consumption and HVAC systems in real-time, ensuring operational efficiency and reduced energy waste. These projects reflect how DTs enable environmentally conscious solutions in architectural and urban development.

VI. IMPACT OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGIES: CASE STUDY INSIGHTS AND SYNTHESIS

As a result of real case building analysis conducted within the scope of this study, it was found that twin technologies play a critical role across various phases of the building life cycle. Significant applications were observed in the design, construction, and operational stages. For instance, the analysis revealed that the YTL Arena Complex in Bristol utilized Vigilant's DT platform during the design phase to simulate crowd dynamics and optimize energy systems. This demonstrated how DTs enable enhanced planning and adaptability. Similarly, Apple Park effectively employed DTs to manage energy efficiency and achieve sustainability targets during operations. The Edge in Amsterdam showcased Microsoft Azure's DT technology for real-time monitoring of environmental conditions via an extensive network of sensors, highlighting the importance of DTs in sustainable building management.

The research further indicated that during the design and construction phases, twins significantly enhance planning and execution processes. For example, the Battersea Power Station redevelopment project utilized Siemens' DT platform to optimize energy system integration, ensuring predictive maintenance capabilities and efficient workflows. Similarly, Hudson Yards in New York City relied on Siemens' Navigator platform to monitor energy consumption, HVAC systems, and occupancy patterns in real time, resulting in reduced energy use and improved project timelines. Additionally, King Abdullah Financial District (KAJD) in Riyadh used Autodesk's DT platform to refine energy consumption and facilitate dynamic adjustments to facility management, underlining DTs' critical role in addressing inefficiencies and adapting to real-time data inputs during these phases. During the operational phase, the study found that DTs offer substantial long-term benefits by enabling performance analysis and predictive maintenance. For instance, Singapore's National University Hospital (NUH) leveraged Siemens' DT platform to optimize energy use, monitor air quality, and ensure patient comfort, demonstrating the effectiveness of DTs in enhancing facility management. Similarly, One World Trade Center used IBM's Maximo platform for real-time operational efficiency, with systems dynamically adjusted based on occupancy patterns. These cases highlight how DTs contribute to sustained cost savings, energy efficiency, and improved user experience. While the current focus remains on the design and construction phases, this study identified significant potential for DT applications in later life-cycle stages, such as renovation and retrofitting. For example, the Bosco Verticale in Milan was found to utilize DTs to monitor and maintain its extensive green infrastructure by optimizing microclimatic conditions and tracking plant health. This approach ensures resource-efficient renovation and maintenance strategies, reflecting the long-term value of DTs in extending building life cycles.

Despite these findings, the research identified several challenges hindering broader adoption of DT technologies. High initial costs of developing and deploying DT systems were noted as a significant barrier, particularly for smaller-scale projects. Additionally, data integration complexity and the lack of standardized approaches to IoT-

enabled sensor networks were observed as persistent issues. Data privacy and security concerns further complicate implementation, especially in large-scale urban projects. However, advancements in edge computing and 5G technology offer promising solutions to these challenges. Edge computing enables real-time data processing at the source, reducing latency and minimizing transfer costs, while 5G ensures faster and more secure data transmission. These technological developments are expected to enhance the efficiency and affordability of DT technologies, broadening their accessibility across diverse applications.

In conclusion, the findings of this study confirm that DT technologies are pivotal in transforming practices across all phases of the building life cycle. Early integration during design and construction maximizes their potential for improving planning, execution, and energy efficiency. Operational benefits such as predictive maintenance and real-time monitoring further reinforce their value, while applications in renovation and retrofitting highlight their role in extending the sustainability and functionality of buildings. Although challenges remain, the continuous evolution of supporting technologies will likely address these issues, solidifying DTs' role in shaping smarter, more sustainable built environments.

VII. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS

This research has demonstrated the transformative potential of DT technologies in addressing key challenges in the AEC industry. By systematically analyzing 95 research publications from 2019 to 2024, this study provided a comprehensive understanding of DT applications, uncovering critical gaps, emerging trends, and significant opportunities for advancement. The findings highlighted underexplored lifecycle stages, such as retrofitting, demolition, and recycling, where DT applications remain limited despite their potential to optimize resource use and enhance sustainability. Furthermore, significant barriers, including interoperability issues, high implementation costs, scalability challenges, and a lack of standardized protocols for data exchange, were identified. These barriers obstruct the seamless integration of DT technologies across different lifecycle stages and limit their potential to fully optimize processes in construction and operational phases. These insights informed the development of a tailored conceptual framework that addresses these barriers while utilizing enabling technologies such as IoT, BIM, AI, and blockchain for seamless integration and enhanced decision-making. The key contributions of this research are listed below:

- **Comprehensive Lifecycle Analysis:** This research revealed the uneven distribution of DT applications across lifecycle phases, emphasizing the need for targeted innovations in underrepresented stages. These findings provide a roadmap for expanding DT integration to cover the entire building lifecycle.
- **Framework Development:** A robust framework was proposed to overcome identified barriers, offering targeted strategies for addressing interoperability limitations, high implementation costs, and fragmented data management systems. This framework emphasizes the integration of predictive analytics for proactive maintenance, real-time data synchronization to improve decision-making, and modular approaches for scalable solutions adaptable to varying project sizes. These contributions align not only with sustainability goals and operational demands but also foster enhanced stakeholder collaboration and resource optimization across all lifecycle phases.

- **Insights into Emerging Technologies:** By examining the dominant and emerging technologies driving DT adoption, this study clarified the synergies required for real-time data processing, predictive analytics, and collaborative workflows.
- **Practical Applications:** Case studies demonstrated that Digital Twin technologies have significantly contributed to enhancing building performance. By enabling real-time monitoring and predictive analytics, DTs facilitated energy optimization, leading to improved efficiency and reduced waste. Additionally, construction timelines were optimized using dynamic progress tracking and resource allocation systems, minimizing delays and improving workflow. Stakeholder collaboration was enhanced via unified digital platforms that provided transparent communication channels and centralized access to critical data, ensuring more effective decision-making throughout project phases.

While this study has contributed to advancing understanding, further data-driven validation is essential. Key areas for future exploration include:

- **Standardization and Interoperability:** Developing universal protocols to address interoperability barriers and ensure seamless data integration across platforms.
- **Lifecycle Expansion:** Exploring DT applications in demolition, recycling, and decommissioning to establish comprehensive lifecycle solutions.
- **Economic and Sustainability Evaluations:** Conducting detailed studies on long-term environmental and financial benefits to strengthen the business case for DT technologies.
- **Scalability for AEC Organizations:** Addressing the unique challenges faced by organizations within the AEC industry, this study emphasizes the development of modular and adaptable DT solutions. These include lightweight digital platforms optimized for minimal computational requirements, cost-effective subscription models to lower financial barriers, and targeted training programs to enhance workforce proficiency in DT tools and applications. By prioritizing accessibility and practicality, these strategies aim to democratize the adoption of DT technologies, enabling smaller organizations to achieve improved process efficiency, smarter resource allocation, and informed decision-making while remaining competitive in a technology-driven landscape.

By addressing these areas, this research contributes a solid foundation for guiding future innovations in DT adoption. The insights and framework provided herein are critical for shaping and accelerating the digital transformation of the AEC industry, enabling smarter, more sustainable, and resilient built environments.

REFERENCES

1. Opoku DGJ, Perera S, Osei-Kyei R, Rashidi M (2021) Digital twin application in the construction industry: A literature review. *J Build Eng* 40:102726. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102726>
2. Su S, Zhong RY, Jiang Y, Song J, Fu Y, Cao H (2023) Digital twin and its potential applications in construction industry: State-of-art review and a conceptual framework. *Adv Eng Inform* 57:102030. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102030>
3. Piras G, Agostinelli S, Muzi F (2024) Digital twin framework for built environment: A review of key enablers. *Energies* 17:436. <https://doi.org/10.3390/en17020436>
4. Bortolini R, Rodrigues R, Alavi H, Vecchia LFD, Forcada N (2022) Digital twins' applications for building energy efficiency: A review. *Energies* 15:7002. <https://doi.org/10.3390/en15197002>

5. Grieves M (2016) Origins of the digital twin concept. https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept. Accessed 13 March 2003
6. Glaessgen EH, Stargel D (2012) The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin, Honolulu, Hawaii, US, Apr 23–26.
7. Tao F, Qi Q, Wang L, Nee AYC (2019) Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Eng* 5:653–661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
8. Singh M, Srivastava R, Fuenmayor E, Kuts V, Qiao Y, Murray N, Devine D (2022) Applications of digital twin across industries: A review. *Appl Sci* 12:5727. <https://doi.org/10.3390/app12115727>
9. Enders MR, Hoßbach N (2019) Dimensions of digital twin applications - A literature review. In: Proceedings of the Americas Conference on Information Systems, Cancun, Mexico, Aug 15–17.
10. Lehtola VV, Koeva M, Elberink SO, Raposo P, Virtanen JP, Vahdatikhaki F, Borsci S (2022) Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 114:102915. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>
11. Madubuike OC, Anumba CJ, Khallaf R (2022) A review of digital twin applications in construction. *IT Con* 27:145–172. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.008>
12. Zhang A, Yang J, Wang F (2023) Application and enabling technologies of digital twin in operation and maintenance stage of the AEC industry: A literature review. *J Build Eng* 107859. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107859>
13. Singh M, Fuenmayor E, Hinchy EP, Qiao Y, Murray N, Devine D (2021) Digital twin: Origin to future. *Appl Syst Innov* 4:36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
14. Tao F, Zhang H, Liu A, Nee AYC (2019) Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Trans Ind Inform* 15:2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
15. Lauria M, Azzalin M (2024) Digital transformation in the construction sector: A digital twin for seismic safety in the lifecycle of buildings. *Sustainability* 16:8245. <https://doi.org/10.3390/su16188245>
16. Boje C, Guerriero A, Kubicki S, Rezgui Y (2020) Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research. *Autom Constr* 114:103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
17. Wang W, Zaheer Q, Qiu S, Wang W, Ai C, Wang J, Wang S, Hu W (2024) Digital twins in design and construction. In: *Digital twin technologies in transportation infrastructure management*. Springer Nature Singapore, pp 147–178. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5804-7_5
18. Khajavi SH, Motlagh NH, Jaribion A, Werner LC, Holmström J (2019) Digital Twin: Vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE Access* 7:147406–147419. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>
19. Liu M, Fang S, Dong H, Xu C (2021) Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *J Manuf Syst* 58:346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
20. Anderl R, Haag S, Schützer K, Zancul E (2018) Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration. *IT* 60:125–132. <https://doi.org/10.1515/itit-2017-0038>
21. Schlenger J, Yeung T, Vilgertshofer S, Martinez J, Sacks R, Borrmann A (2022) Comprehensive data schema for digital twin construction. 29th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE), Aarhus, Denmark. <https://doi.org/10.7146/aul.455.c194>
22. Lin YC (2020) Developing WSN/BIM-based environmental monitoring management system for parking garages in smart cities. *Eng Manag J* 36:04020012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000760](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000760)
23. Radzi AR, Azmi NF, Kamaruzzaman SN, Rahman RA, Papadonikolaki E (2024) Relationship between digital twin and building information modeling: A systematic review and future directions. *Constr Innov* 24:811–824. <https://doi.org/10.1108/CI-07-2022-0183>
24. Autodesk, Autodesk Revit. <https://www.autodesk.com/products/revit/architecture>, Accessed 15 September 2024
25. Graphisoft, ArchiCAD. <https://graphisoft.com/solutions/archicad/>, Accessed 15 September 2024
26. Autodesk, Autodesk Insight. <https://www.autodesk.com/products/insight/overview> Accessed 15 September 2024
27. ESRI, ArcGIS. <https://www.esri.com/en-us>, Accessed 15 September 2024
28. QGIS. <https://qgis.org/>, Accessed 15 September 2024
29. Mapbox. <https://www.mapbox.com/>, Accessed 15 September 2024
30. Siemens (2018) MindSphere The cloud-based, open IoT operating system. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:0005a2a6-14f8-41b6-918d78eabb14211b/mindsphere-brochure.pdf>, Accessed 15 September 2024
31. IBM, Watson IoT Platform. <https://internetofthings.ibmcloud.com/>, Accessed 13 March 2024
32. Enscape GmbH, Enscape. <https://enscape3d.com/>, Accessed 13 October 2024

33. Unity Reflect, Unity Cloud. <https://unity.com/>, Accessed 15 September 2024
34. Microsoft, Microsoft HoloLens. <https://learn.microsoft.com/tr-tr/hololens/>, Accessed 13 October 2024
35. TensorFlow. <https://www.tensorflow.org/>, Accessed 15 September 2024
36. PyTorch Foundation, PyTorch. <https://pytorch.org/>, Accessed 15 September 2024
37. Bentley, Synchro. <https://www.bentley.com/software/synchro/>, Accessed 15 September 2024
38. Autodesk, Autodesk Navisworks. <https://www.autodesk.com/products/navisworks/3d-viewers>, Accessed 15 September 2024
39. Oracle, Oracle Aconex. <https://www.oracle.com/uk/construction-engineering/aconex/>, Accessed 13 October 2024
40. Procore. <https://www.procore.com/en-gb>, Accessed 13 October 2024
41. Trimble Connect. <https://developer.tekla.com/trimble-connect>, Accessed 13 October 2024
42. Verizon, Verizon 5G Network. <https://www.verizon.com/5g/>, Accessed 13 October 2024
43. NVIDIA, NVIDIA EGX Platform. <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/products/egx/>, Accessed 15 September 2024
44. Microsoft, Azure. <https://azure.microsoft.com>, Accessed 15 September 2024
45. Amazon, AWS. <https://aws.amazon.com/>, Accessed 15 September 2024
46. Google, Google Cloud Platform. <https://cloud.google.com/>, Accessed 15 September 2024
47. Google, Looker Studio (formerly Google Data Studio). <https://lookerstudio.google.com/u/0/navigation/reporting>, Accessed 15 September 2024
48. Autodesk, Autodesk CFD. <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>, Accessed 15 September 2024
49. U.S. Department of Energy, EnergyPlus. <https://energyplus.net/>, Accessed 15 September 2024
50. Matterport Inc., Matterport. <https://matterport.com/>, Accessed 15 September 2024
51. Ansys, Inc., Ansys. <https://www.ansys.com/>, Accessed 15 September 2024
52. Lehner H, Dorffner L (2020) Digital geoTwin Vienna: Towards a Digital Twin City as Geodata Hub. PFG 88:63–75. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00101-4>
53. Camposano JC, Smolander K, Ruippo T (2021) Seven metaphors to understand digital twins of built assets. IEEE Access 9:27167–27181. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058009>
54. Coupury C, Noblecourt S, Richard P, Baudry D, Bigaud D (2021) BIM-based digital twin and XR devices to improve maintenance procedures in smart buildings: A literature review. Appl Sci 11:6810. <https://doi.org/10.3390/app11156810>
55. Kaewunrueen S, Rungskunroch P, Welsh J (2019) A digital-twin evaluation of net zero energy building for existing buildings. Sustainability 11:159. <https://doi.org/10.3390/su11010159>
56. Teisserenc B, Sepasgozar S (2021) Adoption of blockchain technology through digital twins in the construction industry 4.0: A PESTELS approach. Buildings 11:670. <https://doi.org/10.3390/buildings11120670>
57. Davila Delgado JM, Oyedele L (2021) Digital twins for the built environment: Learning from conceptual and process models in manufacturing. Adv Eng Inform 49:101332. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>
58. Deng M, Menassa CC, Kamat VR (2021) From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. J Inf Technol Constr 26. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>
59. Rathore MM, Shah SA, Shukla D, Bentafat E, Bakiras S (2021) The role of AI, machine learning, and big data in digital twinning: A systematic literature review, challenges, and opportunities. IEEE Access 9:32030–32052. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060863>
60. Wang W, Guo H, Li X, Tang S, Li Y, Xie L, Lv Z (2022) BIM information integration-based VR modeling in digital twins in Industry 5.0. J Ind Inf Integr 28:100351. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100351>
61. Pregnotato M, Gunner S, Voyagaki E, De Risi R, Carhart N, Gavriel G, Tully P, Tryfonas T, Macdonald J, Taylor C (2022) Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure. Autom Constr 141:104421. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421>
62. Lv Z, Chen D, Lv H (2022) Smart city construction and management by digital twins and BIM big data in COVID-19 scenario. ACM Trans Multimed Comput Commun Appl 18(2s):1–21
63. Lei B, Janssen P, Stoter J, Biljecki F (2023) Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. Autom Constr 147:104716. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104716>
64. Weil C, Bibri SE, Longchamp R, Golay F, Alahi A (2023) Urban digital twin challenges: A systematic review and perspectives for sustainable smart cities. Sustain Cities Soc 99:104862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>
65. Tuhaise VV, Tah JHM, Abanda FH (2023) Technologies for digital twin applications in construction. Autom Constr 152:104931. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104931>

66. Megahed NA, Hassan AM (2022) Evolution of BIM to DTs: A paradigm shift for the post-pandemic AECO industry. *Urban Sci* 6:67. <https://doi.org/10.3390/urbansci6040067>
67. Afzal M, Li RYM, Shoaib M, Ayyub MF, Tagliabue LC, Bilal M, Ghafoor H, Manta O (2023) Delving into the digital twin developments and applications in the construction industry: A PRISMA approach. *Sustainability* 15:16436. <https://doi.org/10.3390/su152316436>
68. Lauria M, Azzalin M (2024) Digital twin approach in buildings: Future challenges via a critical literature review. *Buildings* 14:376. <https://doi.org/10.3390/buildings14020376>
69. Revolti A, Gualtieri L, Pauwels P, Dallasega P (2024) From building information modeling to construction digital twin: A conceptual framework. *Prod Manuf Res* 12:2387679. <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2387679>
70. García-Aranda C, Martínez-Cuevas S, Torres Y, Pedrote Sanz M (2024) A digital twin of a university campus from an urban sustainability approach: Case study in Madrid (Spain). *Urban Sci* 8:167. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040167>
71. Lam P-D, Gu B-H, Lam H-K, Ok S-Y, Lee S-H (2024) Digital twin smart city: Integrating IFC and CityGML with semantic graph for advanced 3D city model visualization. *Sensors* 24:3761. <https://doi.org/10.3390/s24123761>
72. Arsecularatne B, Rodrigo N, Chang R (2024) Digital twins for reducing energy consumption in buildings: A review. *Sustainability* 16:9275. <https://doi.org/10.3390/su16219275>
73. Arowoija VA, Moehler RC, Fang Y (2024) Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions. *Energy Built Environ* 5:641–656
74. Li C, Lu P, Zhu W, Zhu H, Zhang X (2023) Intelligent monitoring platform and application for building energy using information based on digital twin. *Energies* 16:6839. <https://doi.org/10.3390/en16196839>
75. Desogus G, Frau C, Quaquero E, Rubiu G (2023) From building information model to digital twin: A framework for building thermal comfort monitoring, visualizing, and assessment. *Buildings* 13:1971. <https://doi.org/10.3390/buildings13081971>
76. Kang TW, Mo Y (2024) A comprehensive digital twin framework for building environment monitoring with emphasis on real-time data connectivity and predictability. *Dev Built Environ* 17:100309. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100309>
77. Opoku DGJ, Perera S, Osei-Kyei R, Rashidi M, Bamdad K, Famakinwa T (2024) Digital twin for indoor condition monitoring in living labs: University library case study. *Autom Constr* 157:105188. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105188>
78. Naderi H, Shojaei A (2022) Civil infrastructure digital twins: Multi-level knowledge map, research gaps, and future directions. *IEEE Access* 10:122022–122037. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223557>
79. Salem T, Dragomir M (2022) Options for and challenges of employing digital twins in construction management. *Appl Sci* 12:2928. <https://doi.org/10.3390/app12062928>
80. Naderi H, Shojaei A (2023) Digital twinning of civil infrastructures: Current state of model architectures, interoperability solutions, and future prospects. *Autom Constr* 149:104785. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104785>
81. Lucchi E (2023) Digital twins for the automation of the heritage construction sector. *Autom Constr* 156:105073. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105073>
82. Omrany H, Al-Obaidi KM, Husain A, Ghaffarianhoseini A (2023) Digital twins in the construction industry: A comprehensive review of current implementations, enabling technologies, and future directions. *Sustainability* 15:10908. <https://doi.org/10.3390/su151410908>
83. Osadcha I, Jurelionis A, Fokaides P (2023) Geometric parameter updating in digital twin of built assets: A systematic literature review. *J Build Eng* 73:106704. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106704>
84. Hakimi O, Liu H, Abudayyeh O (2024) Digital twin-enabled smart facility management: A bibliometric review. *Front Eng Manag* 11:32–49. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0254-4>
85. Radzi AR, Azmi NF, Kamaruzzaman SN, Rahman RA, Papadonikolaki E (2024) Relationship between digital twin and building information modeling: A systematic review and future directions. *Constr Innov* 24:811–829. <https://doi.org/10.1108/CI-07-2022-0183>
86. Zhou Y, Wei X, Peng Y (2021) The modelling of digital twins technology in the construction process of prefabricated buildings. *Adv Civ Eng* 2021: Article 2801557. <https://doi.org/10.1155/2021/2801557>
87. Mohseni S-R, Zeitouni MJ, Parvaresh A, Abrazeh S, Gheisarnejad M, Khooban M-H (2023) FMI real-time co-simulation-based machine deep learning control of HVAC systems in smart buildings: Digital-twins technology. *Trans Inst Meas Control* 45:661–673. <https://doi.org/10.1177/01423312221119635>
88. de Wilde P (2023) Building performance simulation in the brave new world of artificial intelligence and digital twins: A systematic review. *Energy Built* 292:113171. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113171>
89. Ammar A, Nassereddine H, AbdulBaky N, AbouKansour A, Tannoury J, Urban H, Schranz C (2022) Digital twins in the construction industry: A perspective of practitioners and building authority. *Front Built Environ*. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.834671>

90. Gourlis G, Kovacic I (2022) A holistic digital twin simulation framework for industrial facilities: BIM-based data acquisition for building energy modeling. *Front Built Environ* 8:918821. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.918821>
91. Chacón R, Posada H, Ramonell C, Jungmann M, Hartmann T, Khan R, Tomar R (2024) Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure. *J Build Eng* 84:108522. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108522>
92. Chen G, Alomari I, Taffese WZ, Shi Z, Afsharmovahed MH, Mondal TG, Nguyen S (2024) Multifunctional models in digital and physical twinning of the built environment—A university campus case study. *Smart Cities* 7:836–858. <https://doi.org/10.3390/smartsities7020035>
93. Zhao L, Zhang H, Wang Q, Wang H (2021) Digital-twin-based evaluation of nearly zero-energy building for existing buildings based on scan-to-BIM. *Adv Civ Eng* 2021:6638897. <https://doi.org/10.1155/2021/6638897>
94. Eneyew DD, Capretz MAM, Bitsuamlak GT (2022) Toward smart-building digital twins: BIM and IoT data integration. *IEEE Access* 10:130487–130506. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3229370>
95. Yang B, Lv Z, Wang F (2022) Digital twins for intelligent green buildings. *Buildings* 12:856. <https://doi.org/10.3390/buildings12060856>
96. Zhao Y, Wang N, Liu Z, Mu E (2022) Construction theory for a building intelligent operation and maintenance system based on digital twins and machine learning. *Buildings* 12:87. <https://doi.org/10.3390/buildings12020087>
97. Xie X, Merino J, Moretti N, Pauwels P, Chang JY, Parlikad A (2023) Digital twin enabled fault detection and diagnosis process for building HVAC systems. *Autom Constr* 146:104695. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104695>
98. Marienkov M, Kaliukh I, Trofymchuk O (2024) The digital twin use for modeling the multi-storey building response to seismic impacts. *Struct Concr* 25:2079–2096. <https://doi.org/10.1002/suco.202300695>
99. Wang W, Xu K, Song S, Bao Y, Xiang C (2024) From BIM to digital twin in BIPV: A review of current knowledge. *Sustain Energy Technol Assess* 67:103855. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103855>
100. Hosamo HH, Nielsen HK, Alnmr AN, Svennevig PR, Svidt K (2022) A review of the Digital Twin technology for fault detection in buildings. *Front Built Environ* 8:1013196. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1013196>
101. Meschini S, Pellegrini L, Locatelli M, Accardo D, Tagliabue LC, Di Giuda GM, Avena M (2022) Toward cognitive digital twins using a BIM-GIS asset management system for a diffused university. *Front Built Environ* 8:959475. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.959475>
102. Tan Y, Chen P, Shou W, Sadick A-M (2022) Digital Twin-driven approach to improving energy efficiency of indoor lighting based on computer vision and dynamic BIM. *Energy Build* 270:112271. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112271>
103. Hakimi O, Liu H, Abudayyeh O, Houshyar A, Almatared M, Alhawiti A (2023) Data fusion for smart civil infrastructure management: A conceptual digital twin framework. *Buildings* 13:2725. <https://doi.org/10.3390/buildings13112725>
104. Zhou X, Sun K, Wang J, Zhao J, Feng C, Yang Y, Zhou W (2023) Computer vision enabled building digital twin using building information model. *IEEE Trans Ind Inform* 19:2684–2692. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3190366>
105. Ghorbani A, Messner J (2024) A categorical approach for defining digital twins in the AECO industry. *J Inf Technol Constr* 29:198–218. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.010>
106. Banfi F, Brumana R, Salvalai G, Previtali M (2022) Digital twin and cloud BIM-XR platform development: From scan-to-BIM-to-DT process to a 4D multi-user live app to improve building comfort, efficiency and costs. *Energies* 15:4497. <https://doi.org/10.3390/en15124497>
107. Nguyen TD, Adhikari S (2023) The role of BIM in integrating digital twin in building construction: A literature review. *Sustainability* 15:10462. <https://doi.org/10.3390/su151310462>
108. Yang J, Rong H (2024) Site-scale digital twinning: From city-scale modeling to multiple micro-urban interventions. *SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4873135>
109. Mohandes SR, Singh AK, Fazeli A, Banihashemi S, Arashpour M, Cheung C, Ejohwomu O, Zayed T (2024) Determining the stationary digital twins implementation barriers for sustainable construction projects. *Smart Sustain Built Environ*. <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2023-0344>
110. Walczyk G, Ozadowicz A (2024) Building information modeling and digital twins for functional and technical design of smart buildings with distributed IoT networks—Review and new challenges discussion. *Future Internet* 16:225. <https://doi.org/10.3390/fi16070225>
111. Ghansah FA, Lu W (2024) Major opportunities of digital twins for smart buildings: A scientometric and content analysis. *Smart Sustain Built Environ* 13:63–84. <https://doi.org/10.1108/SASBE-09-2022-0192>
112. Jasiński M, Łaziński P, Piotrowski D (2023) The concept of creating digital twins of bridges using load tests. *Sensors* 23:7349. <https://doi.org/10.3390/s23177349>

113. Oulefki A, Kheddar H, Amira A, Kurugollu F, Himeur Y (2024) Innovative AI strategies for enhancing smart building operations through digital twins: A survey. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5015571>
114. Kosse S, Vogt O, Wolf M, König M, Gerhard D (2022) Digital twin framework for enabling serial construction. *Front Built Environ* 8:864722. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.864722>
115. Drobnyi V, Hu Z, Fathy Y, Brilakis I (2023) Construction and maintenance of building geometric digital twins: State of the art review. *Sensors* 23:4382. <https://doi.org/10.3390/s23094382>
116. Sepasgozar SME, Khan AA, Smith K, Romero JG, Shen X, Shirowzhan S, Li H, Tahmasebinia F (2023) BIM and digital twin for developing convergence technologies as future of digital construction. *Buildings* 13:441. <https://doi.org/10.3390/buildings13020441>
117. Bakhshi S, Ghaffarianhoseini A, Ghaffarianhoseini A, Najafi M, Rahimian F, Park C, Lee D (2024) Digital twin applications for overcoming construction supply chain challenges. *Autom Constr* 167:105679. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105679>
118. Mitera-Kielbasa E, Zima K (2024) Automated classification of exchange information requirements for construction projects using Word2Vec and SVM. *Infrastructures* 9:194. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9110194>
119. Li T, Li X, Rui Y, Ling J, Zhao S, Zhu H (2024) Digital twin for intelligent tunnel construction. *Autom Constr* 158:105210. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105210>
120. Hosamo HH, Imran A, Cardenas-Cartagena J, Svennevig PR, Svidt K, Nielsen HK (2022) A review of the digital twin technology in the AEC-FM industry. *Adv Civ Eng* 2022(1):2185170. <https://doi.org/10.1155/2022/2185170>
121. Yang Z, Tang C, Zhang T, Zhang Z, Doan DT (2024) Digital twins in construction: Architecture, applications, trends, and challenges. *Build* 14:2616. <https://doi.org/10.3390/buildings14092616>
122. Yeom S, Kim J, Kang H, Jung S, Hong T (2024) Digital twin (DT) and extended reality (XR) for building energy management. *Energy Build* 323:114746. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114746>
123. Zahedi F, Alavi H, Majrouhi Sardroud J, Dang H (2024) Digital twins in the sustainable construction industry. *Build* 14:11. <https://doi.org/10.3390/buildings14113613>
124. Osama Z (2024) The digital twin framework: A roadmap to the development of user-centred digital twin in the built environment. *J Build Eng* 98:111081. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111081>
125. Wang J, Wu Y, Wang S, Narazaki Y, Liu H, Spencer Jr BF (2024) Development and validation of graphics-based digital twin framework for UAV-aided post-earthquake inspection of high-rise buildings. *Struct Des Tall Spec Build* 33(13):e2127. <https://doi.org/10.1002/tal.2127>
126. Jradi M, Madsen BE, Kaiser JH (2023) DanRETwin: A digital twin solution for optimal energy retrofit decision-making and decarbonization of the Danish building stock. *Appl Sci* 13(17):9778. <https://doi.org/10.3390/app13179778>
127. Bäcklund K, Lundqvist P, Molinari M (2024) Showcasing a digital twin for higher educational buildings: Developing the concept toward human centricity. *Front Built Environ* 10:1347451. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1347451>
128. Xu J, Shu X, Qiao P, Li S, Xu J (2023) Developing a digital twin model for monitoring building structural health by combining a building information model and a real-scene 3D model. *Meas* 217:112955. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112955>
129. Ellul C, Hamilton N, Pieri A, Floros G (2024) Exploring data for construction digital twins: Building health and safety and progress monitoring twins using the Unreal gaming engine. *Build* 14(7):2216. <https://doi.org/10.3390/buildings14072216>
130. Hu X, Olgun G, Assaad RH (2024) An intelligent BIM-enabled digital twin framework for real-time structural health monitoring using wireless IoT sensing, digital signal processing, and structural analysis. *Expert Syst Appl* 252(Part A):124204. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124204>
131. Almatared M, Liu H, Abudayyeh O, Hakim O, Sulaiman M (2024) Digital-twin-based fire safety management framework for smart buildings. *Build* 14(1):4. <https://doi.org/10.3390/buildings14010004>
132. Sousa MNP de O e, Correa FR (2023) Towards digital twins for heritage buildings: A workflow proposal. *Int J Archit Comput* 21(4):712–729. <https://doi.org/10.1177/14780771231168226>
133. Cheng JCP, Zhang J, Kwok HHL, Tong JCK (2024) Thermal performance improvement for residential heritage building preservation based on digital twins. *J Build Eng* 82:108283. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108283>
134. Rausch C, Lu R, Talebi S, Haas C (2021) Deploying 3D scanning-based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing. *Int J Constr Manag* 23(3):565–578. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1896942>
135. Yevu SK, Owusu EK, Chan APC, Sepasgozar SME, Kamat VR (2023) Digital twin-enabled prefabrication supply chain for smart construction and carbon emissions evaluation in building projects. *J Build Eng* 78:107598. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107598>

136. Hauer M, Hammes S, Zech P, Geisler-Moroder D, Plörer D, Miller J, van Karsbergen V, Pfluger R (2024) Integrating digital twins with BIM for enhanced building control strategies: A systematic literature review focusing on daylight and artificial lighting systems. *Build* 14(3):805. <https://doi.org/10.3390/buildings14030805>
137. Naem G, Asif M, Khalid M (2024) Industry 4.0 digital technologies for the advancement of renewable energy: Functions, applications, potential and challenges. *Energy Convers Manag* X 100779.
138. Jeong D, Lee C, Choi Y, Jeong T (2024) Building digital twin data model based on public data. *Build* 14(9):2911. <https://doi.org/10.3390/buildings14092911>
139. Dittrichhudsonvasetti Architects (DHVA, YTL Arena Complex, Bristol. <https://www.dhva.co.uk/ytl-arena-bristol>, 15 September 2024.
140. Buro Happold, Battersea Power Station. <https://www.burohappold.com/projects/battersea-power-station-building-works/>, Accessed 15 September 2024.
141. Architectural Digest, Vessel in Hudson Yards. <https://www.architecturaldigest.com/story/vessel-hudson-yards-opens-public>, Accessed 15 September 2024.
142. Amazing Architecture, King Abdullah Financial District by Henning Larsen Architects. <https://amazingarchitecture.com/office/king-abdullah-financial-district-by-henning-larsen-architects>, 15 September 2024.
143. Foster & Partners, Apple Park. <https://www.fosterandpartners.com/projects/apple-park>, 15 September 2024.
144. National University of Singapore (NUS), Digital Twin. <https://cde.nus.edu.sg/research/digital-twin/>, Accessed 5 October 2024.
145. PLP Architecture, The EDGE Amsterdam. <https://plparchitecture.com/the-edge/>, Accessed 5 October 2024.
146. Dezeen, Nanjing International Youth Cultural Centre. <https://www.dezeen.com/2016/09/27/zaha-hadid-architects-nanjing-international-youth-cultural-centre-skyscraper-china/>, 5 October 2024.
147. Hammer Mission, BIM & Digital Twins: 3 Real-World Examples. <https://www.hammermissions.com/post/bim-digital-twins-3-real-world-examples>, 5 October 2024.
148. Inexhibit, Stefano Boeri's Vertical Forest. From Hype to Archetype. https://www.inexhibit.com/case-studies/the-vertical-forest-towers-in-milan-by-boeri-phenomenon-or-archetype/#google_vignette, Accessed 5 October 2024.
149. Digital Dubai, Digital Dubai Initiatives. <https://www.digitaldubai.ae/initiatives>, 15 September 2024.
150. Smart Nation Singapore, Smart Nation Initiatives. <https://www.smartnation.gov.sg/>, 15 September 2024.
151. Florian MC (2024) Notre Dame Rebuilt: A Journey of Restoration for France's Iconic Cathedral. <https://www.archdaily.com/1024689/notre-dame-rebuilt-a-journey-of-restoration-for-frances-iconic-cathedral>, Accessed 5 January 2025.

APPENDIX A

Table A1. A complete list of all 95 reviewed studies, along with detailed insights and analyses

Author(s) and Year	Research Objective	Methodology	Technologies Mentioned	Lifecycle Phase	Scale	Key Contributions to Literature	Barriers/Challenges Identified	Gaps Identified
Kaewunruen et al (2019) [55]	Evaluate the feasibility of digital twins for achieving Net Zero Energy Building status in existing buildings.	Evaluation of NZEB solutions using BIM-enabled visualization and simulations.	BIM, renewable energy, simulation	design and operation	Building	Provided feasibility evidence for NZEB solutions in existing buildings.	High costs and implementation barriers for NZEB solutions.	Few studies on NZEB retrofits in existing buildings.
Boje et al (2020) [16]	Define and explore the semantic construction digital twin and its applications.	Review and thematic analysis of BIM and IoT integrations in construction.	BIM, IoT, semantic web, AI	design, construction, and operation	Construction site and lifecycle scale.	Explored transitioning BIM to semantic digital twins for improved processes.	Semantic and data synchronization limitations.	Integration of IoT and AI in real-time construction digital twins.
Lehner et al (2020) [52]	Develop a comprehensive digital twin framework for Vienna as a geodata hub.	Developed a semantic digital twin using geospatial data and 3D models for Vienna.	GIS, 3D modeling, geodata management	urban management	City-scale geodata hub.	Proposed a new strategy for digital twins in urban geodata management.	Data coherence challenges in geospatial datasets.	Limited studies on semantic urban data management.
Camposano et al (2021) [53]	Understand digital twins of built assets using seven metaphors and explore their role in AEC/FM ecosystems.	Qualitative study with semi-structured interviews of AEC/FM practitioners.	BIM, IoT, service-dominant logic	conceptual	Asset scale and broader ecosystem scale.	Identified seven metaphors for understanding digital twins in AEC/FM.	Fragmentation in the AEC/FM industry and lack of standard definitions for DTs.	Lack of consensus on digital twin definitions and frameworks.
Coupry et al (2021) [54]	Explore the combination of BIM and XR technologies to enhance maintenance procedures in smart buildings.	Systematic literature review combining DT, BIM, and XR technologies.	BIM, XR, AR, IoT	operation and maintenance	Building and smart maintenance scales.	Reviewed XR and BIM integrations for smart building maintenance.	Complexity of XR integration in real-world settings.	Few practical XR-BIM use cases in O&M.
Delgado et al (2021) [57]	Analyze DT concepts in manufacturing to derive models suitable for the built environment.	Broad literature review and conceptual analysis of DT models in AECO.	BIM, CPS, conceptual models, process models	design and operation	Industry-wide application with AECO focus.	Mapped DT applications in manufacturing for AECO contexts.	High costs of adapting manufacturing methods to AECO.	Need for AECO-specific DT maturity models.
Deng et al (2021) [58]	Systematically review the evolution of BIM to Digital Twins and assess enabling technologies.	Systematic literature review with a five-level ladder taxonomy.	IoT, BIM, AI, smart buildings.	design, construction, and operation	Building scale within smart city contexts.	Developed a taxonomy for assessing DT maturity in built environments.	Lack of real-time synchronization in many DT implementations.	Insufficient exploitation of IoT-enabled DTs.
Opoku et al (2021) [1]	Analyze DT applications in construction lifecycle stages and provide a roadmap for adoption.	Systematic review and science mapping method.	IoT, AI, data fusion, Industry 4.0	construction project	Project scale in construction.	Presented a comprehensive roadmap for DT adoption in construction.	Limited consensus on DT standards in construction.	Lack of detailed roadmaps for DT lifecycle integration.
Rausch et al (2021) [134]	Analyze geometric DTs for quality control during offsite manufacturing.	Comparative analysis of geometric DT approaches in offsite manufacturing.	3D scanning, laser scanning, BIM, parametric design	fabrication and assembly	Project and component scales in offsite manufacturing.	Proposed quality control mechanisms using geometric DTs in OSM.	High costs and complexity of 3D scanning technologies.	No unified approach for geometric DT in manufacturing.
Teisserenc et al (2021) [56]	To explore the integration of blockchain with digital twins for improving trust, security, and efficiency in Industry 4.0 projects.	Conceptual framework using PESTELS analysis and literature review.	blockchain, IoT, BIM, Industry 4.0	Entire lifecycle: design to operation	Large-scale construction projects.	Proposed Decentralized Digital Twin Cycle (DDTC); addressed scalability, security, and interoperability gaps.	High computational requirements; lack of standardization; regulatory uncertainties.	Insufficient case studies on blockchain-DT integration.
Zhao et al (2021) [93]	To evaluate energy retrofitting schemes for existing buildings using digital twin technology.	Development of a Scan-to-BIM framework; applied to nearly zero-energy buildings (nZEB) retrofitting.	Scan-to-BIM, IoT, Energy Simulation, Photovoltaic Systems	Retrofit and maintenance	Building-level retrofitting projects.	Demonstrated a 14.1% energy cost reduction and 24.13% photovoltaic efficiency increase through DT-enabled retrofitting.	Technical challenges in 3D modeling and data fusion.	Limited exploration of DT retrofitting for large-scale or diverse building types.
Zhou et al (2021) [86]	To explore the use of digital twins in managing prefabricated building construction processes and mitigating risks.	Integrated BIM with digital twins for real-time monitoring and prediction.	BIM, IoT, cloud computing	Construction	Prefabricated building systems.	Demonstrated DT-BIM integration for risk mitigation; real-time monitoring of prefabricated building components.	Complexity in data fusion; high costs in implementing digital twins.	Lack of scalability studies for larger prefabricated projects.
Ammar et al (2022) [89]	Propose a definition of digital twins in construction and explore their applications and challenges.	Semi-structured interviews with nine practitioners and a case study.	IoT, AI, BIM, semantic web	operation and maintenance	Construction projects and building authority integration.	Provided a practical definition of digital twins and identified applications and challenges.	Data preparation challenges, stakeholder alignment, cost issues.	Lack of prototype applications and quantifiable benefits.

Table A1 (Continued). A complete list of all 95 reviewed studies, along with detailed insights and analyses

Author(s) and Year	Research Objective	Methodology	Technologies Mentioned	Lifecycle Phase	Scale	Key Contributions to Literature	Barriers/Challenges Identified	Gaps Identified
Banfi et al (2022) [106]	Develop a 4D multi-user digital twin platform integrating BIM and extended reality (XR) for energy efficiency.	Case study integrating scan-to-BIM processes and cloud-based XR platforms.	BIM, XR, cloud computing, APIs	Design, operation, and retrofit	Building scale with energy and comfort focus.	Showcased a multi-user 4D DT platform integrating BIM and XR.	Interoperability and user adoption challenges.	Scalability of multi-user DT platforms.
Bortolini et al (2022) [4]	Review digital twin applications for building energy efficiency and analyze research trends.	Comprehensive literature review categorized into key topics.	BIM, IoT, cloud computing	Operation and maintenance	Building and operational scale.	Reviewed DT applications in energy efficiency and highlighted future research areas.	Energy data integration and scalability challenges.	Limited comparative analysis of DT tools for energy efficiency.
Eneyew et al (2022) [94]	Propose a BIM-IoT integration framework for semantic interoperability in smart-building digital twins.	Framework development and experimental evaluation for BIM-IoT integration.	BIM, IoT, ontology-based query mediation	Lifecycle-wide integration for smart buildings	Smart building scale with BIM-IoT integration.	Developed a novel semantic interoperability framework for smart buildings.	Lack of real-world validation for BIM-IoT frameworks.	Insufficient research on semantic-level BIM-IoT interoperability.
Gourlis et al (2022) [90]	Develop a holistic DT framework integrating energy modeling for industrial facilities.	Case study comparing semi-automated workflows for building energy modeling in DTs.	BIM, BEM, hybrid simulation, visual programming	design optimization	Industrial facility scale.	Proposed a modular DT framework for integrating energy modeling in industrial facilities.	Data simplification and workflow standardization for energy modeling.	Few practical implementations of holistic industrial DT frameworks.
Hosamo et al (2022a) [100]	Evaluate DT technology's potential for fault detection in building maintenance and operations.	Qualitative assessment of 115 relevant documents on DT for fault detection.	IoT, AI, predictive algorithms, BIM	Operation and maintenance	Building scale with focus on maintenance.	Identified gaps and opportunities to improve DT fault detection.	Hardware/software limitations, financial incentives for stakeholders.	Limited integration of ML with DTs for proactive fault detection.
Hosamo et al (2022b) [120]	Reviewed AEC-FM trends to advance digital twin-driven building management.	Analyzed 77 publications, identifying six research areas: lifecycle management, integration, design, maintenance, semantics, and knowledge.	BIM, IoT, ML, big data	Entire lifecycle: design to maintenance	Building and facility management industry.	Developed a framework for digital twin adoption in AEC-FM, addressing information standardization gaps and identifying six key application areas.	Lack of standardization for data integration; Poor interoperability between BIM, IoT, and FM systems; Data overload and fragmentation.	Highlights gaps in predictive maintenance, occupant-centric twins, and the need for AI-BIM frameworks for adaptive management.
Kosse et al (2022) [114]	Propose a digital twin framework for serial construction using modular precast elements.	Application of Industry 4.0 principles to modular construction with precast elements.	BIM, Industry 4.0, IoT, modular construction	Production and construction	Precast element scale for serial construction.	Advanced modular construction using a digital twin framework.	Limited automation and feedback loops in modular construction.	Few implementations of serial construction DTs.
Lv et al (2022) [62]	Explore BIM and DT integration for smart city construction during the COVID-19 scenario.	Review of BIM and DT integration for big data processing in smart cities.	BIM, cloud computing, big data	construction and operation	City-scale data processing and management.	Demonstrated DT applications in smart city development during COVID-19.	Complexity of big data integration in smart cities.	Lack of scalability studies for smart city DTs.
Megahed et al (2022) [66]	Review the evolution of BIM into DTs and assess their post-pandemic potential in AECO.	Systematic review and bibliometric analysis of 238 publications.	BIM, IoT, AI, cloud computing	All lifecycle phases in AECO	Building and urban scales in AECO.	Proposed a theoretical model for DTs in post-pandemic AECO.	Misconceptions between BIM and DTs.	Limited post-pandemic DT applications in AECO.
Meschini et al (2022) [101]	Develop a cognitive digital twin framework using BIM-GIS for smart campus management.	BIM-GIS integration and AMS app development for university campuses.	BIM, GIS, IoT	Operation and maintenance	Campus-scale asset management.	Showcased BIM-GIS for cognitive campus DTs and emergency management.	Fragmented databases and limited scalability in AMS.	Need for AI-driven applications in cognitive DTs.
Mohseni et al (2022) [87]	Introduce an advanced control method for HVAC systems using DTs and reinforcement learning.	Co-simulation and hardware-in-loop tests with reinforcement learning algorithms.	HVAC systems, PPO, RL, co-simulation	Operation	Building-scale smart systems.	Demonstrated DT-based control for efficient HVAC systems.	Complex system dynamics and high computational demands.	Insufficient adoption of RL in HVAC DT systems.
Naderi et al (2022) [78]	Present a knowledge map of IDT research and identify gaps for future exploration.	Bibliometric analysis of 139 studies with network mapping.	BIM, IoT, network theory, big data	Infrastructure	Infrastructure scale for civil engineering.	Mapped IDT maturity and gaps with a comprehensive knowledge map.	Lack of common understanding and stakeholder collaboration.	Limited research on enabling IDT technologies.
Pregnotato et al (2022) [61]	Develop a workflow for applying DTs to legacy infrastructure and provide a case study.	State-of-the-art review and development of a proof-of-concept framework.	IoT, wireless sensors, SHM, BIM	Management and maintenance	Infrastructure scale (bridges).	Developed a step-by-step DT workflow for existing assets.	Lack of standards and protocols for legacy infrastructure.	Few frameworks for infrastructure DT applications.
Salem et al (2022) [79]	Review DT applications in construction project management and propose a comprehensive framework.	Systematic literature review and structured framework proposal.	AI, CPS, BIM, IoT	construction project	Project-scale construction management.	Provided a structured approach for integrating DTs in construction management.	Resistance to adopting advanced DT technologies.	Limited applications of DTs in project execution stages.
Tan et al (2022) [102]	Developed a digital twin lighting system using computer vision and dynamic BIM for efficient, intelligent lighting control.	14-day experiment using YOLOv4 for pedestrian detection and environment sensing.	BIM, Computer Vision, YOLOv4, IoT	operation and maintenance	Individual buildings.	Introduced DTL system; achieved 79% energy savings; demonstrated improved decision-making accuracy (95.15%).	High initial costs; integration complexities; data privacy concerns.	Limited scalability and real-time adaptability in multi-building scenarios.
Wang et al (2022) [60]	To propose a VR-based digital twin framework for improving construction efficiency and real-time monitoring.	Development of a VR-integrated digital twin framework; performance evaluation via simulations.	BIM, VR, IoT, AI	Construction and operation	Building and infrastructure projects.	Introduced a VR-enhanced DT framework; demonstrated improved scalability and real-time performance.	Technical and financial constraints; scalability issues.	Lack of large-scale implementation studies.

Table A1 (Continued). A complete list of all 95 reviewed studies, along with detailed insights and analyses

Author(s) and Year	Research Objective	Methodology	Technologies Mentioned	Lifecycle Phase	Scale	Key Contributions to Literature	Barriers/Challenges Identified	Gaps Identified
Yang et al (2022) [95]	To analyze the role of digital twins in promoting intelligent green buildings and achieving sustainable urban development.	Comprehensive literature review and conceptual framework.	Green Building, IoT, AI, Sustainable Design	Entire lifecycle: design to operation	Building and urban contexts.	Highlighted integration of DT with green building principles; provided development trends and challenges for intelligent green buildings.	Integration with legacy systems; limited stakeholder engagement.	Need for real-world implementation studies in diverse climates.
Zhao et al (2022) [96]	To propose a fusion of digital twins and machine learning for intelligent building operation and maintenance (O&M).	Developed a digital twin framework and a neural-network-driven O&M prediction mechanism.	ANN, ML, IoT	Operation and maintenance	Building-level applications.	Proposed a digital twin model for predictive O&M; demonstrated the integration of machine learning for risk and life prediction.	High data processing requirements; technical challenges in real-time data synchronization.	Limited studies on full-scale implementation of digital twins in O&M.
Naderi et al (2023) [80]	Analyze infrastructure digital twins (IDTs) with a focus on architectures, interoperability, and future prospects.	Systematic literature review and network analysis of 85 studies on IDTs.	BIM, IoT, network theory, big data	Operation and maintenance	Infrastructure scale.	Mapped the evolution of IDTs and highlighted interoperability solutions.	Complexity and scalability challenges for IDTs.	Insufficient research on IDT architectures and interoperability.
Afzal et al (2023) [67]	Review digital twin developments in construction, identifying key components and advancing DT applications.	PRISMA-based review of DT developments in the AEC sector.	AI, IoT, XR, BIM	Lifecycle management	Building and construction industry scale.	Reviewed DT applications and components critical for AEC practices.	Confusion between BIM and DT, lack of standard frameworks.	Need for advancements in DT maturity and integration technologies.
Desogus et al. (2023) [75]	Develop a scalable, modular framework for monitoring building thermal comfort using digital twins.	Case study and BIM-centered framework development for thermal comfort monitoring.	BIM, IoT, thermal monitoring sensors	Operation	Building scale focused on thermal monitoring.	Proposed a BIM-integrated DT framework for thermal comfort assessment.	Data integration issues and limited user interfaces.	Limited studies on integrating thermal sensors into DTs.
de Wilde et al. (2023) [88]	Critically evaluate how AI and Digital Twins intersect with building performance simulation.	Structured review and thematic analysis of ICT in building simulation and DTs.	AI, ML, IoT, CPS, data mining	Design and operation	Building and data ecosystems scale.	Highlighted synergies between AI, DTs, and building simulations.	Conceptual confusion about overlaps between AI and DTs.	Few practical frameworks bridging AI with DTs.
Drobnyi et al. (2023) [115]	Review methods for constructing and maintaining geometric digital twins for existing buildings.	Systematic review of geometry-based DT methods focusing on as-built conditions.	BIM, scan-to-BIM, deep learning, point clouds	Construction and operation	Building scale with emphasis on geometric accuracy.	Reviewed advancements in geometric DT construction and maintenance.	High costs and manual effort required for geometric DT creation.	Gaps in automated methods for DT geometric updates.
Ghansah et al. (2023) [111]	Identify major opportunities and limitations of digital twins for smart buildings.	Scientometric and content analysis of literature on smart-building digital twins.	IoT, big data, cloud computing, blockchain	Operation	Building scale with a focus on smart buildings.	Identified 24 opportunities and 5 research domains for DTs in smart buildings.	Challenges in data integration, standardization, and security.	Need for standardized methods and tools for smart-building DTs.
Hakimi et al (2023) [103]	Develop a conceptual digital twin framework emphasizing data fusion for efficient civil infrastructure management.	Systematic review of 105 papers on data fusion and DT frameworks in infrastructure management.	OpenBIM, GIS, IFC, multilayer data fusion, AI	Operation and maintenance	Infrastructure scale, focusing on civil infrastructure management.	Proposed a novel DT framework emphasizing multilayer data fusion for lifecycle efficiency.	Data heterogeneity, lack of interoperability standards.	Need for real-world implementations of proposed frameworks.
Jasinski et al (2023) [112]	Develop and validate digital twins of bridges using load tests and FEM models.	Case study of bridge load tests integrated with BIM and FEM simulations.	BIM, FEM, IoT, load testing	Operation	Bridge-scale applications.	Highlighted the critical role of load tests in validating digital twins of bridges.	Data synchronization and model validation issues.	Need for real-world validations of bridge DTs.
Jradi et al (2023) [126]	Provide a scalable digital twin solution for energy retrofitting and decarbonization of Danish buildings.	Energy modeling using ML and AI techniques with IoT sensor integration.	IoT, ML, AI	Operation and retrofit	City-scale and building retrofitting.	Demonstrated energy retrofitting potential using a scalable DT framework.	Limited adoption of advanced IoT and ML models.	Limited focus on non-residential building retrofits.
Lei et al (2023) [63]	Identify and classify challenges in urban digital twins through systematic review and expert survey.	Systematic review combined with a Delphi survey of domain experts.	IoT, AI, edge computing, simulation	Lifecycle management	Urban-scale digital twins.	Mapped technical and non-technical challenges in urban DTs.	Interoperability, business model gaps.	Few holistic frameworks for urban DT challenges.
Lucchi et al (2023) [81]	Analyze digital twin applications in heritage building automation and propose future directions.	Bibliometric and scientometric analysis of DT applications in heritage construction.	BIM, HBIM, VR, AR, IoT	Heritage management	Heritage building scale.	Proposed advanced methods for heritage building automation using DTs.	Lack of tailored standards for heritage automation.	Limited studies on VR/AR applications in heritage DTs.
Marienkov et al (2023) [98]	Develop and validate a digital twin for a 24-story building to model seismic impacts.	Case study with numerical and experimental analysis using FEM and IoT.	IoT, FEM, accelerograms, vibration monitoring	Construction and operation	Building-scale application in seismic zones.	Validated seismic performance using a hybrid DT framework.	Data synchronization and real-time monitoring issues.	Lack of real-world validations in seismic DTs.
Nguyen et al (2023) [107]	Examine the integration of BIM and DT for improved efficiency in building construction.	Systematic literature review focusing on BIM-DT integration.	BIM, IoT, real-time data capture	Design and construction	Building scale for construction efficiency.	Clarified the relationship between BIM and DT in construction.	Fragmented data systems and lack of stakeholder coordination.	Need for practical implementations of BIM-DT integrations.
Oliveira e Sousa et al (2023) [132]	Propose a workflow for using HBIM in developing digital twins for heritage buildings.	Incremental low-code workflow with Grasshopper for Rhino 3D and laser scanning.	HBIM, parametric modeling, laser scanning, Rhino 3D	Heritage management	Heritage building scale.	Proposed a low-code HBIM-DT workflow for historic buildings.	Challenges in accurately modeling complex historic geometries.	Limited studies on parametric HBIM workflows for DTs.

Table A1 (Continued). A complete list of all 95 reviewed studies, along with detailed insights and analyses

Author(s) and Year	Research Objective	Methodology	Technologies Mentioned	Lifecycle Phase	Scale	Key Contributions to Literature	Barriers/Challenges Identified	Gaps Identified
Omrany et al (2023) [82]	Review current DT implementations and enabling technologies in construction.	Systematic review of 145 publications on DT in construction.	BIM, IoT, AI, blockchain, semantic modeling	construction	Building and project scales.	Identified key DT applications and challenges in construction.	Interoperability, scalability, and data privacy issues.	Few frameworks addressing DT scalability and governance.
Osadcha et al (2023) [83]	Provide an overview of DT geometry updating methods for built assets.	Systematic literature review and bibliometric analysis.	UAVs, photogrammetry, laser scanning, data integration	design	Building scale focusing on geometry updates.	Outlined the challenges and methods for DT geometry updates.	High costs and technical complexity of geometry updates.	Need for standardized geometry update processes.
Sepasgozar et al (2023) [116]	Present a roadmap for integrating BIM and DT as converging technologies in construction.	Roadmap creation based on thematic and systematic analysis.	BIM, VR, AR, Industry 4.0, blockchain	construction and facility management	Industry-wide and facility scales.	Highlighted converging technologies for future digital construction.	Expensive technologies and need for advanced workforce training.	Few studies on integrating emerging technologies with DT.
Su et al (2023) [2]	Propose a conceptual framework for DT-enabled construction lifecycle management.	Systematic literature review with conceptual modeling.	IoT, CPS, BIM, predictive analytics	demolition	Building and project lifecycle scales.	Proposed a lifecycle management framework with DT.	Limited adoption and unclear implementation strategies.	Need for holistic frameworks covering entire lifecycles.
Tuhaise et al (2023) [65]	To identify key technologies for digital twin development in construction and highlight future research directions.	Systematic literature review with case studies.	BIM, IoT, big data, AI, ML	Design, construction, and operation	Building and city-scale projects.	Identified 5 development layers for digital twins; emphasized integration and data processing technologies.	Interoperability issues; financial constraints; organizational resistance to change.	Limited focus on real-time data integration and analytics.
Wang et al (2024) [125]	To develop and validate a graphics-based digital twin framework for UAV-aided post-earthquake inspection, ensuring rapid and safe evaluations.	Developed a GBDT framework combining FE and CG models, validated with real data.	UAVs, Finite Element, Computer Graphics (CG), ML	maintenance	High-rise buildings.	Introduced GBDT for rapid inspections; improved damage detection and UAV flight planning under real-world constraints.	Dependency on environmental factors; high computational requirements.	Limited application in diverse seismic regions; scalability issues for larger urban contexts.
Weil et al (2023) [64]	To identify and categorize challenges in the development and implementation of urban digital twins (UDTs) for smart cities.	Systematic literature review using PRISMA approach; analysis of 189 articles.	Urban Digital Twin, AI, IoT, big data, edge computing	City planning and management	Urban environments.	Grouped UDT challenges into eight themes (e.g., interoperability, data quality) and highlighted environmental sustainability in smart cities	Interoperability issues; governance constraints; insufficient standardization.	Lack of real-world case studies; limited frameworks addressing multi-domain integration.
Xie et al (2023) [97]	To develop a digital twin-enabled framework for real-time fault detection and diagnosis in HVAC systems.	Symbolic AI techniques for semantic tagging; real-time data integration using a digital twin data platform.	Semantic Web, AI, IoT, HVAC	Operation and maintenance	Building systems.	Developed a semantic fault tagging system, improving HVAC fault diagnosis and reducing overfitting.	Complexity in semantic integration; high data processing requirements.	Lack of large-scale implementation and validation.
Xu et al (2023) [128]	To propose a digital twin model for structural health monitoring by integrating BIM and 3D scene models.	Fusion of BIM with real-scene 3D modeling; validated using the Nanjing Museum case study.	\BIM, 3D Modeling, Oblique Photogrammetry	monitoring (structural health)	Individual historical buildings.	Demonstrated integration of SHM data with BIM for dynamic health representation.	Complexity in integrating heterogeneous data sources.	Limited application to non-historical or large-scale structures.
Yevu et al (2023) [135]	To explore real-time carbon emissions monitoring in prefabrication supply chains (PSC) and enhance smart construction processes.	Mixed-method review involving scientometric and qualitative analysis.	RFID, GPS, IoT, Laser Scanning	Manufacturing and supply chain management	Prefabrication supply chains and building projects.	Proposed systematic DT-enabled carbon monitoring solutions; identified essential smart technologies for PSC.	Data inconsistency; limited adoption of real-time monitoring technologies.	Lack of frameworks for integrating DT in large-scale PSC applications.
Zhang et al (2023) [12]	To identify enabling technologies for DT applications in the operation and maintenance phase of the AEC industry	Review of 825 publications; analysis of technologies and strategies.	IoT, AI, Cloud Computing, big data	Operation and maintenance	AEC industry O&M applications.	Proposed DT strategies for O&M with key enabling technologies highlighted.	High dependency on data synchronization; interoperability challenges.	Insufficient strategies for large-scale O&M DT implementations.
Zhou et al (2023) [104]	Explore computer vision enabled BIM for real-time updates in building digital twins (BDTs)	Developed a CV enabled BDT scheme integrating 2D object detection and 3D estimation networks	BIM, Computer Vision, IoT	Operation and maintenance	Building automation systems.	Achieved real-time updates with low error rates; advanced integration of CV and BIM	Addressing inconsistencies in dimensions and coordinate systems.	Lack of applications beyond operational phases.
Arsecularatne et al (2024) [72]	Investigate the use of digital twin (DT) technology to improve building energy management and analyze occupant behavior.	Systematic literature review and scientometric analysis of 466 articles from the Scopus database.	real-time monitoring, predictive maintenance, AI	Operation	Building and urban scales.	Identifies challenges and proposes future research directions for DTs in energy efficiency.	Interoperability issues, privacy concerns, data quality challenges, and high implementation costs.	Lack of standard frameworks and insufficient integration of occupant behavior in DT models.
Bäcklund et al (2024) [127]	Develop a human-centric digital twin to improve navigation and operational excellence in educational buildings.	Case study on digital twin applications in university campus buildings in Sweden.	3D scanning, geospatial data, real-time monitoring, AI, fault detection	Operation	Building scale (educational buildings).	Introduced a novel human-centric approach for digital twins in educational facilities.	Interoperability issues, replicability challenges for other building types.	Limited validation of digital twin innovations in real-world contexts.
Almatared et al (2024) [131]	Develop a digital-twin-based framework for improving fire safety management in smart buildings.	Questionnaire-based survey with FM professionals and literature review.	BIM, IoT, AI, AR	Fire safety and evacuation	Building scale (smart buildings).	Proposed a comprehensive DT framework for FSM and highlighted industry readiness.	Integration issues, high costs, data security, and user acceptance.	Gap in adoption of DTs for fire safety and lack of comprehensive frameworks.

Table A1 (Continued). A complete list of all 95 reviewed studies, along with detailed insights and analyses

Author(s) and Year	Research Objective	Methodology	Technologies Mentioned	Lifecycle Phase	Scale	Key Contributions to Literature	Barriers/Challenges Identified	Gaps Identified
Aranda et al (2024) [70]	Develop and evaluate a digital twin for a university campus integrating urban sustainability.	Case study-based development and pilot testing of a digital twin model.	GIS, IoT, BIM, 3D modeling	urban and infrastructure management	Campus-scale case study.	Demonstrated a digital twin's role in sustainability and urban management.	Integration challenges, data standardization issues.	Need for integrating real-time urban and sustainability data.
Arowoia et al (2024) [73]	Review digital twin technologies for thermal comfort and energy efficiency in buildings.	Scientometric review and systematic analysis of methods and technologies.	AI, IoT, ANN, sensors	Operation	Building scale focusing on energy and thermal comfort.	Summarized state-of-the-art applications and highlighted gaps in energy efficiency.	Limited adoption of sensors, subjective occupant perceptions.	Insufficient focus on human-centric energy optimization.
Bakhshi et al (2024) [117]	Investigate how digital twins can address challenges in the construction supply chain (CSC).	Mixed-method systematic literature review (SLR) and discussions.	IoT, cloud computing, AI, big data	construction supply chain	Supply chain scale.	Explored CSC-specific digital twin challenges and potential solutions.	Fragmentation of processes, lack of real-time information.	Limited exploration of DT applications across CSC phases.
Chacón et al (2024) [91]	Develop pipelines for synchronizing data flow between physical construction sites and digital twins.	Case study of office building construction using real-time data and sensor networks.	IoT, sensor networks, real-time dashboards, knowledge graphs	construction	Building construction scale.	Showcased the implementation of real-time DT in construction processes.	Stakeholder alignment, data heterogeneity, cost issues.	Limited case studies on DT in active construction sites.
Chen et al (2024) [92]	Integrate multifunctional models in digital twins for lifecycle management of assets and systems in smart cities.	Case study-based framework development with hierarchical tiers for DTs.	IoT, BIM, remote sensing, spatiotemporal analysis	Entire lifecycle on urban systems	Campus-scale for integrated management.	Proposed a DODT concept for multifunctional DT integration.	Lack of standards for multifunctional DTs.	Insufficient research on hierarchical DT models.
Cheng et al (2024) [133]	Improve thermal performance in heritage buildings by using digital twins to optimize heater placement.	CFD and HBIM simulations for thermal performance improvement in heritage buildings.	IoT, CFD, HBIM, structural simulation	Operation and heritage buildings	Building scale focused on heritage preservation.	Demonstrated the use of DTs for improving heritage building performance.	Challenges in coupling CFD and HBIM simulations.	Lack of scalable applications for heritage buildings.
Ellul et al (2024) [129]	Develop data-centric digital twins for health and safety and progress monitoring using gaming engines.	Two case studies leveraging Unreal Engine for construction digital twins.	Gaming engines (Unreal Engine), GIS, 4D modeling	Construction and monitoring (health and safety)	Project scale for highway construction.	Demonstrated the feasibility of low-code approaches for construction digital twins.	Interoperability issues and data fragmentation.	Limited exploration of gaming engines in DT applications.
Ghorbani et al (2024) [105]	Define digital twins for the AECO industry and propose a classification system.	Systematic literature review and expert validation of proposed definitions and classifications.	BIM, CPS, ontology-based classifications	Operation and maintenance in AECO	Industry-wide AECO focus.	Provided a common definition and classification structure for AECO digital twins.	Confusion over DT definitions and classifications in AECO.	Lack of consensus on DT classification systems in AECO.
Hakimi et al (2024) [84]	Conduct a bibliometric review to identify trends and gaps in digital twin applications for facility management.	Bibliometric analysis of 248 articles using VOSviewer to identify trends and research gaps.	BIM, AI, CPS, IoT	Facility management	Building and facility management scale.	Identified state-of-the-art trends and gaps in DT applications for smart FM.	Data interoperability, standardization challenges in FM.	Insufficient focus on semantic interoperability in FM DTs.
Hauer et al (2024) [136]	Systematically review BIM and DT integrations for advanced building control strategies, focusing on lighting systems.	Systematic literature review using keyword searches across databases.	BIM, advanced lighting controls, AI, IoT	Design and operation	Building scale with focus on control systems.	Highlighted the integration potential of BIM and DT for lighting system optimization.	Interoperability issues, proprietary system limitations.	Lack of advanced BIM-DT integrations in lighting systems.
Hu et al. (2024) [130]	Develop an intelligent BIM-enabled DT framework for structural health monitoring with IoT and digital signal processing.	Experimental demonstration using a prototyped structural frame for SHM under varying load conditions.	IoT, DSP, structural analysis, BIM	real-time monitoring (structural health)	Structure/component scale for SHM.	Demonstrated a scalable framework for integrating SHM data into BIM with real-time visualization.	Sensor data quality issues, lack of interoperability in SHM frameworks.	Need for frameworks addressing sensor data preprocessing in SHM.
Jeong et al (2024) [138]	Propose a method for constructing building-related digital twin data models using public data.	Data modeling and mapping using CityGML and UML diagrams.	CityGML, UML, public data integration	Data modeling	Building-scale applications.	Proposed an interoperable digital twin data model for buildings.	Lack of interoperability in public data standards.	Insufficient research on public data-based DTs.
Yang et al (2024) [108]	Advocate for site-scale DTs to enhance urban planning and landscape design.	Case studies of urban interventions using site-scale digital twins.	IoT, urban sensing, participatory design	Design and operation	Site-scale for urban elements.	Promoted site-scale DTs for more effective urban interventions.	Complexities in urban-scale data integration.	Lack of scalability studies for site-scale DTs.
Kang et al (2024) [76]	Define connectivity and predictability as core requirements for real-time DT frameworks in building monitoring.	Case study of environmental performance monitoring in buildings using real-time data.	IoT, BIM, real-time monitoring, predictive analytics	Operation for building monitoring	Building-scale environmental monitoring.	Presented a detailed framework for DT connectivity and predictability.	Challenges in ensuring data quality and system integration.	Limited frameworks addressing connectivity in DTs.
Mitera-Kielbasa et al (2024) [118]	Enhance information management in construction using AI-based automation of Exchange Information Requirements.	Use of Word2Vec and SVM for AI-driven text classification in Exchange Information Requirements.	AI, BIM, Word2Vec, SVM	construction projects	Project-scale EIR management.	Improved EIR management in construction with AI-driven classification.	Insufficient standardization in EIR practices.	Gaps in AI integration for BIM and DT projects.
Lam et al (2024) [71]	Propose methods to integrate IFC, CityGML, and semantic graphs for 3D city model visualization.	Case study using IFC, CityGML, and semantic graph data visualization with Neo4j.	CityGML, IFC, semantic graphs, Neo4j	Urban management and planning	City-scale visualization and analysis.	Enhanced interoperability and visualization in 3D city modeling.	Data synchronization, interoperability issues.	Lack of real-world validation for proposed models.

Table A1 (Continued). A complete list of all 95 reviewed studies, along with detailed insights and analyses

Author(s) and Year	Research Objective	Methodology	Technologies Mentioned	Lifecycle Phase	Scale	Key Contributions to Literature	Barriers/Challenges Identified	Gaps Identified
Lauria et al (2024) [68]	Critically review future challenges of applying digital twins in building lifecycle management.	Systematic literature review from Scopus and other databases focusing on lifecycle phases.	BIM, IoT, AI, lifecycle analytics	Operation and maintenance	Building-scale lifecycle analysis.	Identified key challenges and future research directions in building DTs.	Limited integration across building lifecycle phases.	Insufficient research on decarbonization impacts of DTs.
Li et al (2024) [74]	Create an intelligent monitoring platform for building energy consumption using digital twin technology.	Case study with simulation using Designbuilder software for energy monitoring.	BIM, IoT, predictive control, smart sensors	Operation and maintenance	Building-scale energy monitoring.	Developed a DT platform to optimize building energy use.	Low adoption of intelligent control systems.	Need for frameworks integrating occupant behavior data.
Li et al (2024) [119]	Define a conceptual framework for intelligent tunnel construction using digital twins.	Critical review and conceptual modeling of DTs in tunnel construction.	BIM, IoT, ML, point cloud	construction	Infrastructure and tunnel-scale construction.	Outlined a DT framework for addressing tunnel construction challenges.	Uncertainty in geological data and slow decision-making.	Scarcity of DT applications in real-time tunnel operations.
Mohandes et al (2024) [109]	Identify and prioritize barriers to DT adoption in sustainable construction.	Iterative method with literature review and stakeholder survey in Hong Kong.	IoT, BIM, AI, simulation	Sustainability-focused lifecycle stages	Building and project-scale sustainability efforts.	Identified actionable barriers and solutions for DT adoption.	Low data reliability and stakeholder coordination issues.	Few frameworks integrating sustainability with DTs.
Naeem et al (2024) [137]	Analyze Industry 4.0 technologies' applications in renewable energy with a focus on DT.	Systematic literature review combined with industrial insights.	AI, IoT, blockchain, cybersecurity	Energy lifecycle in renewable systems	Energy systems scale with a renewable focus.	Explored digital technologies' impact on renewable energy sectors.	High costs and cybersecurity risks.	Lack of comprehensive studies on Industry 4.0 in RES.
Opoku et al (2024) [77]	Develop a BIM-IoT integrated DT for monitoring indoor conditions in living labs.	Development of a BIM-IoT DT for Indoor Environment Monitoring	IoT, BIM, live data platforms, semiotic representation	real-time monitoring	Building scale for indoor condition optimization.	Demonstrated a practical DT for library indoor condition monitoring.	Challenges in integrating live data into DTs.	Insufficient real-world DT applications in living labs.
Osama et al (2024) [124]	Develop a framework for user-centered DT applications in the built environment.	Applied research on city-scale user-centered DT development.	user-centric design, city-scale DT	Built environment lifecycle with user focus	City-scale applications for urban environments.	Developed a user-centric DT framework for built environments.	Insufficient frameworks for user-centric DTs.	Limited research on human-centric DT applications.
Oulefki et al (2024) [113]	Survey AI strategies for enhancing smart building operations using DTs.	Review of AI in DT applications for smart buildings.	AI, ML, deep learning, IoT, federated learning, reinforcement learning	Operation	Smart building scale with AI integration.	Reviewed advanced AI strategies for smart building DTs.	Data processing challenges and scalability in AI-powered DTs.	Few studies on integrating advanced AI with DTs.
Piras et al. (2024) [3]	Present a comprehensive framework for integrating digital twin technologies in the AECO sector.	Thematic review based on extensive literature analysis.	BIM, GIS, IoT, AI, remote sensing	All lifecycle phases in AECO	Building and urban scales.	Outlined enablers for DT implementation in AECO with a comprehensive framework.	Data standardization and stakeholder coordination issues.	Limited real-world implementations in AECO.
Radzi et al. (2024) [85]	Explore the relationship between BIM and DT in construction projects and synthesize existing research.	Systematic literature review of 54 studies.	BIM, CPS, IoT, geo-referencing	Entire construction lifecycle: design to decommissioning	Building and project scales.	Clarified the relationship between BIM and DT, addressing misconceptions.	Misunderstandings of BIM-DT integration among practitioners.	Lack of knowledge sharing on BIM-DT relationships.
Revolti et al. (2024) [70]	Investigate the transition from BIM to DT technologies in building construction and facility management.	Systematic review and development of a conceptual framework.	BIM, IoT, cloud computing, data analytics	Design, construction, and operations phases.	Building scale in facility management.	Identified gaps and opportunities for BIM-DT integration.	Limited protocols for dynamic BIM-DT transitions.	Insufficient focus on dynamic capabilities of DTs.
Wang et al. (2024) [99]	To analyze the integration of Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) with digital twin technologies across building lifecycles.	Literature review and lifecycle analysis of BIPV-DT applications.	BIM, IoT, BIPV, ML	Entire lifecycle: design to demolition	Building-level BIPV systems.	Showcased DT's role in enhancing BIPV efficiency and lifecycle integration strategies.	Integration complexities; lack of standardization; high costs.	Scarcity of lifecycle-oriented BIPV-DT studies.
Walczyk et al. (2024) [110]	To evaluate the role of BIM and DT in enhancing smart building design and energy efficiency.	Review of existing frameworks and case studies.	BIM, IoT, Smart Readiness Indicator (SRI)	Design and operation	Smart buildings.	Provided guidelines for integrating DT and IoT in smart buildings; highlighted SRI applications.	Complexity in IoT integration; lack of expertise in advanced DT applications.	Need for advanced methods for evaluating smart readiness.
Yang et al. (2024) [121]	Analyzed digital twins in construction, focusing on lifecycle applications and challenges like data quality and integration.	Systematic review using PRISMA approach; analyzed architectures and enabling technologies of digital twins in construction.	BIM, IoT, AI, Cyber-Physical Systems, VR, AR	Entire lifecycle: design to demolition	Construction industry and project level.	Analyzed DT lifecycle integration, highlighting emerging trends and challenges.	Data quality issues; integration difficulties; lack of standardization.	Insufficient studies on DT's role in demolition and restoration phases.
Yeom et al. (2024) [122]	Explored DT and XR integration for improved energy management and sustainability.	Comprehensive review with proposed DT-XR integrated solutions for energy management and occupant comfort.	XR, IoT, Metaverse, AI	Design, operation, and maintenance	Building energy management systems.	Highlighted DT-XR integration's potential for energy optimization, bridging gaps in comfort and system fidelity.	Lack of fidelity and interoperability; high data security concerns.	Need for practical applications demonstrating real-world DT-XR integration.
Zahedi et al. (2024) [123]	To review the role of digital twins in promoting sustainability throughout the construction lifecycle.	Systematic review of 235 papers; thematic analysis of DT integration in sustainability.	AI, IoT, AR, BIM	Entire lifecycle: design to demolition	Sustainable construction projects and urban environments.	Identified sustainability-driven DT advancements; emphasized AI-IoT integration for sustainability.	Lack of IT infrastructure; data privacy and security issues.	Need for standardized frameworks for DT implementation in sustainability contexts.



Erratum Article

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

CORRECTION / ERRATUM ARTICLE

Investigation friction loss of concrete pavement surface with a new method

 Orhan Karpuz^a,  Muhammet Vefa Akpınar^b,  Hakan Aslan^c,  Muhammet Çelik^{d*},  Elif Çiçek^e

^a Civil Engineering Free Technical Office, Civil Engineer, Gümüşhane, 29010, Turkey

^b Department of Civil Engineering, The Faculty of Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61080, Turkey.

^c Department of Civil Engineering, The Faculty of Engineering, Sakarya University, Sakarya, 54187, Turkey.

^d Department of Civil Engineering, The Faculty of Engineering, Yalova University, Yalova, 77200, Turkey.

^e Department of Civil Engineering, The Faculty of Engineering, Hacettepe University, Ankara, 06800, Turkey.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 November 2024

Received in revised form 27 November 2024

Accepted 28 November 2024

Available online

CORRECTION / ERRATUM ARTICLE

Correction to be made:

Article details: Karpuz, O., Akpınar, M. V., Aslan, H., Çelik, M., & Çiçek, E. (2022). Investigation Friction Loss of Concrete Pavement Surface with a New Method. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 2(2), 66-75. <http://dx.doi.org/10.29228/JIENS.62559>

URL address: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jiens/issue/78942/1327305>

Reason for correction request:

A correction request has been submitted by the authors of the article referenced above, stating that the ORCID numbers of Hakan Aslan and Muhammet Çelik were incorrectly recorded due to name similarities. Based on this request and the supporting documents provided, the journal's editorial board has decided to publish a correction in the January 2025 issue of the journal, indicating both the old and new ORCID numbers. This notice is provided for the information of readers and users.

Former (incorrectly reported) ORCID numbers:

Author	Former (Incorrectly Reported) ORCID Number
Hakan Aslan	0000-0003-2923-6837
Muhammet Çelik	0000-0003-0222-9784

Declared and corrected new ORCID numbers:

Author	Former (Incorrectly Reported) ORCID Number
Hakan Aslan	0000-0001-9444-6908
Muhammet Çelik	0000-0002-3998-8146

Keywords:

Erratum article

The correction request for this article was reviewed by the journal editors Yahya Bozkurt, Aslıhan Sezgin, and Yasemin Balçık Tamer, and the validity of the request was confirmed. With the positive views of the other editors on the editorial board, it has been decided that the correction article will be published in the January 2025 issue.