



ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

JOURNAL OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY OF ESKİŞEHİR OSMANGAZİ UNIVERSITY

Yıl / Year : 2025

Cilt / Volume : 33

Sayı/ Issue : 1

e-ISSN : 2630 – 5712





T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

e-ISSN : 2630 - 5712



ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ **MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ**

JOURNAL OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY
OF ESKİŞEHİR OSMANGAZİ UNIVERSITY



YIL/YEAR : 2025

CİLT/VOLUME : 33

SAYI/ISSUE : 1



T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

e-ISSN : 2630 - 5712



SAHİBİ / OWNER

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Adına
Prof. Dr. Haldun KURAMA
Dekan

EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Haldun KURAMA (hkurama@ogu.edu.tr)

EDİTÖR YADIMCISI / ASSOCIATE EDITOR

Prof. Dr. Melih İPHAR (miphar@ogu.edu.tr)

ALAN (BÖLÜM) EDİTÖRLERİ / AREA EDITORS

Bölüm / Department	Adı ve Soyadı / Name
Bilgisayar Mühendisliği Computer Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Esra N. YOLAÇAN yolacan@ogu.edu.tr
Biyomedikal Mühendisliği Biomedical Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Sultan BÜTÜN ŞENGEL sultanbutun.sengel@ogu.edu.tr
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical-Electronics Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DINDİŞ gdindis@ogu.edu.tr
Endüstri Mühendisliği Industrial Engineering	Doç. Dr. Feriştah ÖZÇELİK fdurmaz@ogu.edu.tr
İnşaat Mühendisliği Civil Engineering	Doç. Dr. Hakan ÖZBAŞARAN ozbasaran@ogu.edu.tr
Jeoloji Mühendisliği Geology Engineering	Prof. Dr. Selahattin KADİR skadir@ogu.edu.tr
Kimya Mühendisliği Chemical Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Uğur SELENGİL uselen@ogu.edu.tr
Maden Mühendisliği Mining Engineering	Prof. Dr. Sabiha KOCA skoca@ogu.edu.tr
Makine Mühendisliği Mechanical Engineering	Prof. Dr. Haydar ARAS haras@ogu.edu.tr
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metallurgical and Materials Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Ersu LÖKÇÜ elokcu@ogu.edu.tr
Mimarlık Architecture	Doç. Dr. Başak GÜÇYETER basakgucyeter@gmail.com
Uçak Mühendisliği Aeronautical Engineering	Prof. Dr. Melih KUŞHAN mkushan@ogu.edu.tr
Yazılım Mühendisliği Software Engineering	Dr. Öğr. Üyesi İlker ÖZÇELİK ilker.ozcelik@ogu.edu.tr



ÖN DEĞERLENDİRME / PRE-CONTROL

Bölüm	Adı ve Soyadı
Bilgisayar Müh. / Computer Engineering	Araş. Gör. Dr. Zuhale TEPECİK CAN zcan@ogu.edu.tr
Biyomedikal Mühendisliği/Biomedical Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Yapıncak GÖNCÜ yapincak.goncu@ogu.edu.tr
Elektrik ve Elektronik Müh. / Electrical-Electronics Engineering	Araş. Gör. Dr. Feyza YILMAZ f.yilmaz@ogu.edu.tr
Endüstri Müh. / Industrial Engineering	Araş. Gör. Aslıhan KARAŞ aslihan.karas@ogu.edu.tr
İnşaat Müh. / Civil Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Meltem ERYILMAZ YILDIRIM meryilmaz@ogu.edu.tr
Jeoloji Müh. / Geology Engineering	Araş. Gör. Duru CESUR daral@ogu.edu.tr
Kimya Müh. / Chemical Engineering	Araş. Gör. Fırat YILMAZ fiat.yilmaz@ogu.edu.tr
Maden Müh. / Mining Engineering	Araş. Gör. Dr. Işıl KILIÇKAPLAN TOKCAN ikilickaplan@ogu.edu.tr
Makine Müh. / Mechanical Engineering	Araş. Gör. Hakan SERTEL hsertel@ogu.edu.tr
Metalurji ve Malzeme Müh. / Metallurgical and Materials Engineering	Araş. Gör. Dr. Işın AKAY ERDOĞAN iakay@ogu.edu.tr
Mimarlık/Architecture	Doç. Dr. Nazife Aslı KAYA ÜÇÖK nasli.kayaucok@ogu.edu.tr
Uçak Mühendisliği/Aeronautical Engineering	Prof. Dr. Melih KUŞHAN mkushan@ogu.edu.tr
Yazılım Mühendisliği/Software Engineering	Araş. Gör. Sergen AŞIK sergen.asik@ogu.edu.tr



EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

- A. Hakan Benzer, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, benzer@hacettepe.edu.tr
- Barbara Tora, AGH University of Science and Technology in Kraków, Poland, tora@agh.edu.pl
- Buket D. Barkana, The University of Akron, Ohio, ABD, mbbarkana@uakron.edu
- Cafer Çelik, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, ccelik@atauni.edu.tr
- Cahit Helvacı, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, cahit.helvacı@deu.edu.tr
- Cemal Baykara, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, baykaracem@itu.edu.tr
- Cengiz Dünder, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, dunder@cu.edu.tr
- Demircan Canadınç, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, dcanadinc@ku.edu.tr
- Derviş Karaboğa, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, karaboga@erciyes.edu.tr
- Emin Çiftçi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, eciftci@gmail.com
- Fatih Altun, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, faltun@erciyes.edu.tr
- Fatih Onur Hocaoglu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, hocaoglu@aku.edu.tr
- Gürsoy Arslan, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, mgarslan@eskisehir.edu.tr
- Habil. Ali Cemal Benim, Duesseldorf University, Duesseldorf, Almanya, alicemal.benim@hs-duesseldorf.de
- Hatem Akbulut, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, akbulut@sakarya.edu.tr
- Kadri Dağdelen, Colorado School of Mines, Colorado, ABD, kdagdelen@mines.edu
- L. Antonio Estévez, University of Puerto Rico, Mayaguez, Puerto Rico, antonio.estevez@upr.edu
- Manuel Pozo Rodríguez, Universidad Autónoma of Madrid, İspanya, manuel.pozo@uam.es
- Mehmet Saltan, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, mehmetsaltan@sdu.edu.tr
- Ömer Nezih Gerek, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, ongerek@eskisehir.edu.tr
- Paul A. Schroeder, University of Georgia, ABD, schroe@uga.edu
- Rasim İpek, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, rasim.ipek@ege.edu.tr
- Serpil Erol, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, serpiller@gazi.edu.tr
- Şadan Kelebek, Queen's University, Kanada, sadan.kelebek@queensu.ca
- Şeref Sağıroğlu, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, ss@gazi.edu.tr
- Yasemin Serin, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, serin@metu.edu.tr
- Yüksel Avcıbaşı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, avcibasi@itu.edu.tr
- Zeki Aktaş, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, zaktas@eng.ankara.edu.tr



Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, bilim ve teknolojideki son gelişmeleri aktarmak amacıyla;

- ❖ Bilgisayar Mühendisliği
- ❖ Biyomedikal Mühendisliği
- ❖ Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- ❖ Endüstri Mühendisliği
- ❖ İnşaat Mühendisliği
- ❖ Jeoloji Mühendisliği
- ❖ Kimya Mühendisliği
- ❖ Maden Mühendisliği
- ❖ Makine Mühendisliği
- ❖ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- ❖ Mimarlık
- ❖ Uçak Mühendisliği
- ❖ Yazılım Mühendisliği

dallarında; *kuramsal ve uygulamalı araştırma ile tarama* niteliklerinde makaleler yayımlamayı amaçlayan disiplinler arası ve hakemli bir dergidir. Dergi, belirtilen mühendislik branşlarında hızla gelişen alanlarına ilişkin çalışmaları ulaştırmayı amaçlamaktadır.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi ilk olarak **1986 yılında** "Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi" olarak yayın hayatına başlamıştır. 1993 ve 2005 yıllarında yapılan isim değişiklikleri sonrasında, üniversitemiz adının "Eskişehir Osmangazi Üniversitesi" olması nedeniyle derginin adı da "Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi" (ISSN: 1301-045x) haline gelmiştir.

Dergi yılda 2 sayı olarak yayımlanmış olup 2012 yılı sonunda yayın hayatına ara vermiştir.

2018 yılından itibaren e-Dergi olarak yayın hayatına tekrar başlamıştır.

Dergi hakkında ayrıntılı bilgiler

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf>

web sayfasında verilmiştir.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi yılda 3 sayı olarak yayımlanmaktadır.

Bu sayılara ek olarak Editörler Kurulu'nun kararıyla, fakültemiz bölümleri tarafında yürütülen bir kongrede sunulan bildiriler "Özel Sayı" olarak yayımlanabilmektedir.

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University is a multidisciplinary and peer-reviewed journal in engineering. The journal is not limited to a particular aspect of science and engineering, but is instead devoted to a wide range of areas in engineering. The journal aims to publish high quality papers in the areas of:

- ❖ Computer Engineering
- ❖ Biomedical Engineering
- ❖ Electrical-Electronics Engineering
- ❖ Industrial Engineering
- ❖ Civil Engineering
- ❖ Geology Engineering
- ❖ Chemical Engineering
- ❖ Mining Engineering
- ❖ Mechanical Engineering
- ❖ Metallurgical and Materials Engineering
- ❖ Architecture
- ❖ Aeronautical Engineering
- ❖ Software Engineering

This journal publishes original theoretical and empirical research papers as well as review papers and case studies related to these areas of engineering. High quality submissions are welcome from academics, researchers, and practitioners.

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University was first launched in 1986. After the name of the journal changed in both 1993 and 2005, consequently, the name is "The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University" (ISSN: 1301-045x). The journal was published as 2 issues per year until the end of 2012, then publication of the journal is suspended between 2012-2017.

It has resumed its publication life as an online journal in 2018.

Additional information for the journal is given at web page :

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf>

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University is published as 3 issues per year.

In addition to the regular issues, proceedings of the conferences which are organized by our university are published as special issues depending upon the decision of the Editorial Board.



**T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ**

e-ISSN : 2630 - 5712



Dergi, halen, aşağıda verilen indeksler tarafından taranmaktadır.

The journal is currently indexed in the following databases.



[TR Dizin](#)



[SOBIAD](#)



[EBSCO Host](#)



[INDEX COPERNICUS](#)



[DOAJ \(Directory of Open Access Journals\)](#)



[BASE](#)



[WorldCat](#)



İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Sayfa

OPTIMIZATION OF STOCK KEEPING AND SPACE UTILIZATION POLICY FOR A WAREHOUSE Faris ALBAKAR, Mhd Hazem ALHAMMAMI, Husam Jehad Hasan OMAR, Mazen SIMI, Basel ZBEDA, Zehra DUZGIT	1608 – 1617
YEŞİL YÖNTEM İLE SENTEZLENEN METAL NANOPARTİKÜLLER İÇEREN POLİMER YÜZEY KAPLAMALARININ HAZIRLANMASI VE İNCELENMESİ Fırat YILMAZ, Demet TOPALOĞLU YAZICI, Buse ERDOĞAN, Eda ÖZDURMUŞ, Umut KILINÇOĞLU, Sinem KIZILKAYA	1618 – 1628
MEŞE PALAMUDU YAĞINDAN MOTORLU TAŞITLARDA KULLANIMA YÖNELİK BİYODİZEL ÜRETİMİ Merve GÖRDESEL YILDIZ	1629 – 1635
UNDERSTANDING THE IMPACT OF RECOGNITION AND RECALL ACTIONS ON ARCHITECTURAL DESIGN PROCESS Noor Kadhim Saeed AL-KHAFAJI, Can UZUN	1636 – 1647
Gd ve $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ BİLEŞİĞİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN VE MANYETİK SOĞUTMA PERFORMANSLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI Arda ZAİM, Haydar ARAS, Cumhur Gökhan ÜNLÜ	1648 – 1655
DERİN KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ ORTA KARBONLU ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ Esad KAYA, İsmail BAYAR, Koray KILIÇAY	1656 – 1661
BİNEK ARAÇLARIN DEVRİLME SÜRECİNDEKİ DİNAMİK DAVRANIŞLARININ ANALİZİ VE DEVRİLME ŞARTLARININ BELİRLENMESİ Halit KARABULUT, Emre YILDIRIM, Mesut DÜZGÜN, Kazım Melih TURGUT	1662 – 1678
SÜRDÜREBİLİRLİĞİ SAĞLAMAK AMACIYLA ANKASTRE FIRINLARDA ISIL VERİMLİLİK ARTIRMA Muharrem KEYFOĞLU, S. Fatih KIRMIZIGÖL	1679 – 1694
BINARY HONEY BADGER ALGORITHM ENHANCED WITH TIME-VARYING SIGMOID TRANSFER FUNCTION AND CROSSOVER STRATEGY Gülnur YILDIZDAN, Emine BAŞ	1695 – 1711
TARIMSAL SENSÖR VERİLERİ KULLANILARAK BİTKİ HASTALIKLARININ ERKEN TESPİTİ İÇİN LSTM TABANLI DERİN ÖĞRENME MODELİ Elif GENÇ, Cem BAĞLUM, Osman ÇAĞLAR, Yusuf KARTAL, Erol SEKE, Kemal ÖZKAN	1712 – 1720
DİNAMİK YÜKLER ALTINDA FARKLI YÜKSEKLİKTE YAPILARIN KAZIK PERFORMANSININ İNCELENMESİ Süleyman GÜCEK, Gülbahar ÜNAL	1721 – 1731
INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ST-37 AND STREX-960 STEELS BY A-TIG WELDING METHOD Emre KASIM, Mehmet Fahri SARAÇ, İlyas GENÇ	1732 – 1738



İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Sayfa

**FRACTURE RESISTANCE AND SELF-HEALING POTENTIAL OF VERY THIN ASPHALT
OVERLAY ENHANCED BY MICROWAVE HEATING**

1739 – 1750

Ezgi EREN, Jan VALENTIN, Peter GALLO, Perviz AHMEDZADE

**INVESTIGATION INTO PRYING FORCE AND BOLT MOMENT IN WELDED STEEL
T-STUBS**

1751 – 1779

Tchabremane Jean de la Croix KOMBATE, Kıvanç TAŞKIN, Kerem PEKER

OPTIMIZATION OF STOCK KEEPING AND SPACE UTILIZATION POLICY FOR A WAREHOUSE

Faris ALBAKAR¹, Mhd Hazem ALHAMMAMI², Husam Jehad Hasan OMAR³, Mazen SIMI⁴, Basel ZBEDA⁵, Zehra DUZGİT^{6*}

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, İstanbul

¹ ORCID No : <https://orcid.org/0009-0001-0614-6030>, ² ORCID No : <https://orcid.org/0009-0004-0147-9823>,
³ ORCID No : <https://orcid.org/0009-0008-9649-9622>, ⁴ ORCID No : <https://orcid.org/0009-0008-0542-0238>,
⁵ ORCID No : <https://orcid.org/0009-0008-5718-330X>, ⁶ ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-0686-1672>

Keywords	Abstract
Warehouse, Variable-Sized Bin Packing Problem, First Fit Decreasing, Best Fit Decreasing, Next Fit Decreasing	<i>This study considers the one-dimensional variable-sized bin packing problem (VSBPP) which is an NP-Hard problem. In this study, the objective is to find an efficient solution that minimizes both the total capacity of the bins used and the number of bins required, thereby optimizing the company's storage policy and saving space within the warehouse. Three algorithms are employed to solve a real warehouse's VSBPP: i) First Fit Decreasing (FFD), ii) Best Fit Decreasing (BFD), and iii) Next Fit Decreasing (NFD). The warehouse dataset includes items of various sizes, and the goal is to allocate these items into bins most efficiently. Experimental results demonstrate that the FFD and BFD algorithms outperform the NFD algorithm. Furthermore, all three algorithms significantly reduce storage space usage and improve space utilization compared to the warehouse's current practices.</i>

BİR DEPO İÇİN ENVANTER TUTMA VE ALAN KULLANIMI POLİTİKASININ ENİYİLEMESİ

Anahtar Kelimeler	Öz
Depo, Değişken Boyutlu Kutulama Problemi, İlk Bulduğun Boşluğu Doldur, En İyi Boşluğu Doldur, Sonraki Boşluğu Doldur	<i>Bu çalışmada NP-Zor bir problem olan tek boyutlu değişken ölçekli kutulama problemi ele alınmaktadır. Bu çalışmada amaç, kullanılan kutuların kapasitelerinin toplamını ve kullanılan kutu sayısını en aza indiren verimli bir çözüm bulmak, böylece şirketin depolama politikasını optimize etmek ve depoda yer tasarrufu sağlamaktır. Gerçek bir deponun problemini çözmek için üç farklı yöntem: i) İlk Bulduğun Boşluğu Doldur (İBBD), ii) En İyi Boşluğu Doldur (EİBD) ve iii) Sonraki Boşluğu Doldur (SBD) algoritmaları kullanılmıştır. Deponun veri seti, farklı boyutlarda çeşitli öğelerden oluşmakta olup amaç bu öğeleri en verimli şekilde kutulara tahsis etmektir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, İBBD ve EİBD algoritmaları SBD algoritmasından daha iyi olmakla beraber, her üç algoritmanın da mevcut depo uygulamasına kıyasla depolama alanı kullanımını azaltmada ve alandan yararlanmayı arttırmada başarılı olduğu gösterilmiştir.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 07.02.2024

Kabul Tarihi : 19.12.2024

Research Article

Submission Date : 07.02.2024

Accepted Date : 19.12.2024

* Sorumlu yazar: zehra.duzgit@bilgi.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1432654>

1. Introduction

The management of warehouses is an essential function for any company that trades in tangible commodities. It should be a priority since it gives companies the ability to retain competitiveness. Warehouse management entails several processes, such as optimizing space and maintaining inventory records. Proper warehousing management is usually faced with several widely known problems. Hemmelmayr, Schmid, and Blum (2012) stated that a common optimization problem called the Bin Packing Problem (BPP) consists of packing items

into bins. Finding a reasonable solution to the BPP is a way of saving resources such as storage space. Therefore, it is essential to find solutions by determining the most effective method for packing different items into bins.

This research provides a way of effectively storing items in bins of a particular warehouse. Finding an effective way to store leads to saving space inside a particular warehouse, which can be utilized for other warehousing activities, and dismissing the option of renting new storage spaces to store all the items at hand. This study



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

can be used as a reference amongst other industries that face the redundant problem of effectively storing their Stock Keeping Units (SKUs) within bins.

The warehouse under consideration is a maintenance, repair, and overhaul (MRO) warehouse and faces challenges in effectively utilizing its space. MRO covers preventive maintenance, component repair, replacement, deep maintenance, structural repairs, etc. In practice, the warehouse's space is being wasted due to incorrect storage techniques. This indicates an underlying lack of organization, which must be addressed to maximize efficiency and eliminate wasted space. This leads to requiring expensive external storage solutions. To overcome this, the warehouse management desires to optimize existing space usage through better storage techniques, aiming to store more parts without acquiring or renting additional warehouses.

The rest of the paper is organized as follows. Literature review is given in Section 2. In Section 3, the problem is defined. The solution approach is explained in Section 4. Computational results are reported in Section 5. The conclusion is given in Section 6.

2. Literature Review

BPP is one of the combinatorial optimization problems that has been well studied for many years because of its economic benefits on different sectors and the high number of industrial applications. BPP involves a set of items or boxes (small objects) of various dimensions that must be assigned to containers or bins (large objects) with capacity constraints to minimize the number of required bins to pack all items. Several variants of BPP differ in terms of dimensionality, type of bins (identical, variable size), and static/dynamic nature. One classification was introduced by Dyckhoff (1990), and another improved typology was proposed by Wäscher, Haußner, and Schumann (2007).

In the classical one-dimensional BPP (1DBPP), only a single dimension of the item is taken into consideration (usually width), and all bins are identical with the same capacity, where the objective is to minimize the total number of used bins. In the two-dimensional BPP (2DBPP), the aim is to pack items while only considering two-dimensional (usually width and height) rectangular items into identical two-dimensional bins. Lodi, Martello, Monaci, and Vigo (2013) stated that 2DBPP has many industrial applications, such as wood and glass cutting, in addition to packing in transportation and warehousing. The strip packing problem is a variation of the 2DBPP where bins of width and infinite height (therefore, this is referred to as strip) and a set of rectangular items are given, and the objective is to determine the way to pack the items within the strip such that the height of the strip is minimized. Wäscher et al. (2007) have classified this problem in their

typology as an open dimension problem, one of the applications of strip packing in manufacturing where rectangular pieces must be cut from a roll of cloth or paper with a fixed width and infinite height. According to Jin, Ito, and Ohno (2003), a three-dimensional BPP (3DBPP) is a generalization of the one and two-dimensional BPPs in which the three dimensions (width, length, and height) of both the items and bins are taken into consideration. 3DBPP has the most practical applications, such as in transportation, where it is used to determine the most efficient way to load boxes onto a transportation vehicle or containers, minimizing the amount of space wasted. 3DBPP appears in a range of contexts, such as in the distribution and storage of goods, manufacturing, the packaging of items, and the use of space in various settings.

A variant of bin packing is variable-sized BPP (VSBPP), where bins or containers have different capacities, and each item must be packed in turn. The objective is to minimize the sum of the capacities of the bins. VSBPP adds a layer of complexity to the problems because of the variable size of the bins. The VSBPP has practical applications in areas such as packing, transportation planning, and cutting, but according to Hemmelmayr et al. (2012), there is not a lot of published research on the VSBPP. Furthermore, the bin packing problem can be classified as either online or offline. The main difference between online and offline bin packing problems is that in online bin packing, items arrive one at a time, and a decision must be made about which bin to place each item in as soon as the bin becomes available without knowing the complete set of items in advance (Boyar, Kamali, Larsen, and López-Ortiz, 2013). This contrasts with the offline bin packing problem, where the complete set of items is known, and the bins can be optimized for the entire set of items at once.

Offline algorithms perform better than online algorithms on the bin packing problem because they receive the sequence of items in advance (Karp, 1992). However, online algorithms have the advantage of being able to start packing items right away without having to wait for the entire set of items to become available. Online algorithms can be useful in situations where the items are arriving continuously and must be packed immediately as opposed to being available all at once.

Additionally, the bin packing problem can be studied in a dynamic setting, where items can be added or removed from the bins during the execution of an algorithm (Gupta, Guruganesh, Kumar, and Wajc, 2018). To achieve the best possible space utilization, the algorithm must be able to adapt to changes in the input data and rearrange the items in the bins. On the contrary, in a static bin packing setting, items are known beforehand when they are assigned to the bins.

Most existing work focuses on static bin packing in the sense that items do not depart. In some potential

applications like warehouse storage, a more realistic model takes into consideration the dynamic arrival and departure of items. In dynamic bin packing, items arrive over time, reside for some time, and may depart at an arbitrary time. The BPP is strongly NP-Hard and very complex to solve in practice (Martello and Vigo, 1998). Hence, many different methods have been developed to solve this problem.

Exact algorithms, such as integer programming, dynamic programming, and branch and bound, guarantee finding the optimal solution to bin packing problems. However, their high computational complexity often renders them impractical for large-scale instances, as highlighted by Coffman, Garey, and Johnson (1984). On the other hand, heuristic and meta-heuristic algorithms are primarily employed to provide high-quality solutions when optimality cannot be reached within a reasonable running time. Meta-heuristic algorithms, including simulated annealing, genetic algorithms, variable neighborhood search, and tabu search, have been widely applied in solving combinatorial optimization problems (Aarts and Korst, 2003; Hemmelmayr et al., 2012).

In this study, we tackle an NP-hard problem by adopting a mathematical model and tracking the running time for different problem sizes. Afterward, three heuristic algorithms, which are developed for identical-size bin packing problems, are adapted for variable-sized bin packing problems, and their performance measures are reported.

3. Problem Definition

Proper warehouse management is one of the most impactful aspects that can affect a company's success. In today's world, warehouse performance measurements can be the deciding factor in determining companies' global rankings (Tompkins and Smith, 1998). There are several criteria to consider for a warehouse to be classified as properly managed. These criteria include picking systems, optimizing space, maintaining inventory records, following safety standards, and controlling labor expenses. Optimizing picking systems plays a critical role in enhancing both customer satisfaction and the overall efficiency of warehouse operations (Pinto, Nagano, and Boz, 2023). Also, optimizing space utilization includes multiple criteria, such as fitting as many SKUs into their desired storage containers and fitting the storage containers in an organized manner to minimize unutilized space. With every criterion having its own contribution weight to optimizing space utilization, this study focuses on fitting as many SKUs into their desired storage containers inside warehouses as the key factor for increasing warehouse efficiency. The handled problem is called the one-dimensional variable-sized bin-packing problem (VSBPP). The objective of the VSBPP is to minimize the

sum of the used bin capacities which will lead to more space in the warehouse without the need to rent any additional warehouse.

A lack of coordination emerges between the planning department and the warehousing department inside the company. The planning department presumes a storage-containing unit can no longer store more SKUs, while in reality, the containers can store almost double the amount of the currently available items. To prevent the costly option of renting new warehousing spaces, this study focuses on storing more items within each bin to use fewer bins and generate more space for storing even more items if needed.

In the first phase, an ABC analysis is conducted to split the inventory into three main categories. A-items have the highest importance with respect to the value contribution, B-items have lower importance and value, and C-items have the least importance. It is one of the methods that help companies control warehouses by allowing the management to stay focused on the most important items. In addition to that, it aids in achieving effective stock management of resources and stock level optimization. ABC analysis is based on the Pareto principle, which assumes that 20% of the items generate 80% of the total value.

Grondys (2009) stated that ABC analysis allows companies to focus on the most expensive items. However, classifying the items in the company depends on different aspects, so analyzing and filtering data is the first step before applying the ABC analysis. The goal is to work on every aspect that the company considers important, then combine all the results together so a decision can be made in terms of which item should be classified to which category. Two different criteria were considered for the ABC analysis. The first criterion is based on the distinct count of the picklist, which is the number of orders for each item throughout the year. The second criterion is based on priority.

After conducting the ABC analysis, the manager in the company decided to go with the first criterion and proceed with only class A and B items since class C items were not ordered often per year and thus had minimal impact on the optimization process for storage space allocation. In addition, the warehouse management expressed a preference to assign a dedicated storage area for Class C items, located far from the main operational zones, without including them in the optimization process, as their low demand does not justify the computational effort or complexity of their inclusion.

The subsequent step was to determine the number of bins used, which amounted to 762 distinct bins for class A and B items. Table 1 shows the existing bins in use derived from three different bin sizes (small, medium, and large), with a total used capacity of 1,940,472 cm^3 .

Table 1. Current Bin Structure and Used Capacity for Class A and B Items

Bin type	Bin size (cm^3)	Count	Total used capacity (cm^3)
Small	900	139	125,100
Medium	2,808	587	1,648,296
Large	4,641	36	167,076
Total		762	1,940,472

By evaluating the current used capacity and establishing a value for benchmark, our primary objective is to minimize total used capacity. Since then, it would be reasonable to aim for 100% utilization per bin. However, including more items per bin increases the time for the picker to retrieve any desired items from the bin. It is, therefore, crucial to ensure that every bin contains some free space or buffer, in other words. Hence, all maximum bin capacities were decreased by 20% to make sure that some free space remained inside the bin.

In this study, the items are significantly smaller than the bins, with none of their dimensions (length, width, height) exceeding the respective dimensions of the bins. This allows the problem to focus on optimizing the total volume within the capacity constraints of the bins,

effectively treating items as occupying liquid-like volumes.

4. Solution Methodology

After defining the problem with all the considerations, the solution approach should cover all the problem's aspects. Figure 1 explains the plan and the methods that the defined problem would be solved with. The initial goal is to find an optimal solution, but if the problem size at hand cannot be solved within a reasonable running time due to NP-Hardness, a feasible and effective alternative solution method should be implemented.

4.1. Exact Solution

A mathematical model aids in understanding the level of complexity of a certain problem. Knowing the level of complexity, henceforth, gives insight into the appropriate ways to approach the solution. It is proven that the one-dimensional bin-packing problem is classified as NP-Hard (Alenezi, Aboelfotoh, Albdeiwi, and Almulla, 2015). As stated by Haouari and Serairi (2009), the VSBPP is a generalization of the classical-dimensional bin-packing problem and therefore also NP-Hard.

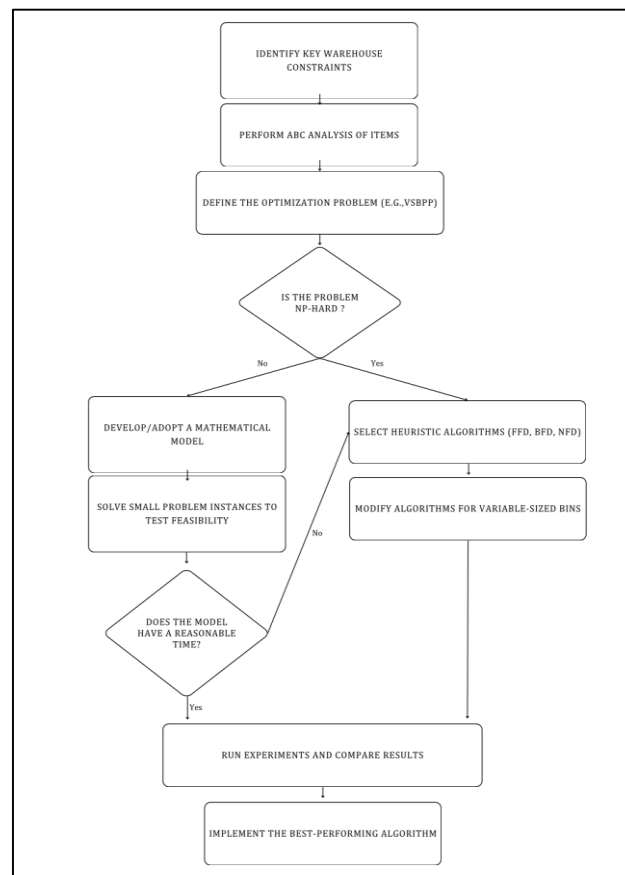


Figure 1. Flowchart of Solution Approach

The following mathematical model is developed by adapting the model proposed Hemmelmayr et al. (2012) which considers a general one-dimensional VSBPP. Some indices, parameters, and decision variables are modified according to the problem at hand. In addition, the objective function was revised to minimize the total utilized bin capacities, to align with the company warehouse optimization goals. There are three indices in the model. i represents the items ($i = 1, 2, \dots, n$) where n is the number of items; j represents the bins ($j = 1, 2, \dots, m$) where m is the number of bins; k represents the bin type ($k = 1, 2, \dots, r$) where r is the number of bin types.

In the model, the following parameters are used. C_k represents the capacity of bin type k . V_i represents the volume of item i . These parameters define the storage limits of bins and the space requirements of items, respectively.

The decision variables are as follows. x_{ij} is a binary variable and takes 1 if item i is stored in bin j ; 0, otherwise. y_{jk} is a binary variable and takes 1 if used bin j is of type k ; 0, otherwise.

Furthermore, the mathematical model operates with the fact that the items are significantly smaller than the bins, and none of their individual dimensions exceed the bin dimensions. This ensures that all items can fit within the bins in 3D space. As such, the model focuses exclusively on volume optimization, aligning with the practical constraints of the study.

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r C_k \cdot y_{jk} \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \text{ for } i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^r y_{jk} \leq 1 \text{ for } j = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n V_i \cdot x_{ij} \leq \sum_{k=1}^r C_k \cdot y_{jk} \text{ for } j = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \text{ for } i = 1, \dots, n \text{ and } j = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$y_{jk} \in \{0,1\} \text{ for } j = 1, \dots, m \text{ and } k = 1, \dots, r \quad (6)$$

The objective (1) is to minimize the sum of the multiplication of the utilized bins and their corresponding capacities. This results in minimizing the total utilized capacities, thereby optimizing storage space usage. Constraint (2) ensures that each item is assigned to exactly one bin. This guarantees that all items are stored without duplication. Constraint (3) ensures that each bin can only be at most one bin type. Constraint (4) ensures that the total volume of stored

items in a bin cannot exceed its capacity. This ensures adherence to the physical limits of the bins. Constraints (5) and (6) are binary restrictions for all decision variables.

To clarify the boundaries of the model, the following assumptions are made: the model assumes that all items must be assigned to exactly one bin, bins of each type have fixed capacities (C_k) defined in advance, and the total number of bins (m) and bin types (r) are finite and predetermined. The focus is solely on storage space optimization, excluding other operational constraints like bin costs.

After formulating the mathematical model for the problem, some small size problems are solved by using IBM ILOG CPLEX. Then, we progressively increased the problem size until reaching the real-scale scenario for the problem at hand.

Table 2 provides the results regarding the number of items (n), the number of bins (m), the number of bin types (r), the number of decision variables (x_{ij}, y_{jk}) and the running times.

The execution times vary depending on the problem size, with smaller instances being solved relatively quickly while larger instances may require significantly more time to find an optimal solution. This highlights the time complexity of the problem, which can increase exponentially as the problem size grows due to the NP-Hardness of VSBPP.

Table 2. Problem Size and Average Running Time

n	m	r	x_{ij} (Count)	y_{jk} (Count)	Average running time (hours)
10	10	3	100	30	00:00:01:43
20	20	3	400	60	00:00:01:65
30	30	3	900	90	00:00:01:53
50	50	3	2,500	150	00:00:02:12
80	80	3	6,400	240	00:00:02:77
100	100	3	10,000	300	00:00:04:75
150	150	3	22,500	450	>24

4.2. Heuristic Algorithms

In general, the running time for solving a mathematical model may take an unreasonable time as the problem size gets larger if it is NP-Hard. To tackle this problem, implementing a heuristic algorithm is a good alternative that allows us to efficiently solve large instances of the VSBPP within a reasonable running time.

In the literature, several heuristic methods have been utilized to address the VSBPP. Moreover, VSBPP has been solved using metaheuristic algorithms such as tabu search and genetic algorithm.

Heuristic algorithms to solve VSBPP include (Coffman, et al., 1984):

- i. *First Fit Decreasing (FFD)*: This algorithm tries to place each item into the first bin that has enough space for it. If no bin has enough space, a new bin is created, and the item is placed in the new bin.
- ii. *Next Fit Decreasing (NFD)*: Like the First Fit Decreasing algorithm, the Next Fit Decreasing algorithm begins packing items into the next bin after the current one rather than the first bin. The algorithm moves to the next bin and tries to fit the item there if it does not fit in the current bin. The item is placed in the newly created bin if the item still does not fit the bin.
- iii. *Best Fit Decreasing (BFD)*: This algorithm looks for a bin that can accommodate the current item with the smallest amount of leftover space. If no bin has space for the item, a new bin is created, and the item is put in it.

For VSBPP, Figure 2 shows the pseudocode of the FFD algorithm, whereas Figure 3 shows the pseudocode of the NFD algorithm. Figure 4 shows the pseudocode of the BFD algorithm.

Dökeroğlu (2017) implements FFD and BFD algorithms for one-dimensional BPP in his study.

The VSBPP was addressed by Haouari and Serairi (2009) through the utilization of multiple methods, including FFD, BFD, a set covering heuristic, and genetic algorithm. Notably, the results obtained from FFD and BFD were found to be satisfactory.

Kang and Park (2003) conducted a research on the VSBPP and proposed two algorithms known as iterative FFD (IFFD) and iterative BFD (IBFD). The authors asserted that these modified versions of the original FFD and BFD algorithms effectively address the VSBPP. The approach of IFFD involves initially assigning all items to the largest size bins using FFD, resulting in a feasible solution. Subsequently, the items in the last bin of the solution are repacked into the next largest bins using FFD, leading to another solution. This process continues until repacking becomes unfeasible, generating multiple feasible solutions. Among these solutions, the best one is chosen as the final solution, with potential additional modifications if required. Similarly, IBFD follows a similar procedure but employs the BFD algorithm instead of FFD.

```
Sort items in decreasing order based on their sizes
Initialize an empty list of bins

for each item in items:
    binFound = False
    for each bin in bins:
        if item can fit in bin:
            Add item to bin
            binFound = True
            break

    if binFound is False:
        Create a new bin
        Add item to the new bin

return bins
```

Figure 1. Pseudocode of FFD Algorithm

```
Sort items in decreasing order based on their sizes
Initialize an empty list of bins

for each item in items:
    binFound = False
    for each bin in bins:
        if item can fit in bin:
            Add item to bin
            binFound = True
            break

    if binFound is False:
        Create a new bin
        Add item to the new bin

return bins
```

Figure 2. Pseudocode of NFD Algorithm

```
Sort items in decreasing order based on their sizes
Initialize an empty list of bins

for each item in items:
    minSpace = infinity
    selectedBin = None

    for each bin in bins:
        if item can fit in bin and bin's available space is less than minSpace:
            minSpace = bin's available space
            selectedBin = bin

    if selectedBin is not None:
        Add item to selectedBin
    else:
        Create a new bin
        Add item to the new bin

return bins
```

Figure 3. Pseudocode of BFD Algorithm

The drawback of the FFD, BFD, and NFD lies in their reliance on identical bin sizes, which is not applicable to the VSBPP. Consequently, some researchers have endeavored to modify these algorithms to accommodate variable-sized bins, as exemplified by the Iterative FFD algorithm developed by Kang and Park (2003). Therefore, employing these algorithms directly -without any modifications- would not be suitable for addressing our specific problem. So, some modifications are required. Research on the VSBPP is limited when compared to the bin-packing problem, with the majority of studies focused on one-dimensional events. Common issues include the creation of lower bounds and solution strategies. VSBPP, an NP-hard issue, has been handled using both accurate and efficient approximation methods, with the latter category comprising heuristic and metaheuristic approaches (Borgulya, 2024).

In order to test the algorithms' effectiveness, the dimensions of the SKUs associated with the warehouse at hand were taken into consideration along with the bin types. In the case of having different SKUs, however, simple modifications need to be done to make for the change of the new dimensions in order for the algorithm to run effectively. All algorithms are implemented in Python. For instance, a partial depiction of the obtained FFD results for small bin types can be observed in Figure 5. The implementation of the FFD algorithm yielded highly favorable outcomes for the small items, with an impressive average utilization of 98.4% across all bins. Notably, the storage of 314 items required using 106 small bins.

Bin 99 : 243, 245, 246, 247, 273	Utilization: 99.62%
Bin 100 : 248, 249, 251, 252, 258	Utilization: 99.74%
Bin 101 : 253, 254, 255, 257, 259	Utilization: 98.37%
Bin 102 : 260, 261, 262, 265, 266	Utilization: 92.67%
Bin 103 : 267, 269, 270, 274, 275, 295	Utilization: 99.92%
Bin 104 : 277, 279, 280, 283, 284, 286	Utilization: 92.78%
Bin 105 : 287, 288, 292, 293, 298, 305, 307	Utilization: 93.89%
Bin 106 : 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314	Utilization: 81.03%
Average utilization of all bins: 98.40%	
Number of bins used: 106	

Figure 5. Partial Depiction of FFD Algorithm Results for the Small Bin Type

To align with the requirements of the MRO warehouse, the standard FFD, BFD, and NFD algorithms were modified. Specifically, three FFD algorithms were implemented in a single code, each addressing a distinct bin size (large, medium, small). Furthermore, a constraint limiting the number of items per bin to 7 was introduced to ensure efficient retrieval times. These modifications were guided by practical observations during preliminary testing, ensuring the algorithms effectively balance space utilization and operational efficiency.

The Python code for the implementation of FFD, NFD, and BFD algorithms has been made publicly available on GitHub for transparency and reproducibility. The repository includes detailed comments and documentation to help readers understand and replicate the methodology. The code can be accessed via the following link:

<https://gist.github.com/faris118203/600e15c76ad47325303403fa418a536e>

For context, the code comprises three separate FFD algorithms, each tailored for a specific bin type. It begins by sorting all items in descending order based on their weights. Additionally, a constraint has been introduced to limit the maximum number of items in a single bin to 7, determined based on preliminary studies to optimize retrieval time efficiency.

The outcomes derived from the code partially displayed in Figure 6 revealed that a total of 1,169 items were successfully stored across 511 bins. In Figure 6, the overall utilization percentage of all bins amounted to 95.25%, indicating an efficient utilization of available storage space. The sum of the capacities of the used bins (overall used space) equated to 1,520,421 cm^3 , which was computed by multiplying the number of bins used for each bin type by its respective capacity. Furthermore, the code yielded these impressive results within a remarkably short duration of around 1 second.

```
Total number of bins used: 511
Number of bins used of capacity 4641 cm3: 157
Number of bins used of capacity 2808 cm3: 248
Number of bins used of capacity 900 cm3: 106
Overall used space: 1520421 cm3
Average utilization for bins with capacity 4641 cm3: 93.84 %
Average utilization for bins with capacity 2808 cm3: 94.79 %
Average utilization for bins with capacity 900 cm3: 98.40 %
Overall average utilization: 95.25 %
```

Figure 6. Average Utilization Results for FFD for All Bin Types

This study complies with scientific research and publication ethics and principles.

5. Computational Results

Table 3 provides a summary of the sum of the used bin capacities, overall average utilization, and the number of used bins for each algorithm.

Table 3. FFD, BFD, and NFD Algorithms' Results

Algorithm	Total Number of Used Bins	The Sum of the Used Bins' Capacities (cm^3)	Average Utilization
FFD	511	1,520,421	95.25 %
BFD	511	1,520,421	95.25 %
NFD	631	1,859,097	77.14 %

Notably, FFD and BFD algorithms both exhibited the most favorable outcomes, boasting an impressive average utilization percentage of 95.25% across all bin types. Furthermore, the total capacity of the used bins amounted to $1,520,421 \text{ cm}^3$, indicating a highly efficient utilization of available storage space.

When comparing the FFD and BFD algorithms' results with the current utilized capacity inside the company's warehouse, the results turn out to be rather impressive. The items inside the warehouse are currently distributed across 762 bins with three different bin types. The total utilized capacities of the currently used bins are $1,940,472 \text{ cm}^3$. The FFD and BFD algorithms' results indicate that the items will be stored across 511 bins. Moreover, the total utilized capacities needed to store all items will be $1,520,421 \text{ cm}^3$. This leads to a decrease of $420,051 \text{ cm}^3$ which is around 21.6% of the total used storage capacities. This number is equivalent to around $(420,051 / 4,641) = 90$ of the large bins, 149 of the medium bins, and 466 of the small bins in the warehouse.

The efficiency and practicality of the proposed algorithms were evaluated using three performance metrics: optimality gap, computation time, and solution quality. Table 4 provides a detailed comparison of the results obtained for FFD, BFD, and NFD algorithms.

Table 4. Performance Metrics for FFD, BFD, and NFD Algorithms

Algorithm	Optimality Gap (%)	Running Time (sec)	Solution Quality (%)
FFD	2.56	1.25	95.25
BFD	2.75	1.48	95.25
NFD	8.24	0.96	77.14

The results indicate that the FFD and BFD algorithms achieve superior solution quality compared to NFD, albeit with slightly higher computation times. These findings are consistent with the literature, where similar trends have been observed (Hemmelmayr et al., 2012). The gap values demonstrate the near-optimal performance of FFD and BFD, making them suitable for practical applications in real-world warehouse management.

6. Conclusion

Effective warehouse management is crucial for companies in the warehouse industry, offering significant cost and space savings, improved operational efficiency, and increased profitability. Ongoing optimization of warehouse operations, including inventory management and storage arrangements, leads to streamlined workflows and accurate inventory

tracking. Efficient storage systems maximize space utilization, eliminating the need for additional warehouses and associated costs.

The aim of this study is to find an efficient solution that minimizes the total capacity of the boxes used and the number of boxes used, thus optimizing the company's storage policy and saving space in the warehouse. The problem under consideration is an NP-Hard problem. Foremost, three-dimensional measurements were taken for thousands of SKUs in the warehouse, and a detailed ABC analysis was performed. Subsequently, we focused on A and B-class items. Afterwards, Hemmelmayr et al.'s (2012) mathematical model was adapted to the problem under consideration. The problem was solved by increasing its size gradually and trying to obtain optimum results through computational experiments. However, it has been shown that as the problem size gets larger, the problem cannot be solved in a reasonable time, which supports the NP-Hardness of the real problem size. Therefore, First Fit Decreasing (FFD), Best Fit Decreasing (BFD), and Next Fit Decreasing (NFD) heuristic algorithms, which do not guarantee the optimal result but are known to give good results in a short running time, are considered. This means that this study can be used as a reference for implementing the FFD, BFD, and NFD inside warehouses that face the same problem of having to store items inside variable-sized bins as opposed to storing the items in only single-sized bins (which was the original aim of designing these algorithms) by slightly modifying the code implemented to match the needed dimensions.

The results obtained from the computational experiments showed that FFD and BFD outperformed the NFD algorithm with the same performance, and all three algorithms were successful in reducing storage space usage and increasing space utilization compared to the existing warehouse practice.

The scalability of the proposed approach can be extended to larger warehouses by employing distributed algorithms or parallel computation techniques. These techniques would enable the efficient handling of larger datasets and more complex configurations without significantly increasing computation time.

For dynamic inventory conditions, where items frequently arrive and leave, adaptive heuristic algorithms can be integrated into the existing framework. These algorithms would dynamically adjust bin allocations based on real-time data, ensuring that storage space utilization remains efficient under changing inventory demands.

Future work could explore these enhancements, including testing the algorithms under varying warehouse scales and dynamic conditions, to further

validate their robustness and applicability in diverse operational environments.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Authorship Contribution Statement

Faris ALBAKAR: Conceptualization, Methodology / Study design, Software, Validation, Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft,

Mhd Hazem ALHAMMAMI: Conceptualization, Methodology / Study design, Software, Validation, Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft,

Husam Jihad Hasan OMAR: Conceptualization, Methodology / Study design, Software, Validation, Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft,

Mazen SIMI: Conceptualization, Methodology / Study design, Software, Validation, Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft,

Basel ZBEDA: Conceptualization, Methodology / Study design, Software, Validation, Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft,

Zehra DUZGIT: Conceptualization, Validation, Writing – review and editing, Supervision

References

- Aarts, E., & Korst, J. (2003). Simulated Annealing and Boltzmann Machines. Wiley.
- Alenezi, Q., Aboelfotoh, H., Albdaiwi, B., & Almulla, M.A. (2015). Heuristics for the Variable Sized Bin Packing Problem Using a Hybrid P-System and CUDA Architecture. Computer Science Department, Kuwait University. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/1602.08735>
- Borgulya, I. (2024). A hybrid estimation of distribution algorithm for the offline 2D variable-sized bin packing problem. *Central European Journal of Operations Research*, 32, 45–65. <https://doi.org/10.1007/s10100-023-00858-0>
- Boyar, J., Kamali, S., Larsen, K.S., & López-Ortiz, A. (2013). Online Bin Packing with Advice. *Algorithmica*, 74, 507-527. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1212.4016>

- Coffman Jr, E.G., Garey, M.R., & Johnson, D.S. (1984). Approximation Algorithms for Bin-Packing — An Updated Survey. *Algorithm Design for Computer System Design*. Editors: Ausiello, G., Lucertini, M., & Serafini, P., Vienna, Springer, 49-106. Retrieved from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-4338-4_3
- Dökeroğlu T. (2017). Bir boyutlu kutulama probleminin eniyilenmesi için hiper-sezgisel paralel bir algoritma, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1), 1-11. doi: <https://doi.org/10.25092/baunfbed.319992>
- Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 44, 145-159. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90350-K](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90350-K)
- Grondys, K. (2009). ABC Analysis in Spare Parts Warehouse. *Polish Journal of Management Studies*, 3, 147-156. Retrieved from: https://econpapers.repec.org/article/pczjournal/v_3_a3_3ay_3a2009_3ai_3a1_3ap_3a147-156.htm
- Gupta, A., Guruganesh, G., Kumar, A., & Wajc, D. (2018). Fully-Dynamic Bin Packing with Limited Repacking. ArXiv, abs/1711.02078. Retrieved from: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.02078>
- Haouari, M., & Serairi, M. (2009). Heuristics for the variable sized bin-packing problem. *Computers & Operations Research*, 36, 2877-2884. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.12.016>
- Hemmelmayr, V., Schmid, V., & Blum, C. (2012). Variable neighbourhood search for the variable sized bin packing problem. *Computers & Operations Research*, 39, 1097-1108. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.07.003>
- Jin, Z., Ito, T., & Ohno, K. (2003). The Three-Dimensional Bin Packing Problem and Its Practical Algorithm. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46, 60-66. doi: <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.60>
- Kang, J., & Park, S. (2003). Algorithms for the variable sized bin packing problem. *European Journal of Operational Research*, 147, 365-372. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00247-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00247-3)

- Karp, R.M. (1992). On-line algorithms versus off-line algorithms: How much is it worth to know the future?. International Computer Science Institute, Berkeley, California, Technical report, TR-92-044. Retrieved from: <https://www1.icsi.berkeley.edu/pubs/techreports/TR-92-044.pdf>
- Lodi, A., Martello, S., Monaci, M., & Vigo, D. (2013). Two-Dimensional Bin Packing Problems. Editor: Paschos, V. T. Paradigms of Combinatorial Optimization, 107-129, Wiley, GB. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118600207.ch5>
- Martello, S., & Vigo, D. (1998). Exact Solution of the Two-Dimensional Finite Bin Packing Problem. *Management Science*, 44, 388-399. Retrieved from: <https://www.jstor.org/stable/2634676>
- Pinto, A. R. F., Nagano, M. S., & Boz, E. (2023). A classification approach to order picking systems and policies: Integrating automation and optimization for future research. *Results in Control and Optimization*, 12, 100281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rico.2023.100281>
- Tompkins, J.A., & Smith, J.D. (1998). The Warehouse Management Handbook. Tompkins Press, Raleigh, North Carolina.
- Wäscher, G., Haußner, H., & Schumann, H. (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183, 1109-1130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.047>

YEŞİL YÖNTEM İLE SENTEZLENEN METAL NANOPARTİKÜLLER İÇEREN POLİMER YÜZEY KAPLAMALARININ HAZIRLANMASI VE İNCELENMESİ

Fırat YILMAZ^{1*}, Demet TOPALOĞLU YAZICI², Buse ERDOĞAN³, Eda ÖZDURMUŞ⁴, Umut KILINÇOĞLU⁵, Sinem KIZILKAYA⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği, Eskişehir,

¹ ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-9634-4438>, ² ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-9409-7397>

³ ORCID No : <https://orcid.org/0009-0003-2613-2271>, ⁴ ORCID No : <https://orcid.org/0009-0008-6031-8340>

⁵ ORCID No : <http://orcid.org/0009-0000-7580-3981>, ⁶ ORCID No : <http://orcid.org/0009-0006-2050-1998>

Anahtar Kelimeler	Öz
Antimikrobiyal Kaplama COVID-19 Hijyen Kitosan Nanoparçacık	<i>Son yıllarda hayatımızı önemli ölçüde etkileyen COVID-19 ve influenza gibi yaygın viral hastalıklar, ortak temas edilen yüzeylerden hızlı bir şekilde yayılmakta ve çeşitli enfeksiyonlara neden olmaktadır. Bu nedenle, halka açık alanlardaki yüzeylerin antimikrobiyal özellik göstermesi viral ve bakteriyel yayılımın engellenmesi açısından oldukça önemlidir. Antimikrobiyal uygulamalarda, kitosan gibi doğal polimerlerin ve metal nanoparçacıkların kullanımlarına yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmanın amacı, yeşil sentez yöntemi ile metal nanoparçacıkların hazırlanması ve hijyenik alan uygulamalarında yüzey kaplaması olarak kullanılabilecek, çevreye duyarlı yeşil kompozit filmlerin geliştirilmesi ve karakterize edilmesidir. Kaplama filmlerinin; sudaki, asidik ve bazik ortamlardaki davranışları ultraviyole (UV) spektroskopi kullanılarak incelenmiş, nem tutma kapasiteleri değerlendirilmiş ve yüzey temas açısı ölçümleri yapılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ile kompozit filmlerin yüzey morfolojileri incelenmiş ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) görüntüleri ile nanoparçacıkların parçacık boyutu özellikleri ve dağılımları değerlendirilmiştir. Ek olarak, hazırlanan yeşil kompozit filmlerin antimikrobiyal özellikleri, E. Coli ve S. Aureus bakterilerine karşı değerlendirilmiştir. TEM görüntüleri, nano gümüş ve bakır parçacık boyutlarının literatür verileriyle eşleştiğini göstermiştir. Hazırlanan kompozit filmlere uygulanan antimikrobiyal testler ise gümüş nanoparçacık içeren kompozit filmlerin test edilen bakterilere karşı antimikrobiyal bölge oluşturduğunu göstermiştir.</i>

PREPARATION AND INVESTIGATION OF POLYMER SURFACE COATINGS INCLUDING METAL NANOPARTICLES SYNTHESIZED BY GREEN METHOD

Keywords	Abstract
Antimicrobial Cating COVID-19 Hygiene Chitosan Nanoparticles	<i>Viral diseases such as COVID-19 which have recently affected our lives significantly and influenza which is a common viral disease spread rapidly from common contact surfaces and cause various infections. For this reason, it is very important that the surfaces in public areas show antimicrobial properties in terms of preventing viral and bacterial spread. There are studies on the use of natural polymers such as chitosan and metal nanoparticles in antimicrobial applications. The aim of this study is to prepare metal nanoparticles by green synthesis method and to develop and characterize environmentally friendly, green composite films that can be used as surface coatings in hygienic field applications. Durability of coatings in water, acidic and basic environments was determined using ultraviolet (UV) spectroscopy. Also, their moisture holding capacity was examined and their surface contact angle measurements were made. The surface morphologies of the coating composite films were examined by Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis and the particle size properties and distributions of nanoparticles were evaluated with Transmissive Electron Microscopy (TEM) images. In addition, the antimicrobial properties of the prepared green composite films were evaluated against E. Coli and S. Aureus bacteria. TEM images showed that nano silver and copper particle sizes matched with literature data. Antimicrobial tests applied to the composite films showed that composite films containing silver nanoparticles formed an antimicrobial zone against certain bacteria.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 02.09.2024

Submission Date : 02.09.2024

Kabul Tarihi : 12.02.2025

Accepted Date : 12.02.2025

* Sorumlu yazar: firat.yilmaz@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogumf.1542476>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Geçtiğimiz yıllarda tüm dünyayı etkisi altına alan salgın, bilim insanlarını benzer tehditlere karşı alternatif çözümler bulmaya yönlendirmiştir. İlaç bileşimleri, aşı çalışmaları, alternatif dezenfeksiyon yöntemleri tehlikeye karşı yapılan araştırmaların odağı olmuştur. Bulaşma riskinden korunmak için öncelikle virüsün vücuttaki etki alanına ulaşım kanalları üzerine koruyucu ekipmanlar düşünülmüş ve tasarlanmıştır. Bu ekipmanlar ile önemli ölçüde başarımın sağlandığı görüldüğünde, insanların normal yaşam koşullarına dönmesi için adımlar atılmıştır. Kişilerin ortak alanlara temasında hijyen tedbir ve teknolojileri ön plana çıkmıştır.

Hijyenin tesisi için kompozit malzemelerden hazırlanan antimikrobiyal kaplamalar gibi yeni teknoloji uygulamaları geliştirilerek kullanılmaya başlanmıştır (Erkoc ve Ulucan-Karnak, 2021). Kaplama, genel olarak nesnenin yüzeyine koruyucu bir film tabaka uygulanması işlemidir ve yüzyıllardır birçok alanda kullanılmaktadır. Kaplamaların temel amacı, yüzeyi korozyon ve dış etkenlerden korumaktır. Antimikrobiyal yüzey kaplamaları, özellikle günlük hayatta sıkça temas edilen yüzeylerde bulunan mikroorganizma ve virüslerin inhibe edilmesinde oldukça önemlidir (Atacan, Güy ve Özacar, 2022). Kompozit kaplamalar içinde, destek malzemesi olarak metal nanoparçacıklar, matris yapısı olarak da doğal ya da sentetik polimerler yer alabilmektedir. Toksik olmayan, biyobozunur ve doğal bir polimer olan kitosan, elde edilebilirlik açısından dünyada selülozdan sonra en yaygın polisakkarit olması sebebiyle biyopolimerler arasında öne çıkmaktadır.

Geçtiğimiz yıllarda hayatımızı büyük ölçüde etkileyen COVID-19 ve günümüzde yaygın olarak rastlanan influenza (grip) gibi viral hastalıklar, halka açık alanlardaki yüzeylere temas edilerek daha hızlı yayılmakta ve enfeksiyona sebep olmaktadır (Kim, Lee ve Joung, 2021). Dolayısıyla, ortak temas edilen yüzeylerin antiviral özellik taşıması ve bu sayede viral yayılımın engellenmesi büyük önem arz etmektedir (Rakowska ve diğ., 2021). Kitosan, antibakteriyel özellikte bir polimerdir (Li ve Zhuang, 2020). Ayrıca, nanoteknoloji ve malzeme bilimi kapsamında yapılmış olan mevcut araştırmalar, metal ve metal oksit nanoparçacıkların antibakteriyel etki gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda, yeni ve etkili antimikrobiyal ajanların geliştirilmesi için kullanılan gümüş (Ag), bakır (Cu), altın (Au), titanyum (Ti) ve çinko (Zn) gibi metallerin, yüzey kaplamalarında kullanılabilirliği büyük önem arz etmektedir (Hoseinzadeh ve diğ., 2017). Bu noktada, yüzey uygulamalarında metal nanoparçacıkların kullanımı ön plana çıkmaktadır. Ancak metal nanoparçacıkların, reaksiyona girme eğilimlerinin yüksek olması nedeniyle organik ya da inorganik bileşenler ile birleştirilerek

kompozit halinde kullanımları önerilmektedir (Das Jana ve diğ., 2020).

Genel olarak, geçiş metali nanoparçacıkların sentezi için fiziksel ve kimyasal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Anwar ve diğ., 2021). Bu teknikler pahalı olabilmekte ve bazıları, çevreye zararlı kimyasalların kullanımını gerektirmektedir. Zararlı kimyasalların kullanımını içermeyen yöntemlere yönelik farkındalığın artmasıyla birlikte metal nanoparçacıkların sentezi için çevre dostu yeşil sentez yaklaşımının geliştirilmesi söz konusu olmuştur. Bitkilerin ve bitki özlerinin yeşil sentezde kullanılabilmeleri, tek adımlı bir yöntem olarak uygulanabilmeleri, uygun maliyet, patojenite ve çevre dostu olma gibi avantajlarının bulunması nedeniyle yeşil sentez yöntemleri popülerlik kazanmıştır (Alabdallah ve Hasan, 2021).

Metaller içerisinde gümüş, iyileştirici özelliğinden dolayı yüzyıllardır üzerinde çalışılan bir metal olmuştur ve çok düşük konsantrasyonlardaki gümüşün insan vücudu için toksik olmadığı belirlenmiştir (Galdiero ve diğ., 2011). Gümüş nanoparçacıkların eşsiz fiziksel ve kimyasal özellikleri bulunmaktadır. Bununla birlikte, virüslere karşı güçlü adsorpsiyon kapasitesi oluşturan gümüş nanoparçacıklar, kendileriyle kimyasal reaksiyonlar üretmek üzere etkileşime giren birçok bakteri türü ve çeşitli virüsler üzerinde güçlü antibakteriyel ve antiviral aktivite özellikleri göstermektedirler (Sinclair ve diğ., 2021; Zhang, Fan, Sun, Chen ve Zhang, 2021). Ancak, gümüşün bir virüs olarak kullanımı konusunda oldukça az çalışma vardır (Rakowska ve diğ., 2021). Öte yandan, bakır nanoparçacıklar, son dönemde farklı yöntemler kullanılarak sentezlenmiş ve bu nanoparçacıkların birçok mikroorganizma üzerinde etkinlik testleri gerçekleştirilmiştir. Amer ve Awwad (2021), limon ekstraktı kullanarak sentezledikleri bakır nanoparçacıkların antibakteriyel aktivitelerini incelemişlerdir. Yapılan analizler, hazırlanan bakır nanoparçacıkların, E. Coli ve S. Aureus patojenik bakterilerine karşı mükemmel bir antibakteriyel aktivite sergilediğini göstermiştir. Bu doğrultuda, limon ekstraktı kullanılarak, yeşil sentez yöntemiyle elde edilmiş bakır nanoparçacıkların, düşük maliyetli ve mükemmel antibakteriyel aktivite ile çevre dostu olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, gümüş ve bakır nanoparçacıklar yeşil sentez yöntemiyle elde edilmiş olup, hazırlanan nanoparçacıklar, yardımcı bileşenler aracılığıyla kitosan doğal polimeri ile birleştirilerek yeşil kompozit film haline getirilmiştir. Çalışmanın ilk aşaması olan nanoparçacıkların hazırlanması sırasında, gümüş iyonlarının (Ag^+), gümüş nanoparçacıklara (Ag^0) indirgenmesi için aloe vera ekstraktı; bakır iyonlarının (Cu^{+2}), bakır nanoparçacıklara (Cu^0) indirgenmesi için ise domates ekstraktı kullanılmıştır. Çalışmada;

nanoparçacık hazırlama aşamasında kullanılan yeşil sentez yönteminin detayları ve kompozit film üretimindeki optimizasyon süreçleri ile ilgili yeni bir reçetelendirme yapılmış olup, reçetelerdeki bileşenleri içeren kompozitlerin bu amaçla metal yüzeyine kaplandığına, ulaşılabilen araştırmalarda rastlanamamıştır. Hazırlanan nanoparçacıkların SEM ve TEM görüntüleri alınmış, yeşil kompozit filmlere antimikrobiyal analizler uygulanmış ve farklı özelliklerdeki çözücülerin film kaplamalara etkisi incelenmiştir. Hazırlanan film kaplamalar ile hijyenik ortam tesisine alternatif bir çözüm önerilmiştir.

2. Yöntem

2.1. Materyal

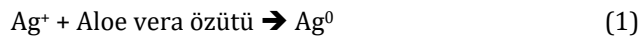
Çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuş olup, nanoparçacıkların hazırlanması aşamasında gümüş nitrat (AgNO_3) (Sigma-Aldrich), bakır sülfat (CuSO_4) (BDH Chemicals); kaplama çözeltilerinin hazırlanması aşamasında kitosan (Sigma-Aldrich), asetik asit (CH_3COOH) (Sigma-Aldrich) ve gliserin kullanılmıştır. Solanum lycopersicum (Domates) ve Aloe Barbadensis Miller (Aloe vera) yerel marketlerden temin edilmiştir. Kaplama yüzeyi olarak seçilen metal alüminyumdur ve kapı kolu malzemeleri satan yerel bir satıcıdan temin edilmiştir.

2.2. Nanoparçacıkların Hazırlanması

Gümüş Nanoparçacıkların Hazırlanması

Aloe vera bitki özütünün eldesi için; bitki, toprağın 1 cm yukarısındaki yeşil kısmından kesilmiştir. Kesilen bitki parçaları, daha küçük parçalara ayrılarak üzerine saf su ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım, manyetik karıştırıcıda kademeli olarak 80°C 'ye ısıtılmış ve 2 saat boyunca kaynatılmıştır. Özüt, beyaz bant filtre kağıdı kullanılarak süzümüştür ve ortam sıcaklığına soğutulmuştur. Ardından, sonradan kullanılmak üzere $+4^\circ\text{C}$ 'de muhafaza edilmiştir (Arshad, Saleem, Pasha ve Sadaf, 2022).

Gümüş nanoparçacıkların eldesi için; gümüş nitrat (AgNO_3) eser miktarda deiyonize su ile karıştırılmıştır. Ardından, karışım içerisine aloe vera özütü eklenmiş ve homojen hale gelinceye kadar manyetik karıştırıcıda etkin karışma hızında karıştırılmıştır. Hazırlanan çözelti, önceden 65°C 'ye ısıtılmış ultrasonik su banyosuna alınmış ve çözeltideki renk değişimi tamamlanmaya kadar su banyosu içerisinde bekletilmiştir. Çözeltide, renk değişimi sırasında meydana gelen gümüş iyonlarının aloe vera özütü ile indirgenme tepkimesi Denklem (1) ile gösterilmiştir.

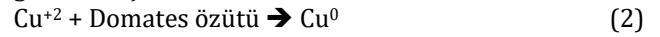


Renk değişiminin tamamlanmasının ardından çözelti, 4000 rpm hızda 15 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Santrifüj sonunda oluşan ve içerisinde gümüş nanoparçacıkları içeren çökelek, santrifüjattan ayrılmıştır ve üç kez saf su ile yıkandıktan sonra 60°C 'de vakumlu etüvde kurutulmuştur (Tippayawat, Phromviyo, Boueroy ve Chompoosor, 2016).

Bakır Nanoparçacıkların Hazırlanması

Domates bitki özütünün eldesi için, 200 gram domates, kabukları soyularak küçük parçalara ayrılmıştır. Parçalama sonunda elde edilen püre, siyah bant filtre kağıdı kullanılarak süzümüştür. Süzüntü, 60°C 'ye ısıtılmış manyetik karıştırıcıda, etkin karışma hızında 15 dakika boyunca karıştırılmış ve ardından 15 dakika boyunca 4000 rpm hızda santrifüj edilmiştir. Santrifüj olarak ayrılan özüt, sonradan kullanılmak üzere $+4^\circ\text{C}$ 'de muhafaza edilmiştir.

Bakır nanoparçacıkların eldesi için; 0,6 gram bakır sülfat (CuSO_4), 375 mL deiyonize su içinde ortam sıcaklığında çözündürülmüştür. Çözelti, ultrasonik su banyosunda kademeli olarak 70°C 'ye ısıtılmış ve çözelti içerisine, çözelti hacmi kadar domates özütü ilave edilmiştir. Karışım, bir saat boyunca etkin karışma hızında renk değişimi gözleninceye kadar karıştırılmıştır (Batoool ve Masood, 2017). Çözeltide, renk değişimi sırasında meydana gelen bakır iyonlarının domates özütü ile indirgenme tepkimesi Denklem (2) ile gösterilmiştir.



Renk değişiminin ardından, çözelti 4000 rpm hızda 15 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Santrifüj sonunda oluşan ve içerisinde bakır nanoparçacıkları içeren çökelek, santrifüjattan ayrılmış ve üç kez saf su ile yıkandıktan sonra 60°C 'de vakumlu etüvde kurutulmuştur.

2.3. Nanoparçacık İçeren Kompozitlerin Hazırlanması

Kompozit malzemeler polimer ile nanoparçacık koloidal süspansiyonlarının birleştirilmesi yöntemi ile hazırlanmıştır. Bunun için kısaca, kitosan %1'lik asetik asit çözeltisinde etkin karışma hızında çözündürülmüştür. Çözünme işleminin ardından, kitosan çözeltisine, kitosanın ağırlıkça iki katı kadar nanoparçacık içeren nanoparçacık-deiyonize su süspansiyonu eklenmiş ve homojen oluncaya dek karıştırılmıştır. Ardından, çözelti içerisine çözelti hacminin %10'u kadar gliserin eklenmiş ve karışım ortam sıcaklığında 20 saat boyunca karıştırılmıştır.

2.4. Metal Yüzeylerin Kompozit ile Kaplanması

2x2 cm² boyutunda kesilen ve zımparalanmış metallerin tek yüzeyi, gümüş ve bakır nanoparçacık içeren sıvı kompozite daldırılmıştır. Daldırma-kaplama yöntemi ile

metal yüzeylerinde ince bir film tabakası elde edilmiştir ve ortam sıcaklığında kurutulmuştur.

Hazırlanan kompozit kaplamalar, 1MK (Bakır nanoparçacık içeren metal kaplama) ve 2MK (Gümüş nanoparçacık içeren metal kaplama) olarak isimlendirilmiştir.

2.5. Kararlılık Testleri

Kuruyan metal yüzeylere, deiyonize su, %5'lik HCl ve %5'lik NaOH çözeltilerinin püskürtülmesi yöntemi ile kararlılık testleri gerçekleştirilmiştir. Metal yüzeyler, tüm çözücüler ile 15 cm'lik mesafeden püskürtülerek yıkanmıştır. Yıkama işlemi, her yüzey ve çözücü için 25 kez tekrarlanmıştır. Her uygulama sonrası metal yüzeyler, püskürtme sonrası kuruması için kısa süreliğine etüvde bekletilmiştir. 5, 10, 15, 20 ve 25. yıkamalarda metal yüzeyler üzerinden çözünmüş olabilecek film tabakasını tespit etmek üzere, yıkama suları Thermo Scientific GENESYS 10S UV-VIS spektrofotometresinde okutulmuştur. Bu amaçla; hazırlanan kaplama çözeltileri UV spektroskopisi cihazında 200-800 nm dalga boyları arasında taramaya tabi tutulmuştur ve maksimum absorbans değerleri belirlenmiştir. Her yıkama için üçer örnek alınarak UV okumaları yapılmış ve ortalama değerler kullanılmıştır.

2.6. Temas Açısı Ölçümü

Kaplama yapılan yüzeylerin temas açısı ölçümlerinde Attension marka Theta model optik tensiyometre kullanılmıştır. Ölçümde, cihazın enjektörü ile yüzeylerin üç farklı bölgesine birer damla saf su damlatılmıştır ve damlanın davranışı kamera ile görüntülenmiştir. Her analizin 8. saniyesindeki temas açısı değerleri kaydedilmiştir.

2.7. SEM Analizi

Hazırlanan örneklerin morfolojik karakterizasyonu ESOGÜ ARUM Laboratuvarları'nda JEOL JSM-5600LV taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı ile yapılmıştır. SEM görüntüleri; cihaz hızlandırma gerilimi 1,0-5,0 kV aralığında, 10-700 kat büyütme ile alınmıştır.

2.8. TEM Analizi

Gümüş ve bakır nanoparçacıkların TEM analizleri, ESOGÜ ARUM Laboratuvarlarında Hitachi marka HT7800 model cihaz kullanılarak, 100 kV hızlandırma gerilimi ve 40-200 kat büyütme oranları arasında gerçekleştirilmiştir.

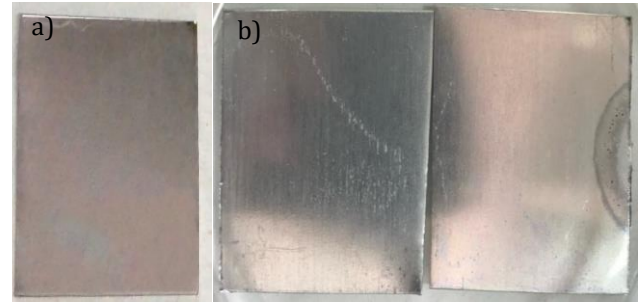
2.9. Antimikrobiyal Analiz

Hazırlanan bakır ve gümüş nanoparçacık içeren filmlerin ilk olarak kontaminasyon kontrolü yapılmıştır. Kontaminasyon kontrolü sonuçlarına göre antimikrobiyal aktivite çalışması için yeterli aseptik koşulları sağladığı görülen örnekler, disk difüzyon

metodu ile zon testi uygulanmıştır. Testlerde; inokülatif sıvı olarak fosfat tamponlu tuz çözeltisinde sulandırılmış *Escherichia coli* (E. Coli) ve *Staphylococcus aureus* (S. Aureus) kullanılmıştır. Kullanılan bakteri miktarı; McFarland 0,5/1-2,9x10⁸ CFU/mL olarak belirlenmiştir. Ekim tekniği olarak steril swab yayma tekniği kullanılmıştır. *Escherichia coli* ATCC 25922, *Staphylococcus aureus* ATCC 29213 bakterileri besleyici agar besiyerinde kültürlenmiştir ve 37°C'de inkübe edilmiştir. Kaplama filmleri de agar plakalarının yüzeyi üzerine yerleştirilerek inkübe edilmiştir. Mikroorganizmaların filmler ile etkileşimi, inhibisyon bölgesinin büyüklüğüne göre belirlenmiştir. Bu çalışmalar Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İLTEM'den hizmet alımı şeklinde yürütülmüştür.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada; bakır ve gümüş nanoparçacıklar içeren polimer matrisli kompozitler hazırlanmıştır. Bu kompozitler, sık temas edildiği düşünülen temsili metal yüzeylere kaplanmıştır. Metal yüzeylerden alınmış görseller Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Metal plaka görüntüleri

a) Kaplamasız b) Kompozit film kaplı

Kaplanan metal yüzeylerin farklı çözücülere karşı tepkileri kararlılık testleriyle, yüzeylerin ıslanabilirliği ise temas açısı ölçümü ile incelenmiştir. Kompozit filmlerin morfolojik yapısı SEM ile değerlendirilmiştir. Ek olarak, metal yüzeylere kaplanan kompozit filmlerin antimikrobiyal etkinliği belirlenmiştir.

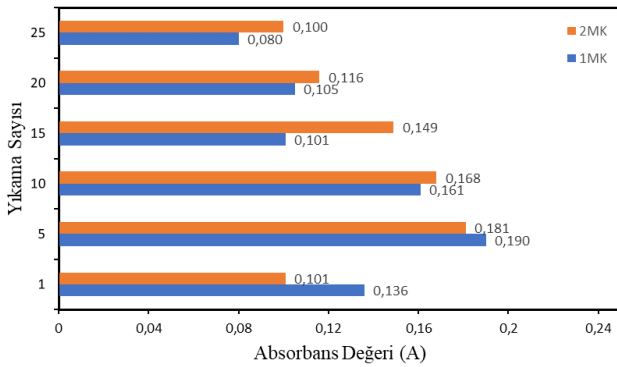
3.1. Kararlılık Testleri Sonuçları

Eşit boyutlardaki metal yüzeylere, daldırma-kaplama yöntemiyle uygulanan sıvı kompozit, kuruduktan sonra su, asidik ve bazik çözücülere karşı kararlılık testleri gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. Suda Kararlılık Testi Sonuçları

Hazırlanan kaplamaların deiyonize su ile yıkanmasının ardından, yıkama suları, UV spektroskopisinde, maksimum absorbans değerinin elde edildiği 800 nm dalga boyunda, kör çözelti olarak deiyonize suya karşı okutularak absorbans değerleri belirlenmiştir.

Absorbans değerlerinin yıkama sayısı ile değişimi Şekil 2’de verilmiştir.

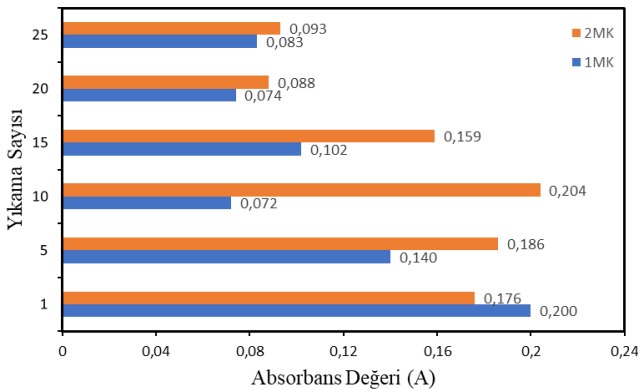


Şekil 2. Su ile yapılan yıkama sayısına karşılık absorbans değerlerinin değişimi

Bileşimleri farklı olan kompozitler ile kaplanmış metal yüzeyler su ile yıkandığında, ilk yıkamalarda (1. ve 5.) 1MK’nin absorbans değerinin 2MK’ya göre %25 ve %5 kadar daha yüksek olduğu görülmüştür. 10. yıkama ve sonrasında 2MK’nin absorbans değerlerinin 1MK’ye göre daha yüksek olduğu ve her iki kaplamanın absorbans değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, en yüksek absorbans değerinin her iki kaplama için 5. yıkamada görülmesi ortak olup. 25. yıkamada, yıkama sularından elde edilen absorbans değerleri birbirine yakındır. Bu kapsamda, saf su ile periyodik yıkamalar süresince bakır nanoparçacık içeren kaplamaların yüzeyden ayrılma oranının nispeten daha az olduğu önerilebilir.

3.1.2. Asidik Çözücülerde Kararlılık Testleri Sonuçları

Asidik çözücülere karşı kararlılık testi için kör çözelti olarak %5’lik HCl çözeltisine karşı okumalar yapılmıştır. Okunan absorbans değerlerinin yıkama sayısı ile değişimi Şekil 3’te verilmiştir.

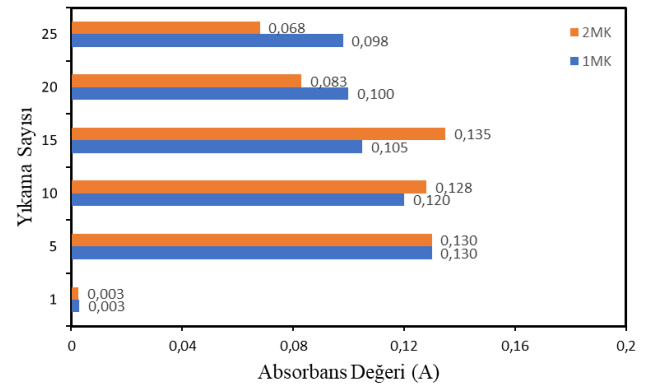


Şekil 3. Asit çözeltisi ile yapılan yıkama sayısına karşılık absorbans değerlerinin değişimi

Asit çözeltisi ile yapılan yıkama işlemleri sırasında her iki kaplamanın da ilk yıkamada su ile yıkamaya kıyasla 1MK’nin %47, 2MK’nin ise %74 daha fazla deformasyona uğradığı görülmüştür. Kompozit bileşeni olan polimerin asidik çözeltelerde daha iyi çözünmesi sebebiyle bu etki gözlenmiştir.

3.1.3. Bazik Çözücülere Kararlılık Testleri Sonuçları

Bazik çözücülere tepki testi için kör çözelti olarak %5’lik NaOH çözeltisi alınmış ve okumalar yapılmıştır. Absorbans değerlerinin yıkama sayısı ile değişimi Şekil 4’te verilmiştir.



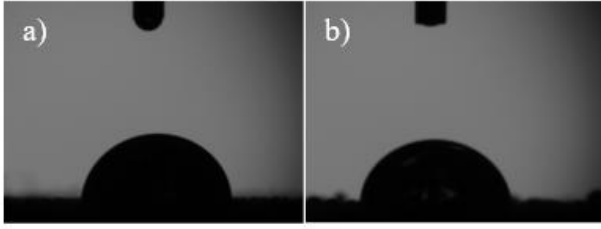
Şekil 4. Baz çözeltisi ile yapılan yıkama sayısına karşılık absorbans değerlerinin değişimi

Bazik çözelti ile yapılan yıkama işlemi sırasında her iki kaplamanın da diğer çözücülerle yapılan (su ve asit) yıkamalara göre daha az deformasyona uğradığı (ilk yıkamada su ve asit için sırasıyla; %97 ve %98.) görülmüştür. 25 kez bazik çözücü ile yıkama işlemi sonrasında, 1MK’nin 2MK’ye göre nispeten bazik çözücünden daha çok etkilendiği gözlenmiştir.

Farklı nano metal içeren polimer kaplamaların su, asidik ve bazik çözücülere maruz bırakılması ile gerçekleştirilen yüzeyde kalma kararlılığı test sonuçlarına göre, 2MK malzemesinin 1MK’ye kıyasla yüzeyden daha fazla ayrıldığı, ölçülen absorbans değerlerinden (örneğin; 15. yıkamadaki değerler temel alınarak, aynı çözücüde 2MK’nin 1MK’ye göre değişim oranı; su, asit ve baz için sırasıyla; %48, %56 ve %29 daha fazla bulunmuştur) gözlenmiştir. Burada temel etkenin, kompozit bileşenlerinden olan gümüş nanoparçacıkların boyut dağılımının bakır nanoparçacıklara göre daha geniş bir aralıkta olması ve nispeten büyük parçacıkların ince polimer kompozit kaplama içinde daha az polimer ile sarılması ve daha çok çözünmesi ile açıklanabilir.

3.2. Temas Açısı Ölçümü Analizi Sonuçları

Kaplanmış metal yüzeylerin temas açısı ölçümüne ait görüntüler Şekil 5'te verilmiştir.



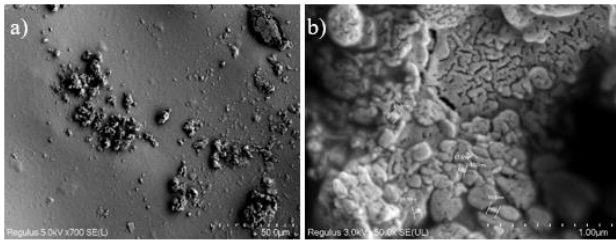
Şekil 5. Temas açısı görüntüleri a) 1MK b) 2MK

Ölçümler, metal kaplamaların yüzeyine damlatılan suyun temas açısı değerinin 80°'nin üzerinde olduğunu göstermiştir. Kaplamanın yapıldığı metal yüzeyin kaplamasız haldeki temas açısı değeri ortalama 70,15° olarak belirlenmiştir. Her iki metal kaplamanın temas açıları, kaplamasız yüzeyden daha yüksek ölçülmüş olup, ortalama temas açısı değerleri 1MK ve 2MK için sırasıyla 83,78° ve 81,75° olarak belirlenmiştir. Kaplanan yüzeyler için ölçülen bu değerlerin, hidrofobiklik sınır değeri olan 90°'ye yakın olduğu ve nano parçacık içeren polimer kompozitler ile kaplanan yüzeylerin kaplamasız yüzeye göre hidrofobik yüzey özelliğine yöneldiği gözlenmiştir.

Kaplanan yüzeylerin temas açısı değerlerinin birbirine yakın olması, kompozitlerdeki nanoparçacık türünün etkisinden daha çok, nanoparçacıkların polimer içinde dağılımlarının benzer olabileceği şeklinde yorumlanmıştır.

3.3. SEM Analizi Sonuçları

Bakır nanoparçacık içeren kompozit kaplama filmlerinin SEM görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.



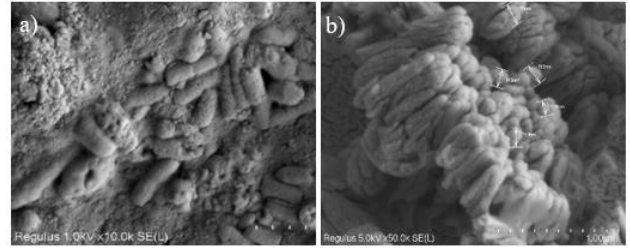
Şekil 6. Bakır nanoparçacık içeren metal kaplamanın (1MK) SEM görüntüleri a) 5,0 kV hızlandırma gerilimi ve 700 kat büyütme uygulanmıştır. b) 3,0 kV hızlandırma gerilimi ve 50 kat büyütme uygulanmıştır.

Bikdeloo, Ahsani Irvani, Roosta ve Ghanbari (2021) yapmış oldukları bir çalışmada, elde ettikleri bakır nanoparçacıkların boyutlarını SEM analiziyle yaklaşık olarak 50 nm ölçmüşlerdir. Muhammad ve diğ. (2022) ise domates kullanarak sentezledikleri bakır

nanoparçacıkların boyutlarını ortalama 52 nm olarak görüntülemişlerdir.

Bu çalışmada elde edilen bakır nanoparçacıkların SEM görüntüleri incelendiğinde ve literatür ile (Amaliyah, Pangesti, Masruri, Sabarudin ve Sumitro, 2020; Fatma, Kalainila, Ravindran ve Renganathan, 2017) kıyaslandığında, nanoparçacıkların başarılı bir şekilde sentezlendiği görülmüştür. Ek olarak, nanoparçacık boyutlarının 57-80 nm aralığında olduğu gözlenmiştir. Ölçüm sırasında bazı parçacık grupları için, topaklanma ve kümelenmenin gözlemlendiği bölgelerde net parçacık boyutlarının tespitinde zorluk yaşanmıştır. Boyut aralığı literatür verileri ile büyük ölçüde örtüşmekle birlikte bazı bölgelerde kümelenme sebebiyle 80 nm değerine ulaşıldığı düşünülmektedir.

Yeşil sentez yöntemi ile elde edilmiş gümüş nanoparçacıkları içeren kaplama filmine uygulanan SEM analizi, film yapısındaki nanoparçacık boyutlarının 121-175 nm aralığında değiştiğini ve nanoparçacıkların film yapısı içerisinde homojene yakın şekilde dağıldığını göstermiştir (Şekil 7).



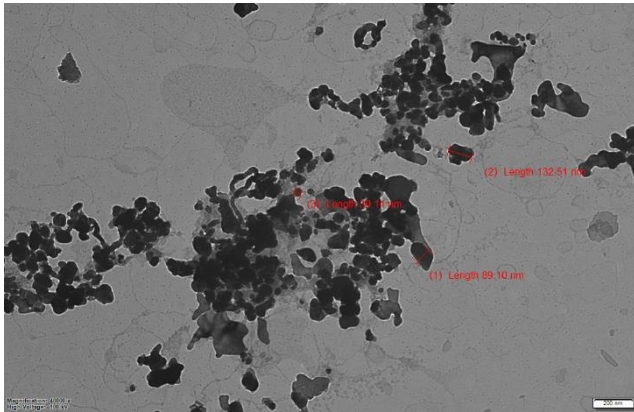
Şekil 7. Gümüş nanoparçacık içeren metal kaplamanın (2MK) SEM görüntüleri a) 1,0 kV hızlandırma gerilimi ve 10 kat büyütme uygulanmıştır. b) 5,0 kV hızlandırma gerilimi ve 50 kat büyütme uygulanmıştır.

Tippayawat ve diğ. (2016) çalışmalarında, alo vera ekstraktı kullanarak elde ettikleri nanoparçacıkların boyutlarının $70,70 \pm 22-192,02 \pm 53$ nm aralığında olduğunu belirlemişlerdir. Supriya ve Kumari (2019) ise yine alo vera kullanarak sentezledikleri gümüş nanoparçacıkların boyutlarının 49,6 ile 82,1 nm aralığında olduğunu saptamışlardır. Aloe vera kullanılarak yapılan başka bir çalışmada (Arshad ve diğ., 2022) ise sentezlenen gümüş nanoparçacıkların boyutlarının 30-80 nm aralığında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen literatür verilerine göre, yeşil sentezle elde edilen nanoparçacıkların SEM analizi ile görüntülenmesi sonucu, boyutlarının 30-200 nm aralığında olduğu görülmektedir. Bu bakımdan, bu çalışmada elde edilen gümüş parçacıkların literatürdeki diğer çalışmalara (Kiani ve diğ., 2021; Tippayawat ve diğ., 2016) benzer, nano boyutlarda ve küresel görünüme sahip oldukları belirlenmiştir. Ek olarak, SEM görüntülerinde gümüş nanoparçacıkların varlığı, AgNO₃ sulu çözeltisindeki Ag⁺ iyonlarının alo vera bitki özütü ile Ag nanoparçacıklarına indirgenmesinin başarılı bir

şekilde gerçekleştiğini göstermektedir (Tippayawat ve diğ., 2016).

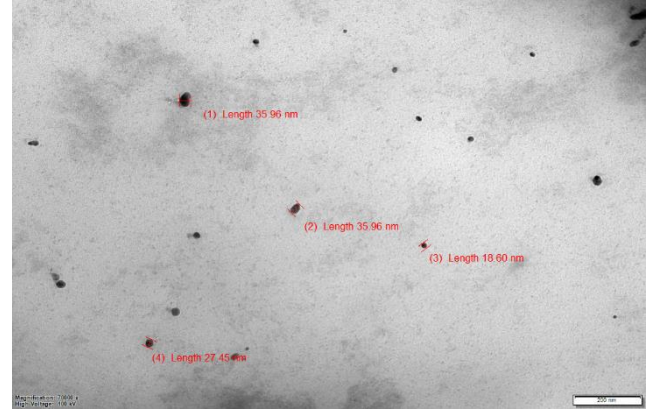
3.4. TEM Analizi Sonuçları

Çalışmada elde edilen gümüş nanoparçacıklar için gerçekleştirilen TEM analizi görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir. Khan, Shaheen, Mahmood, Rehman ve Yaqoob (2017), aloe vera ekstraktı ile sentezledikleri gümüş nanoparçacıkların boyutlarının TEM görüntüleri yardımıyla 87 ile 100 nm aralığında olduğunu belirlemişlerdir. Ashraf, Ansari, Khan, Alzohairy ve Choi (2016) ise benzer şekilde aloe vera kullanarak sentezledikleri nanoparçacık boyutlarının ortalama 82 nm olduğunu belirtmişlerdir. Aloe vera ekstraktı kullanılarak yapılan başka bir çalışmada (Tippayawat ve diğ., 2016), nanoparçacık boyutlarının SEM ile 70–190 nm aralığında bulunduğu ve bu değerlerin TEM ölçümleri ile de büyük ölçüde uyduğu belirtilmiştir. Literatürde bulunan diğer çalışmalara bakıldığında ise elde edilen gümüş nanoparçacık boyutlarının sıklıkla 48-139 nm aralığında olduğu görülmektedir. Buradan hareketle, bu çalışma kapsamında görüntülenen nanoparçacık boyutlarının literatür verileriyle uyduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. Gümüş nanoparçacıkların TEM görüntüsü (100 kV hızlandırma gerilimi ve 40000 kat büyütme uygulanmıştır)

Hazırlanan bakır nanoparçacıklar için gerçekleştirilen TEM analizi görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir. Saitawadekar ve Kakde (2020), nar kullanarak elde ettikleri bakır nanoparçacık boyutlarını TEM analiziyle 2-60 nm aralığında belirlerken; Suresh, Annapurna, Bhikshamaiah ve Singh (2013) ise patates kullandıkları bir çalışmada, elde ettikleri bakır nanoparçacıkların ortalama boyutlarının 20 nm olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışma ile elde edilen bakır nanoparçacıkların TEM görüntüleri ile boyutlarının 27-36 nm aralığında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9. Bakır nanoparçacıkların TEM görüntüsü (100 kV hızlandırma gerilimi ve 70000 kat büyütme uygulanmıştır)

3.5. Antimikrobiyal Madde Analizi Sonuçları

Gümüş ve bakır nanoparçacıklar içeren kompozit filmler için kontaminasyon kontrolü ve farklı bakteriler için zone (disk difüzyon) testi gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Kontaminasyon Kontrolü

Antimikrobiyal testlerden önce nanoparçacık içeren kaplama film örneklerine kontaminasyon kontrolü testi uygulanarak, örneklerin antimikrobiyal testler sırasında kontaminasyon oluşturma ihtimali değerlendirilmiştir. A (bakır nanoparçacık içeren kaplama filmi), B (gümüş nanoparçacık içeren kaplama filmi) ve K (nanoparçacık içermeyen kontrol filmi) örnek filmlerine uygulanan kontaminasyon kontrolü analizi Şekil 10'da gösterilmiştir. Test sonuçları; örnek malzemelerin besleyici agar üzerinde sırasıyla 30°C'de ve 37°C'de 24 saat inkübe edilmesinin ardından, örnekler üzerinde ve çevresinde herhangi bir mikroorganizma büyümesi gözlenmediğini ve antimikrobiyal analiz için yeterli aseptik koşulları sağladıklarını göstermiştir.



Şekil 10. Kontaminasyon kontrolü testi

3.5.2. Örnekler Üzerinde Zon Testi ile Antimikrobiyal Aktivite Çalışması

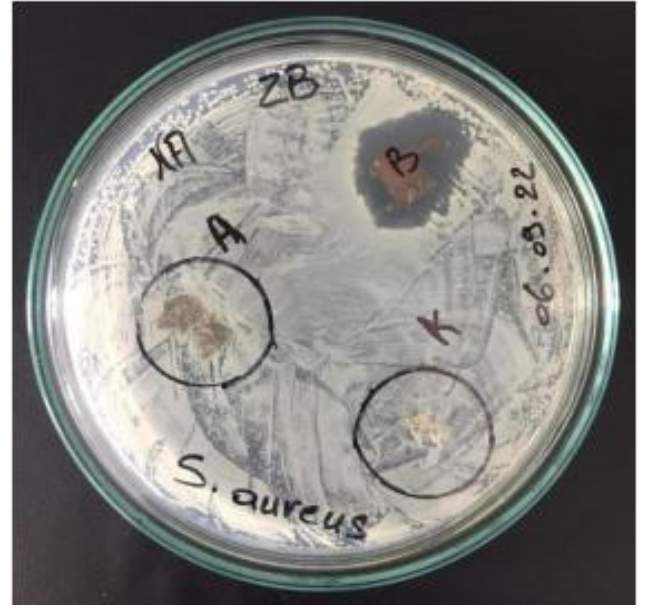
Örneklerin E. Coli Bakterisi üzerindeki antimikrobiyal aktivitesinin, zon testi ile tayini sonrasında elde edilen görüntü Şekil 11'de verilmiştir. Kaplamaların antimikrobiyal aktiviteye sahip olma durumunun tam bir değerlendirmesi için elektron mikroskoplar ile görüntüleme, minimal inhibisyon kontrolü ve CFU sayım testleri gibi ek analizler uygulanarak sonuçlar pekiştirilebilecektir.



Şekil 11. Örneklerin E. coli bakterisi üzerindeki antimikrobiyal aktivitesinin zone testi ile tayini

Zone testi ile bakır film (A) örneğinin E. Coli bakterisi üzerinde antimikrobiyal etkisinin olmadığı görülmüştür. Öte yandan, gümüş film (B) örneğinin, E. Coli bakterisi üzerinde antimikrobiyal etkisinin olduğu belirlenmiştir. Film çevresinde oluşan bölgenin oldukça temiz olması (bulanık olmaması) antimikrobiyal etkinin bakterisidal olabileceğini göstermektedir.

Örneklerin S. Aureus Bakterisi üzerindeki antimikrobiyal aktivitesinin zone testi ile tayini sonucunda elde edilen görüntü Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Örneklerin S. aureus bakterisi üzerindeki antimikrobiyal aktivitesinin zone deneyi ile tayini

Gümüş film örneğinin (B) S. Aureus bakterisi üzerinde antimikrobiyal etkisinin olduğu belirlenmiştir. Oluşan bölgenin E. Coli bakterisinde gözlemlendiği gibi temiz olması, antimikrobiyal etkinin bakterisidal olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, B filminin Gram (+) bakteri üzerinde Gram (-) bakterilere göre daha yüksek öldürücü etki gösterdiği tespit edilmiştir. Bu tür etkiye sahip antimikrobiyal maddelerin daha nadir olması, B filminin yüksek bulaşıcılığa sahip bakterilere karşı etkili olma ihtimalini yükseltmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma ile; her iki metal nanoparçacığın hazırlanmasında tercih edilen yeşil sentez yöntemi üzerinde, optimizasyon çalışmaları ile sentez parametreleri belirlenmiştir ve nihai ürünlerde nanoparçacıkların elde edildiği, TEM analizleri ile kanıtlanmıştır. Elde edilen nanoparçacık boyutları literatür bildirileri ile uyumludur. Ayrıca film kaplamaların metal nanoparçacıkları içerdiği de SEM görüntüleri ile doğrulanmış ve yapıdaki dağılımları incelenmiştir. Antimikrobiyal aktivitenin ön

değerlendirmesinde, yaygın görülen bakterilere karşı denenen gümüş nanoparçacık içeren kaplama filminin antimikrobiyal etkisinin bulunduğu ve bakterisidal olabileceği görülmüştür. Kaplamaların farklı sıvı maruziyetine tepkileri ölçülmüş, her iki kaplamanın 25 yıkamaya kadar suya ve bazik sıvılara karşı daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca temas açısı ölçümleri ile kaplamaların hidrofobikliğe yakın olduğu belirlenmiştir.

Enfeksiyona sebep olan mikroorganizmaların (bakteri, mantar veya diğer virüsler gibi) hastalarda birlikte görülmesinin, Covid-19 pandemi sürecine benzer şekilde, influenza gibi yaygın viral hastalıkları şiddetlendirdiği, tanı ve tedavisinde ciddi problemlere yol açtığı ve iyileşme sürecini olumsuz etkilediği belirtilmiştir (Chen vd., 2020). Zararlı mikroorganizmaların bir arada bulunmasının engellenebilmesi ve bulaşıcı hastalıkların yayılma riskinin azaltılabilmesi amacıyla, sık temas edilen yüzeylerde hijyen tesisinin önemli olacağı açıktır. Sonuç olarak çalışmada, çevreye duyarlı bileşenlerden oluşan kompozit filmlerin özellikleri incelenmiş ve metal yüzeyine kaplanmaları değerlendirilerek, nano gümüş parçacıklar içeren kompozit film kaplamaların geliştirilmesi sonrasında uygulama potansiyelinin yüksek olduğu gözlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 2209-B 1139B412101848 başvuru nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Projede Sanayi Danışmanı olarak destek veren Bugamed Biyoteknoloji Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi'ne teşekkür ederiz.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Fırat YILMAZ, deneysel sonuçların yorumlanması ve makalenin oluşturulması; Demet TOPALOĞLU YAZICI, bilimsel yayın araştırması, deneysel sonuçların yorumlanması ve makalenin oluşturulması; Buse ERDOĞAN, Eda ÖZDURMUŞ, Umut KILINÇOĞLU ve Sinem KIZILKAYA deneysel çalışmaların yürütülmesi konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Alabdallah, N. M., & Hasan, M. M. (2021). Plant-based green synthesis of silver nanoparticles and its effective role in abiotic stress tolerance in crop plants. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5631-5639. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.081>

- Amaliyah, S., Pangesti, D. P., Masruri, M., Sabarudin, A., & Sumitro, S. B. (2020). Green synthesis and characterization of copper nanoparticles using Piper retrofractum Vahl extract as bioreductor and capping agent. *Heliyon*, 6(8). doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04636>
- Amer, M., & Awwad, A. (2021). Green synthesis of copper nanoparticles by Citrus limon fruits extract, characterization and antibacterial activity. *Chemistry International*, 7(1), 1-8. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4017993>
- Anwar, Y., Ullah, I., Al Johny, B. O., Al-Shehri, A. M., Bakhsh, E. M., Ul-Islam, M., Asiri, A. M., & Kamal, T. (2021). Nigella sativa L. seeds extract assisted synthesis of silver nanoparticles and their antibacterial and catalytic performance. *Applied Nanoscience*, 12(11), 3185-3196. doi: <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02048-3>
- Arshad, H., Saleem, M., Pasha, U., & Sadaf, S. (2022). Synthesis of Aloe vera-conjugated silver nanoparticles for use against multidrug-resistant microorganisms. *Electronic Journal of Biotechnology*, 55, 55-64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2021.11.003>
- Ashraf, J. M., Ansari, M. A., Khan, H. M., Alzohairy, M. A., & Choi, I. (2016). Green synthesis of silver nanoparticles and characterization of their inhibitory effects on AGEs formation using biophysical techniques. *Scientific reports*, 6(1), 1-10. doi: <https://doi.org/10.1038/srep20414>
- Atacan, K., Güy, N., & Özacar, M. (2022). Recent advances in photocatalytic coatings for antimicrobial surfaces. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 36, 100777. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100777>
- Batoool, M., & Masood, B. (2017). Green Synthesis of Copper Nanoparticles Using Solanum Lycopersicum (Tomato Aqueous Extract) and Study Characterization. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology Research*, 1(1), 1-5. Erişim adresi: <https://www.primescholars.com/articles/green-synthesis-of-copper-nanoparticles-using-solanum-lycopersicum-tomato-aqueous-extract-and-study-characterization.pdf>
- Bikdeloo, M., Ahsani Irvani, M., Roosta, H. R., & Ghanbari, D. (2021). Green synthesis of Copper Nanoparticles Using Rosemary Extract to Reduce Postharvest Decays Caused by Botrytis Cinerea in Tomato. *Journal of Nanostructures*, 11(4), 834-841. doi: <https://doi.org/10.22052/JNS.2021.04.020>
- Chen, X., Liao, B., Cheng, L., Peng, X., Xu, X., Li, Y., ... & Ren, B. (2020). The microbial coinfection in COVID-19. *Applied microbiology and biotechnology*, 104, 7777-

7785. doi: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10814-6>
- Das Jana, I., Kumbhakar, P., Banerjee, S., Gowda, C. C., Kedia, N., Kuila, S. K., Banerjee S., Gowda C.C., Kedia N., Kulia S.K., Banerjee S., Chandra Das N., Kumar Das A., Manna I., Tiwary C.S., & Mondal, A. (2020). Copper Nanoparticle–Graphene Composite-Based Transparent Surface Coating with Antiviral Activity against Influenza Virus. *ACS Applied Nano Materials*, 4(1), 352-362. doi: <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c02713>
- Erkoc, P., & Ulucan-Karnak, F. (2021). Nanotechnology-Based Antimicrobial and Antiviral Surface Coating Strategies. *Prosthesis*, 3(1), 25-52. doi: <https://doi.org/10.3390/prosthesis3010005>
- Fatma, S., Kalainila, P., Ravindran, E., & Renganathan, S. (2017). Green synthesis of copper nanoparticle from Passiflora foetida leaf extract and its antibacterial activity. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 79-83. doi: <http://dx.doi.org/10.22159/ajpcr.2017.v10i4.15744>
- Galdiero, S., Falanga, A., Vitiello, M., Cantisani, M., Marra, V., & Galdiero, M. (2011). Silver nanoparticles as potential antiviral agents. *Molecules*, 16(10), 8894-8918. doi: <https://doi.org/10.3390/molecules16108894>
- Hoseinzadeh, E., Makhdoumi, P., Taha, P., Hossini, H., Stelling, J., & Amjad Kamal, M. (2017). A review on nano-antimicrobials: metal nanoparticles, methods and mechanisms. *Current drug metabolism*, 18(2), 120-128. doi: <https://doi.org/10.2174/138920021766616120111146>
- Khan, A., Shaheen, A., Mahmood, T., Rehman, W., & Yaqoob. (2017). Novel synthesis and characterization of silver nanoparticles from leaf aqueous extract of Aloe vera and their anti-microbial activity. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology Applications*, 1(1), 103. Erişim adresi: <http://article.scholarena.co/Novel-Synthesis-and-Characterization-of-Silver-Nanoparticles-from-Leaf-Aqueous-Extract-of-Aloe-Vera-and-their-Anti-Microbial-Activity.pdf>
- Kiani, M., Rabiee, N., Bagherzadeh, M., Ghadiri, A. M., Fatahi, Y., Dinarvand, R., & Webster, T. J. (2021). Improved green biosynthesis of chitosan decorated Ag-and Co3O4-nanoparticles: A relationship between surface morphology, photocatalytic and biomedical applications. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 32, 102331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nano.2020.102331>
- Kim, J., Lee, H., & Joung, Y.S. (2021). Antibacterial fabric with contradictory functions of water repellency and absorbency realized by electrophoretic deposition of hydrophobic SiO₂ and hydrophilic ZnO nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, 161, 1-3. doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106455>
- Li J., & Zhuang S. (2020). Antibacterial activity of chitosan and its derivatives and their interaction mechanism with bacteria: Current state and perspectives. *European Polymer Journal*, 138, 109984. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109984>
- Muhammad, A., Umar, A., Birnin-Yauri, A. U., Sanni, H. A., AR, I., & Elinge, C. M. (2022). Effect of process variables on green synthesis of copper nanoparticles from solanum lycopersicum and Psidium guajava and its antibacterial activities. *International Journal of Advanced Chemistry*, 10(1), 17-23. doi: <http://dx.doi.org/10.14419/ijac.v10i1.32045>
- Rakowska, P.D., Tiddila, M., Faruqui, N., Bankier, C., Pei, Y., Pollard, A.J., Zhang, J., & Gimore, I.S. (2021). Antiviral surfaces and coatings and their mechanisms of action. *Communications Materials*, 2(53). doi: <https://doi.org/10.1038/s43246-021-00153-y>
- Saitawadekar, A., & Kakde, U. B. (2020). Green Synthesis of Copper Nanoparticles Using Aspergillus Flavus. *Journal of Critical Reviews*, 7(16), 1083-1090. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Umesh-Kakde/publication/343318586_JOURNAL_OF_CRITICAL_REVIEWS_GREEN_SYNTHESIS_OF_COPPER_NANOPARTICLES_USING ASPERGILLUS FLAVUS/links/5f22d84d458515b729f3504e/JOURNAL-OF-CRITICAL-REVIEWS-GREEN-SYNTHESIS-OF-COPPER-NANOPARTICLES-USING-ASPERGILLUS-FLAVUS.pdf
- Sinclair, T. R., Van den Hengel, S. K., Raza, B. G., Rutjes, S. A., de Roda Husman, A. M., Peijnenburg, W. J., Roesink, H. D. W., & de Vos, W. M. (2021). Surface chemistry-dependent antiviral activity of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 32(36), 365101. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac03d6>
- Supriya, G., & Kumari, S. (2019). Green synthesis of silver nanoparticles using Aloe vera extract and assessing their antimicrobial activity against skin infections. *International Journal of Scientific Research in Biological Sciences*, 6(1), 60-65. doi: <http://dx.doi.org/10.26438/ijrsrbs/v6si1.6065>
- Suresh, Y., Annapurna, S., Bhikshamaiah, G., & Singh, A. K. (2013). Characterization of green synthesized

copper nanoparticles: A novel approach. *International Conference on Advanced Nanomaterials & Emerging Engineering Technologies*, 63-67. doi: <https://doi.org/10.1109/ICANMEET.2013.6609236>

Tippayawat, P., Phromviyo, N., Boueroy, P., & Chompoosor, A. (2016). Green synthesis of silver nanoparticles in aloe vera plant extract prepared by a hydrothermal method and their synergistic antibacterial activity. *PeerJ*, 4, e2589. doi: <https://doi.org/10.7717/peerj.2589>

Zhang, Y., Fan, W., Sun, Y., Chen, W., & Zhang, Y. (2021). Application of antiviral materials in textiles: A review. *Nanotechnology Reviews*, 10(1), 1092-1115. doi: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0072>

MEŞE PALAMUDU YAĞINDAN MOTORLU TAŞITLARDA KULLANIMA YÖNELİK BİYODİZEL ÜRETİMİ

Merve GÖRDESEL YILDIZ^{1*}

¹ Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Çankaya/Ankara

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-4035-3540>

Anahtar Kelimeler	Öz
Biyodizel Bitkisel yağ Meşe palamudu Transesterifikasyon	<i>Biyodizel biyolojik kaynaklardan elde edilen ester tabanlı bir tür oksijenli yakıttır ve dizel motorlarda kullanılabilir. Petrol kökenli dizele göre daha yüksek tutuşma sıcaklığına sahip olduğundan taşıma ve depolama açısından avantajlı konumdadır. Çevre açısından değerlendirildiğinde toksik etkisi yoktur ve biyolojik olarak doğada bozunabilmektedir. Bu nedenle biyodizelin üretiminin ve kullanımının yaygınlaştırılması gerek tarım gerek otomotiv sektörümüzü ekonomik olarak güçlendirecektir. Ancak biyodizel üretim maliyeti yüksek olan bir yakıttır. Yağlı bitki tohumundan üretim yapan tesislerde biyodizel maliyetindeki en büyük pay tohumuna aittir. Bu nedenle çeşitli kaynaklardan verimli biyodizel üretimi araştırılmaktadır. Çalışma kapsamında meşe palamudundan elde edilen bitkisel yağdan transesterifikasyon yöntemiyle kaliteli ve ekonomik biyodizel üretimi amaçlanmıştır. Meşe palamudundan Soxlet ekstraksiyonu ile bitkisel yağ eldesi ve bitkisel yağdan transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel eldesi gerçekleştirilmiştir. Meşe palamudunun yağ oranı %4,26 bulunmuştur. Bitkisel yağın ve biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi amacıyla çeşitli analizler uygulanmıştır. Yağın doymamışlığını belirlemek amacıyla iyot analizi yapılmıştır ve iyot sayısı 91,72 olarak belirlenmiştir. Biyodizelin viskozite değeri dizel motorun çalışmasını etkileyeceğinden üretilen biyodizelin viskozitesinin düşük olması istenmektedir. Elde ettiğimiz biyodizelin dinamik viskozitesi 20°C için 0,53 kg/m.s bulunmuştur. Çalışmada biyodizelin akma noktası tayini ve nötralleşme sayısı belirlenerek biyodizelin kalitesi ve motorlu araçlarda kullanımı değerlendirilmiştir. Bu değerler sırasıyla -12,6°C ve 0,092 bulunmuştur.</i>

BIODIESEL PRODUCTION FROM ACORN OIL FOR USE IN MOTOR VEHICLE

Keywords	Abstract
Biodiesel Vegetable oil Acorn Transesterification	<i>Biodiesel is an ester-based type of oxygenated fuel obtained from biological sources and can be used in diesel engines. Since it has a higher ignition temperature than petroleum-based diesel, it is advantageous in terms of transportation and storage. When evaluated from an environmental perspective, it has no toxic effects and is biodegradable in nature. Therefore, the widespread production and use of biodiesel will economically strengthen both our agricultural and automotive sectors. However, biodiesel is a fuel with a high production cost. In facilities producing from oilseed plants, the largest share in biodiesel costs belongs to the seed. Therefore, efficient biodiesel production from various sources is being investigated. Within the scope of the study, it is aimed to produce high-quality and economical biodiesel from vegetable oil obtained from acorns by transesterification method. Vegetable oil was obtained from acorns by Soxlet extraction and biodiesel was obtained from vegetable oil by transesterification method. The oil ratio of acorns was found to be 4.26%. Various analyzes were applied to examine the physical and chemical properties of vegetable oil and biodiesel. Iodine analysis was performed to determine the unsaturation of the oil and the iodine number was determined as 91.72. Since the viscosity value of biodiesel will affect the operation of the diesel engine, it is desired that the viscosity of the produced biodiesel be low. The dynamic viscosity of the biodiesel was found to be 0.53 kg/m.s for 20°C. In the study, the pour point and neutralization number of biodiesel were determined and the quality of biodiesel and its use in motor vehicles were evaluated. These values were found to be -12.6°C and 0.092, respectively.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 25.09.2024

Kabul Tarihi : 03.03.2025

Research Article

Submission Date : 25.09.2024

Accepted Date : 03.03.2025

* Sorumlu yazar: mervegordesel@gazi.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1555844>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Fosil kaynaklı yakıtların sınırlı ve yakın gelecekte tükenecek seviyelere ulaşacak olması Dünya'da enerji krizlerine neden olmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların kullanımından kaynaklı sera gazı oluşumunun neden olduğu küresel ısınma ve çevre kirliliği kaçınılmazdır. Bu nedenle petrole alternatif enerji kaynaklarının araştırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu kapsamda enerji bağımsızlığının sağlanması ve temiz enerji eldesi amacıyla önümüzdeki yıllarda biyoyakıtlara eğilimin artacağı ön görülmektedir. Biyoyakıtların günümüzde en yaygın alt dalı olan biyodizel, dizel motorlarda kullanılabilen hayvansal ve bitkisel yağlar gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen alternatif bir yakıttır. Biyolojik olarak parçalanabilen ve toksik olmayan yenilenebilir bir yakıt türüdür. Oksijenli yakıtların egzoz emisyonlarını azaltmadaki başarısı ve artan çevre bilinci biyodizel olarak adlandırılan yağ asitlerinin dizel motorlarında kullanımını 1980'li yılların başında gündeme getirmiştir. O yıllarda biyodizelin yakıt olarak kullanılmasıyla petrole bağımlılığı azaltacağı ve tarımın gelişmesine de katkı sağlayacağı belirtilmiştir. Biyodizel çevre ile uyumlu ve kısa bir süre içerisinde %99,5 oranında doğada parçalanabilen bir yakıttır.

Biyodizel üretiminde; yağın temel katalizör eşliğinde transesterifikasyonu, direkt esterleşme reaksiyonu, yağın önce yağ asitlerine sonra biyodizele dönüştürülmesi olmak üzere üç temel yöntem bulunmaktadır. Günümüzde biyodizel üretiminde en fazla tercih edilen yöntem katalizör eşliğinde transesterifikasyon yöntemidir. Bu yöntemde düşük basınçta ve düşük sıcaklıkta çalışılıyor olması, minimum reaksiyon zamanında yüksek dönüşüm sağlanması, ara bileşenler olmadan direkt biyodizel üretilebilmesi yöntemin çok tercih edilme sebepleri arasındadır. Transesterifikasyon reaksiyonunda yağ, monohidrik bir alkolle (etanol, metanol) katalizör varlığında (asidik, bazik katalizörler ve enzimler) ana ürün olarak yağ asidi esterleri ve gliserin oluşturarak esterleşir. Ayrıca esterleşme reaksiyonunda yan ürün olarak monogliseridler, reaktant fazlası ve serbest yağ asitleri oluşur. Biyodizel üretiminin esası bitkisel yağın içerisindeki ester ve gliserini ayırma işlemidir. Transesterifikasyon işlemi esnasında bitkisel yağdaki gliserin komponentleri, alkolle yer değiştirir (Çildir ve Çanakçı, 2006).

Biyodizel üretiminde metil alkol (metanol), daha dengeli bir reaksiyon sağladığı için etil alkole (etanol) göre daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca metil alkol, bitkisel yağ içerisindeki sudan, etil alkole göre daha az etkilenir. Reaksiyonda kullanılacak etil alkol miktarı, aynı yağ miktarı için metil alkolden daha fazla olmaktadır. Polar olması, en kısa zincirli alkol olması, trigliseritlerle kolay reaksiyon vermesi sebebiyle metanol kullanımı daha

yaygındır (Shailendra, Agarwal ve Sanjeev, 2008). Transesterifikasyon reaksiyonunda trigliseridi parçalamak amacıyla katalizör kullanılmaktadır. Bazik katalizör kullanımında reaksiyonun daha hızlı gerçekleştiği ve bu sayede daha düşük reaksiyon süresine gereksinim duyulduğu bilinmektedir (Özdemir ve Mutlubaş, 2016). Ayrıca baz katalizli transesterifikasyonun gerçekleşmesiyle sabunlaşma riski azalmıştır. Bu nedenle katalizör olarak genellikle NaOH veya KOH kullanılmaktadır. Ancak H₂SO₄ gibi farklı asidik yapıların katalizör olarak kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur (Bague ve Franks, 2019). Reaksiyonda serbest kalan esterler alkolle birleşirken katalizör ise gliserinle birleşir (Graboski ve McCormick, 1998). Bitkisel yağ asit, alkol ve katalizör ise baz karakterlidir. Biyodizel reaksiyonunda kullanılan katalizörün miktarı, bitkisel yağın pH değerine bağlı olmaktadır.

Çalışmada, ülkemizde popülasyonu yüksek ve meyvesi verimli şekilde kullanılmayan bir ağaç türü olan meşe ağacı ile çalışılmıştır. Meşe palamudunun ülke genelinde fazla bulunması ve kullanılmaması, kolay erişilebilirlik ve düşük maliyet sağlamaktadır. Çalışma kapsamında hem ürün değerlendirilmesi ve maliyet açısından ülke ekonomisine ve bilime katkı sağlanmış hem de çevresel ve ekonomik etkiler de göz önüne alındığında meşe palamudundan elde edilen bitkisel yağın kullanılmasıyla biyodizel üretimiyle alternatif yakıtlara dönüşüm sağlanmıştır. Çalışma kapsamında fosil kaynaklı yakıtların tüketiminin azaltılmasına katkı sağlanarak ülkemizde bol miktarda bulunan meşe palamudundan elde edilen yağdan biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Biyodizel üretiminde yeni bir hammadde kaynağının kullanımı, çalışmanın yenilikçi yanına dikkat çekmektedir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Biyodizel eldesinde bitkisel yağlar, hayvansal yağlar, kullanılmış atık kızartma yağları ve algler kullanılmaktadır. Bu kaynaklar içerisinde en büyük paya sahip olan bitkisel yağlardır (Altınsoy, 2007). Biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağ kaynakları başta kanola yağı olmak üzere (Boz ve Sunal 2009) aspir, pamuk, soya, palm, ayçiçek, zeytin, prina, hardal ve diğer yağlı tohumların yağları sıralanabilir (Çildir ve Çanakçı, 2006; Ögüt ve Oguz, 2005). Avrupa'da biyodizel üretimde kullanılan hammaddelerin kullanım oranları karşılaştırıldığında %42 ile kanola ilk sırada iken, Türkiye'de pamuk %32 oranla ilk sırada yer almaktadır (USDA Foreign Agricultural Service. Biofuels Annual, 2024). Biyodizelin özellikleri kullanılan yağ kaynağına ve alkol tipine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu durum her biyodizel için farklı tutuşma, yanma ve emisyon değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır (Asaumi, Shintani ve Watanabe, 1992). Bitkisel yağ eldesi amacıyla kullanılan yağlı tohumların çoğu, gıda sektörü başta olmak üzere pek çok alanda kullanılan

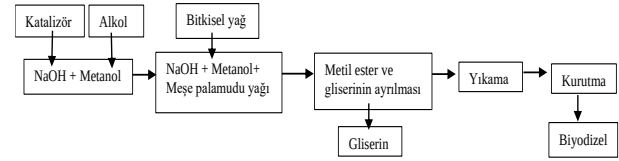
değerli bitkilerdir. Mevcut durumda bu hammaddelerin farklı sektörlerde zaten kullanılıyor olması hammadde eldesindeki zorluklara ve fiyat artışına neden olmaktadır. Bu nedenle biyodizel üretimi için bitkisel yağ eldesinde farklı hammadde arayışları mevcuttur.

Bu kapsamda biyodizel eldesinde kullanılacak bitkisel yağın üretimi için farklı sektörlerde kullanım alanı oldukça kısıtlı olan meşe palamudu dikkat çekmektedir. Meşe palamudu, Türkiye’de özellikle Trakya, Marmara ve İç Anadolu bölgesinde sıklıkla yetişen bir bitki türü olan meşe ağacının meyvesidir. Ancak meşe palamudu diğer ağaçların meyveleri gibi doğrudan tüketilmemektedir. Bu nedenle hammadde temini açısından oldukça bol ve kolay ulaşılabilir konumdadır. Meşe palamudunun diğer hammaddelerden farklı kılan özelliği E-vitamini, toplam fenol ve antioksidan içeriğinin yüksek olmasıdır. Ayrıca sterol (Beta-sitosterol vb.) ve yağ asitleri (omega-3, omega-6 ve toplam doymamışlık) bakımında önemli değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bitkiden elde edilen yağın kalitesi için önemli olan bu değerler meşe palamudunun yağ üretiminde kullanımına elverişli olduğunu göstermektedir. Meşe palamudunun bazı fiziksel özellikleri ve içeriğindeki yağ miktarı meşe türüne göre çeşitlilik göstermektedir. Amerika’daki Tarım Bölümü Tarımsal Araştırma Hizmetleri (United States Department of Agriculture-USDA) verilerine göre meşe palamudunun yağ içeriği %24’tür. Bu değer bitkisel yağ üretiminde sıklıkla kullanılan mısır, soya, aspir vb. hammaddelerle yarışacak düzeydedir (Ertaş, 2024).

Meşe ağacının meyvesi olan meşe palamudundan elde edilen bitkisel yağ, biyodizel üretiminde alternatif kaynak olarak incelenmiştir. Yapılan literatür araştırmasında konuyla ilgili ayrıntılı bir deneysel çalışmaya rastlanmamıştır.

3. Yöntem

Çalışmada, gıda ve sağlık endüstrisi gibi çeşitli alanlarda kullanılan bitkisel yağların yerine meşe palamudu yağı kullanılarak biyodizel üretimi amaçlanmıştır. Bu amaçla hem ülkemizde bol miktarda yetişen meşe palamudu değerlendirilerek katma değeri yüksek ürün eldesi sağlanacak hem de biyodizel üretiminde kullanılan ayçiçek yağı, pamuk yağı gibi bitkisel yağların farklı alanlarda değerlendirilmesinin önü açılacaktır. Çalışma meşe palamuduna uygulanan ön işlem, meşe palamudu yağının eldesi, biyodizel üretimi, bitkisel yağa ve biyodizele uygulanan analizler olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır. Meşe palamudu yağı ve biyodizel eldesi aşamalarını özetleyen akım şeması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Meşe Palamudu Yağı ve Biyodizel Üretim Akım Şeması

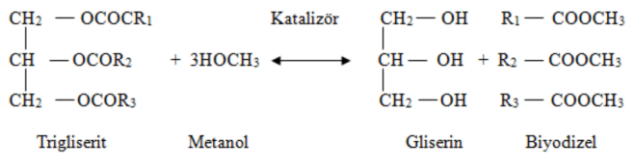
İlk olarak Türkiye’de İç Anadolu Bölgesi’nden temin ettiğimiz meşe palamudunun kabukları soyularak numune hazırlanmıştır. Yaprak ve sap gibi bileşenleri ayrılmıştır, ardından öğütme işlemi gerçekleştirilir. Biyodizel üretiminde düşük tanecik boyutuna sahip meşe palamudunun kullanılması yüksek yüzey alanı nedeniyle ekstraksiyon verimini olumlu etkilemektedir. Öğütülen meşe palamudu etüvde 100°C de 2 saat kurutulmuştur. Meşe palamudunun kurutulması içeriğindeki nemin uzaklaştırılması yağ eldesinde verimi olumlu etkilemektedir.

Ardından meşe palamudundan Soxhlet ekstraksiyonu yöntemiyle bitkisel yağ elde edilmiştir. Bu amaçla çözücü olarak seçilen petrol eteri Soxhlet cihazının altında yer alan balon jojeye doldurulmuştur. Öğütülmüş meşe palamudu numunesinden 10 gr tartılarak kartuş içine yerleştirilmiştir. Ardından kartuş Soxhlet cihazına yerleştirilerek Şekil 2.a’da verilen deney sistemi kurulmuştur. Soxhlet ekstraksiyon sisteminde yer alan geri soğutucu soğuk su girişi ve çıkışı bağlantıları yapılmıştır. Soxhlet ekstraksiyon balonu içinde bulunan petrol eteri ceketli ısıtıcı yardımıyla 50°C-60°C’de ısıtılarak buharlaştırılmıştır. Çözücünün sıcak buharı yoğunlaştırıcıya ilerleyerek ve yoğunlaşarak kartuş içindeki katı numunenin üzerine damlamaktadır. Meşe palamudu numunesini içeren kartuş çözücü ile tam dolduğunda, sistem üzerindeki bypass kolunun seviyesine ulaşır ve sifon oluşarak çözücü tekrar cam balona boşalmıştır. Bu döngü tekrarlanarak her döngü sırasında katının içerdiği bir miktar yağın çözücüde çözünmesi sağlanmıştır. 2 saat süreyle toplam 10 dakikada bir sifon yapacak şekilde ekstraksiyon gerçekleştirilmiştir. Ekstraksiyon işlemi sonrası meşe palamudu yağı ve çözücü içeren karışım içinden petrol eteri damıtılarak geri kazanılmıştır. Damıtma işlemi için kurulan sistem Şekil 2.b’de verilmiştir. Balonda kalan yağ 105°C’deki etüvde sabit tartıma getirilmiştir. Ardından desikatörde soğutulan bitkisel yağ miktarı kaydedilmiştir. Bu deneysel süreç tekrarlı şekilde gerçekleştirilerek hedeflenen yağ miktarına ulaşılmış ve bu miktar tartılarak kaydedilmiştir.



Şekil 2. a) Soxhlet Ekstraksiyonu Yöntemiyle Bitkisel Yağ Elde Edilen Deneysel Düzenek b) Damıtma Sistemi Düzenegi

Çalışmanın üçüncü aşamasında, meşe palamudu yağından transestrifikasyon yöntemiyle biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Biyodizel üretiminde esterin verimini etkileyen en önemli değişkenlerden biri alkolün trigliserite molar oranıdır. Şekil 3'te verilen reaksiyon incelendiğinde, transesterifikasyon stokiometrik oranı 3 mol yağ asidi alkil esteri ve bir mol gliserol vermek üzere 3 mol alkol ve bir mol trigliserit gerektirir. Bununla beraber transestrifikasyon bir denge reaksiyonudur ve reaksiyonu ürünler yönüne ilerletmek için alkolün aşırısı gereklidir. Çalışmada estere maksimum dönüşüm için molar oran 6:1 olarak belirlenmiştir.

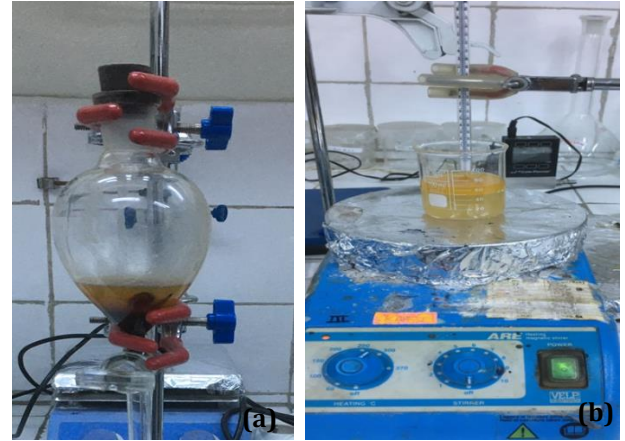


Şekil 3. Transesterifikasyon Reaksiyonu

İlk olarak çalışmada alkol olarak seçilen metanol ve katalizör olarak seçilen NaOH kapalı bir reaksiyon kabında birleştirilmiştir. Bu aşamada 0,9 g katı NaOH kullanılarak metanol içinde çözünmesi sağlanmıştır. Ardından manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak ısıtılan meşe palamudu yağına yağ ve katalizör karışımı ilave edilmiştir. Bu aşamadan itibaren alkol kaybını önlemek amacıyla sistem atmosfere kapatılarak, deney kapalı sistemde devam etmiştir. Reaksiyon, 60°C ve 600 RPM de karıştırılıp ısıtılarak 2 saat boyunca reaksiyon gerçekleşmiştir. Bu aşamada alkolün kaynama noktası olan 64,7°C çalışma sıcaklığı açısından sınırlayıcı olmuştur.

Reaksiyon sonunda ürün karışım dinlenme tankı görevi gören ayırma hunisine alınarak 2 gün bekletilmiştir. Şekil 4.a'da, 2 günün sonunda oluşan faz ayrımı ve alt fazda gliserin, üst fazda biyodizel birikimi görülmektedir. Gliserin fazı biyodizel fazından daha

yoğundur ve her ikisi faz da reaksiyonda kullanılan alkol fazlası içermektedir. Gliserin ve biyodizel ayırma işleminden sonra, fazla alkol buharlaştırılarak ortamdan uzaklaştırılmıştır. Elde edilen biyodizel kalan katalizör ve sabunların uzaklaştırılması için ılık su ile yıkanmıştır. Ayırma hunisi yardımıyla fazlar ayrıldıktan sonra yıkama işlemi tekrarlanmıştır. Şekil 4.b'de görüldüğü gibi yıkama işlemi bitikten sonra çözelti 100°C'de ısıtılarak biyodizel içerisindeki su buharlaştırılır. Bu işlem sonunda sarı görünümlü, viskozitesi petrole yakın biyodizel elde edilmiştir.



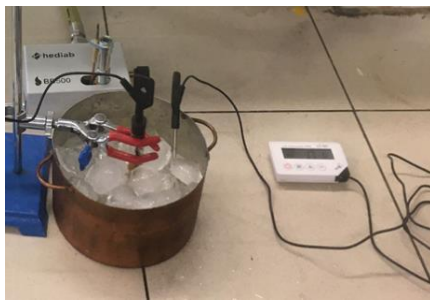
Şekil 4. a) Ürün Karışımın Faz Ayrımı b) Biyodizel Fazındaki Suyun Buharlaştırılması

Elde edilen meşe palamudu yağının ve biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi amacıyla çeşitli analizler uygulanmıştır. Bu amaçla ilk olarak bitkisel yağın iyot sayısı analizi gerçekleştirilecektir. İyot sayısı, yağların doymamışlık ölçüsü olup uygulamada ağırlık olarak yüz kısım yağın bağladığı iyodun ağırlığı olarak belirtilmektedir. Yüksek iyot sayılı yağ tortu oluşumuna, aşırı karbon kalıntısı oluşumuna ve depolama kararlılığının düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle bu değerin analiz edilerek belirlenmesi yağ kalitesi açısından önemlidir. Bu amaçla gerçekleştirilen iyot sayısı analizinde iyodometrik yöntem kullanılmıştır. İlk olarak palamut yağı kloroform ile çözülmüş, ardından Hanus çözeltisi ve KI çözeltisi ilave edilerek sodyum tiyosülfat çözeltisi ile titre edilmiştir. Analiz sırasında indikatör olarak nişasta kullanılmıştır. Ancak nişasta fazla iyot varlığında indikatör özelliğini gösteremediğinden indikatör eşdeğerlik noktasına yaklaşıldığında ilave edilmiştir. Aynı işlemler palamut yağı içermeyen tanık deney için de tekrarlanarak meşe palamudu yağındaki iyot sayısı belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen biyodizelin viskozite tayini gerçekleştirilecektir. Bu amaçla numune cam bir silindire doldurularak ve 0,0032, 0,0021 ve 0,0016 m çaplara sahip çelik bilyelerin ($d' = 7800 \text{ kg/m}^3$) belirlenen h mesafesini aldığı sürelerin kaydedilmesiyle viskozite hesaplanır. Biyodizelin yüksek viskoziteye

sahip olması esterleşme reaksiyonunun tamamlanmadığını göstermektedir. Yüksek viskoziteye sahip biyodizel enjektörde tıkanmaya, püskürtme ve silindir içinde kurumlaşmaya neden olarak motora zarar vermektedir. Bu nedenle biyodizelin viskozitesinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Viskozitenin sıcaklığa bağlı olduğu bilinmektedir. Biyodizelin kinematik viskozite değeri 40 °C'de 3,5-6 mm²/s arasında değişmektedir (Akyarlı, 2004). Dinamik viskozite değeri ise yaklaşık 15 mPa.s'dir (Hartman, 2015). Çalışmada biyodizelin viskozite ölçümünün yanı sıra yoğunluğu da belirlenmiştir. Birçok standartta biyodizellerin yoğunluk değerleri 860-900 arasında değişir (Meher, Sagar ve Naik, 2006). Yoğunluğun yüksek olması ise proses sırasında gliserinin yeterine uzaklaştırılmadığının göstergesidir. Yoğunluk yakıt tüketimine ve yanma ısısına etki etmektedir. Literatürde biyodizelin yoğunluk ve viskozite değerlerini düşürmek için farklı oranlarda çeşitli biyodizel-dizel karışımları oluşturularak bunlara özel korelasyonlar geliştirmiş çalışmalar mevcuttur (Pham, Hoang, Le, Al-Tawaba, Dong ve Le, 2018; Hoang, 2021).

Biyodizelde gerçekleştirdiğimiz bir diğer analiz ise akma noktası tayinidir. Akma noktası tayini, numunenin soğuktaki akış özelliğini belirtir. Düşük sıcaklıkta yakıt uygun bir şekilde akamayarak yakıt yollarının ve enjektörlerin performansını etkileyebilir. Akma noktası, biyodizelin hareket edebildiği en düşük sıcaklıktır. Soğuk akış özelliği iyi olmayan yakıt kullanımı motorun yakıt besleme elemanlarına hasar verir bu nedenle üretilen biyodizelin motorlu taşıtlarda kullanımı açısından önemlidir. Bu nedenle elde ettiğimiz biyodizelin akma noktasını belirlemek amacıyla Şekil 5'teki düzenek kurulmuştur.



Şekil 5. Akma Noktası Deneyel Sistemi

Analiz için biyodizel numunesi bir cam tüpe konarak buz banyosu içine yerleştirilir. Numune ve banyo içine dijital termometreler yerleştirilerek eş zamanlı sıcaklık takibi yapılır. Numunedeki her 1°C'lik değişimde numunenin akış durumu kontrol edilir ve akmadığı sıcaklık belirlenir. Ayrıca çalışma kapsamında serbest yağ asitlerin veya biyodizel üretiminde kullanılan asitlerin varlığını belirlemek amacıyla biyodizelin nötralleşme sayısı belirlenmiştir. Bu analiz biyodizelin kalitesini

belirlemede yardımcı olmaktadır (Kaya, 2006). Bu işlem için biyodizel numunesi alkol-eter çözeltisinde çözünerek KOH ile titre edilmiştir. Aynı işlemler biyodizel içermeyen şahit numune ile tekrarlanarak işlem sonucunda biyodizelin nötralleşme sayısı belirlenmiştir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

4. Bulgular

Çalışmada elde edilen meşe palamudu yağının yağ oranı %4,26 bulunmuştur. Literatürdeki benzer bir çalışmada bu değer %3,38 olarak kaydedilmiştir (Karabas, 2013). Yağ oranı; meşe palamudu cinsine, gerçekleştirilen ön işleme ve ekstraksiyon verimi gibi çeşitli faktörlere göre çeşitlilik göstermektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda çalışılan meşe palamudu tipine en uygun ve araştırmaları yapılmış olan en yakın meşe türünün Mardin ince meşe palamudu olduğu belirlenmiştir. Mardin ince meşe türünün meyvesinin 100 gramındaki yağ oranının 4,95 olduğu tespit edilmiştir. Bu değer elde ettiğimiz sonuçla karşılaştırılabilir ve yakın bulunmuştur. Meşe palamudu yağının iyot sayısının belirlenmesi amacıyla Eşitlik 1 kullanılmıştır.

$$\text{İyot sayısı} = \frac{(V_2 - V_1) \cdot N}{m} \cdot 12,7 \quad (1)$$

Burada; V₂ tanık deneyi için harcanan sodyum tiyosülfat çözelti miktarı, V₁ örnek için harcanan sodyum tiyosülfat çözelti miktarı, N sodyum tiyosülfat çözeltisinin gerçek normalitesi ve m örneğin ağırlığını ifade etmektedir. Çalışmada Bölüm 2'de belirtilen prosedüre göre gerçekleştirilen analiz sonucundan meşe palamudu yağı iyot sayısı 91,72 olarak bulunmuştur. Literatürde yer alan Mardin ince meşe palamuduna yönelik çalışmada ise bu değer 88,30'dur. Literatürdeki bu değer baz alınarak yapılan karşılaştırmada hata oranı %3,87 olarak belirlenmiştir. Aradaki meşe palamudu türünün farklılığından kaynaklanmakta olup kabul edilebilir bir değerdir. Ayrıca iyot sayısı Avrupa Standardı EN 14214'e göre en fazla 120 olmalıdır. Elde edilen sonuç standart ile uyumlu olup standart isterlerini karşılamaktadır. Çalışmada elde edilen biyodizel numunesinin viskozitesinin belirlenmesi amacıyla Eşitlik 2 kullanılmıştır.

$$\eta = \frac{2 \cdot g \cdot r \cdot (d' - d)}{9 \cdot v} \quad (2)$$

Burada; r bilyenin yarıçapı, v limit hız, g yerçekimi ivmesi (9,8 m/s²), d sıvının yoğunluğu (860 kg/m³) d' bilye malzemesinin yoğunluğunu ifade etmektedir. Biyodizelin dinamik viskozitesi hesaplamalar sonucunda 20°C için 0,53 kg/m.s bulunmuştur. Biyodizelin nötralleşme sayısının belirlenmesi amacıyla

yürütülen deney sonucu elde edilen veriler Eşitlik 3'te kullanılmıştır.

$$A_x = \frac{V_1 - V_2}{w M_A N} \quad (3)$$

Burada; V_1 birinci deneyde harcanan KOH miktarı, V_2 şahit deneyde harcanan KOH miktarı, w numune ağırlığı, N KOH normalitesi, M_A KOH molekül ağırlığını (56,11 g/mol) ifade etmektedir. Analiz ve hesaplama sonrası biyodizelin nötralleşme sayısı 0,092 bulunmuştur. Bu sayede 1 gram numune içinde bulunana kuvvetli asitleri nötralize etmek için gerekli olan KOH miktarına eşdeğer alkali miktarı belirlendi. Son olarak Bölüm 2'de belirtilen prosedüre göre gerçekleştirilen analiz sonucu biyodizelin akma noktası -12,6°C bulunmuştur. Bu değer sırasıyla susam, yer fıstığı ve atık yağlardan elde edilen biyodizelde -14, -8 ve -9°C'dir (Kaya, 2006). Bu kapsamda elde edilen sonuç literatürle uyumlu ve karşılaştırılabilir düzeyde bulunmuştur. Biyodizel verimi hammadde kalitesi, katalizör türü ve miktarı, sıcaklık ve reaksiyon süresi gibi reaksiyon koşulları, kullanılan alkol türü ve oranı gibi pek çok parametreden etkilenmektedir. Çalışmada Eşitlik 4'te verilen ifade kullanılarak biyodizel verimi %62,4 bulunmuştur.

$$\text{Biyodizel verimi (\%)} = \frac{\text{Elde edilen biyodizel miktarı}}{\text{Kullanılan yağ miktarı}} \quad (4)$$

5. Sonuçlar

Biyodizel'in ülkemizde yaygın olarak üretilmesi ve kullanılmasıyla enerji tarımı ve yerli enerji üretimi gerçekleştirilerek temiz enerjiye katkı sağlanacaktır. Çalışmanın ilk aşamasında meşe palamudundan bitkisel yağ elde edilmiştir. Türkiye'de milyonlarca dönüm arazide bulunan meşe ağaçlarının bitkisinin kullanılmıyor olup bu şekilde değerlendirilmesi ülkemiz geleceği için çok büyük bir avantajdır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise bitkisel yağdan transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonunda yağ, monohidrik bir alkolle katalizör varlığında yağ asidi esterleri, gliserin ve biyodizel vererek esterleşmektedir. Elde edilen meşe palamudu yağına ve biyodizele ait analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Analizler; Avrupa'da biyodizel yakıtın temel özelliklerini ve kalite kriterlerini belirleyen standart olan EN14214 Avrupa Birliği Standardı ve bu standart temel alınarak TSE tarafından hazırlanan biyodizel standardına uygun biçimde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Meşe Palamudu Yağı ve Biyodizele Ait Analiz Sonuçları

Meşe Palamudu Yağı		Biyodizel			
Yağ oranı	İyot sayısı	Yoğunluk (kg/m ³)	Dinamik Viskozite (kg/m.s)	Akma Noktası	Nötralleşme Sayısı
%4,260	91,720	860	0,530	-12,600	0,092

Bitkilerden ve yağlı tohumlardan elde edilen yağ oranı üretim verimini doğrudan etkilediği için önemli bir kriterdir. İyot sayısı, bitkisel yağların yağ asitlerinde daha fazla çift bağ olduğunu gösterdiğinden, yüksek iyot değerine sahip bir bitkisel yağ, düşük iyot değerine sahip bir yağdan oksidatif olarak daha az kararlı olacaktır.

EN14214 standardına göre biyodizelin yoğunluk değeri 15°C'de 860-900 kg/m³ aralığında olmalıdır. Biyodizelin yoğunluğu enerji içeriği, yanma ve akışkanlık durumlarını etkilemektedir. Standartta nötralleşme sayısı için belirtilen üst değer ile karşılaştırıldığında elde edilen biyodizelin nötralleşme sayısı standarda uyum göstermektedir. EN14214 standardı, biyodizelin temel özelliklerini ve kalite kriterlerini belirlerken, akma noktası gibi bazı özellikler üreticinin sorumluluğuna bırakılır. Farklı uygulamalar ve iklim koşulları için farklı özelliklere sahip olması istendiğinden standartta bu konu hakkında doğrudan bir değer mevcut değildir.

Mevcutta kullanılan dizele alternatif olarak üretilen biyodizelin basit bir teknoloji ile düşük maliyetle üretilmesi beklenmektedir. Düşük viskozite, düşük akma noktası değeri de değerlendirildiğinde meşe palamudu yağından elde edilen biyodizel basit bir teknoloji ve düşük maliyetle üretilebilmektedir. Bu bağlamda küçük işletmelerde kolaylıkla üretimi mümkündür. Ayrıca petrol dizeli ile her oranda karıştırılarak veya saf halde kullanılabilir. Biyodizel kullanımı CO₂, yanmamış hidrokarbon, CO emisyonları açısından önemli azalma sağlaması nedeniyle çevre açısından pek çok avantaja sahiptir. Bunun yanı sıra atık konumundaki meşe palamudunun kullanılmasıyla atık yönetimi ve enerji verimliliği açısından faydalı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma kapsamında meşe palamudu potansiyel bir biyodizel kaynağı olarak sunulmuştur.

Teşekkür

Yazar, çalışmanın yürütülmesinde katkı ve desteğinden dolayı Prof. Dr. Özkan Murat Doğan'a ve deneylerin yürütülmesindeki yardımlarından dolayı Fatih Can Cantürk'e teşekkür etmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Merve GÖRDESEL YILDIZ, metodolojinin oluşturulması, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması, makalenin sonuçlarının hazırlanması konusunda katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Akyarlı, A. (2004). *Biyodizelin yakıtın uluslararası standartlarda üretimi*, Biyoenerji Sempozyumunda Sunulmuş Bildiri, İzmir.

Altınsoy, A. S. (2007). *Biyodizel üretimi, motorlarda kullanımı ve Türkiye'deki kaynakların incelenmesi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Asaumi Y., Shintani M. & Watanabe Y. (1992). Effects of fuel properties on diesel engine exhaust emission characteristics. *SAE Tech. Paper*, 922214. doi: <https://doi.org/10.4271/922214>

Bague D. A. & Franks, R. J. (2019). Synthesis and characterization of fatty acid methyl ester mixtures derived from acorn kernel oil. *Texas Journal of Science*, 71(1), 8. doi: <https://doi.org/10.32011/tjxsci.71.1.Article8>

Çildir O. & Çanakçı M. (2006). An Investigation of the effects of catalyst and alcohol amounts on the fuel properties of biodiesel from various vegetable oils. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(2), 367-372.

Ertaş E. (2012). Yöresel Ürünlerin Değerlendirilmesi ve Katma Değerli Ürünler Haline Getirilmesi Projesi TÜBİTAK-MAM Sonuç Raporu. Erişim adresi: <https://www.dika.org.tr/assets/upload/dosyalar/yoresel-urunlerin-degerlendirilmesi-ve-katma-degerli-urunler-haline-getirilmesi-projesi-sonuc-raporu.pdf> Erişim tarihi: 23 Mayıs 2024.

Graboski, M.S. & McCormick, R.L. (1998). Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Prog. Energy Combust. Sci.* (24), 125-164. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00034-8)

Hartman, J. (2015). Kinematic and Dynamic Viscosity of Diesel, Biodiesel, and JP-900 Compared to Other Non-Standard Fluids with a Demonstration of Viscosity Changes at Varying Temperatures (Undergraduate Report). Pennsylvania Devlet Üniversitesi, Philadelphia. Erişim Adresi: <https://bpb-us->

e1.wpmucdn.com/sites.psu.edu/dist/a/11907/files/2015/06/jzh5270_viscosity.pdf Erişim tarihi: 18 Mart 2024.

Hoang, A. T. (2021). Prediction of the density and viscosity of biodiesel and the influence of biodiesel properties on a diesel engine fuel supply system. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(5), 299-311. doi: <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1532734>

Karabas, H. (2013). Biodiesel production from crude acorn (*Quercus frainetto* L.) kernel oil: An optimisation process using the Taguchi method. *Renewable Energy*, 53, 384-388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.002>

Kaya, C. (2006). *Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi*, (Yüksek Lisans Tezi). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Meher, L. C., Sagar D. V. & Naik S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification-A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 10, 248-268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>

Öğüt, H. ve Oguz, H. (2005). *Üçüncü Milenyum Yakıtı Biyodizel*, 2. Baskı, Ankara: Nobel Yayınevi.

Özdemir Z. Ö. ve Mutlubaş H. (2016). Biyodizel üretim yöntemleri ve çevresel etkileri. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 129-143. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/klujes/issue/27696/406935>

Pham M. T., Hoang A. T., Le A. T., Al-Tawaha A. R. M. S., Dong V. H. & Le V. V. (2018). Measurement and prediction of the density and viscosity of biodiesel blends. *Int. J. Technol.* 9(5), 1015-1026. doi: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i5.1950>

Shailendra S., Agarwal A.K. & Sanjeev G. (2008). Biodiesel development from rice bran oil: Transesterification process optimization and fuel characterization, *Energy Conversion and Management*, 49, 1248-1257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.08.010>

USDA Foreign Agricultural Service. Biofuels Annual. Erişim adresi: <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Biofuels%20Annual%20Hague%20EU-28%207-3-2018.pdf> Erişim tarihi: 18 Temmuz 2024.

UNDERSTANDING THE IMPACT OF RECOGNITION AND RECALL ACTIONS ON ARCHITECTURAL DESIGN PROCESS

Noor Kadhim Saeed AL-KHAFAJI¹, Can UZUN^{2*}

^{1,2} Altınbaş University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Architecture, İstanbul, Türkiye,

¹ ORCID No: <https://orcid.org/0009-0008-5886-158X>

² ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-4373-9732>

Keywords	Abstract
Investigate-and-redesign Protocol Analysis Retrieval Action Design Action Memory	Every architect has a personal archive of pictures and details that they use to help them develop their architectural design that, for the most part, embodies their vocabulary within their memory from earlier experiences. The retrieval mechanism for these experiences is vital in the design process. This study examines the relationship between retrieval and design action, particularly through the specified codes: recall, recognize, guess, propose, analyze, and evaluate to understand the underlying design strategies based on these retrieval actions. This study applies the investigate-and-redesign method to reveal the retrieval and design action patterns and conducts protocol analysis through the think-aloud procedure. We use a two-stage quasi-experiment method for "investigate and redesign" parts. In the investigate part, subjects study the twenty given building facade images, and in the redesign part, subjects are asked to design a new facade, and they are allowed to apply free recall from the studied examples. Results show that designers are shifting or modifying their strategies on retrieval and design actions to minimize the error rates in design and accomplish the task in a given time. Design actions are more focus-demanding than retrieval actions. Retrieval actions appear with free associations, and focus shifts occur frequently in retrieval actions. All the codes of retrieval action and proposed code of design action are associated. Overall, this study reveals the nature of the occurrence pattern between retrieval and design actions by providing different design strategies for different retrieval actions.

TANIMA VE HATIRLAMA EYLEMLERİNİN MİMARİ TASARIM SÜRECİNE ETKİSİNİN ANLAŞILMASI

Anahtar Kelimeler	Öz
Araştır-ve- tasarla Protokol Analizi Hatırlama Eylemi Tasarım Eylemi Bellek	Her mimar tasarım sürecinde önceki deneyimlerinden topladığı kişisel bir bellek arşivine başvurur. Bu deneyimler için hatırlama mekanizması, tasarım sürecinde önemli bir yer tutar. Bu çalışma, hatırlama ve tasarım eylemi arasındaki ilişkiyi tanımlanan kodlar aracılığı ile incelemektedir. Bu kodlar; hatırlama, tanıma, tahmin etme, önerme, analiz etme ve değerlendirme olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, hatırlama ve tasarım eylemi ilişkisini ortaya çıkarmak için araştır-ve-tasarla yöntemini uygular ve yüksek sesle düşünme prosedürü aracılığıyla protokol analizi yöntemini analiz yöntemi olarak kullanır. Araştır-ve-tasarla yöntemi için iki aşamalı bir yarı-deney yöntemi kullanılmıştır. Deney süresince, denekler verilen yirmi bina cephesi görüntüsünü inceler ve tasarım bölümünde, deneklerden yeni bir cephe tasarımları istenir. Tasarlama sürecinde deneklere inceledikleri örnekleri serbestçe hatırlamaları için izin verilir. Sonuçlar, tasarımcıların tasarımdaki hata oranlarını en aza indirmek ve tasarım görevini belirli bir sürede tamamlamak amacıyla hatırlama ve tasarım eylemlerindeki stratejilerini düzenlediklerini göstermektedir. Hatırlama eylemi serbest çağrışımlarla ortaya çıkar ve odak kaymaları hatırlama eylemleri ile birlikte sıklıkla meydana gelir. Sonuçlara göre hatırlama eylemi kodları ile tasarım eylemi kodları birbirleri ile ilişkili belli örüntüler üzerinden meydana gelir. Bu çalışma, farklı geri çağırma eylemleri için farklı tasarım stratejileri sağlayarak, geri çağırma ve tasarım eylemleri arasındaki oluşum örüntüsünün doğasını ortaya koymaktadır.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 7.10.2024

Kabul Tarihi : 5.02.2025

Research Article

Submission Date : 7.10.2024

Accepted Date : 5.02.2025

* Sorumlu yazar: can.uzun@altinbas.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1562544>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The designer's memory is the most critical information processing mechanism for evaluating the information, consciously selecting the categories, and shaping the method to analyze design problems (Shen, Yao, Bao, and Yu, 2023). Moreover, memory is the retrieval source of the experiences of any information. Experiences contribute to finding a starting point for any design proposal and developing it. Eastmen, Newstetter, and McCracken (2001) indicate that architectural memory is structured earlier than an architecture education, with the built environment in which we pursue our whole life. Architecture education contributes to this process by increasing its curriculum and course contents with various experiences through projects, readings, and field trips (Eastmen, Newstetter, & McCracken, 2001). This experience creates a broad vocabulary for the association of architectural projects, and the association facilitates architectural knowledge processing.

Eastman et al. (2001) suggests that design retrievals are complex processes based on structuring architectural knowledge and constructing its association with architectural experience. In other words, retrieval actions can be a way for knowledge or experience transfer act during design. Hence, retrieval can be important for guiding designers in developing creative solutions using their existing design knowledge pool.

This study aims to understand if, during the design process, strategies for different retrieval actions, such as recall, recognition, and guessing, can organize the design problem's management (meta-planning) for different design objectives and if different retrieval processes can lead to intuitional or analytical design approaches. Each retrieval approach may contribute to the design from various perspectives. This research will provide further information to understand better the relationship between memory retrieval and design action in the design problem-solving process to address the designer's problem-solving strategies between memory and design actions.

The following chapters illustrate the retrieval states and their importance in design processes, explain the investigate-and-redesign quasi-experiment method, and finally explain the results.

2. Literature Review

Schacter (1995) defines memory as the capacity to recollect information acquired throughout time. At the same time, William (1891) defines memory as the process by which the outside world and ideas are stored for us to recall later. On the other hand, memory is critical for problem-solving and problem recognition,

which entails processing information by the brain and its application to decision-making.

Coding, storing, and retrieval are important activities for the memory system (Smith, 2014). Coding transforms the information the brain gets from interactions with the outside world into a form that the brain can comprehend and easily store. The location of the information's storage—long-term or short-term memory—relates to storing and the ability to recollect facts or information that have already been encoded and stored in the brain is linked to retrieving it. These three processes are essential for forming human memories, which are then held and eventually retrieved.

Memory retrieval includes recall, recognition, and guess actions (Freund, Brelsford, & Atkinson, 1969; Watkins & Tulving, 1975; Uner, 2018; Watkins & Gardiner, 1979). Freund et al. (1969) define recall and recognition as the functional depiction of memory and state that recall and recognition differ not because of the storage processes but because of the retrieval processes (Freund et al., 1969). According to Watkins & Tulving (1975), recall appears with the search activity and recognition afterward. The relationship between recall and recognition has been discussed in various circumstances. It has been questioned whether these tasks represent distinct cognitive processes depending on the kind of retrieval cues (Uner, 2018). Uner defined that the only difference between recall and recognition is the available cue information. The recognize action is activated if the available cue duplicates the target (retrieval trace). If not, recall action is activated (Watkins & Gardiner, 1979). This order of retrieval actions parallels the design problem-solving process. The designer first proposes an idea by recollecting their earlier experiences, whether knowingly or not, and recognizing its context of use. Investigating the occurrence pattern of the retrieval cycle can be a worthy point for understanding the retrieval strategies and how this cycle can be effectively organized during the design process.

Cleary (2018) defines recognition memory as identifying the ability of learned items from non-learned items. Recognition memory has two concepts: familiarity and recollection; the familiarity concept is a fast and weak recollection type of process and is easily affected by external factors, while recollection duration takes longer and makes strong associations with past experiences; however, for both concepts of recognition, an external stimulus is necessary to retrieve an experience (Rugg & Yonelinas, 2003; Gardiner, Ramponi, & Klavehn, 2002). The external stimulus in design that triggers the recognition is the verbal or visual externalization of the ideas. So, proposing new ideas by searching the memory by the recall can give the potential stimulus for recognition to detect the

familiar part of the idea and integrate it into the design process familiarly or innovatively. The underlying occurrence pattern of recognition can help to understand how to create connections between ideas in a design process.

Tulving (1985) proposes knowing and remembering concepts for recognition memory, creating a relation between knowing and remembering while considering both actions as a different activity. Donaldson (1996) added a third concept for the recognition memory: guessing. Although guessing is an intuitive decision-making activity, the design process can benefit from its vague, uncertain nature for a creative design idea. The occurrence and the relation of this retrieval action with the design action can reveal some design decision-making strategies.

Recall, recognition, and guessing are integral in the design decision-making process. The interplay between different retrieval actions can develop different design strategies, too. According to the design problem, one may change his/her retrieval strategy to find the design solution easily. This study aims to understand the nature of the above-mentioned information. For this purpose, firstly the next section will present the literature related to memory retrieval in design, and both the importance of memory retrieval in the literature and the gap in memory retrieval will be explained.

2.1. Memory Retrieval in Design

In design problem-solving, memory retrieval plays a crucial role. Eastman directly indicates the memory issue in design by mentioning that retrieving the related design ideas provides a contextual frame of the design problem space (Eastman et al., 2001). Eastman defines the analogy with memory retrieval in design. Akin (1990) indicates that knowledge from memory shapes generative thinking, which is called design. Hence, retrieval from memory is necessary for the design process to be achieved. Goldschmidt (1991) sees action as memory retrieval through visual analogy, and states that visual analogies can improve the design problem-solving process. Verstijnen, Van-Leeuwen, Goldschmidt, Hamel, and Hennessey (1998) define memory as the structured information location retrieved in the mental imagery process.

In the context of memory retrieval in design, the literature has been associated with many different design strategies, such as, analogical thinking, contextual framing, and developing new approaches to problem-solving. Studies in the literature have made significant contributions to understanding the effects of these actions on the design process strategies.

Gero and Milovanovic (2020) argue that memory retrieval as analogy is useful for proliferating the

design problem solutions. Yuan, Liu, Lu, Yang, and Hao (2023) developed their research on the optimization of the memory retrieval process and analogies by balancing the abstraction level of the samples retrieved from the memory. Chan, Dow, and Shunn (2015) experimented to understand the analogical reasoning process in design while stating that experienced designers are more prone to make analogical reasoning and memory retrieval than novice designers and they propose structured analogical training to improve the design education. Atılola and Linsey (2015) compare different means of visual analogies while criticizing the problem of design fixation as a result of analogies. Koronis, Casakin, Silva, and Siew (2021) compare the effect of verbal, visual, and detailly instructed stimulus on the analogical reasoning of design students, and they suggest textual-based stimuli for analogies enhances the creativity of novice designers. Casakin (2004) claims that visual analogies through retrieval enhance the design solution quality.

Jia, Jiang, Hu, and Qui (2022) study the stimuli to trigger the retrieval process in design and state that the over-stimuli for retrieval may limit the creativity of the novice designer with superficial design fixations. However, Jia et al. reveals that design fixation increases the quality of design and has a strong relation with different design features (focus-type and broad design features). According to Jia et al. using targeted design fixations for specific design features may contribute to the designers' innovation. All these statement shows retrieval process has direct relation with the design process moreover as highlighted in cited work of Jia et al. fixation and thinking are intertwined actions throughout the design process hence memory retrieval is an inseparable part of design process.

In their study, Koronis, Casakin, and Silva (2023) indicate that memory retrieval in the analogy process is important to construct innovative ideas in the design process and propose visual stimuli for enhancing the analogies. According to Koronis et al., visual stimulus firstly increases the designers' ability to create analogies and enables the emergence of new ideas. On the other hand, Koronis et al. states that visual stimuli provide a concrete framework for a possible solution to abstract design problems and visual stimuli helps novice designers solve problems with a broader perspective rather than their mis-preconceptions.

Shen et al. (2023) analyze the categories of retrieved memory examples and states that the categorization of retrieved memory examples facilitates the optimization of the designer's knowledge. This study shows that designers can use categorized memory examples more efficiently, make more accurate analyses and evaluations with categorized examples, and improve their designs with transitions between different categories by understanding the relationships between

different categories. Crismond (2001) proposes investigate-and-redesign action to examine the retrieval processes in design action. According to Crismond, expert designers apply analogies while retrieving the structured knowledge in their memories; however, interestingly, Crismond reveals that designers do not use every piece of information they retrieve from their memory. Novick (1998) asserts that experts structure successful analogies through retrieval from their memories.

This study differs from the existing literature by focusing specifically on recognition, recall and guessing, and their relation to design actions and by exploring the underlying design strategies based on these retrieval actions.

Firstly, this study contributes to the literature with its findings regarding the relation between design and retrieval actions. Secondly, understanding the nature of occurrence patterns for the retrieval actions reveals different decision-making strategies that contribute to the literature by guiding novice and expert designers in developing their planning through the design problem-solving process. Moreover, although retrieval actions are emergent and involuntary reflexes, being aware of them can guide the designers, and they can track their path to understand if they are in the right decision-making process. For expert and novice designers, awareness of retrieval decision-making strategies can provide self-confidence for a more controlled design process. Novice designers can develop effective design strategies with this awareness. Strategies for retrieval cycles in the design process can also contribute to design education. It can contribute to creating a plan in design education in terms of memory instruments that can help the design process correctly.

3. Methodology

Research examining the cognitive processes has always become a challenging task. Most importantly, the validity control of the examined cognitive processes is critical. Watson (1920) proposes verbalization for studying mental processes and asserts that verbalization is a valid externalization method of thinking. Ericsson and Simon (1980) indicate that the investigation of internal states is possible through verbalization, and they accept verbal descriptions as the source of valid cognitive data. Moreover, Ericsson (2017) states that verbalization does not interfere with or change the subjects' activity.

Ericsson and Simon (1980) classify the verbalization protocols into three categories: think-aloud, concurrent, and retrospective. Verbalization is a simultaneous action with the subjects' activity when thinking aloud technique is applied; when the concurrent protocol is used, the performance is ended, but the information is still active in the short-term

memory of the subject, while the retrospective method is applied after the subjects' activity completed (Ericsson & Simon, 1980). This analysis procedure of verbalization reports is called protocol analysis (Sauder & Jin, 2016).

The protocol analysis method is utilized in educational, psychological, architectural, and other disciplines that are interested in learning more about cognitive processes (Sauder & Jin, 2016). The transcripts of (think-aloud protocols) are used to study the cognitive processes that underpin task performance after they have been recorded or filmed as data (Somerén, Barnard, & Sandberg, 1994). This technique is meant to be uninterruptible and question-free for the participants; it is a straightforward and easy-to-use instrument for investigating and comprehending how people think and the kinds of abilities and tactics they employ while addressing difficulties (Sauder & Jin, 2016). Verbalization skills are among the most important requirements for obtaining the right protocols.

In this study, investigate-and-design process is utilized as proposed in Crismond (2001) with the protocol analysis through think-aloud protocols to collect transcriptions and analyze the relation between memory and design processes. Firstly, the experiment setup was organized to collect the think-aloud protocols and analyzed them through the codes we defined.

3.1. Design of the Quasi Experimental Model

This study applies a quasi-experiment model to trigger the memory effect on the design process. This quasi-experimental model is based on the two-step experiment, stage 1/investigate, and stage 2/redesign, involving ten architect participants.

The quasi-experimental model with a two-stage (review and redesign) design combines practical application with analysis, unlike abstract theoretical models and limited observational studies. This approach enables exploring design cognition from a dynamic perspective, not only with theoretical or observational limitations, but also by providing applicable insights based on real-world design scenarios.

In our study, the independent variable of the quasi-experimental method is the previously shown images (investigate phase), while the dependent variables are the design process (redesign phase). The quasi-experimental model is employed due to the absence of any manipulation of the independent variables, the lack of a control group, and the goal of understanding the direct effects on the dependent variables. The independent variable aims to trigger memory retrieval in the design process and to understand the relation between memory retrieval states and design action.

The first stage prepares the participants for the think-aloud-experiment. It presents twenty architectural images, each representing a different architectural housing project's facades with various scales worldwide. The selection criteria of the architectural images to be shown to the participants are visually and design-wise diverse examples not to create a design fixation bias. So, the visuals contain random styles from architectural facades. The participants are asked to study the projects shown one day before the think-aloud experiment. In the second stage of the experiment, the think-aloud procedure is applied. At the beginning of the experiment for stage 2, architects are tasked with designing a new two-story house facade using pen, pencil, and paper, and they are told that they can do free recalls from their early studied building facades. In this stage, the subjects are asked to think aloud to express their internal design states. During stage 2, subjects rely only on their memory; no signals are provided during the experiment. Figure 1 represents the visuals from investigate and the sketches of participants from design phase.



Figure 1: Examples of façades presented during the 'investigate' phase and corresponding design sketches created by participants in the 'design' phase.

Data acquired from the recordings is analyzed using a coding scheme that has been created. The first stage of the experiment to examine the examples is 30 minutes, and the second stage is agreed to be 15 minutes for each participant. Both stages of the experiment are illustrated in Figure 2.

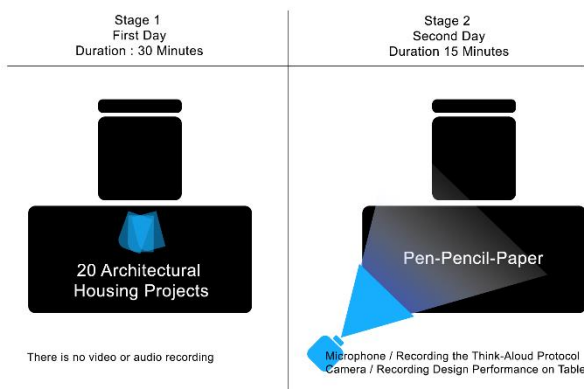


Figure 2. Diagram of the Experimental Setup Used in

Both Investigation and Redesign Stages, Illustrating Key Components and Processes (by the Authors)

3.2. Participants

3.2.1. Participants overview

This experiment consists of ten architect participants. The participants' ages ranged between 25 and 30 and were early-career professionals. The selection of this early-career professional group may also minimize the potential effects of design fixation in the experiment and help to obtain a more homogeneous group of participants.

3.2.2. Ethical consideration

Before the experiment, participants were informed that the recordings would not show any personal details about their identity and voices and that only the researcher could use and analyze them in private after signing consent letters from the participants.

After participants sign consent papers allowing the use of their data, this experiment is recorded (audio and video). This study was conducted in accordance with the ethical standards set forth by the Altınbaş University Scientific Research and Publication Ethics Committee and received approval from the Scientific Research and Publication Ethics Committee at Altınbaş University. The ethical committee approval number for this study is 2024/14 and the approval date is 02.05.2024.

3.2.3. Segmentation and Coding

Data transcription, the meticulous first step of protocol analysis, was undertaken carefully. 150 minutes of verbalization data was meticulously transcribed for ten experiments, each having 15-minute recordings. After the transcription of the verbal data, the segmentation phase is completed.

The subject's smallest meaningful moves are called segments. Firstly, to encode the verbal data, the smallest meaningful parts are extracted from the verbal data; in other words, attention/move shifts are decided on the protocols. After segmentation of the protocols, we obtained 29, 19, 21, 20, 24, 18, 33, 24, 21, and 25 segments for each ten experiments, respectively.

The second phase, equally significant, involves assigning a code to each segmentation so that the changes in the subjects' activity can be examined. To complete the coding phase, a coding scheme must be meticulously organized according to the research question, which aims to understand the relation of the moves from the design and memory phases. The coding scheme used in this paper is taken from Sauder and Jin (2016) but is reconfigured according to experiment

purposes. We designed two categories: design action and retrieval action (Table 1).

Table 1. Segmentation and coding table

Experiment	Codes	Description
Design action	Propose	Starting a new idea about the facade
	Evaluate	Determinate whether to continue or make changes to the design
	Analyze	Checking the current step of the design
Retrieval action	Recognition	Familiarity - Knowing the details with cues
	Recall	Retrieving details from memory without any cues / Free Recall
	Guess	Feeling as knowing experience

Design action includes propose, evaluate, analyze actions which are the essential activities of a design process. Retrieval actions contain recognition, recall, and guessing actions to test the memory states of the cognitive actions.

Propose action stands for the ideation processes, evaluate is the determination of whether to continue or make changes, and analyze is the current state of the experiment's examination.

Recognition occurs when a cue is available and is defined as knowing the available cue. Recall is the retrieval process of memory without any cues, and in this experiment, free recall is applied. Free recall permits subjects to recall the studied items in any order (Cleary, 2018). Guessing is the feeling of knowing the retrieval process.

During the coding process, we followed different criteria for all the codes. After segmenting each design move, we analyzed each segment using the code definitions in Table 1. Firstly, the related move in the segment must semantically fit the code definitions in Table 1. Secondly, there were some obvious clues regarding the codes. Participants mainly repeat the verb “remember” or a similar verb for remember code. This helped us to find the remember code easily.

Such a case is also valid for the guess action, as the participant directly spells the word “guess” when guessing something. For the recognition task, we look at some recognition clues in the segments, using words such as “obvious,” “I see,” and “I know this.” This kind of phrase conveys familiarity or knowing the details with some cues. For design actions, if a designer verbally or visually creates or adds a new idea about the facade, we directly define these segments as proposed. If there is a decision about the proposal as “this fits” or “*the proposal can be..*” we coded it as evaluate action. In the analysis code, if the participant inquiries about the relations and inherited structure of the proposed ideas, then we code it as analyze code. In Table 2 we represent some partial examples from the experiments showing the transcript samples and their related codes.

Table 2. Example coding scheme from experiment 1, 2, 6 with transcripts

	Time Stamp	Propose	Evaluate	Analyze	Recognize	Recall	Guess
1	2:16-2:35	-	-	-	-	I remember such column in the examples.	-
	2:35-2:51	It is obvious it will be black porcline column.	-	-	It is obvious it will be black porcline column.	-	-
	2:51-2:57	I guess there were stairs somewhere.	-	-	-	-	I guess there can be stairs somewhere.
	2:57-3:26	From its form I see that I can draw one floor mass.	-	-	From its form I see that I can draw one floor mass.	-	-
	3:26-3:49	-	This mass fits.	-	-	-	-
	2:02-2:22	-	-	-	-	I remember two masses one is higher than the other	-
	2:22-3:10	-	-	I guess this relation is a question.	-	-	I guess this relation is a question.
	3:10-4:09	I will draw the stairs in this shape, I remember it was like this	-	-	-	I will draw the stairs in this shape, I remember it was like this	-
	4:09-5:01	I will add this mass as I remember seeing it in the images	-	-	-	I will add this mass as I remember seeing it in the images	-
	5:01-5:36	I see a sliding glass door here	-	-	I see a sliding glass door here	-	-
2	0:38-1:03	I know there are windows in the new classic style	-	-	I know this, there are windows in the new classic style	-	-
	1:03-1:26	-	-	-	-	I remember some louvers on the facade	-
	1:26-2:36	I guess stone can fit on this surface	I guess stone can fit on this surface	-	-	-	I guess stone can fit on this surface
	2:36-3:04	columns can be... I guess	columns can be... I guess	-	-	-	columns can be... I guess
	3:04-3:14	I guess this will be stone	-	-	-	-	I guess this will be stone

4. Findings and Discussion

We analyzed the protocols under four headings in their respective order: occurrence pattern of codes to understand the nature of simultaneous and successive patterns of codes; duration, occurrence, and average-duration-per-segment (ADpS) comparison to reveal the focus demanding codes and their similarities or differences; segment duration to measure the attention shifts for each experiment, and finally code correlation to inquire the pairwise significant relations between the design actions and retrieval actions.

4.1. Occurrence Pattern of Codes

The occurrence of the actions has a certain pattern for each experiment. The occurrence pattern reveals the

code shift behavior of the subjects (Figure 3). The code shift occurs along with the active-inactive actions and codes' simultaneous or successive occurrences. Simultaneous actions are associated actions. Successive actions can trigger actions for each other. Detailed control of the simultaneous actions reveals some action codes depend on other codes while the vice-versa may not be necessary. Nine out of ten experiments start with the propose action and the occurrence of the propose action has no specific location in the timeline of the experiments. However, analyze and evaluate actions do occur in the middle or end of the experiments instead of at the beginning of the experiment. This is a natural result of the design problem-solving process because the solution is initially proposed, evaluated or analyzed. On the other hand, this finding is parallel to the findings of Malhotra, Thomas, Carroll, and Miller (1980) in their study examining the cognitive processes in design, emphasizing that the design evaluation phase occurs after the design production phase. Additionally, figure 3 does not represent of any specific occurrence pattern of design action codes except the evaluate code. When the evaluate code is active, the other codes for both actions are inactive. The evaluation process is a stop point for understanding the existing situation of the project process; hence, evaluate code is an independent code.

Retrieval action codes follow a certain occurrence pattern and interact with the proposed code of design action. All the retrieval actions (recognize, recall, guess) always appear distinctly and successively. Jennings and Half (1980) demonstrate that recall and recognition take similar processing capacities in memory load; hence, these two memory retrieval states have some common processes. This can be why the memory retrieval states occur successively to decrease the memory load. One can recall things after recognition is activated or recognize things after recall is activated. On the other hand, this cognitive order can be a result of triggering events.

Occurrence of recognize, recall, and guess actions has an obvious association with the occurrence of propose action. Recognize, guess, and propose actions appear simultaneously while recall and propose actions occur successively.

Propose, recognize, and guess codes are the concomitant codes. Hence, these codes can be associated with each other. When the either recognize or guess code appears, propose code is always active with a small exception. However, vice-versa happens rarely. This means propose code must be always active for recognize and guess codes. Hence recognize and guess codes depend on the propose code, while propose action is independent to recognize or guess codes.

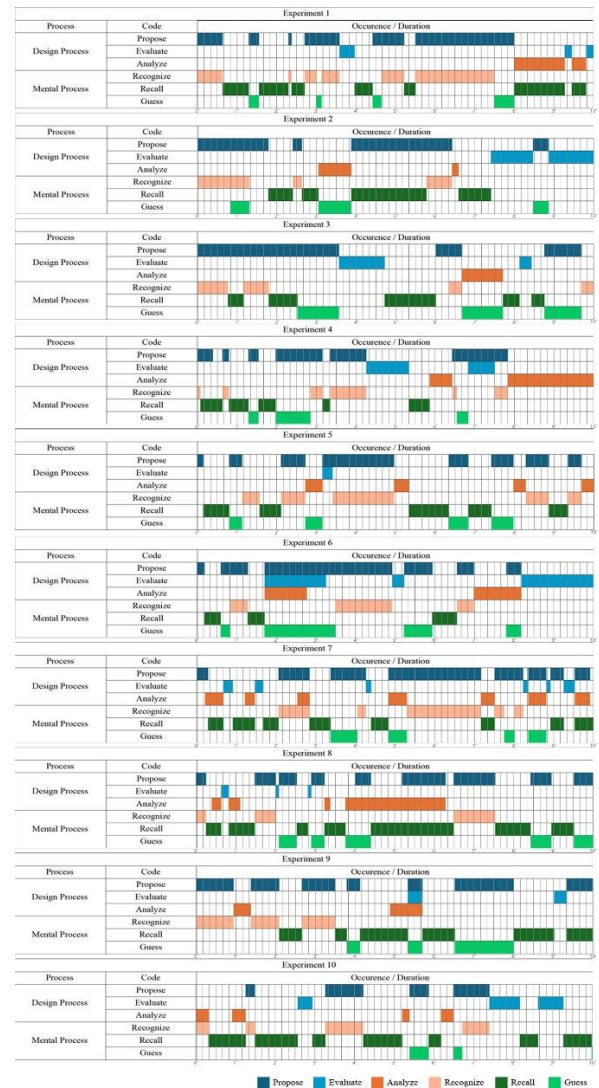


Figure 3. Chronological Representation of Design Actions and Information Retrieval Processes During the Design Task for each ten experiments (by Authors)

Recall and propose codes can be sequential actions, as after most of the recall codes, the proposed code is activated. To start a propose code, the recall code must be ended. They occur independently, but they can be the triggering factors for each other.

The occurrence of codes reveals that all the codes of retrieval action and propose code of design action are associated. This interaction is important for the exchanging design information from memory to proposal.

4.2. Duration, Occurrence and ADpS Comparison

Duration, occurrence, and ADpS are the numeric metrics that compare actions and codes. They convey information related to action/code focus, frequent action/code, and the relation between the action/code.

In this section, we compare the duration, occurrence, and ADpS metrics for actions and then analyze the average value of the metrics for the actions' codes. Figure 4 illustrates the action-based comparison, while Figure 5 represents the code-based comparison.

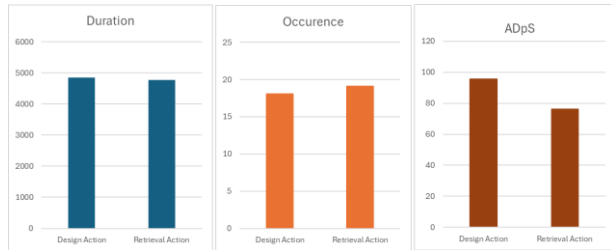


Figure 4. Bar Charts Depicting Duration (in Seconds), Occurrence (Count), and ADpS Values (Rate) for Design and Retrieval Actions (by Authors)

Overall evaluation of the actions proposes that the total duration of the design action (4854 sec.) slightly surpasses the retrieval action (4779 sec.). The number of occurrences is higher in retrieval actions (191) than in design actions (181). Interestingly, the ADpS of the design action is higher than the retrieval actions. According to these findings, average-duration-per-segment (ADpS) is higher in design action than retrieval action; hence, the design actions are more focused than retrieval actions.

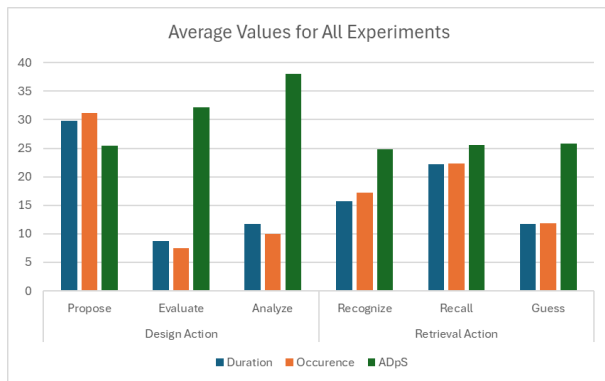


Figure 5. Normalized Bar Chart Comparing Duration (in Seconds), Occurrence (Count), and ADpS Values (Rate) for Propose, Evaluate, Analyze, Recognize, Recall, and Guess Codes (by Authors)

The action-based comparison of duration, occurrence, and ADpS reveal that throughout the experiments main structure of the design process continues along with the design action focus while retrieval actions appear as an auxiliary part of the design. In this way Design actions exhibit greater consistency compared to retrieval actions. Short-term retrieval focus shifts facilitate efficient memory scanning, while focusing in design actions helps the design decisions be consistent.

We also compare the duration, occurrence, and ADpS for each code using the average values from all the experiments.

Codes are ranked in descending order, as propose, recall, recognize, guess, analyze, and evaluate, for the duration and the number of occurrence metrics. The recall has the second highest value for both duration and the number of occurrences. So there is a parallelism for both recall, and propose action. As explained in literature analogies can be triggering actions for ideation process in design. Recall action is the main source from the memory for propose actions as this action retrieves previous design experiences, knowledge and information. Hence during the design activity for all experiments, recall becomes the most applied retrieval action state. Evaluate and analyze actions are the least applied actions, and this must be due to the limited experiment time as the participants mainly focused on the generative tasks to complete the experiment within the given time. This time limitation may create a bias in the findings.

For ADpS, the descending order is as follows: analyze, evaluate, guess, recall, propose, recognize. This order reveals the most focus demanding code to be analyze and least focus demanding action to be recognize. ADpS value of analyze action is the highest, as during the experiment, participants' examination of their proposal takes time to understand, comprehend and interpret.

In this perspective the most focus-demanding actions appears to be the analyze action. Opposed to analysis, recognition action is the least focus-demanding code. Rugg and Yonelinas (2003) indicate that one type of recognition appears as a familiarity memory state, and this action is a fast and momentary action. The findings of these experiments are parallel with Rugg and Yonelinas' assertion.

On the other hand, recall and guess actions are more focus-demanding than the recognize action. In these tasks, memory tries to retrieve previous data, increasing the focus duration. The difference between recall and guess actions is that the first is a knowing experience, while the second is a feeling-as-knowing experience, as defined by Hart (1965).

4.3. Segment Duration

Figure 6 shows segment duration to illustrate the attention shifts for each experiment and provides a holistic perspective for the whole experiment process with the number of attention shifts. When the segment duration increases, the attention duration rises, too, and vice versa. The average attention shift number for all experiments is 23,4. For 10-minute experiments, the average attention shift per minute is 2,34. For each minute, participants of the experiments shift their attention and actions between 2 or 3 times during the

experiment, and the average duration for each segment is almost 20-30 seconds. The total number of segments for each experiment ranges between 19 and 33.

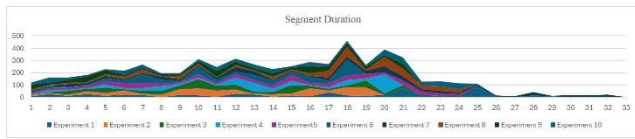


Figure 6. 2D Area graphs shows segment durations (in seconds) for each experiment. The general trend is more short segments at the start, longer segments in the middle, and fewer, shorter segments at the end (by Authors)

Figure 6 not only presents the numeric durations of the segments but also provides an insight into designers' design strategies and cognitive workload in the design problem-solving process. We observe three strategic parts of the design process through all the experiments: the initial, middle, and final phases. Each phase has different patterns in terms of segment durations. Initial segments tend to change faster to explore potential design solutions and plan the design process. In the middle segments, designers' concentration intensifies to comprehend and make design decisions, so the mid-phase of the experiment can be the critical design decision phase, and the segment durations peak. In the final segments, the designer makes the final adjustments with fewer iterations on the design as the design decision takes its final shape, the cognitive workload decreases slightly, and segment durations decrease too. Although it is defined as the initial, middle, and final phases, these phases cannot be reflected on the X-axis in Figure 6. This is because the number of segments for each experiment is different, and therefore, each experiment's initial, middle, and final phases are different. Consequently, showing 10 different initial, middle, and final stages on the same graph would be quite complicated. On the other hand, it does not aim to determine a definite initial, middle, and final phase starting and ending point. However, the general trend observed for all experiments is that there are many short-term segments at the beginning, longer-term segments in the middle, and shorter and fewer segments at the end.

4.4. Code Correlation

Considering that correlation is not causation, this section provides the pairwise relation between the codes from mental and design actions. Figure 7 shows the correlation heatmap matrix for each code duration, occurrence, and ADpS. Correlation analysis expresses the inverse or direct proportion between variables. In this experiment, we defined 18 different variables. This

section will explain the correlation between the retrieval actions and design actions.

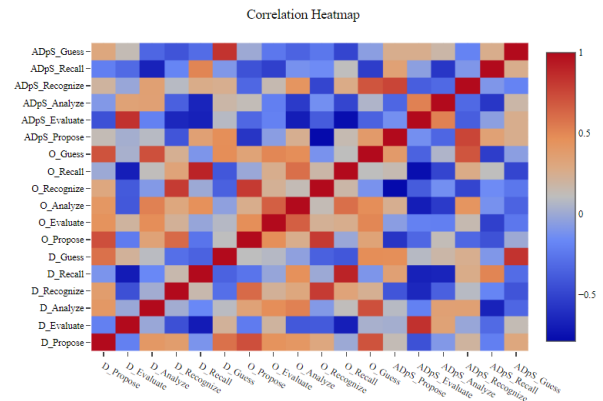


Figure 7. Heatmap Showing Correlation of Codes for Duration, Occurrence, and ADpS Values, with Red Indicating Positive Correlation and Blue Indicating Negative Correlation (by Authors)

As the duration of recall and occurrence of recall increase, the occurrence of analyze and ADpS propose increases, but ADpS of evaluate and analyze decreases. As recall increases, the occurrence of analysis increases, and ADpS evaluation and ADpS analysis decrease. As the ADpS of recall increases, the ADpS proposal increases. As a result of recall action, the need for analysis may arise, and thus, the number of analyses and focus on the proposal will increase. In this relationship, the propose segment durations may increase to understand the compatibility of the retrieved examples with the design solution. The increase in the number of analyses results from controlling the compatibility of the retrieved ideas.

On the other hand, an increase in recall occludes the focus on the evaluation and analysis process, although the number of analyses increases. This occlusion in evaluating and analyzing may increase the possibility of making design errors. Therefore, although recall is important for proposal development, too much recall may increase the probability of error. This situation parallels the literature that too much analogy can cause mistakes in design decisions. Experiments show that, intentionally or not, designers increase the number of analyses to create a strategy for avoiding errors in recall processes.

As explained in section 4.1. recall, analyze, and evaluate actions are successive and cannot occur at the same time, and the realization of one of them may cause the other to occur less. Analyzing and evaluating actions are the supporting actions for recall actions and helps to structure the memory retrieval process properly.

The correlation heatmap shows that recognition duration inversely correlates with the ADpS of the

evaluate code, while the number of propose actions directly correlates with recognition occurrences. As in the recall action, recognition action has an inverse relation with ADpS of evaluation. The number of occurrence of recognition has an inverse correlation with ADpS propose and a direct relation with the number of occurrence of propose action. During the design process, designers trigger the ideation with recognition, but recognition can still disrupt the designer's focus on a single idea. Each new recognition can trigger a new proposal; due to high number of recognitions and proposals, one cannot focus on one single proposal longer and duration-per-segment decreases for propose code; hence concentrating on a proposal for a long time becomes more difficult. The balance between the recognition and proposal actions may create an efficient design process.

The guess action correlates positively with most design actions, especially all the propose parameters. Designers apply the guess action as an auxiliary action for the design actions. Guess action, feeling-as-knowing, can be a strategic shortcut to propose a new idea. Designers may choose to guess when they make a fast decision on a proposal, and as in the recall process, not to make any mistakes, analyze and evaluate codes are activated to validity check the guessed idea.

On the other hand, the experiment durations can be longer, which can offer more flexibility in the retrieval and design actions for the experiment participants not to be in a hurry and destroy the study's findings. The other important factor to be tested must be a control group, not imposed with the investigation part before the design phase, to fully understand the effects of the retrieval states in the design process.

5. Conclusion

This paper adapts the investigate-and-redesign method while applying the protocol analysis in a quasi-experimental method to examine the nature of the retrieval mechanism throughout the design process. In summary, retrieval actions are inseparable part of the design process. Design actions are focus-demanding actions. On the other hand, retrieval actions are temporary and ephemeral actions in the design process. Recall can be one of the main sources of the propose actions. Recognition can contribute to design process, but if the number of recognition is high than it can be an interfering action in design process. Guess retrieval, feeling-as-knowing action, increases the analysis times due to reliability of the guess retrieval. Occurrence of design actions and retrieval actions shows the strong association among the propose code and recall, recognition, guess codes. Upon reviewing the entire study, it is evident that designers are shifting or modifying their strategies to minimize the error rates in design and accomplish the task in a given time.

This process clearly shows the designer's strategy optimization process. We saw that by altering the segment durations, designers adapt their process according to the time limitations. On the other hand, while retrieval actions contribute to design actions, intentionally or not, designers always develop a control strategy to rely on the retrieved information. Design strategy opens an important research question on creating an optimized problem-solving strategy that balances the retrieval and design actions.

All the analysis shows that there is a substantial difference between retrieval actions. Recall is a search mechanism in the memory; recognition is activated when it meets with a clue, and guessing is a shortcut, a feeling-as-knowing act. Guessing is an intuitive decision-making process, and it requires to be controlled. Each retrieval action can play a substantial role in the design decision-making process. Recall, recognition, and guessing have different decision-making processes; respectively, decisions depend on experience, decisions depend on clues, and decisions depend on control. Recall decisions depend on experience strategy may help the designer understand and analyze the problem,

In contrast, developing alternatives may depend on clues, so decisions based on clues and recognition retrieval action can be a good fit. Creative ideas that rely on a control mechanism can be guessing and decision-making based on a control strategy. This study opens this three decision making act as an hypothesis to be tested in the future studies. However, revealing these strategies helps designers understand their retrieval acts and organize their strategy specific to their problem definition. On the other hand, developing design strategies based on different retrieval actions in design education can help novice designers find their design problem-solving path easier.

Despite all the listed findings related to retrieval actions, the generalization of the results becomes statistically questionable due to the limited number of experiments. Hence, the limited sample fails to represent individual and other demographic differences. Moreover, limited sample size results in biased findings. Nevertheless, the study provides valuable insights and opens new hypotheses to be tested about memory retrieval states and the design process, which is the pilot study for future comprehensive studies. For future studies to increase the statistical reliability of the findings and increase the variability of the samples for different demographics, future studies can be conducted with a bigger sample size representing the real world.

Acknowledgement

The author (s) has no received any financial support for the research, authorship or publication of this study.

Authors' Contribution

Author 1 and Author 2 contributed equally to the preparation of the survey study, the design of the methodology, the analysis, the preparation of the visuals, and the writing of the manuscript.

The Declaration of Conflict of Interest/ Common Interest

No conflict of interest or common interest has been declared by the authors.

References

- Akin, Ö. (1990). Necessary conditions for design expertise and creativity. *Design Studies*, 11(2), 107-113.
- Atilola, O. and Linsey, J. (2015). Representing analogies to influence fixation and creativity: A study comparing computer-aided design, photographs, and sketches. *AI EDAM*, 29(2), 161-171.
- Casakin, H. (2004). Visual Analogy as a Cognitive Strategy in the Design Process. Expert Versus Novice Performance. *Journal of Design Research*, 4(2), 197-217.
- Chan, J., Dow, S. P. and Shunn C. D. (2015). Do the best design ideas (really) come from conceptually distant sources of inspiration? *Design Studies*, 36, 31-58.
- Cleary, M. (2018). Dependent measures in memory research: From free recall to recognition, H. Otani, B. L. Schwartz, Routledge, 19-35.
- Crismond, D. (2001). Learning and using science ideas when doing investigate-and-redesign tasks: A study of naive, novice, and expert designers doing constrained and scaffolded design work. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(7), 791-820.
- Donaldson, W. (1996). The role of decision processes in remembering and knowing. *Memory & Cognition*, 24(4), 523-533.
- Eastmen, C., Newstetter, W. and McCracken, M. (2001). Design Knowing and Learning: Cognition in Design Education, Elsevier.
- Ericsson, A. and Simon, H. A. (1980). Verbal reports as data. *Psychological Review*, 87(3), 215-251.
- Ericsson, A. (2017). Protocol Analysis, W. Bechtel, G. Graham. *Blackwell Publishing Ltd*, 425-432.
- Freund, R.D., Brelsford, J.W., Atkinson, R.C. (1969). Recognition vs. Recall: Storage or Retrieval Differences? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 21(3), 214-224.
- Gardiner, J.M., Ramponi, C. and Klavehn, A.R. (2002). Recognition memory and decision processes: A meta-analysis of remember, know, and guess responses. *Memory*, 10(2), 83-98.
- Gero, J.S. and Milovanovic, J. (2020). A framework for studying design thinking through measuring designers' minds, bodies, and brains. *Design Science*, 6, e19.
- Goldschmidt, G. (1991). The dialectics of sketching. *Creativity Research Journal*, 4(2), 123-143.
- Hart, J. T. (1965). Memory and the feeling-of-knowing experience, *Journal of Educational Psychology*.
- Jennings, J. R. and Hall Jr, S. W. (1980). Recall, recognition, and rate: Memory and the heart. *Psychophysiology*, 17(1), 37-46.
- Jia, M., Jiang S. Ju, J. and Qi. J. (2022). Toward understanding sources and influences of design fixation: A focus on example stimuli and background of novice designers. *Journal of Mechanical Design*, 145(5).
- Koronis, G., Casakin, H., Silva, A. and Siew, J. W. W. (2021). *The use of analogies and the design brief information: Impact on creative outcomes*. in Conf. International Design Engineering Technical Conferences, Online.
- Koronis, G., Casakin, H., and Silva, A. (2023). An experimental comparison of analogy representation effects on creative design outcomes. *Journal of Creative Behavior*, 57(4), 711-729.
- Malhotra, Thomas, J. C., Carroll, J. M. and Miller, L. A. (1980). Cognitive processes in design. *International journal of man-machine studies*, 12(2), 119-140.
- Novick, L. R. (1988). Analogical transfer, problem similarity, and expertise. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 14(3), 510-520.
- Rugg, M.DM. and Yonelinas A.P. (2003). Human recognition memory: a cognitive neuroscience perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(7), 313-319, doi: 10.1016/s1364-6613(03)00131-1.
- Sauder, J. and Jin, Y. (2016). A qualitative study of collaborative stimulation in group design thinking J. S. Gero, P. Papalambros. *Cambridge University Press*, 1-25.

- Schacter, D.L. (1995). Memory distortion: how minds, brains, and societies reconstruct the past, Harvard University Press.
- Shen, D., Yao, X., Bao, D. and Yu, Y. (2023). Content categorization for memory retrieval: A method for evaluating design performance. *PloS one*, 8(1).
- Smith, D. (2014). Age differences in encoding, storage, and retrieval," L. Poon, J. Fozard, L. Cermak, D. Arenberg, L. Thompson, Psychology Press, 23-45.
- Someren, W. V., Barnard, Y.F. and Sandberg, J. A. C. (1994). Sandberg, The think aloud method: a practical approach to modelling cognitive, UK: Academic Press.
- Tulving, E. (1985). Memory and consciousness. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 26(1), 1-12.
- Uner, O., (2018). Do Recall and Recognition Lead to Different Retrieval Experiences? *The American Journal of Psychology*, 135(1), 33-43.
- Verstijnen, M., Van-Leeuwen, C., Goldschmidt, G., Hamel, R. and Hennessy, J. M. (1998). Creative discovery in imagery and perception: Combining is relatively easy, restructuring takes a sketch. *Acta Psychologica*, 99(2), 177-200.
- Watkins, M.J. and Gardiner J.M. (1979). An appreciation of generate-recognize theory of recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 18(6), 687-704.
- Watkins, M.J., Tulving, E. (1975). Episodic memory: When recognition fails. *Journal of Experimental Psychology: General*, 104(1), 5-29.
- Watson, B. (1920). Is Thinking Merely Action of Language Mechanism? *British Journal of Psychology. General Section* ,11(1), 87-104.
- William, F. (1891). Memory. Its Logical Relations and Cultivation, Second Edition, London: Baillière, Tindall and Cox.
- Yuan, H., Liu, M., Lu, K., Yang, C. and Hao, N. (2023). The effect of example abstraction on creativity from the perspectives of example modality and generality. *Thinking Skills and Creativity*, 47, 101234.

Gd ve $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ BİLEŞİĞİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN VE MANYETİK SOĞUTMA PERFORMANSLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Arda ZAİM^{1*}, Haydar ARAS², Cumhur Gökhan ÜNLÜ³

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Eskişehir

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-2602-3169>

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-8131-6426>

³ Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Denizli

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-2554-5886>

Anahtar Kelimeler	Öz
Manyetokalorik malzeme Manyetokalorik etki Manyetik soğutma	<i>Çalışmada oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda çalışan manyetik soğutma sistemlerinde manyetokalorik malzeme olarak kullanılan Gd elementinin ve $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin yapısal özellikleri ve manyetik soğutma performansı deneysel olarak incelenmiştir. $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiği sol-jel yöntemiyle sentezlenmiş, her iki manyetokalorik malzemenin yapısal özellikleri SEM ve EDX analizi gerçekleştirilerek detaylı bir şekilde ele alınmıştır. SEM analizinde Gd elementi için tane boyutlarının homojen bir dağılıma sahip olmadığı, tane boyutlarının 2-20 μm aralığında değiştiği ve kübik benzeri formda sert köşeli bir yapıda olduğu belirlenmiş olup; $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinde ise daha küçük tane boyutlu, küresel geometride, süngerimsi yapıda, homojen dağılımlı ve düşük boşluklu bir yapı gözlenmiştir. EDX analizinde Gd elementinde yapının tamamen Gd'den oluştuğu, sol-jel yöntemiyle sentezlenen perovskit manganit bileşiğinde istenilen yapı karakterizasyonunun elde edildiği tespit edilmiştir. 1.2 T manyetik akı yoğunluğunda gerçekleştirilen zamana bağlı sıcaklık değişimi deneylerinde 250 çevrim sonrasında kritik kullanım faktörü olarak tanımlanan $\phi=15$'de; Gd elementinde 2.204 K, $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinde ise 1.472 K sıcaklık farkı elde edilmiştir.</i>

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF STRUCTURAL PROPERTIES AND MAGNETIC REFRIGERATION PERFORMANCE OF Gd AND $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ COMPOUNDS

Keywords	Abstract
Magnetocaloric materials Magnetocaloric effect Magnetic refrigeration	<i>In this study, the structural properties and magnetic cooling performance of Gd element and $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskite manganite compound used as magnetocaloric material in magnetic cooling systems operating at temperatures close to room temperature were experimentally investigated. $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskite manganite compound was synthesized by sol-gel method, and the structural properties of both magnetocaloric materials were examined in detail by performing SEM and EDX analysis. In SEM analysis, it was determined that the grain sizes for Gd element did not have a homogeneous distribution, the grain sizes varied between 2-20 μm and had a cubic-like hard-cornered structure; In $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskite manganite compound, a smaller grain size, spherical geometry, sponge-like structure, homogeneous distribution and low void structure were observed. In the EDX analysis, it was determined that the structure in the Gd element was largely composed of Gd, and the desired structure characterization was obtained in the perovskite manganite compound synthesized by the sol-gel method. In the time-dependent temperature change experiments carried out under a magnetic field density of 1.2 T, a temperature difference of 2.204 K was obtained in the Gd element and 1.472 K in the $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskite manganite compound at $\phi=15$ defined as the critical utilization factor after 250 cycles.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 17.12.2024

Submission Date : 17.12.2024

Kabul Tarihi : 03.03.2025

Accepted Date : 03.03.2025

* Sorumlu yazar: arda.zaim@gmail.com

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1603193>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

1881 yılında Alman fizikçi Emil Gabriel Warburg bir demir örneğini manyetik alan kaynağına maruz bıraktığında birkaç mK seviyesinde ısındığını, manyetik alan kaynağı etkisinden uzaklaştırıldığında ise soğuduğunu gözlemleyerek manyetokalorik etkiyi keşfetmiştir (Vuarnoz, Kitanovski, Gonin, Egolf ve Kawanami, 2011). Manyetokalorik etkinin fiziksel orijini, malzeme üzerinde uygulanan manyetik alanın malzemenin entropisinde değişiklik meydana getirmesidir. Manyetokalorik malzemeye manyetik alan uygulandığında manyetik momentlerin uygulanan manyetik alana paralel olacak şekilde dizilmesi nedeniyle sıcaklığı artmakta, manyetik alan kaldırıldığında ise manyetik momentlerin dizilimi eski haline döndüğü için sıcaklığı azalmaktadır (Pecharsky ve Gschneidner, 1999).

Manyetokalorik etkinin keşfedilmesi, manyetokalorik malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar ve manyetik soğutma teknolojilerinin geliştirilmesi; konvansiyonel buhar sıkıştırma soğutma sistemlerine alternatif olabilecek yeni bir sistem ortaya koymaktadır. Manyetik soğutma, manyetokalorik etki gösteren bir malzemenin manyetik alana maruz bırakılarak ısınma ve manyetik alandan uzaklaştırıldığında meydana gelen soğuma etkisini bir ısı transfer akışkanına aktarabilen, bu etki sayesinde ısı değiştiriciler aracılığıyla dış ortamla ısı alışverişini yapabilen bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Eriksen ve diğ., 2015).

Manyetik soğutma sistemleri, konvansiyonel buhar sıkıştırma soğutma sistemlerinin aksine CFC ve HCFC bazlı ısı transfer akışkanları yerine etil alkol + saf su karışımlarını, ısı transfer akışkanı olarak kullanmaktadır. Önlenemeyen tesisat kaçakları nedeniyle akışkanların atmosfere sızması halinde ozon tabakası olumsuz olarak etkilenmemektedir. Isı transferi süreçlerinde akışkanın faz değişiminden yararlanılmadığı için yapıda kompresöre ihtiyaç duyulmamaktadır. Manyetik soğutma sistemlerinde kompresör bulunmadığından, konvansiyonel buhar sıkıştırma soğutma sistemlerde gözlenen gürültü, mekanik titreşim, gibi olumsuzluklar gözlemlenmez.. Manyetik soğutma sistemleri belirtilen avantajlarından dolayı çevre dostu ve daha az enerji tüketen yenilikçi bir uygulamadır (Aprea, Greco ve Maiorino, 2016).

Manyetik soğutma sistemlerinin avantajlarından bir diğeri ise soğutma performansdır. Konvansiyonel buhar sıkıştırma soğutma sistemlerinin teorik verimliliği tersinir Carnot çevriminin yalnızca %10'una kadar ulaşabilirken, manyetik soğutma sistemlerinde bu oran %60'lara kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle manyetik soğutma sistemlerinin hem çevreye olan olumlu etkileri hem de enerji verimliliği potansiyeli sayesinde gelecekte yapılacak olan araştırma geliştirme faaliyetlerinin de desteğiyle kendisine önemli bir

kullanım alanı edineceği beklenmektedir. (Zimm ve diğ., 1998).

Manyetik soğutma sistemlerinin birçok avantajı olmasına rağmen, ticari olarak henüz yeterli olgunluğa ulaşamamıştır. Konvansiyonel buhar sıkıştırma sistemler ile kıyaslandığında daha yüksek üretim maliyetleri, yüksek sıcaklık farkı elde edilebilen manyetokalorik malzemelerin tedarik zorluğu, manyetik alan kaynağı olarak kullanılan kalıcı mıknatısların kısıtlı manyetik alan gücü, yüksek tekrarlanabilirlik hassasiyeti gerektiren karmaşık mekanik konstrüksiyon gibi sınırlayıcı etkenler söz konusudur (Alahmer, Al-Amayreh, Mostafa, Al-Dabbas ve Rezk, 2021).

Önlenemeyen nüfus artışıyla birlikte büyük bir hızla gelişen teknoloji, hızla artan enerji kullanımı, tedarik zorlukları, enerji kaynaklarının sınırlı oluşu ve şehirleşmenin artması gibi hususlar ozon tabakasının incilmesi, küresel ısınma ve iklim değişikliği konularındaki endişeleri beraberinde getirmektedir. Konvansiyonel buhar sıkıştırma sistemler dünya üzerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Buhar sıkıştırma soğutma sistemlerinin tükettiği enerji miktarı dünya üzerindeki şehirlerin büyük bir kısmında toplamda tüketilen enerjinin %30'u ile %50'sini oluşturmakta olup, özellikle yaz aylarında ticari olarak gelişmiş bazı bölgelerde bu oran %50'yi de aşmaktadır. Bu doğrultuda konvansiyonel buhar sıkıştırma soğutma sistemlerine alternatif olabilecek; soğutma performansı yüksek, düşük enerji tüketimli ve çevre dostu manyetik soğutma sistemlerinin geliştirmesi dünya enerji tüketiminin azaltılması ve enerji yoğunluğunun düşürülmesinde büyük bir etkiye sahip olacaktır (Li ve diğ., 2014).

Manyetokalorik etkinin gözlemlenebildiği en önemli örneklerden birisi Gd ve bunun alaşımlarıdır. Gd ve alaşımları manyetik özellikleri sayesinde manyetik soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bahl ve Nielsen, 2009). Ayrıca bu manyetokalorik malzemeler ikinci dereceden faz geçişlerine tabi oldukları için oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda çalışan manyetik soğutma uygulamaları için literatürde bilinen en iyi malzeme olarak değerlendirilmektedir (Yu, Gao, Zhang, Meng ve Chen, 2003).

Günümüzde bilinen en iyi özelliklere sahip manyetokalorik malzemelerden birisi olan Gd'nin bile manyetokalorik etki ile elde edilebilen sıcaklık farkları oldukça düşüktür. Bu nedenle, manyetokalorik etkinin soğutma uygulamalarında kullanılabilirliğini tanımlamak oldukça güçtür. Bu teknik engel aktif manyetik rejeneratör (AMR) teknolojisinin manyetik soğutma sistemlerine entegre edilmesiyle aşılmıştır. Rejeneratör, manyetik soğutma sistemlerinde sistem tarafından atılan ısıyı çevrimin herhangi bir aşamasında geri kazanıp, aynı döngünün başka bir aşamasında sisteme geri göndermektedir. Bu süreç soğutma

kapasitesinin etkin şekilde kullanılmasını sağlayarak, gerçek entropi değişimlerini artırıp daha büyük sıcaklık farkları elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu nedenle manyetik soğutma uygulamalarında manyetokalorik malzeme seçimi ve kullanımı istenilen soğutma performansının elde edilebilmesi için büyük bir önem taşımaktadır (Rowe ve Tura, 2006).

Bu çalışmada oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda çalışan manyetik soğutma uygulamalarında manyetokalorik malzeme olarak yaygın kullanılan Gd elementinin ve Gd yerine kullanılabilecek daha ekonomik maliyetli ve üretimi kolay $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiği sol-jel yöntemiyle sentezlenmiş, her iki manyetokalorik malzemenin yapısal özellikleri SEM ve EDX analizleri gerçekleştirilerek detaylı olarak ele alınmıştır. Bununla birlikte Gd ve $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ 'ün manyetik alan altında sıcaklık değişimi ölçümleri oluşturulan deney düzeneği ile gerçekleştirilmiş, karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve manyetik soğutma uygulamalarında kullanılabilirliği irdelenmiştir.

2. Literatür Araştırması

Son yıllarda manyetik soğutma uygulamalarında Gd yerine alternatif olarak kullanılabilecek daha ekonomik ve manyetokalorik özellikleri Gd'ye yakın olan perovskit manganit bileşikler üzerinde çeşitli bilimsel araştırmalar gerçekleştirilmektedir.

Phan ve Yu (2007) Gd yerine alternatif olarak manyetokalorik malzeme kullanılabilecek perovskit manganitlerin manyetokalorik özelliklerini kapsamlı bir şekilde karşılaştırmış, aktif manyetik rejeneratif soğutma çevrimlerinde perovskit manganit bileşiklerinin kullanılabilirliği irdelenmiş ve manyetik entropi değişimlerini ölçümlemiştir. Perovskit manganit bileşiklerinin daha ekonomik maliyetli ve kolay elde edilebilir olması nedeniyle 100 – 375 K sıcaklık aralığında çalışan küçük ölçekli manyetik soğutma uygulamalarında gelecekte daha yaygın olarak kullanılacağı belirtilmiştir.

Hagary ve diğ. (2009) Cu katkılı perovskit manganit bileşiklerinin manyetokalorik özelliklerine yönelik çalışmalar gerçekleştirmiş, Cu katkısının bileşik üzerinde düşük manyetik alan kuvvetinde daha yüksek entropi değişimine sebep olduğunu gözlemlemiş ve bu özellikler ışığında Cu katkılı perovskit manganitlerin oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda çalışan manyetik soğutma uygulamalarında kullanılabilecek alternatif bir manyetokalorik malzeme olduğunu tespit etmiştir.

Wang, Qin, Ren ve Hu (2013) $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin manyetoempedansı ve tane sınırı etkisi konularında çalışmalar gerçekleştirmiş, bileşiği sol-jel metoduyla sentezlemiş, dikdörtgen geometrideki numunenin SEM ve XRD analizlerini gerçekleştirmiştir. Manyetik alana bağlı sıcaklık ölçümlerinde ferromanyetik fazdan paramanyetik faza geçiş sıcaklığı

olan Curie sıcaklığını 323 K olarak tespit etmiş ve oda sıcaklığındaki uygulamalar için potansiyel bir manyetokalorik malzeme olduğunu belirtmiştir.

Kumar, Rubi ve Mahendiran (2016) $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin oda sıcaklığına yakın sıcaklıklardaki manyetokalorik etkisi konusunda çalışmalar gerçekleştirmiş, çalışma gerçekleştirdikleri numuneyi La_2O_3 , BaCO_3 ve Mn_3O_4 bileşiklerini kullanarak katı hal reaksiyon yöntemi ile elde etmiştir. Elde edilen dikdörtgen geometrilili numune üzerinde XRD analizi ve manyetik alana bağlı sıcaklık ölçümleri gerçekleştirmiş, ferromanyetik fazdan paramanyetik faza geçiş sıcaklığı olan Curie sıcaklığını 326 K olarak tespit etmiş ve düşük manyetik alan şiddetinde manyetokalorik etki gösterebilen bir manyetokalorik malzeme olduğunu belirtmiştir.

Ayaş (2017) La ile Gd yer değiştirmesinin, sol-jel yöntemi ile üretilmiş, $(\text{La}_{0.9}\text{Gd}_{0.1})_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ manyetik soğutucu örneğinde yapısal manyetik ve manyetik soğutucu özellikler üzerine olan etkilerini araştırmıştır. Manyetik alana bağlı mıknatıslanma ölçümlerinde sentezlenen bileşiğin Curie sıcaklığını 190 K olarak belirlemiş, en yüksek manyetik entropi değişim değerini ise 50 kOe manyetik alan şiddeti altında 2.5 J/kg.K olarak tespit etmiştir. Sentezlenen bileşiğin orta sıcaklık aralığında tersinir bir manyetokalorik etki göstermesi sebebiyle manyetik soğutucu bir malzeme olarak kullanılabilir olduğunu belirtmiştir.

Kokila ve diğ. (2018) EuMnO_3 perovskit manganit bileşiğinin yapısal ve manyetokalorik özelliklerini araştırmış, bu özellikleri literatürde yer alan diğer manyetokalorik etki gösteren nadir toprak manganitleri ve alaşımları ile karşılaştırmış, EuMnO_3 'ün düşük manyetik alan şiddetinde göstermiş olduğu yüksek bağlı soğutma gücü nedeniyle manyetik soğutma uygulamalarında kullanılabilirliğini belirlemiştir.

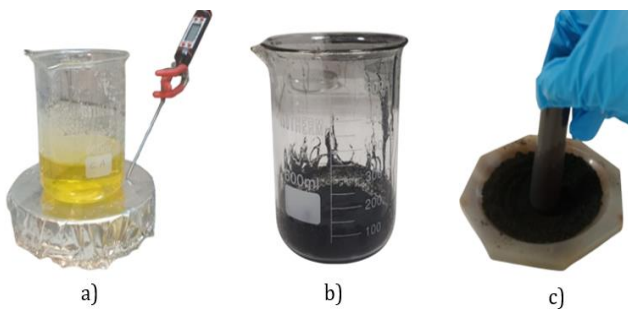
Samancıoğlu (2018) $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğini sol-jel yöntemiyle sentezlemiş, SEM, EDS ve XRD analizlerini gerçekleştirmiştir. Bununla birlikte sentezlenen bileşiğin mıknatıslanma ölçümlerinde ferromanyetik fazdan paramanyetik faza geçiş sıcaklığı olan Curie sıcaklığını 341 K olarak belirlemiş, manyetik entropi değişimi hesabında 1 T manyetik alan şiddeti altında görece soğutma gücünü 38 J/kg olarak tespit etmiştir. Entropi değişiminin 341 K civarlarında yayvan bir geçiş göstermesi nedeniyle bileşiğin manyetik soğutma uygulamalarında kullanılabilir olduğunu ancak oda sıcaklığından daha yüksek bir değerde Curie geçiş sıcaklığı sergilemesi nedeniyle oda sıcaklığında çalışan manyetik soğutma uygulamalarında verimli bir performans elde edemeyeceğini ve yapılan hesaplamalarla soğutma gücünün literatürde yer alan değerlerden daha düşük soğutma gücüne sahip olduğunu belirtmiştir.

Ünlü (2018) $\text{La}_{0.7}\text{Nd}_{0.1}\text{K}_{0.2}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin yapısal ve manyetik akışkan hipertermi özelliğini araştırmış, manyetik analizlerin sonucunda bileşiğin oda sıcaklığında ferromanyetik, kısmen paramanyetik faza ait mıknatıslanma değerinin $0.23 \text{ Am}^2/\text{kg}$ ve koarsivite değerini 0.005 T olarak tespit etmiş, bileşiğin manyetik soğutma uygulamalarında kullanılabilir olduğunu belirlemiştir.

Ayaş, Çetin, Akça, Akyol ve Ekicibil, (2023) perovskit manganit bileşiklerinin özelliklerindeki güncel gelişmeler üzerine araştırmalar gerçekleştirmiş, yüksek geri dönüşümlü entropi değişimi ve oda sıcaklığındaki manyetik soğutma uygulamaları için geniş soğutma aralığı özellikleri nedeniyle bu bileşiklerin gelecekteki manyetik soğutma uygulamalarında kendine önemli bir yer edineceğini belirtmiştir.

3. Materyal ve Yöntem

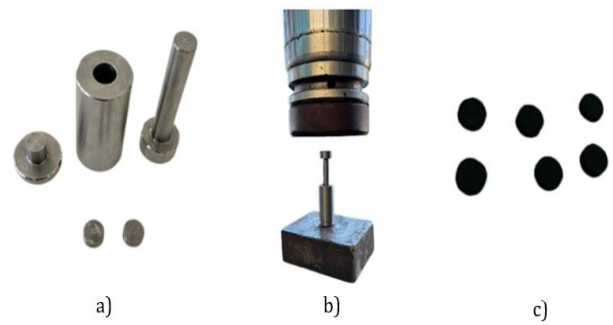
Çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğini sentezlemek için sol-jel yöntemi kullanılmıştır. Bileşenlerden ne kadar kullanılması gerektiği hesaplandıktan sonra, bileşenler suda çözülürerek solüsyon haline getirilmiştir. Şekil 1.'de (a) gösterildiği üzere solüsyon haline getirilen karışım 80°C 'ye kadar ısıtılmış, homojen hale gelmesi için manyetik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Şekil 1.'de (b) görüleceği üzere, sıcaklık kademeli olarak artırılarak ve yapıya etilen glikol eklenerek jelleşme sağlanmıştır. Tamamen jelleşen karışım 500°C 'ye kadar düzenli rejimde ısıtılmıştır. Sonrasında kül fırınında 12 saat aynı sıcaklıkta yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yakma işleminden sonra toz halinde küçük taneli bir yapı elde edilmiştir. Toz haldeki malzeme Şekil 1.'de (c) görüldüğü üzere tane boyutunun küçültülmesi ve homojenize bir yapı sağlamak amacıyla agat havan içerisinde öğütülmüştür.



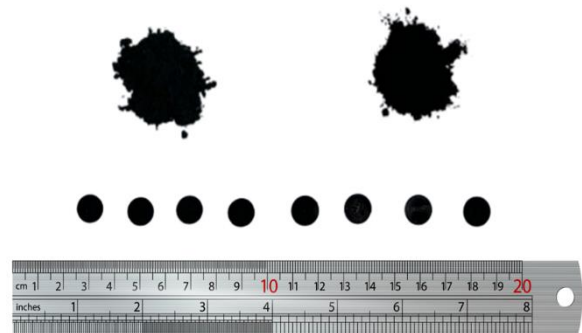
Şekil 1. Sol-jel yöntemiyle perovskit manganit bileşiğinin sentezlenmesi.

Şekil 2.'de (a) gösterildiği üzere sol-jel yöntemiyle sentezlenen $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin ve toz halde bulunan Gd elementinin yapısal özelliklerinin incelenmesi ve manyetik soğutma performansının belirlenmesi amacıyla bileşenler $\varnothing 10$

mm çap ve 5 mm yükseklikte silindir formunda deney numuneleri haline getirilmiştir. Bunun için kalıp tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.'de (b) görüleceği üzere toz yapıda malzemeler hidrolik silindir ile kalıpta preslenerek ısıtılma işlemi öncesi geometrisinin bozulmaması için sıkıştırılmıştır. Şekil 2.'de (c) gösterildiği üzere yapı kristalizasyonunun gerçekleşmesi ve manyetik özelliklerin kaybedilmemesi amacıyla 1100°C 24 saat ısıtılma işlemi tabi tutularak rijit bir yapıya dönüştürülmüştür. Şekil 3.'de ise toz halindeki numuneler; preslenmiş ve sinterlenmiş numuneler bir arada gösterilmektedir. Numunelerin sinterleme prosesi sonrasında mekanik dayanımlarında ciddi derecede iyileşme meydana gelmiştir.



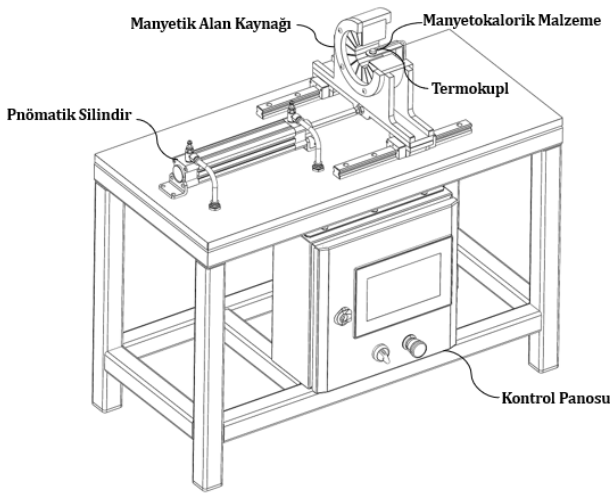
Şekil 2. Kalıp imalatı, presleme süreci ve numuneler.



Şekil 3. Deney numuneleri.

Gd ve $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin soğutma performansının belirlenmesi için Şekil 4.'de gösterilen deney düzeneği ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan kaynağı, Hallbach dizilimi ile oluşturulmuş 16 adet N50 NdFeB kalıcı mıknatıstan meydana gelmekte olup, alan boşluğunda 1.2 T manyetik akı yoğunluğu elde edilmektedir. Hallbach dizilimi ile dizinin merkez noktasındaki manyetik alan daha güçlü hale getirilirken diğer taraftaki manyetik alan ise sıfıra yakın bir seviyeye indirilmektedir. Bu sayede bir elektromıknatısın gerektireceği herhangi bir güç girişi veya soğutmaya ihtiyaç duyulmadan çok yüksek ve düzgün akı yoğunlukları elde etmek mümkün olmaktadır. Manyetik

alan kaynağı, lineer yatak ile tablaya mesnetlenmiş olup; pnömatik silindir ile manyetokalik malzeme üzerinde konumlanıp, manyetokalik malzemeden uzaklaşarak manyetizasyon ve demanyetizasyon işlemlerini sırasıyla gerçekleştirmektedir. Manyetokalik malzeme üzerine entegre edilen hassas termokupl ile sıcaklık değişimleri ölçümlenip, PLC ile kayıt altına alınmaktadır. Pnömatik silindir üzerinde bulunan hız ayar valfleri ile konumlanma hızları değiştirilebilmektedir. Manyetizasyon ve demanyetizasyon süreleri ise PLC ile kontrol edilmektedir. Çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

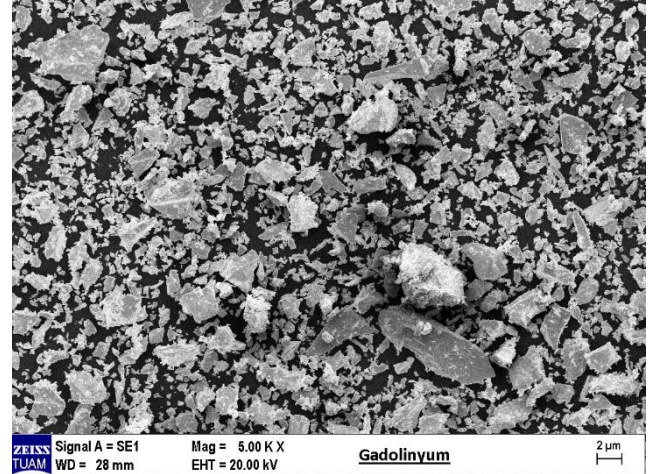


Şekil 4. Deney düzeneği.

4. Bulgular

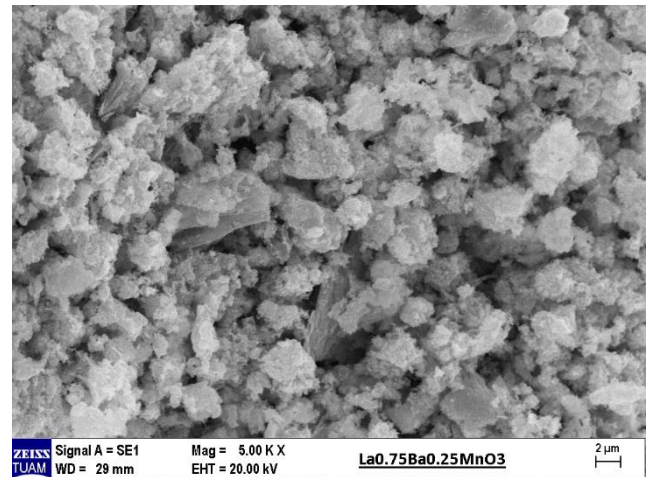
Manyetokalik malzemelerin tanecik yapılarının ve yüzey morfolojilerinin incelenmesi için tungsten filament ile çalışan LEO 1430 VP model SEM cihazı kullanılmıştır. İlgili cihaz üzerinde ikincil elektron, geri yansıyan elektron ve RÖNTEC QX2 marka model X flash tipi X ışınları (EDX) dedektöründen de faydalanılmıştır. Bu cihazla görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleri kullanılarak kalitatif elementer analizler de gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.'de Gd'ye ait 5000 büyütmeli SEM analiz sonucu gösterilmektedir. Şekil 6. incelendiğinde Gd elementi için tane boyutlarının homojen bir dağılıma sahip olmadığı, tane boyutlarının 2-20 µm aralığında değiştiği, kübik benzeri formda sert köşeli bir yapıda olduğu belirlenmiştir. Mikron seviyelerinde taneler arası boşlukların bulunması nedeniyle sıkıştırılabilirlik özelliğinin iyi olmadığı görülmüştür.



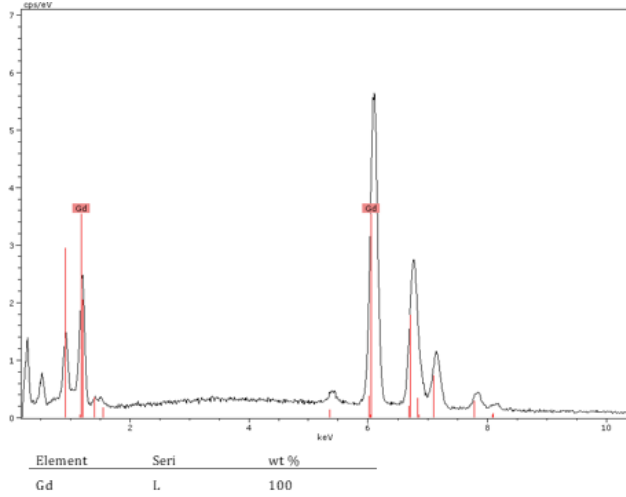
Şekil 5. Gd SEM analiz görüntüsü.

Şekil 6.'da ise $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin 5000 büyütmeli SEM analiz sonucu yer almaktadır. Gd'ye kıyasla daha küçük tane boyutlu, süngerimsi formda, tane boyutlarının daha homojen dağılımlı olduğu ve sıkıştırılabilirlik özelliğinin iyi olduğu görülmüştür.

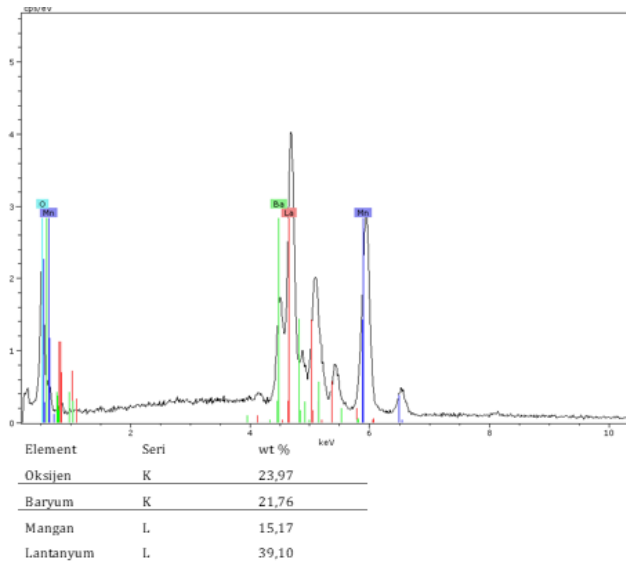


Şekil 6. $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ SEM analiz görüntüsü.

Şekil 7.'de Gd ve Şekil 8.'de $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğine ait EDX analiz grafikleri yer almaktadır. Şekil 7.'de görüldüğü üzere yapının tamamının Gd'den oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 8.'de sol-jel yöntemiyle sentezlenen perovskit manganit bileşiğinin ise O, Mn, Ba ve La elementlerinden meydana geldiği, diğer pik noktalarının bileşik içerisinde safsızlığa neden olan maddeler olduğu, ancak küçük safsızlıkların malzeme karakterizasyonuna ihmal edilebilir derecede etkili olduğu varsayıldığında sol-jel ile sentezleme ve sinterleme süreçlerinde istenilen yapının elde edildiği, ilave bir karışımın olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 7. Gd EDX analizi.

Şekil 8. La_{0.75}Ba_{0.25}MnO₃ EDX analizi.

Gd ve La_{0.75}Ba_{0.25}MnO₃ perovskit manganit bileşiğinin 1.2 T manyetik akı yoğunluğunda, 0.10-0.15 ve 0.20 m/s manyetik alan kaynağı hareket hızlarında, farklı kullanım faktörleriyle (φ) sıcaklık değişimi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Burada (φ) kullanım faktörü olarak tanımlanmakta olup, dakikada gerçekleştirilen çevrim sayısını ifade etmektedir. Tablo 1.'de Gd'ye ait, Tablo 2.'de ise Gd ve La_{0.75}Ba_{0.25}MnO₃'e ait farklı parametrelerle 250 çevrim sonrasında elde edilen sıcaklık farkları gösterilmektedir.

Tablo 1. Gd'ye ait farklı parametrelerle elde edilen sıcaklık farkı.

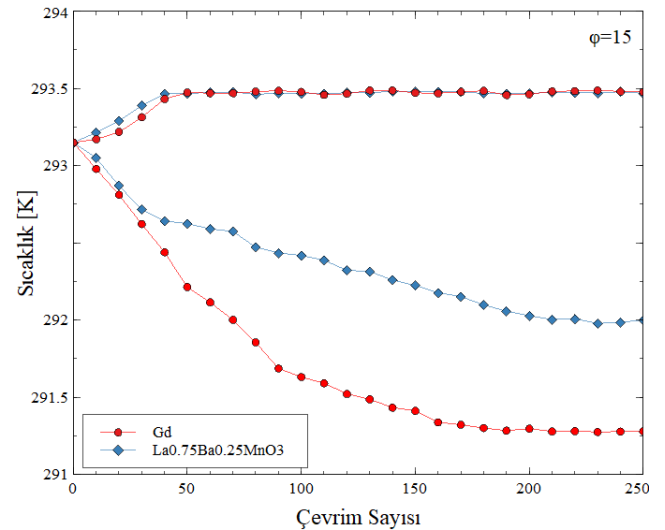
Gd	Elde edilen sıcaklık farkı (K)			
[Hız]	$\varphi=30$	$\varphi=15$	$\varphi=10$	$\varphi=7.5$
0.10 m/s	1.119	2.197	2.050	1.911
0.15 m/s	1.097	2.182	2.011	1.948
0.20 m/s	1.185	2.204	2.007	1.956

Tablo 2. La_{0.75}Ba_{0.25}MnO₃'e ait farklı parametrelerle elde edilen sıcaklık farkı.

La _{0.75} Ba _{0.25} MnO ₃	Elde edilen sıcaklık farkı (K)			
[Hız]	$\varphi=30$	$\varphi=15$	$\varphi=10$	$\varphi=7.5$
0.10 m/s	0.735	1.433	1.384	1.214
0.15 m/s	0.874	1.472	1.373	1.189
0.20 m/s	0.792	1.415	1.390	1.201

Tablo 1. incelendiğinde Gd için maksimum sıcaklık farkı olan 2.204 K'nin 0.20 m/s hız ve $\varphi=15$ 'de elde edildiği görülmektedir. Manyetik alan kaynağı konumlanma hızının elde edilen sıcaklık farkına belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Manyetizasyon ve demanyetizasyon süresi ise elde edilen sıcaklık farkı üzerinde oldukça etkilidir. Tablo 2. incelendiğinde La_{0.75}Ba_{0.25}MnO₃ için maksimum sıcaklık farkı olan 1.472 K'nin 0.15 m/s hız ve $\varphi=15$ 'de elde edildiği görülmektedir. Gd'de olduğu gibi manyetik alan konumlanma hızının elde edilen sıcaklık farkına bir etkisi yoktur.

Şekil 9.'da Gd ve La_{0.75}Ba_{0.25}MnO₃'de maksimum sıcaklık farkının elde edildiği parametrelerde sıcaklık farkı ve çevrim sayısı grafiği gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde her iki manyetokalik malzemede de yaklaşık 190 çevrimden sonra düzenli bir rejim gözlenmiş olup, 250 çevrime kadar sıcaklık farkı sabit değerlerde seyretmiştir.



Şekil 9. Maksimum sıcaklık farkının elde edildiği parametrelere ait ölçüm grafiği.

Tüm bulgular değerlendirildiğinde manyetizasyon ve demanyetizasyon sürelerinin elde edilen sıcaklık farkında önemli bir değişken olduğu, maksimum sıcaklık farkının her iki manyetokalik malzeme için de manyetokalik etkinin maksimum derecede elde edilebildiği kritik kullanım faktörü olarak tanımlanan $\varphi=15$ 'de elde edildiği, $\varphi=30$ 'daki çevrim süresinin manyetokalik etkinin görülmesi için yeterli derecede

olmadığı, kritik kullanım faktörü aşıldıktan sonra $\varphi=10$ ve $\varphi=7.5$ 'da elde edilen sıcaklık farklarının azaldığı tespit edilmiştir.

5. Sonuçlar

Manyetokalorik etkinin keşfedilmesi, manyetokalorik malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar ve manyetik soğutma teknolojilerinin geliştirilmesi, konvansiyonel buhar sıkıştırma soğutma sistemlerine alternatif olabilecek yeni bir sistem ortaya koymaktadır. Manyetik soğutma uygulamalarında manyetokalorik malzeme olarak yaygın kullanılan Gd elementinin üretim ve tedarik zorlukları, yüksek maliyeti manyetik soğutma sistemlerinin en büyük maliyet girdisini oluşturmaktadır. Manyetik soğutma sistemlerinin ekonomik bir şekilde üretilebilmesi için Gd elementi yerine kullanılabilecek benzer manyetik özellikler gösteren daha düşük maliyetli ve üretimi kolay manyetokalorik malzeme arayışları devam etmektedir.

Çalışma kapsamında oda sıcaklığına yakın sıcaklarda çalışan manyetik soğutma sistemlerinde manyetokalorik malzeme olarak Gd yerine kullanılabilecek $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiği sol-jel yöntemiyle sentezlenerek üretilmiş ve Gd ile karşılaştırmalı olarak deneysel testlere tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler incelendiğinde optimum deney koşullarında maksimum 1.472 K sıcaklık farkı elde edilebileceği belirlenmiştir. $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda çalışan manyetik soğutma uygulamalarında Gd'ye alternatif olarak kullanılabilecek üretim maliyeti düşük, ekonomik ve Gd'ye yakın bir manyetokalorik etki sergileyen manyetokalorik malzeme olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FOA-2021-2224 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Araştırmacıların Katkısı

Çalışmada; **Arda ZAİM**, deney düzeneği imalatı ve deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde; **Haydar ARAS**, bilimsel yayın araştırması ve makalenin oluşturulmasında; **Cumhur Gökhan ÜNLÜ**, manyetokalorik malzemelerin belirlenmesi ve hazırlanmasında katkı sağlamıştır

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Alahmer, A., Al-Amayreh, M., Mostafa, A.O., Al-Dabbas, M. ve Rezk, H. (2021). Magnetic refrigeration design technologies: state of the art and general perspectives. *Energies*, 14(15), 4662. doi: <https://doi.org/10.3390/en14154662>
- Aprea, C., Greco, A. ve Maiorino, A. (2016). Magnetic refrigeration: a promising new technology for energy saving. *International Journal of Ambient Energy*, 37(3), 294- 313. doi: <https://doi.org/10.1080/01430750.2014.962088>
- Ayaş, A.O. (2017). $(\text{La}_{0.9}\text{Gd}_{0.1})_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ manyetik soğutucu malzemede kısmi Gd değişiminin yapısal, manyetik ve manyetik soğutma özellikleri üzerine etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 29(2), 155-162.
- Ayaş, A.O., Çetin, S.K., Akça, G., Akyol, M. ve Ekicibil, A. (2023). Magnetic refrigeration: Current progress in magnetocaloric properties of perovskite manganite materials. *Materials Today Communications*, 35:105988. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105988>
- Bahl, C.R.H. ve Nielsen, K.K. (2009). The effect of demagnetization on the magnetocaloric properties of gadolinium. *Journal of Applied Physics*, 105(1), 013916. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3056220>
- Eriksen, D., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., Bjork, R., Nielsen, K.K., Insigna, A.R. ve Pryds, N. (2015). Design and experimental tests of a rotary active magnetic regenerator prototype. *International Journal of Refrigeration*, 58, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.jirefrig.2015.05.004>
- Hagary, M., Shoker, Y.A., Ismail, M., Moustafa, A.M., Abd-El Aal, A. ve Ramadan, A.A. (2009). Magnetocaloric effect in manganite perovskites $\text{La}_{0.77}\text{Sr}_{0.23}\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_3$ ($0.1 \leq x \leq 0.3$). *Solid State Communications*, 149, 184-187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.11.023>
- Kokila, P., Kanagaraj, M., Kumar, P.S., Peter, S.C., Sekar, C. ve Therese, H.A. (2018). Structural, magnetic and magnetocaloric properties of EuMnO_3 perovskite manganite: A comprehensive MCE study. *Material Search Express*, 5(2), 026107. doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaacd>
- Kumar, P., Rubi, Km. ve Mahendiran, R. (2016). Room temperature giant magnetoimpedance in polycrystalline $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$. *AIP Advances*, 6(5), 055913. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4943244>
- Li, C., Zhou, J., Cao, Y., Zhong, J., Liu, Y., Kang, C. ve Tan, Y. (2014). Interaction between urban microclimate and

electric air-conditioning energy consumption during high temperature season. *Applied Energy*, 117, 149-156. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.057>

Pecharsky, V.K. ve Gschneidner, K.A. (1999). Magnetocaloric effect and magnetic refrigeration. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200, 44-46. doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00397-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00397-2)

Phan, M.H. ve Yu, S.C. (2007). Review of the magnetocaloric effect in manganite materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 308(2), 325-340. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.07.025>

Rowe, A. ve Tura, A. (2006). Investigation of three-material layered active magnetic regenerator. *International Journal of Refrigeration*, 29(8), 1286-1293. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.07.012>

Samancıoğlu, Y. (2018). Manyetokalorik etki gösteren $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin manyetik soğutma teknolojisinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(2), 389-401. doi: <https://doi.org/10.25092/baunfbed.845922>

Ünlü, C.G., (2018). $\text{La}_{0.7}\text{Nd}_{0.1}\text{K}_{0.2}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin yapısal ve manyetik akışkan hipertermi özelliğinin araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 1335-1343. doi: <https://doi.org/10.29130/dubited.411328>

Wang, Y., Qin, H., Ren, S. ve Hu, J. (2013). Giant magnetoimpedance and grain boundary effect in $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{MnO}_3$ sol-gel manganite. *Physica B: Condensed Matter*, 425, 17-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.05.014>

Vuarnoz, D., Kitanovski, A., Gonin, C., Egolf, P.W. ve Kawanami, T. (2011). Modelling and simulation of the operation of a rotary magnetic refrigerator. *Journal of Thermal Science and Technology*, 6(1), 21-33. doi: <https://doi.org/10.1299/jtst.6.21>

Yu, B.F., Gao, Q., Zhang, B., Meng, X.Z. ve Chen, Z. (2003). Review on research of room temperature magnetic refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, 26, 622-636. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(03\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(03)00048-3)

Zimm, C., Jasrtrab, A., Sternberg, A., Pecharsky, V., Gschneidner K., Osborne, M. ve Anderson, I. (1998). Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator. In *Advances in Cryogenic Engineering*, 43, 1759-1766. doi:

https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_222

DERİN KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ ORTA KARBONLU ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Esad KAYA¹, İsmail BAYAR², Koray KILIÇAY^{3*}

¹ ESOĞÜ, Müh.-Mim. Fak. Makine Müh. Bölümü, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-7332-6154>

² Batman Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak. Makine Müh. Bölümü, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-4187-3911>

^{3*} ESOĞÜ Müh.-Mim. Fak. Makine Müh. Bölümü, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-2025-4991>

Anahtar Kelimeler	Öz
Su verme Kriyojenik işlem Fraktografi Mikroyapı Çelik	<i>Derin kriyojenik işlem, kademeli olarak sıfırın altındaki sıcaklıklara soğutulması, bekletilmesi ve ısıtılması işlemlerini içeren özel bir ısı işlem sürecidir. Bu çalışmada, ticari orta karbonlu AISI 4140 çeliğinin mikroyapısal ve mekanik davranışları üzerinde kriyojenik işlemin etkileri araştırılmıştır. Çekme testine uygun hazırlanan numuneler 910°C’de ostenitlenmiş ardından yağda su verme (S), yağda su verme-temperleme (ST) işlemleri uygulanmıştır. -196°C’de uygulanan kriyojenik ısı işlem prosesi, çeliğin geleneksel ısı işlem prosedürüne eklenmiştir. Derin kriyojenik işleme tabi tutulmuş numuneler (SKT) daha sonra 200°C’de 1 saat temperlenmiştir. Derin kriyojenik işlemin numuneler üzerindeki etkileri çekme testi, sertlik ve mikroyapı açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlarda, derin kriyojenik işlem karbürlerin çökmesi ve sertliğin artması nedeniyle statik tokluk açısından geleneksel ısı işlem görmüş numunelere kıyasla benzer davranış göstermesini sağlamıştır. Derin kriyojenik işlem uygulamasının temperlenmiş numuneye göre sertliği hafifçe iyileştirdiğini (%10) görülmüştür. Bununla birlikte, derin kriyojenik işlemin karbürlerin çökmesi sağlaması sonucu sertliğin artması mikroyapısal analizlerden belirlenmiştir. Çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında statik tokluğun, rezilyans modülü, akma ve çekme mukavemeti değerleri bazında kriyojenik işlem uygulamasının temperlenmiş duruma kıyasla üstün olduğu tespit edilmiştir.</i>

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF DEEP CRYOGENICALLY TREATED MEDIUM CARBON ALLOY STEELS

Keywords	Abstract
Quenching Cryogenic treatment Fractography Microstructure Steel	<i>Deep cryogenic treatment is a special heat treatment process involving gradual cooling to subzero temperatures, holding, and heating. In this study, the effects of cryogenic treatment on the microstructural and mechanical behaviors of commercial medium carbon AISI 4140 steel were investigated. Specimens prepared for tensile testing were austenitized at 910°C and then oil quenching (S), oil quenching-tempering (ST) processes were applied. The cryogenic heat treatment process applied at -196°C was added to the conventional heat treatment procedure of the steel. The deep cryogenic treated specimens (DCT) were then tempered at 200°C for 1 hour. The effects of deep cryogenic treatment on the specimens were evaluated in terms of tensile test, hardness and microstructure. In the results, deep cryogenic treatment provided similar behavior compared to conventional heat treated specimens in terms of static toughness due to the precipitation of carbides and increase in hardness. It was observed that deep cryogenic treatment slightly improved the hardness compared to the tempered specimen (10%). However, the increase in hardness due to deep cryogenic treatment resulting in precipitation of carbides was determined from microstructural analysis. When the tensile test results were compared, it was determined that the cryogenic treatment application was superior to the tempered condition in terms of static toughness, resilience modulus, yield and tensile strength values.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 02.01.2025

Submission Date : 02.01.2025

Kabul Tarihi : 24.02.2025

Accepted Date : 24.02.2025

* Sorumlu yazar: kkilicay@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1611872>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında, malzemelerin mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığının belirlenmesi, üretim ve tasarım süreçlerinin temel parçasını oluşturur. Bu amaçla, çeşitli ısı işlemleri kullanılarak malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanır. Özellikle düşük alaşımlı çelikler, çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan, genellikle yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren uygulamalarda tercih edilen önemli malzemelerdir (Zhang ve diğ., 2022; Xie ve diğ., 2020). Düşük alaşımlı çeliklerden AISI 4140 çeliği; mekanik özelliklere önemli ölçüde katkıda bulunan ana alaşım elementleri olarak Mo ve Cr içeren, yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı bir çeliktir (Ranju ve D, 2024; Dewan, Liang, Wahab ve Okeil, 2014). Uygulama alanı şaftlar, cıvatalar, pimler, bağlantı çubukları, krank milleri, dişliler, rulmanlardır. (Prabhu, Kulkarni ve Sharma, 2020; Singh ve diğ., 2022; Choo, Lee ve Golkovski, 2000). AISI 4140 çeliği belirli kullanım koşullarında daha yüksek performans ve dayanıklılık gereksinimleri ortaya çıkabilir. Bu bağlamda, ısı işlem, çeliğin mekanik özelliklerini istenilen seviyelere getirmek veya iyileştirmek için yaygın bir yöntemdir.

Isıl işlem, uygulamaya bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerinde ilerleme sağlamak için kullanılır. Su verme, ısı işlem sürecinin genel bir aşaması olup, çelikte östenitten martenzite faz dönüşümünü takiben önceden östenitlenmiş parçanın hızlı bir şekilde soğutulmasını içerir (Sonar, Lomte, Gogte ve Balasubramanian, 2018). AISI 4140 malzemelerinin su verme işleminden sonra ortaya çıkan mikroyapısı martenzit ve kalıntı östenitten oluşmaktadır (Chuaiphan, Srijaroenpramong ve Pinradub, 2013). Bu da malzemenin daha kırılgan olmasına neden olur.

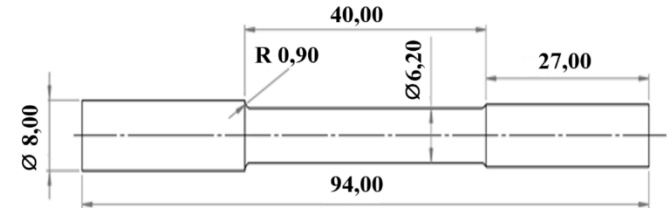
Tokluğu arttırmak ve kalıntı östenitin içeriğini azalmak için kriyojenik ısı işlem ve temperleme işlemleri uygulanır (Salunkhe, Fabijanic, Nayak ve Hodgson, 2015). Isıl işlemin etkilerini belirlemek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Meysami, Ghasemzadeh, Seyedein ve Aboutalebi (2010) çalışmalarında AISI 4140 çelik malzemelere su verilmiş ve 630°C sıcaklıkta 2 saat süreyle temperlenmiştir. Su verme ve temperleme işlemlerinin numunelerin çekme mukavemeti ve sertleşme kabiliyeti gibi mekanik özelliklerini geliştirmiş ve su verme öncesi çelik sıcaklığı, su sıcaklığı, su verme süresi ve ayrıca malzeme boyutu gibi çeşitli parametrelerden etkilendiğini göstermiştir. Sadece su verilen çubukların çekme mukavemeti, akma gerilmesi ve sertlik değerleri, su verilen ve ardından temperlenen çubuklardan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Senthilkumar, Rajendran ve Pellizzari (2011) kriyojenik işlemin AISI 4140 çeliğinin sertlik ve çekme davranışı üzerindeki etkisini incelemiş ve ısı işlem görmüş numune ile karşılaştırmışlardır. Isıl işlem görmüş çeliğe kıyasla sığ ve derin kriyojenik işlem görmüş numunelerin

sertliğinin daha yüksek olduğu ve çekme mukavemetinin ise daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bu durumun kalıntı östenitin martenzite dönüşümünden kaynaklandığı açıklanmıştır. Jamali, Khan, Chandio, Anwer ve Jokhio (2019) çalışmalarında derin kriyojenik ve temperleme işleminin AISI 4340 ve AISI 4140'ın mekanik özelliklerine etkisi incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre temperleme işlemi ile birlikte kriyojenik işlemten sonra çekme mukavemetinin, darbe tokluğunun ve sertliğin kolayca artırılabilirliği belirtilmiştir.

Bu çalışma, 4140 çeliği üzerindeki mekanik özelliklerin geliştirilmesine odaklanarak su verme, su verme işleminin ardından uygulanan temperleme ve kriyojenik işlemlerinin etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. AISI 4140 kalite çelik numunesine sırasıyla 910°C'de östenitleme, ardından su verme, 200°C'de 1 saat temperleme ve -196°C'de 24 saat derin kriyojenik işlemleri uygulanmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testi, mikroyapısal analizler ve sertlik ölçümleri yapılmış, ve SEM görüntüleri ile mikroyapısı incelenmiştir.

2. Yöntem

Şekil 1, deneylerde kullanılan talaşlı imalat ile üretilen standart çekme numunesinin teknik resimlerini göstermektedir. Tüm numuneler şekil 1'deki teknik resime uygun olarak normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinden tornalama yöntemi ile imal edilmiştir. Boyutlar ASTM E8/E8M standartlarına uygun olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Standart çekme numunesinin teknik resmi

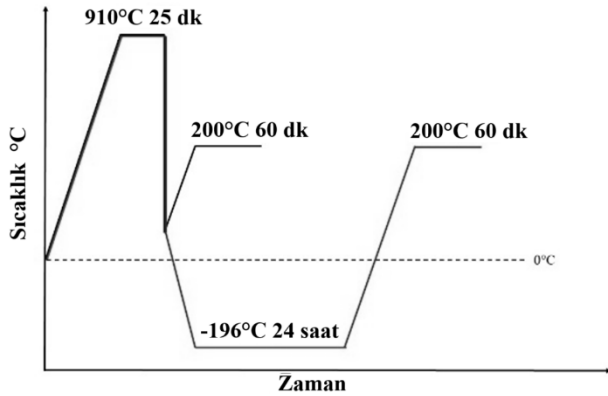
Tablo 1, deneysel süreçlerde kullanılan kontrollü grupları göstermektedir. Toplamda üç adet numune grubu tasarlanmıştır. Bu numune grupları; yalın su verme (S), su verilip temperlenmiş (ST), su verilmiş-kriyojenik işlem uygulanıp temperlenmedir (SKT). Numuneler, 910°C'de 25 dakika östenitlenmiştir. Süre, numunelerdeki tüm kesit aynı sıcaklığa gelecek şekilde seçilmiştir. Temperleme sıcaklığı olarak literatür gözönüne alınarak 200°C olarak seçilmiştir. Temperleme süresi olarak 1 saat seçilmiştir. Kriyojenik ısı işlemler MMD firmasına ait, bilgisayar kontrollü kriyojenik ısı işlem fırınında yapılmıştır. Tüm numuneler 1°C/dk sıcaklık oranı ile soğutulmuştur. Numuneler 24 saat boyunca -196°C'de bekletilmiştir. Tüm numunelerin benzer oranla oda sıcaklığına gelmesi

sağlanmıştır. Kriyojenik ısıtma işlemi takiben temperleme işlemi uygulanmıştır.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan numune grupları

Kod	İşlemler
S	910°C'de 25 dakika ostenitleme ve yağ ortamında su verme
ST	910°C'de 25 dakika ostenitleme, yağ ortamında su verme ve 200°C'de 1 saat temperleme
SKT	910°C'de 25 dakika ostenitleme, yağ ortamında su verme, -196°C 'de derin kriyojenik işlem ve 200°C'de 1 saat temperleme

Şekil 2, çalışmada uygulanan ısıtma işlem prosedürünün sıcaklık ve zamana bağlı değişimini göstermektedir. Tüm numunelere öncesinde 910°C'de 25 dakika ostenitleme işlemi uygulanmış sonrasında yağ ortamında su verilmiştir. Bir grup numuneye -196°C 'de kriyojenik işlem ve 200°C'de 1 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Diğer grup numuneye ise 910°C'de 25 dakika ostenitleme ve yağ ortamında su verme ve 200°C'de 1 saat temperleme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 2. Isıtma işlemlerin sıcaklık ve zamana bağlı değişimi

Deneyisel çalışmanın daha iyi ifade edilebilmesi için numune isimlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan numune isimlendirilmesi Tablo 2' de gösterilmiştir.

Tablo 2. Deneyisel çalışmalarda kullanılan isimlendirme

Kısaltma	İşlemler
S	Sadece su verme
ST	Su verme + temperleme
SKT	Su verme, kriyojenik işlem + temperleme

Çekme testleri, 250 kN yük hücresi ile Shimadzu universal test cihazında 1 mm/dak hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir parametre için testler üç kez tekrarlanmış, sonuçlar ortalama değerler olarak

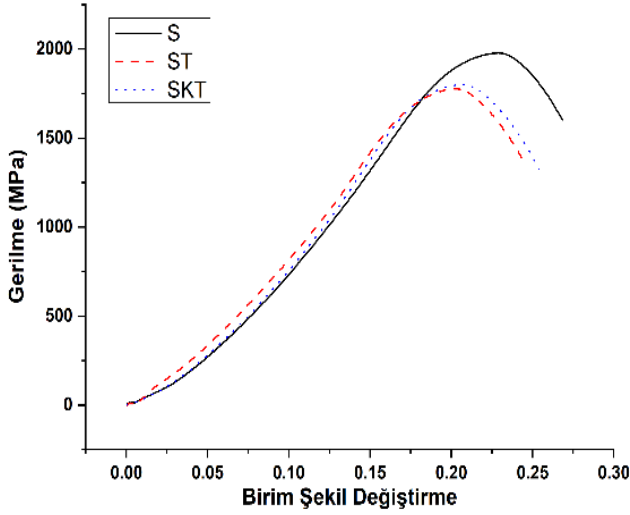
verilmiştir. Numunelere sertlik ölçümleri ve metalografik incelemeleri için Struers MD piano 220 ve 600 grit manyetik disklerde zımparalanma işlemi uygulanmıştır, devamında ise 3 µm elmas solüsyon kullanılarak numune yüzeyleri parlatılmıştır. %2 nital solüsyonu kullanılarak yüzeylere dağlama işlemi uygulanmıştır. Numunelerin mikroyapıları optik mikroskopta (Nikon Clemex) ve kırık kesit analizleri taramalı elektron mikroskopunda (SEM, JEOL JSM-5600LV) incelenmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri ASTM E18'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri, numunelerin yüzeyinde Futuuretech mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri tüm numuneler için 300 gf yük altında ve 10 saniye bekletme süresinde gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler için üç ölçüm yapılmıştır ve sertlik sonucu için ortalama sonuçlar kullanılmıştır. Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3. Bulgular

Numunelerin gerilme-gerinim grafiği Şekil 3'de gösterilmiştir. Numuneler sünek olarak kırılmıştır ve belirgin bir akma göstermemiştir. Karşılaştırma için numunelerin %0,2 akma dayanımı (σ_{ak}) nihai çekme dayanımı (σ_{maks}) ve süneklikteki değişim uzama ve alan daralması hesaplanmıştır. σ_{maks} değerleri büyükten küçüğe S, SKT ve ST olarak elde edilmiştir. S numunesinin çekme dayanımı 1976 ± 19.2 MPa, uzama miktarı %23.6 mm olarak belirlenmiştir. ST ve SKT numunelerinin σ_{maks} değerleri sırasıyla 1673 ± 12.3 MPa ve 1802 ± 11.4 MPa olarak belirlenmiştir. Kriyojenik işlem-temperleme işleminin çekme dayanımı yaklaşık 129 MPa arttırdığı görülmüştür. Benzer şekilde %0.2 akma dayanımları da büyükten küçüğe doğru S, SKT ve ST olarak belirlenmiştir. En yüksek değer su verilen numunede olması beklenen bir sonuçtur. Sıcaklığın ostenitleme sıcaklığından ani bir şekilde oda sıcaklığına düşmesi numunede martenzit yapı oluşmuştur ve bu durum çekme dayanımını yükseltmiştir. Su verme işleminin ardından temperleme işlemi uygulandığında çekme dayanımı düşmüştür. Temperleme ısıtma işlemi ile martenzit içerisindeki ince karbür parçacıklarının büyümesi ve homojen dağılımının etkisiyle bu düşüş gerçekleşmiştir. SKT numunesinde ise kriyojenik işlem ile su verme sırasında oluşan kalıntı östenitler martenzite dönüşmüştür ve ardından temperleme işlemi uygulanmıştır. Burada kalıntı östenitlerin martenzite dönüşmesi ile SKT numunelerinin çekme dayanımı ST numunelerine göre bir miktar artmıştır.

Çekme testi uygulanan numunelerin kırık kesitlerinin makro fotoğrafları Şekil 4' de görülmektedir. Makro incelemeler ile yalın su verilmiş numunede (S) chevron tipi gevrek kırılma belirtileri tespit edilmiştir. Temperlenmiş ve kriyojenik işlem-temperleme uygulanmış numunelerde ise bu oluşumlar görülmemektedir. Ayrıca bu numunelerde belirgin koni

çanak oluşumları olduğu görülmektedir. Bu durum uygulanan ısıl işlemlerin statik tokluk özelliğini iyileştirdiğini bir göstergesidir. Elde edilen makro gözlemler gerilme gerinim eğrisi sonuçları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Isıl işlem uygulanan numunelerin gerilme-gerinim eğrileri

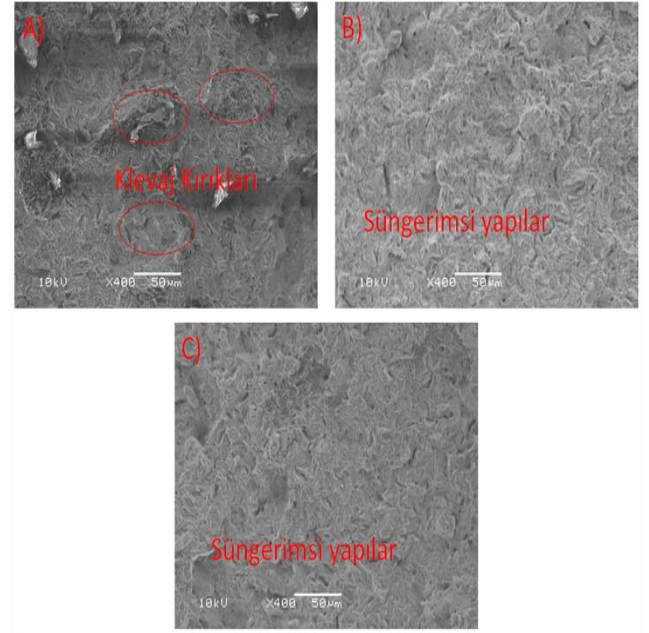


Şekil 4. Numunelerin kırık kesitlerinin makro görüntüsü: a) S, b) SK, c) SKT

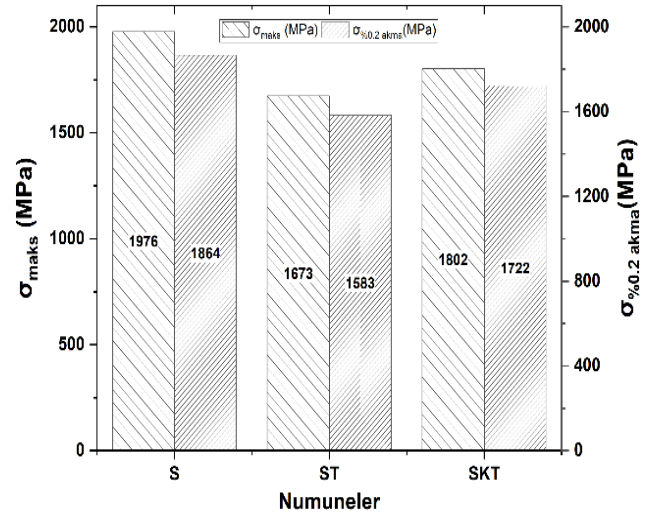
Kırılma mekanizmaları daha etkin belirlenmesi açısından, numuneler ayrıca taramalı elektron mikroskobu altında da incelenmiştir. Şekil 5, numunelerin kırık kesitlerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Tüm görüntüler bir bütün olarak değerlendirildiğinde yalın su verilmiş numunede (S) belirgin klevaj oluşumları görülmektedir. Bu durum bir gevreklik göstergesidir. Temperlenmiş ve kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde ise süngerimsi yapılar görülmektedir. Bu durum kırılmanın sünek karakterli olduğunu göstermektedir.

Şekil 6, numunelerin hesaplanan çekme ve akma mukavemeti değerlerini göstermektedir. Tahmin edileceği üzere en yüksek dayanım yalın su verilmiş numunede elde edilmiştir. Temperleme işlemi uygulanmış numunelerde, dayanımın bir miktar düştüğü gözlemlenmiştir. Sertlik açısından değerlendirildiğinde, kriyojenik işlemin ve temperleme

prosesinin beraber uygulanması yalın temperleme işlemi uygulandığı duruma göre daha etkilidir.

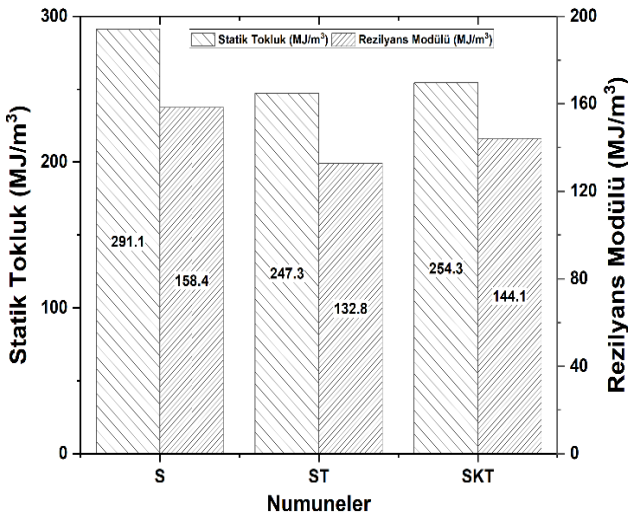


Şekil 5. Numunelerin kırık kesitlerinin SEM görüntüsü, a) S, b) SK, c) SKT



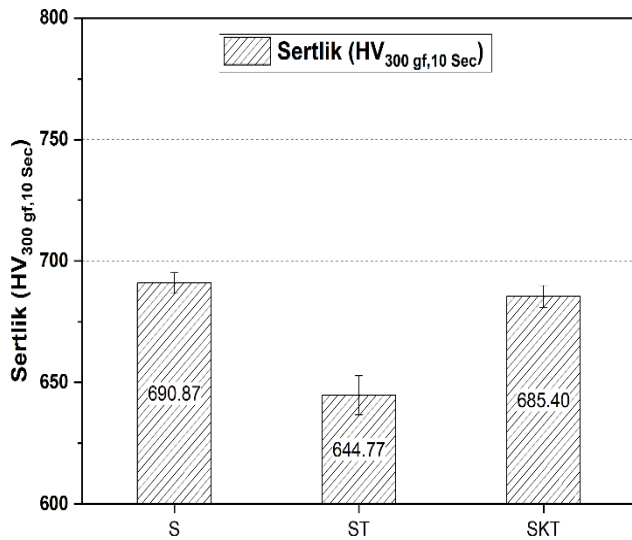
Şekil 6. Hesaplanan çekme ve akma mukavemeti değerleri

Şekil 7, numunelerde hesaplanan statik tokluk ve rezilyans modülü değerlerini göstermektedir. Kriyojenik işlemin temperleme prosesine ilave edilmesiyle statik toklukta artma tespit edilmiştir. Benzer şekilde rezilyans modülünde de bir miktar artış belirlenmiştir. Genel anlamda oluşan bu iyileşmelerin kriyojenik işlem uygulanması sonucu, yapıdaki kalıntı ostenit martenzit dönüşümü ve alaşım elementlerinin boştaki karbon ile ikincil karbürler oluşturması ile sağlandığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Çekme testi sonucu numunelerde hesaplanan statik tokluk ve rezilyans modülü değerleri

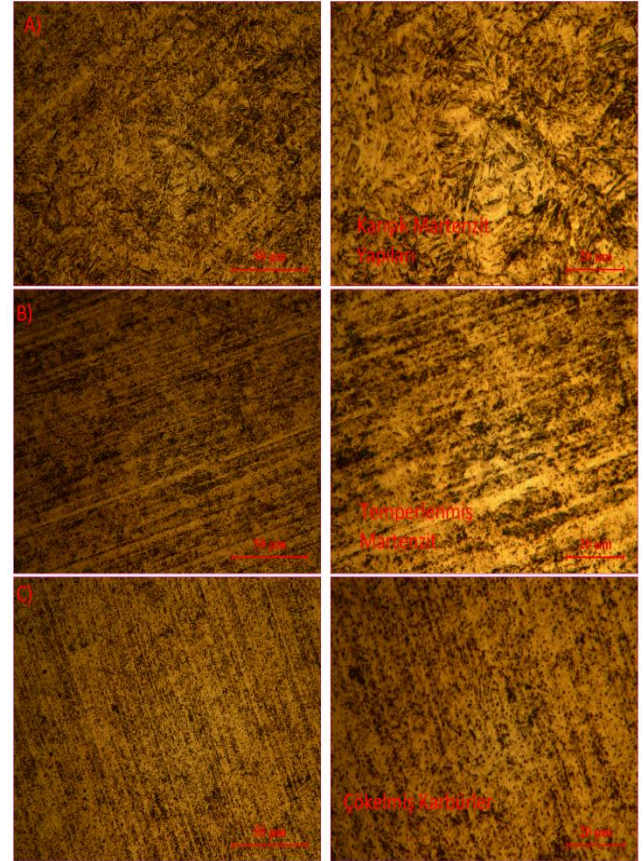
Şekil 8, numunelere uygulanan sertlik testlerinin sonuçlarının göstermektedir. Sertlik testleri ortalama değer olarak raporlanmış ve her bir numune grubu için sapmalar ifade edilmiştir. ST numunesinde temperlenme ısısal işlemin etkisi ile sertlik değerlerinde bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Ancak SKT numunesinde uygulanan derin kriyojenik işlemin etkisi ile sertlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumun ostenitin martensite dönüşümüne ve alaşım elementleriyle ikincil karbürlerin çökmesiyle açıklanabilmektedir.



Şekil 8. Numunelerde ölçülen sertlik değerleri

Şekil 9'da, numunelerin farklı büyütme ölçeklerindeki optik mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Yalın su verilmiş numunenin mikroyapısının karışık formda martenzit fazdan oluştuğu görülmektedir. Su verilmiş

temperlenmiş durumda ise martenzitik yapının bir miktar azaldığı görülmektedir. Oluşan yapı klasik temperlenmiş martenzit yapısı olduğu düşünülmektedir. Kriyojenik işlemin ilave edildiği durumda ise yapı içerisinde küçük siyah noktacıklar görülmektedir. Bu yapının kriyojenik işlem sonrası oluşan kalıntı ostenitten dışarı atılan karbon atomlarının oluşturduğu ikincil karbürler olduğu düşünülmektedir. Bu yapının dislokasyon hareketini bloke ettiği düşünülmektedir. Bu nedenle mekanik özelliklerdeki iyileşmelerin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 9. Numunelerin optik mikroyapısı, a)S, b)SK, c)SKT

6. Sonuçlar

AISI 4140 kalite çelik numunelere, su verme, temperleme ve derin kriyojenik işlemlerini içeren üç adet ısısal işlem başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu çalışma ile, numunelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri farklı ısısal işlem koşulları altında belirlenmiştir. Elde edilen deneyler sonuçları aşağıdaki özetlenmiştir.

- Uygulanan derin kriyojenik işlem ile martenzit ve farklı karbür formları oluştuğu tespit edilmiştir. Temperlenmiş numunede temperlenmiş martenzit formu, yalın su verilmiş numunede ise karışık martenzit yapısı görülmüştür.
- Kriyojenik ısısal işlemin uygulanması ile sertlik değerlerinde yaklaşık %10 artış gözlemlenmiştir.

Sertlikteki iyileşme, ostenitin martensite dönüşümüne ve daha ince karbür dağılımının çökmesi nedenli olduğu değerlendirilmektedir.

- Kriyojenik ısıtma işlemi temperleme işlemine göre kıyaslandığında akma mukavemeti, çekme mukavemeti, statik tokluk ve rezilyans modülünde yaklaşık %10 oranında iyileşme sağlamıştır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Esad KAYA, deney tasarımı, makalenin oluşturulması; İsmail BAYAR, bilimsel yayın araştırması, deney uygulamaları; Koray KILIÇAY, deneysel sonuçların yorumlanması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Choo, S.-H., S. Lee, ve M. G. Golkovski. 2000. Effects of accelerated electron beam irradiation on surface hardening and fatigue properties in an AISI 4140 steel used for automotive crankshaft, *Materials Science and Engineering: A*, 293(1), 56-70. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01207-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01207-7)
- Chuaiphan, W., L. Srijaroenpramong, ve D. Pinradub. 2013. The Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 4140 for Base Cutter Cane Harvester, *Advanced Materials Research*, 774-776(1059-67). doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1059
- Dewan, M. W., J. Liang, M. A. Wahab, ve A. M. Okeil. 2014. Effect of post-weld heat treatment and electrolytic plasma processing on tungsten inert gas welded AISI 4140 alloy steel, *Materials & Design (1980-2015)*, 54(6-13). doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.035>
- Jamali, A. R., W. Khan, A. D. Chandio, Z. Anwer, ve M. H. Jokhio. 2019. Effect of cryogenic treatment on mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steel, *Mehran University Research Journal Of Engineering & Technology*, 38(3), 755-66. doi:
- Meysami, A. H., R. Ghasemzadeh, S. H. Seyedein, ve M. R. Aboutalebi. 2010. An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel, *Materials & Design*, 31(3), 1570-75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.040>
- Prabhu, P. R., S. M. Kulkarni, ve S. Sharma. 2020. Multi-response optimization of the turn-assisted deep cold rolling process parameters for enhanced surface

characteristics and residual stress of AISI 4140 steel shafts, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11402-23. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.025>

- Ranju, M. R., ve K. D. 2024. Effect of nano-graphene as an additive for the improved rolling contact fatigue life of through hardened AISI 4140 alloy steel, *Tribology International*, 192(109249). doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109249>

- Salunkhe, S., D. Fabijanic, J. Nayak, ve P. Hodgson. 2015. Effect of Single and Double Austenitization Treatments on the Microstructure and Hardness of AISI D2 Tool Steel, *Materials Today: Proceedings*, 2(4), 1901-06. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.145>

- Senthilkumar, D., I. Rajendran, ve M. Pellizzari. 2011. Effect of cryogenic treatment on the hardness and tensile behaviour of AISI 4140 steel, *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 6(5), 366-77. doi: 10.1504/IJMMP.2011.043573

- Singh, H., A. K. Singh, Y. K. Singla, K. Chattopadhyay, A. Saini, ve K. Singh. 2022. Interpretation of the wear characteristics of AISI 4140 under nano-fly ash based engine lubricant, *Materials Today: Proceedings*, 50(1683-89). doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.160>

- Sonar, T., S. Lomte, C. Gogte, ve V. Balasubramanian. 2018. Minimization of Distortion in Heat Treated AISI D2 Tool Steel: Mechanism and Distortion Analysis, *Procedia Manufacturing*, 20(113-18). doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.016>

- Xie, Z.-j., C.-j. Shang, X.-l. Wang, X.-m. Wang, G. Han, ve R.-d.-k. Misra. 2020. Recent progress in third-generation low alloy steels developed under M3 microstructure control, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(1), 1-9. doi: 10.1007/s12613-019-1939-x

- Zhang, Y., R. Yuan, J. Yang, D. Xiao, D. Luo, W. Zhou, C. Tuo, H. Wu, ve G. Niu. 2022. Effect of tempering on corrosion behavior and mechanism of low alloy steel in wet atmosphere, *Journal of Materials Research and Technology*, 20(4077-96). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.138>

BİNEK ARAÇLARIN DEVRİLME SÜRECİNDEKİ DİNAMİK DAVRANIŞLARININ ANALİZİ VE DEVRİLME ŞARTLARININ BELİRLENMESİ

Halit KARABULUT¹, Emre YILDIRIM^{2*}, Mesut DÜZGÜN³, Kazım Melih TURGUT⁴

^{1, 2, 3, 4} Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara

¹ ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-6211-5258>

² ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-2528-2740>

³ ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-0582-4183>

⁴ ORCID No: <https://orcid.org/0009-0001-9375-4439>

Anahtar Kelimeler	Özet
Taşıtların devrilmesi Dinamik model Devrilme simülasyonu Kritik devrilme hızı Devrilme şartları	<i>Taşıtların tekerlek süspansiyon sistemlerinin tasarımında; konfor, yük taşıma kapasitesi ve kullanım kolaylığının yanı sıra virajlardaki sürüş güvenliğinin belirlenmesi de ana hedeflerden birisidir. Bu çalışmada dört tekerlekli binek taşıtları (C sınıfı otomobiller) üç kütleli bir dinamik sisteme benzetilmiş ve dinamik modeli kurularak virajdaki dinamik davranışları incelenmiştir. Kütlelerden birisi taşıtın gövdesi, diğerleri ise süspansiyon sistemi ile birlikte tekerleklerdir. Dinamik model bu üç kütleli sistemin momentum denklemlerinden oluşmaktadır. Gövdenin momentum denklemi; gövdeyi tekerlek süspansiyon sistemine bağlayan yayların ve damperlerin yarattığı kuvvetlerin momentlerini ve gövdeye etkiyen merkezkaç kuvvetin momentini içermektedir. Süspansiyon mekanizmalarının momentum denklemleri; gövde ile süspansiyon mekanizmaları arasında yer alan yayların ve damperlerin yarattığı kuvvetlerin momentlerini, tekerleğin elastik deformasyonu ve viskoelastik sönümleme özelliğinden doğan kuvvetlerin momentlerini ve süspansiyon mekanizmalarına etkiyen merkezkaç kuvvetlerin momentlerini içermektedir. Momentum denklemlerinin çözümünde Taylor serisine dayanan bir metot kullanılmış olup hassasiyeti üçüncü mertebeden Runge-Kutta metoduna denktir. Çözüm işlemi için bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Taşıtın üzerinde hareket ettiği viraj, $x=0$ daki eğrilik yarıçapı 25 m olan bir parabolik eğri olarak kabul edilmiştir. Taşıtın $x=0$ da devrilmesine sebep olan hız kritik hız olup daha yüksek hızlarda devrilme bu noktadan önce olmak zorundadır. Simülasyon programını kullanarak taşıtın virajdaki dinamik davranışlarının yanı sıra kritik hızın; taşıt kütlesi, yay sabitleri, taşıtın gövdesinin kütle merkezinin yeri ve tekerlek özellikleri ile değişimi incelenmiştir. Tasarlanan taşıtın yukarıda ifade edilen parabolik eğri ile tanımlı yol üzerindeki yüksüz devrilme hızı 70 km/h civarında belirlenmiştir.</i>

ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOR OF PASSENGER CARS IN ROLLOVER PROCESS AND DETERMINATION OF ROLLOVER CONDITIONS

Keywords	Abstract
Rollover Dynamic model Simulation of rollover Critical rollover speed Rollover conditions	<i>One of the main objectives of the wheel suspension mechanism design is to characterize the driving safety of vehicles in bends, besides the comfortability, load carrying capability, and use easiness. In this study, a four-wheel vehicle (Like C class automobile) is likened to a dynamic system of three masses, and its behaviors in a bend are examined by establishing a dynamic model. One of the masses is the vehicle's body; the others are the two wheels with their suspension elements. The dynamic model consists of angular momentum equations of these three masses. The momentum equation of the body involves the moments of forces generated by springs and dampers connecting the body to the wheel suspension mechanisms and the moment of centrifugal force exerting on the body. The momentum equations of suspension mechanisms involve the moments of spring and damper forces taking part between body and suspension mechanisms, the moments of deflection and viscoelastic damping forces of tires and, the moment of centrifugal force exerted on suspension mechanisms. A Taylor series method, equivalent to the third-order Runge-Kutta method, is used to solve momentum equations and a simulation program is developed. The bend, on which the vehicle moves, is assumed to be a parabolic curve having 25 m curvature diameter at $x=0$. The speed of the vehicle causing rollover at $x=0$</i>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

is a critical speed above which the rollover is unavoidable before that point. By using the simulation program, the dynamic behaviors of the vehicle in bend were examined as well as examining the variation of critical speed with the mass of vehicle, the stiffness of springs, the location of mass center and tire properties. On the road defined by a parabolic curve, the unloaded rollover speed of the proposed vehicle is determined as about 70 km/h.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 29.01.2024

Kabul Tarihi : 09.01.2025

Research Article

Submission Date : 29.01.2024

Accepted Date : 09.01.2025

* Sorumlu yazar: emreyildirim@gazi.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1427532>

1. Giriş

Taşıtlar viraj alırken veya farklı manevralar yaparken taşıt gövdesi virajın dışına doğru yalpa (roll) yapmaktadır. Virajın dönüş yarıçapına, taşıt hızına, taşıt ve süspansiyon geometrilerine bağlı olarak taşıtın yalpa miktarı değişmekte, belirli bir açıdan sonra ise taşıt devrilmektedir (Gillespie, 2021; Putgül ve Altıparmak, 2016). Virajın dış dairesindeki tekerleğe etkiyen zemin kuvvetinin sıfıra gittiği an fiilen devrilmenin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Bu kritik durumun ortaya çıktığı andaki taşıt hızı da devrilme hızı olarak adlandırılmaktadır. Devrilme hızı tabiri devrilme süreci içindeki açısal ya da çevresel hızlar anlamında kullanılmamaktadır.

Taşıtların devrilmesi ile sonuçlanan kazaların sayısı diğer kazalara göre daha az olsa da devrilme ile sonuçlanan kazalarda ölüm oranları daha yüksektir. Türkiye’de ölüm oranları ile ilgili bir istatistik bulunmamakla birlikte ABD Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi’nin hazırladığı raporda (NHTSA, 2010) devrilme ile sonuçlanan kazalardaki ölüm oranının %29 seviyesinde olduğu belirtilmiştir. Taşıtların devrilmesinin önlenmesi amacıyla farklı türde aktif güvenlik sistemleri ve ikaz sistemleri kullanılmaktadır. Devrilmenin önceden tahmin edilebilmesi, kazaların önlenmesi bakımından oldukça fazla önem arz etmektedir. Taşıtların yalpa miktarı devrilme açısı olarak ifade edilmektedir. Aktif güvenlik sistemlerinin çalışması için devrilme açısının, bu açının değişim hızının, yanal ivmenin ve taşıtın ağırlık merkezinin yüksekliğinin anlık olarak bilinmesi gerekmektedir. Devrilme açısının ve değişim hızının belirlenmesi için farklı yöntemler geliştirilmiş olup bu yöntemlerin birçoğu mevcut aktif güvenlik sistemlerinde kullanılmaktadır (Ertlmeier ve Spannaus, 2008). Devrilme açısının taşıt üzerinden doğrudan düşük maliyetli sensörler tarafından ölçülmesi mevcut şartlarda mümkün değildir (Garcia Guzman, Prieto Gonzalez, Pajares Redondo, Montalvo Martinez ve Boada, 2018). Halihazırda çoğu taşıtta yer alan Devrilme Tahmin Sistemleri, savrulma ve yanal ivme ölçüm sensörlerine benzer düşük maliyetli sensör takımları tarafından sağlanan verileri dinamik modellerde girdi

olarak kullanmak sureti ile devrilme açısı ve dönme miktarını belirleyen donanımlardır (Wang, Wang, Zhang, Cao ve Dorrell, 2021). Bu donanımların en önemli gereksinimlerinden birisi gürültü olarak adlandırılan yanlış verilerin elimine edilmesidir. Yanlış verileri veya onların sebep olduğu sapmaları bertaraf etmek için Kalman filtresi, Butterworth filtresi, Finite Impulse Response (FIR) filtresi, gibi veri düzelticileri kullanılmaktadır (Wang ve diğ., 2021; Jeong, You, Kang ve Ahn, 2017).

2. Literatür Taraması

Devrilme hareketinin matematiksel olarak tanımlanabilmesi amacıyla çok sayıda taşıt dinamik modeli geliştirilmiştir. Bu modellerde devrilme süreci farklı fiziki koşullar ve farklı serbestlik dereceleri ile analiz edilmiştir. Das vd. (Das, Hossain, İslam ve Banik, 2022); taşıt dinamiği, devrilme açısı, tekerlek aşınması ve yol profillerinin belirlenmesi gibi konularda yapılmış çalışmaların en önemlilerini inceleyerek taşıt dinamiği modellerinin geliştirilmesine yönelik tavsiyelerde bulunmuştur. Rajamani (2012) tarafından devrilmenin analizi ve önlenmesi için yapılan teorik ve deneysel çalışmaları kapsayan bir kaynak döküman oluşturulmuştur. Jung ve ark. (Jung, Shim ve Gertsch, 2009) devrilme esnasında devrilme merkezinin yer değiştirmesini hesaba katan bir taşıt dinamik modeli oluşturmuşlardır. Yazarlar bu modelden elde ettikleri devrilme açısı ve devrilmenin başlangıcına yönelik bulguları diğer araştırmacıların bulguları ile kıyaslayarak geliştirdikleri modelin daha doğru neticeler verdiğini vurgulamışlardır. Xiao ve ark. (Xiao, Hu, Zhu ve Deng, 2023) devrilmenin üç boyutlu bir modelini oluşturarak veri elde etmiş, elde ettikleri verileri bir elektrikli taşıtın devrilme kontrol ünitesinde kullanarak direksiyon açısı, motor torku ve süspansiyon kuvvetinin devrilmeyi önleyen değerlerini belirlemişlerdir. Geliştirilen algoritmanın sürüş kararlılığını iyileştirdiği ifade edilmiştir. Rahimi ve Naraghi (2018) taşıt dinamiğini kontrol eden aktif süspansiyon, aktif direksiyon sistemi, aktif diferansiyel sistemi ve fren anti blokaj sistemi (ABS) gibi alt sistemlerin birbirlerini etkileyerek yanlış bir kontrol davranışı gösterme ihtimalini bertaraf etmek için

devrilme açısı, savrulma hızı gibi parametreleri bir arada değerlendirilerek sağlıklı kontrol verileri sağlayan bir algoritma geliştirmişlerdir. Hac ve ark. (Hac, Brown ve Martens, 2004) ise taşıt devrilme açısının belirlenmesinde farklı esaslara göre çalışan sensörlerin devrilme açısını belirlemedeki olumlu ve olumsuz yönlerini incelemişlerdir. Sadece yanal ivme sensörü kullanılarak devrilme açısının belirlenmesinin belirli bir yanal ivmeden sonra doğruluğunu kaybettiği ifade edilmiştir. Sadece süspansiyon sisteminden bilgi alan yer değiştirme sensörünün kullanılması halinde ise düz yoldaki bozukluklardan kaynaklanan yanlış ölçümlere neden olduğu belirtilmiştir. Ryu ve Gerdes (2004) yanal yol eğimi (bank angle) ve taşıt devrilme açısının anbean birbirinden bağımsız bir şekilde hesaplanabilmesini sağlamak amacıyla bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemde devrilme açısı ve yalpa açısını belirlemek için Global koordinat belirleme sensörü (GPS) ve atalet ölçüm sensöründen alınan veriler kullanılmaktadır. Nguyen ve Nguyen (2023) taşıt hızının ve ağırlık merkezi yüksekliğinin değişiminin farklı manevralar esnasındaki taşıt kararlılığına etkisini incelemiş, taşıt hızının artması ve ağırlık merkezinin yükselmesinin daha erken devrilmeye neden olduğu ifade edilmiştir. Zhang ve ark. (Zhang, Dong ve Du, 2008) yaptıkları çalışmada binek araçlarının devrilme ve savrulma kararlılıklarını kurdukları bir taşıt dinamik modeli ile incelemiş, farklı manevra tiplerini simüle ederek süspansiyon sertliğinin devrilme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Süspansiyon sertliğinin artması sonucunda yatma miktarının azaldığı ancak sinüs eğrisini andıran yollardaki manevralarda taşıtın devrilmesini kolaylaştırdığı belirtilmiştir. Hamblin ve ark. (Hamblin, Martini, Cameron ve Brennan, 2006) farklı karmaşıklık derecesine sahip taşıt dinamik modellerinin performanslarını incelemiştir. Modelin karmaşıklığının artmasının parametrelerin belirlenmesindeki doğruluğu arttırdığı ancak basit modeller ile elde edilen parametrelerin de kabul edilebilir doğrulukta olduğu ifade edilmiştir. Jalali ve ark. (Jalali, Hashemi, Khajepour, Chen ve Litkouhi, 2018) matematik modele dayalı bir yaklaşım yöntemi ile taşıt devrilmesinin kontrolünü gerçekleştirmiştir. Yanal ivme, savrulma oranı ve yanal hız değerleri bir gözlemci algoritmasında değerlendirilerek devrilme açısı ve devrilme hızı değerleri tahmin edilmiştir. Cheng ve Cebon (2011) yarı römorklu çekicilerin TruckSim yazılımı ile üç ve beş serbestlik dereceli modellerini oluşturarak veri elde etmişler, elde ettikleri verileri Kalman filtresi ile düzeltilmiş deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Teorik esaslı verilerin deneysel veriler ile büyük ölçüde uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Aynı zamanda doğrusal ikinci dereceden tahmin algoritması olarak da kullanılan Kalman filtresi Simon (2001) tarafından ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Rajamani ve ark. (Rajamani, Piyabongkarn, Tsourapas ve Lew, 2011) yaptıkları bir araştırmada, taşıt devrilme endeksinin (devrilme kriteri) hesaplamasında gerekli

olan devrilme açısı ve ağırlık merkezi yüksekliği parametrelerinin hesaplanabilmesi için bir algoritma dizayn etmişlerdir.

Anh (2020) yaptığı bir çalışmada 7 serbestlik derecesine sahip bir taşıt dinamik modeli kurmuştur. Serbestlik derecelerinden ilk üçü x, y ve z eksenleri etrafındaki dönmeler, diğerleri ise tekerlek ve tekerlek bağlantılarının z eksenine doğrultusundaki ötelemesidir. Yazar tekerleğe etkiyen düşey kuvvetler ile tekerleğin yaylanmayan kısmının ötelemesi arasında lineer bir ilişki elde etmişlerdir. Menhour ve ark. (Menhour, Koenig ve d'Andréa-Novel, 2012) yol yanal eğim açısını ve taşıtın yalpa açısını (roll angle) belirlemek amacı ile sanal bir algılayıcı tasarlamışlardır. Bu algılayıcı PIO olarak adlandırılan algoritmaya dayanmakta olup sağladığı veriler taşıtın güvenlik sistemi tarafından kullanılmaktadır. Yol eğim açısı ve taşıt devrilme açısının doğrudan ve anlık olarak ölçülmesi düşük maliyetli sensörler tarafından yapılamadığı için PIO algılayıcısına ihtiyaç duyulmaktadır. Yu ve ark. (Yu, Wang, Li, Wang ve Wang, 2013) yol eğim açısı ve yanal kayma açısının dinamik şartlarda belirlenebilmesine yönelik bir simpleks hesaplama yöntemi geliştirmiştir. Yazarlar yol eğim açısı ile taşıtın devrilmesi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Xu ve Tseng (2007), devrilme açısının hesaplanmasında oluşabilecek sistemsel hataların ve kaynağı bilinmeyen bozucu girdilerin belirlenmesi için bir yöntem geliştirmiştir. Taşıt devrilme açısı ve devrilme hızı belirlenirken basit devrilme modeli ve model tabanlı Kalman filtresi kullanılmıştır. Jeong ve ark. (Jeong, You, Kang ve Ahn, 2017) ölçme yolu ile belirledikleri yanal yol eğimi (bank angle) ve taşıt dönme (roll angle) açılarını farklı filtreleme yöntemleri ile düzelterek, bisiklet modeli ve taşıt devrilme modeli olarak adlandırılan teorik analizlerden elde ettikleri açılar ile kıyaslayarak farklı veri düzelticilerin güvenilirlik derecesini incelemişlerdir. Yazarlar Finite Impulse Response (FIR) filtresi olarak adlandırılan veri düzelticinin Kalman Filtresi ve Dinamik Filtreye göre çok daha hassas ve doğru sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmiştir. Zhang ve arkadaşları (Zhang, Yan, Guo, Yang ve He, 2022), taşıt devrilme merkezi ile taşıt ağırlık merkezi arasındaki mesafenin statik ve dinamik şartlarda hesaplanmasına yönelik bir yöntem geliştirmişlerdir. Sadece devrilme hızının kullanıldığı, Adaptif Sliding Mod Gözlemcisi ve Genişletilmiş Kalman Filtresi yaklaşımlarından faydalanılarak devrilme merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe belirlenmiştir. Bir serbestlik dereceli taşıt devrilme modeli kullanılarak farklı manevralar için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yazalar her iki yaklaşımın da mesafenin tahmini için oldukça kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir. Genişletilmiş Kalman Filtresi yaklaşımının dinamik şartlar için, Adaptif Sliding Mod gözlemci yaklaşımının ise statik şartlar için daha iyi bir performansla sahip olduğu açıklanmıştır.

yukarısında kalmaktadır. Taşıt virajda giderken kütle merkezinin O noktasından uzaklığı sabit kalmakla birlikte O noktasını kütle merkezine birleştiren vektörün doğrultusu değişmektedir. Sol tekerin ezilme miktarının artacağı göz önüne alındığında OQ çubuğunun (sol salıncak kolu) O noktası çevresindeki mutlak dönme hareketinin ters saat yönünde gerçekleşeceği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte OQ çubuğunun taşıta göre rölatif dönmesi saat yönünde gerçekleşmektedir. Sağdaki tekerleğin ezilme miktarının azalacağı dikkate alındığında OW çubuğunun (sağ salıncak kolu) mutlak dönmesinin de ters saat yönünde olacağı, taşıta göre rölatif dönmesinin ise saat yönünde olacağı görülmektedir. İkinci aşamada da tekerleklerin hepsi yerle temastadır. İkinci süreçte sol ve sağ tekerleklerin ezilme miktarlarının değişimleri birbirinden farklı değerler alacaktır. Tekerleklerin ezilmesinden doğan kuvvetler ezilme miktarının değişimi ile lineer orantılı olmayacaktır. Hatta taşıtın gövdesi takoz olarak adlandırılan esneklik sınırlama elemanlarına temas edebilir. Üçüncü aşama virajın iç dairesi tarafındaki tekerin yerden irtibatının kesilmesi ile başlayan bir aşamadır. Bu aşamada taşıtın tamamının sol tekerleğin yere temas ettiği nokta etrafında blok olarak döndüğü kabul edilebilir. Bu çalışmada birinci aşamanın analizi yapılmıştır. Birinci aşama için yapılan analizin ikinci aşama için de geçerli olduğu kabul edilerek devrilmenin başladığı an belirlenebilir. Sağ tekerlek ile yol arasındaki kuvvetin sıfır olduğu an devrilmenin başlangıç anı olarak kabul edilebilir. Şekil 2 de gc noktasını H noktasına birleştiren bir doğru görülmektedir. Gövdeye etkiyen ivme kuvveti vektörünün bu doğru ile çakıştığı an ivme kuvvetinin taşıtı devirmek için etki göstermeye başladığı andır.

3.2. Matematik Model

Şekil 2 de analizde kullanılan sembollerin bir kısmı gösterilmiştir. Şekil 2 de görülen θ , β ve ψ açıları sabit değerler olup, aracın geometrisinden belirlenebilen açılardır. Diğer açılar değişken olup bunlardan α , γ ve ϕ momentum denklemlerinden belirlenmekte, μ açısı da açıların toplamının 2π olma şartından belirlenebilmektedir. Ayrıca α , γ ve ϕ açılarının başlangıç değerlerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar da statik şartlardaki kuvvetlerden belirlenmektedir. Açısal momentum denklemleri türetilirken Şekil 2 deki O noktası moment alma noktası olarak kullanılmaktadır. O noktasının yeri değişken bile olsa analizin gerçekçiliği açısından sakınca oluşturmamaktadır. Bu analizde araç üzerinde viraj denge çubuğu olarak adlandırılan elemanın olmadığı varsayılmıştır.

Sağdaki salıncağa; tekerleğin lastik kısmının esneme miktarı ile orantılı olan zemin kuvveti, tekerleğin esneme hızı ile orantılı olan zemin kuvveti, gövde ile sağ

salıncak arasındaki yayın kuvveti, gövde ile sağ salıncak arasındaki damperin kuvveti ve sağ salıncağın kütle merkezine etkiyen atalet kuvveti olmak üzere toplam 5 adet kuvvet etmektedir. Şekil 3 te bu kuvvetler gösterilmiştir.

Bunların O noktasına göre yarattığı momentler sırası ile T_{wr} , T_{wdr} , T_{sr} , T_{dr} ve T_{ar} ile gösterilerek sağdaki salıncağın açısal momentum denklemi

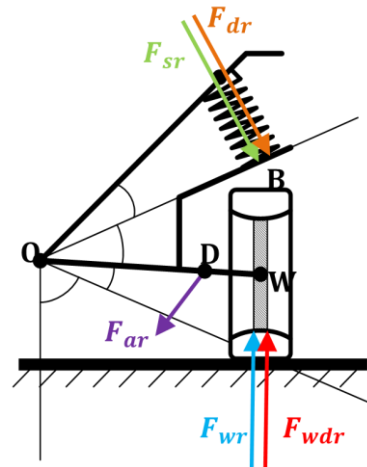
$$I_w \frac{d^2(\theta + \alpha)}{dt^2} = T_{wr} + T_{wdr} + T_{sr} + T_{dr} + T_{ar} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. θ açısının sabit olduğu dikkate alınarak bu denklem

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{1}{I_w} T_{wr} + \frac{1}{I_w} T_{wdr} + \frac{1}{I_w} T_{sr} + \frac{1}{I_w} T_{dr} + \frac{1}{I_w} T_{ar} \quad (2)$$

şekilde düzenlenebilir. Sağ tekerleğin lastik kısmının esnemesinden doğan kuvvet,

$$F_{wr} = F_{w0} - k_w(\alpha - \alpha_0)\overline{OW} \quad (3)$$



Şekil 3. Sağ Salıncak Koluna Etkiyen Kuvvetler

şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitlikte bulunan $(\alpha - \alpha_0)$ tekerlek ekseninin (OW doğrultusu) ters saat yönündeki dönmesini, F_{w0} tekerleğin lastik kısmının statik şartlarda salıncağa ilettiği zemin kuvvetini göstermektedir. Eşitlik (3) ile tanımlanan kuvvetin momenti

$$T_{wr} = \overline{OW} [F_{w0} - k_w(\alpha - \alpha_0)\overline{OW}] \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Tekerleğin lastik kısmının esneme hızını sönmüleme özelliğinden doğan kuvvet

$$F_{wdr} = -c_c \overline{OW} \dot{\alpha} \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu kuvvetin O noktasına göre momenti

$$T_{wdr} = -c_c \overline{OW}^2 \dot{\alpha} \quad (6)$$

olur. Gövde ile sağ salıncak arasındaki yayın kuvveti

$$F_{sr} = F_{b0} - k_s [\gamma - \gamma_0] \overline{OB} \quad (7)$$

olarak ifade edilebilir. Bu kuvvetin O noktasına göre momenti

$$T_{sr} = -\overline{OB} [F_{b0} - k_s (\gamma - \gamma_0) \overline{OB}] \quad (8)$$

olur. Bu eşitlikte bulunan F_{b0} ile yayın statik şartlardaki kuvveti gösterilmektedir. Damper yayın içerisine yerleştirilebilir. Bu durumda damper kuvveti

$$F_{dr} = c_d \dot{\gamma} \overline{OB} \quad (9)$$

olur. Bu kuvvetin momenti

$$T_{dr} = c_d \dot{\gamma} \overline{OB}^2 \quad (10)$$

şeklinde ifade edilebilir. İvme kuvveti salıncığın Şekil 2 de D ile gösterilen kütle merkezine etkmektedir. D noktasının kesin yerini teorik yöntem ile belirlemek zor olmakla birlikte tekerleğe yakın bir yer olarak kabul edilebilir. İvme kuvveti vektör olarak

$$\vec{F}_{ar} = -m_w \frac{V^2}{\rho} i - m_w g j \quad (11)$$

şeklinde ifade edilebilir. İvme kuvvetinin O noktasına göre yer vektörü

$$\vec{S}_{gr} = \overline{OD} [\sin(\theta + \alpha) i - \cos(\theta + \alpha) j] \quad (12)$$

şeklinde tanımlanabilir. İvme kuvvetinin O noktasına göre momenti

$$T_{ar} = -m_w g \overline{OD} \sin(\theta + \alpha) - m_w \frac{V^2}{\rho} \overline{OD} \cos(\theta + \alpha) \quad (13)$$

olur. Tanımlanan momentler kullanılarak sağdaki salıncığın açısıl momentum denklemi

$$\ddot{\alpha} + \frac{c_c \overline{OW}^2}{I_w} \dot{\alpha} + \frac{k_w \overline{OW}^2}{I_w} \alpha - \frac{k_s \overline{OB}^2}{I_w} \gamma - \frac{c_d \dot{\gamma} \overline{OB}^2}{I_w} = \frac{\overline{OW} F_{w0}}{I_w} + \frac{k_w \overline{OW}^2 \alpha_0}{I_w} - \frac{\overline{OB}}{I_w} F_{b0} - k_s \frac{\overline{OB}^2}{I_w} \gamma_0 + \frac{T_{ar}}{I_w} \quad (14)$$

şeklinde düzenlenebilir.

Gövdeye; Şekil 2 de görülen sağ ve sol salıncak

yaylarının kuvvetleri, sağ ve sol salıncak damperlerinin kuvvetleri ve yerçekimi ile merkezci ivmeden doğan kuvvet olmak üzere 5 adet kuvvet etkmektedir. Bu kuvvetlerin momentleri sırası ile M_{sr} , M_{sl} , M_{dr} , M_{dl} ve M_a ile gösterilirse gövdenin açısıl momentum denklemi,

$$I_b \frac{d^2}{dt^2} (\theta + \alpha + \beta + \gamma) = M_{sr} + M_{dr} + M_{sl} + M_{dl} + M_a \quad (15)$$

olur. Bu denklemde bulunan M_{sr} ve M_{dr} yukarıda tanımlanan T_{sr} ve T_{dr} momentlerinin zıt işaretlisidir. θ ve β nın sabit olduğu da dikkate alınarak son denklem

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = -\frac{1}{I_b} T_{sr} - \frac{1}{I_b} T_{dr} + \frac{1}{I_b} M_{sl} + \frac{1}{I_b} M_{dl} + \frac{1}{I_b} M_a \quad (16)$$

şeklinde düzenlenebilir. Son eşitlik ile Eşitlik (2) nin bileşiminden

$$\frac{d^2 \gamma}{dt^2} = -T_{sr} \left(\frac{1}{I_b} + \frac{1}{I_w} \right) - T_{dr} \left(\frac{1}{I_b} + \frac{1}{I_w} \right) + \frac{1}{I_b} M_{sl} + \frac{1}{I_b} M_{dl} + \frac{1}{I_b} M_a - \frac{1}{I_w} T_{wr} - \frac{1}{I_w} T_{wdr} - \frac{1}{I_w} T_{ar} \quad (17)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte bulunan T_{sr} ve T_{dr} nin tanımı hali hazırda yukarıda mevcuttur.

Taşıtın gövdesi ile sol salıncak arasındaki yayın kuvveti

$$F_{sl} = F_{b0} - k_s (\phi - \phi_0) \overline{OA} \quad (18)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu kuvvetin O noktasına göre momenti

$$M_{sl} = -[F_{b0} - k_s (\phi - \phi_0) \overline{OA}] \overline{OA} \quad (19)$$

olur. Sol salıncak ile gövde arasındaki damper yayın içerisine yerleştirilebilir. Bu durumda sol salıncak damperinin kuvveti

$$F_{dl} = c_d \dot{\phi} \overline{OA} \quad (20)$$

olur. $\dot{\phi}$ nın negatif bir sayı olduğu da dikkate alınarak bu kuvvetin momenti

$$M_{dl} = c_d \dot{\phi} \overline{OA}^2 \quad (21)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Gövdeye etkiyen yer çekimi ivmesi ve merkezci ivmeden kaynaklanan kuvvetin vektör şekli

$$\vec{F}_a = -m_b \frac{V^2}{\rho} i - m_b g j \quad (22)$$

olur. Bu kuvvetin etkime noktası Şekil 2 de gc ile gösterilmiştir. Bu noktanın O noktasına göre yer vektörü

$$\begin{aligned} \vec{S}_{gb} = & -S_{gb} \sin\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) i + \\ & S_{gb} \cos\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) j \end{aligned} \quad (23)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda Eşitlik (22) ile tanımlanan ivme kuvvetinin O noktasına göre momenti

$$\begin{aligned} M_a = & m_b g S_{gb} \sin\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) + \\ & m_b \frac{V^2}{\rho} S_{gb} \cos\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) \end{aligned} \quad (24)$$

olur. T_{sr} , T_{dr} , M_{sl} , M_{dl} , T_{wr} , T_{wdr} momentlerinin tanımları Eşitlik (17) de yerine yazılarak

$$\begin{aligned} \ddot{\gamma} + c_d \overline{OB}^2 \left(\frac{1}{I_b} + \frac{1}{I_w}\right) \dot{\gamma} + k_s \overline{OB}^2 \left(\frac{1}{I_b} + \frac{1}{I_w}\right) \gamma - \\ \frac{k_s \overline{OA}^2}{I_b} \phi - \frac{1}{I_b} c_d \dot{\phi} \overline{OA}^2 - \frac{k_w \overline{OW}^2}{I_w} \alpha - \\ \frac{1}{I_w} c_c \overline{OW}^2 \dot{\alpha} = \overline{OB} \left(\frac{1}{I_b} + \frac{1}{I_w}\right) F_{b0} + \\ \overline{OB}^2 \left(\frac{1}{I_b} + \frac{1}{I_w}\right) k_s \gamma_0 - \frac{\overline{OA}}{I_b} F_{b0} - \frac{k_s \overline{OA}^2}{I_b} \phi - \\ \frac{\overline{OW}}{I_w} F_{w0} - \frac{k_w \overline{OW}^2}{I_w} \alpha_0 - \frac{1}{I_w} T_{ar} + \frac{1}{I_b} M_a \end{aligned} \quad (25)$$

eşitliği elde edilir. T_{ar} ve M_a momentlerinin tanımlarının son denkleme yazılması herhangi bir avantaj sağlamamaktadır.

Soldaki salıncağa tekerleğin lastik kısmının esneme miktarı ile orantılı olan zemin kuvveti, tekerleğin esneme hızı ile orantılı olan zemin kuvveti, gövde ile sol salıncak arasındaki yayın kuvveti, gövde ile sol salıncak arasındaki damperin kuvveti ve sol salıncağın kütle merkezine etkiyen ivme kuvveti olmak üzere toplam 5 adet kuvvet etkimektedir. Bunların O noktasına göre yarattığı momentler sırası ile T_{wl} , T_{wdl} , T_{sl} , T_{dl} ve T_{al} ile gösterilerek soldaki salıncağın açısal momentum denklemini

$$\begin{aligned} I_w \frac{d^2}{dt^2} (\theta + \alpha + \beta + \gamma + \psi + \phi) \\ = T_{sl} + T_{dl} + T_{wl} + T_{wdl} + T_{al} \end{aligned} \quad (26)$$

şeklinde yazılabilir. θ , β ve ψ açılarının sabit olduğu ve $T_{sl} = -M_{sl}$, $T_{dl} = -M_{dl}$ olduğu dikkate alınarak bu denklem

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + \frac{d^2 \phi}{dt^2} = \\ -\frac{1}{I_w} M_{sl} - \frac{1}{I_w} M_{dl} + \frac{1}{I_w} T_{wl} + \frac{T_{wdl}}{I_w} + \frac{1}{I_w} T_{al} \end{aligned} \quad (27)$$

şeklinde düzenlenebilir. Son eşitlik ile Eşitlik (16) nın bileşiminden

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \phi}{dt^2} = -\left(\frac{1}{I_w} + \frac{1}{I_b}\right) M_{sl} - \left(\frac{1}{I_w} + \frac{1}{I_b}\right) M_{dl} + \\ \frac{1}{I_w} T_{wl} + \frac{1}{I_w} T_{wdl} + \frac{1}{I_w} T_{al} + \frac{1}{I_b} T_{sr} + \frac{1}{I_b} T_{dr} - \frac{1}{I_b} M_a \end{aligned} \quad (28)$$

elde edilir. Son eşitlikte bulunan T_{wl} , T_{wdl} ve T_{al} momentlerinin dışında kalan momentler halihazırda yukarıda tanımlanmış durumdadır. Yer çekimi ve merkezci ivme nedeni ile sol salıncağa etkiyen kuvvet vektör olarak

$$\vec{F}_{al} = -m_w \frac{V^2}{\rho} i - m_w g j \quad (29)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu kuvvet sol salıncağın kütle merkezine etkimektedir. Sol salıncağın kütle merkezi Şekil 2 de E harfi ile gösterilmiştir. Söz konusu kütle merkezinin O noktasına göre yer vektörü

$$\begin{aligned} \vec{S}_{al} = \overline{OE} \sin(\theta + \alpha + 2\beta + \gamma + \psi + \phi) i \\ - \overline{OE} \cos(\theta + \alpha + 2\beta + \gamma + \psi + \phi) j \end{aligned} \quad (30)$$

şeklinde tanımlanabilir. Eşitlik (29) ile tanımlanan ivme kuvvetinin O noktasına göre momenti

$$\begin{aligned} T_{al} = -m_w g \overline{OE} \sin(\theta + \alpha + 2\beta + \gamma + \psi + \phi) - \\ m_w \frac{V^2}{\rho} \overline{OE} \cos(\theta + \alpha + 2\beta + \gamma + \psi + \phi) \end{aligned} \quad (31)$$

şeklinde tanımlanır. Sol tekerleğin esneme miktarı ile orantılı olarak değişim gösteren zemin kuvveti ve momenti

$$F_{wl} = F_{w0} - k_w (\mu - \mu_0) \overline{OQ} \quad (32)$$

$$T_{wl} = -\overline{OQ} \left[F_{w0} - k_w (\mu - \mu_0) \overline{OQ} \right] \quad (33)$$

olur. Sol tekerleğin esneme hızı ile orantılı olarak değişim gösteren zemin kuvveti

$$F_{wdl} = c_c \overline{OQ} \dot{\mu} \quad (34)$$

şeklinde tanımlanabilir. $\dot{\mu}$ nin negatif bir sayı olduğu da dikkate alınarak bu kuvvetin momentini

$$T_{wdl} = c_c \overline{OQ}^2 \dot{\mu} \quad (35)$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 2 de görülen açılarının toplamının 2π olma şartından Eşitlik (32) ve (33) de bulunan μ açısı

$$\mu = 2\pi - 2\theta - \alpha - 2\beta - \gamma - \psi - \phi \quad (36)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu açının (34) ve (35) numaralı eşitliklerdeki zaman türevi

$$\dot{\mu} = -\dot{\alpha} - \dot{\gamma} - \dot{\phi} \quad (37)$$

olarak belirlenir. Yukarıda tanımlaması yapılmış olan M_{sl} , M_{dl} , T_{wl} , T_{wdl} , T_{sr} ve T_{dr} momentleri Eşitlik (28) de yerine yazılarak ve bilinmeyenleri içeren terimler solda toplanarak

$$\begin{aligned} & \ddot{\phi} + c_d \overline{OA}^2 \left(\frac{1}{I_w} + \frac{1}{I_b} \right) \dot{\phi} + k_s \left(\frac{1}{I_w} + \frac{1}{I_b} \right) \overline{OA}^2 \phi \\ & - \frac{k_w \overline{OQ}^2}{I_w} \mu - \frac{1}{I_w} c_c \overline{OQ}^2 \dot{\mu} - \frac{k_s \overline{OB}^2}{I_b} \gamma \\ & - \frac{1}{I_b} c_d \overline{OB}^2 \dot{\gamma} = \overline{OA} \left(\frac{1}{I_w} + \frac{1}{I_b} \right) F_{b0} \\ & + k_s \left(\frac{1}{I_w} + \frac{1}{I_b} \right) \overline{OA}^2 \phi - \frac{\overline{OQ}}{I_w} F_{w0} - \frac{k_w \overline{OQ}^2}{I_w} \mu_0 - \\ & \frac{\overline{OB}}{I_b} F_{b0} - \frac{k_s \overline{OB}^2}{I_b} \gamma_0 + \frac{1}{I_w} T_{al} - \frac{1}{I_b} M_a \end{aligned} \quad (38)$$

denklemini elde edilir. T_{al} ve M_a momentlerinin tanımlamasını Eşitlik (28) e yazmak avantaj oluşturmamaktadır. Eşitlik (14) ile $\ddot{\alpha}$, Eşitlik (25) ile $\ddot{\gamma}$ ve Eşitlik (38) ile $\ddot{\phi}$ hesaplanacaktır. $\ddot{\mu}$ nin hesabı için Eşitlik (37) nin türetilmesinden

$$\ddot{\mu} = -\ddot{\alpha} - \ddot{\gamma} - \ddot{\phi} \quad (39)$$

elde edilir. Buraya kadar tanımlanan eşitlikler değişken açılarının hesabını mümkün kılmakla birlikte başlangıç değerlerinin yanı sıra taşıtın boyutları, virajın eğrilik yarıçapı, statik kuvvetlerin ve analizde kullanılan bazı

girdilerin belirlenmesinde kullanılmak üzere aşağıda ilave eşitlik veya matematiksel tanımlamalar verilmektedir.

Tekerleklerin yere temas eden kısmının statik şartlarda yarıçapı

$$R_{w0} = R_w - \frac{1}{k_w} \left(\frac{W_b}{2} + W_w \right) \quad (40)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Bu eşitlikte bulunan R_w , W_b ve W_w sırası ile tekerleğin taşıta bağlanmadan önceki yarıçapını, taşıtın gövdesinin ağırlığını ve Şekil 2 de görülen taşıtın sağ veya sol tarafındaki teker ve salıncağın toplam ağırlığını göstermektedir. Şekil 2 de görülen α , γ , ϕ ve μ açılarının statik şartlardaki değerleri

$$\alpha_0 = \mu_0 = \arctg \left(\frac{R_{w0}}{\overline{OW}} \right) \quad (41)$$

$$\gamma_0 = \phi_0 = \frac{L_\infty}{\overline{OB}} - \frac{F_{b0}}{\overline{OB} k_s} \quad (42)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Son eşitlikte bulunan L_∞ salıncak yayının yerine takılmadan önceki uzunluğunu göstermektedir. Şekil 2 de görülen β ve θ açıları

$$\beta = \arctg \left(\frac{R_w + \delta_w}{\overline{OW}} \right) \quad (43)$$

$$\theta = \pi - \frac{\psi}{2} - \gamma_0 - \beta - \alpha_0 \quad (44)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir. Eşitlik (44) te bulunan ψ açısı Şekil 2 de görülmekte olup değeri keyfi olmakla birlikte 90 derece civarında bir değer vermek gerekmektedir. Eğrilik yarıçapının hesabında yol profili kullanılmaktadır. Yol profili yukarıda

$$y = \frac{1}{50} x^2 \quad (45)$$

şeklinde verilmiş olup eğrilik yarıçapı ve eğrilik yarıçapının zaman türevi

$$\rho = 25 \left(1 + \frac{x^2}{625} \right)^{1.5} \quad (46)$$

$$\dot{\rho} = \frac{75}{625} Vx \quad (47)$$

olur. Bu analiz her türlü yol profilinin kullanılmasına imkân vermektedir. Tekerleğe etkiyen zemin kuvvetinin

statik şartlardaki değeri

$$F_{w0} = \frac{W_b}{2} + W_w \quad (48)$$

olur. Bu eşitlikte W_b ile taşıtın gövdesinin ağırlığı, W_w ile salıncağın tekerlek ile birlikte toplam ağırlığı gösterilmektedir. Salıncağın statik şartlardaki moment dengesinden salıncak yaylarında statik şartlarda oluşan kuvvetin hesabı için

$$F_{b0} = \frac{\overline{OW}}{\overline{OB}} F_{w0} - m_w g \frac{\overline{OD}}{\overline{OB}} \sin\left(\theta + \arctg \frac{R_{w0}}{\overline{OW}}\right) \quad (49)$$

eşitliği türetilmiştir. Yukarıda türetilen momentum denklemlerinin çözümünde üçüncü dereceden bir Taylor serisi kullanılacağı için α , γ , ϕ ve μ açılarının üçüncü mertebe türevlerine de gereksinim vardır. Eşitlik (14), (25), (38) ve (39) un zaman türevleri alınarak

$$\ddot{\alpha} = -\frac{c_c \overline{OW}^2}{I_w} \ddot{\alpha} - \frac{k_w \overline{OW}^2}{I_w} \dot{\alpha} + \frac{k_s \overline{OB}^2}{I_w} \dot{\gamma} + \frac{c_d \overline{OB}^2}{I_w} \ddot{\gamma} - \frac{1}{I_w} \left[m_w g \overline{OD} \dot{\alpha} \cos(\theta + \alpha) - m_w V^2 \overline{OD} \sin(\theta + \alpha) \frac{\dot{\alpha}}{\rho} - m_w V^2 \overline{OD} \cos(\theta + \alpha) \frac{\dot{\rho}}{\rho^2} \right] \quad (50)$$

$$\ddot{\gamma} = -c_d \overline{OB}^2 \left(\frac{1}{I_b} + \frac{1}{I_w} \right) \ddot{\gamma} - k_s \overline{OB}^2 \left(\frac{1}{I_b} + \frac{1}{I_w} \right) \dot{\gamma} + \frac{k_s \overline{OA}^2}{I_b} \dot{\phi} + \frac{1}{I_b} c_d \overline{OA}^2 \ddot{\phi} + \frac{k_w \overline{OW}^2}{I_w} \dot{\alpha} + \frac{1}{I_w} c_c \overline{OW}^2 \ddot{\alpha} - \frac{1}{I_w} \left[-m_w g \overline{OD} \cos(\theta + \alpha) \dot{\alpha} + m_w \frac{V^2}{\rho} \overline{OD} \sin(\theta + \alpha) \dot{\alpha} + m_w \frac{\dot{\rho} V^2}{\rho^2} \overline{OD} \cos(\theta + \alpha) \right] + \frac{1}{I_b} \left[m_b g S_{gb} \cos\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) (\dot{\alpha} + \dot{\gamma}) - \frac{m_b V^2 S_{gb}}{\rho} \sin\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) (\dot{\alpha} + \dot{\gamma}) - \frac{m_b V^2 \dot{\rho} S_{gb}}{\rho^2} \cos\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) \right] \quad (51)$$

$$\ddot{\phi} = -c_d \overline{OA}^2 \left(\frac{1}{I_w} + \frac{1}{I_b} \right) \ddot{\phi} - k_s \left(\frac{1}{I_w} + \frac{1}{I_b} \right) \overline{OA}^2 \dot{\phi} + \frac{k_w \overline{OQ}^2}{I_w} \dot{\mu} + \frac{1}{I_w} c_c \overline{OQ}^2 \ddot{\mu} + \frac{k_s \overline{OB}^2}{I_b} \dot{\gamma} + \frac{1}{I_b} c_d \overline{OB}^2 \ddot{\gamma} + \frac{1}{I_w} \left[-m_w g \overline{OE} \cos(\theta + \alpha + 2\beta + \gamma + \psi + \phi) (\dot{\alpha} + \dot{\gamma} + \dot{\phi}) + \frac{m_w V^2 \overline{OE}}{\rho} \sin(\theta + \alpha + 2\beta + \gamma + \psi + \phi) (\dot{\alpha} + \dot{\gamma} + \dot{\phi}) + \frac{m_w V^2 \dot{\rho} \overline{OE}}{\rho^2} \cos(\theta + \alpha + 2\beta + \gamma + \psi + \phi) \right] - \frac{1}{I_b} \left[m_b g S_{gb} \cos\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) (\dot{\alpha} + \dot{\gamma}) - \frac{m_b V^2 S_{gb}}{\rho} \sin\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) (\dot{\alpha} + \dot{\gamma}) - \frac{m_b \dot{\rho} V^2 S_{gb}}{\rho^2} \cos\left(\theta + \alpha + \beta + \gamma + \frac{\psi}{2} - \pi\right) \right] \quad (52)$$

$$\ddot{\mu} = -\ddot{\alpha} - \ddot{\gamma} - \ddot{\phi} \quad (53)$$

eşitlikleri elde edilir.

3.3. Sayısal Çözüm Yöntemi

Denklemlerin çözümü için FORTRAN dilinde bir simülasyon programı hazırlanmıştır. Aracın davranışlarının simülasyonuna $x = -500 \text{ m}$ gibi eğrilik yarıçapı yeterince büyük olan bir noktadan başlanmıştır. Bu noktada araca etkiyen atalet kuvveti yeterince küçük olup aracın statik şartlardaki görünümü devam etmektedir. Programın en başında değeri değişmeyen girdiler tanıtılmıştır. Değeri değişmeyen girdileri takiben $\dot{\alpha}_0 = 0$, $\dot{\gamma}_0 = 0$, $\dot{\phi}_0 = 0$, $\dot{\mu}_0 = 0$ şeklindeki sınır şartları tanıtılmıştır. Sonra (40) dan (49) a kadar olan eşitlikler metin içerisindeki verilmiş sırasına göre kullanılarak R_{w0} , α_0 , μ_0 , γ_0 , ϕ_0 , β , θ , ρ_0 , $\dot{\rho}_0$, F_{w0} ve F_{b0} değerleri hesaplanmıştır. γ_0 ile F_{b0} arasında birbirine bağımlılık olduğu için bu hesap iteratif işlem yapmayı gerektirmiştir. F_{b0} ın Eşitlik (42) de kullanılan atma değeri ile Eşitlik (49) dan hesaplanan değeri eşitleninceye kadar birkaç iterasyon yapmak gerekmektedir. Sonra (14), (25), (38), (39) eşitlikleri kullanılarak açısal ivmelerin başlangıç değerleri olan $\ddot{\alpha}_0$, $\ddot{\gamma}_0$, $\ddot{\phi}_0$, $\ddot{\mu}_0$ hesaplanmıştır. Açısal ivmeleri takiben (50), (51), (52) ve (53) eşitlikleri kullanılarak üçüncü mertebe türevler $\ddot{\alpha}_0$, $\ddot{\gamma}_0$, $\ddot{\phi}_0$ ve $\ddot{\mu}$ hesaplanmış ve başlangıç noktasının verileri tamamlanmıştır.

Birinci zaman adımının sonundaki açılar

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \frac{\dot{\alpha}_0}{1!} \Delta t + \frac{\ddot{\alpha}_0}{2!} \Delta t^2 + \frac{\ddot{\alpha}_0}{3!} \Delta t^3 \quad (54)$$

$$\gamma_1 = \gamma_0 + \frac{\dot{\gamma}_0}{1!} \Delta t + \frac{\ddot{\gamma}_0}{2!} \Delta t^2 + \frac{\dddot{\gamma}_0}{3!} \Delta t^3 \quad (55)$$

$$\phi_1 = \phi_0 + \frac{\dot{\phi}_0}{1!} \Delta t + \frac{\ddot{\phi}_0}{2!} \Delta t^2 + \frac{\dddot{\phi}_0}{3!} \Delta t^3 \quad (56)$$

$$\mu_1 = 2\pi - 2\theta - \alpha_1 - 2\beta - \gamma_1 - \psi - \phi \quad (57)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır. Birinci zaman adımının sonundaki açısal hızların hesabı

$$\dot{\alpha}_1 = \dot{\alpha}_0 + \frac{\ddot{\alpha}_0}{1!} \Delta t + \frac{\dddot{\alpha}_0}{2!} \Delta t^2 \quad (58)$$

$$\dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma}_0 + \frac{\ddot{\gamma}_0}{1!} \Delta t + \frac{\dddot{\gamma}_0}{2!} \Delta t^2 \quad (59)$$

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_0 + \frac{\ddot{\phi}_0}{1!} \Delta t + \frac{\dddot{\phi}_0}{2!} \Delta t^2 \quad (60)$$

$$\dot{\mu}_1 = -\dot{\alpha}_1 - \dot{\gamma}_1 - \dot{\phi}_1 \quad (61)$$

eşitlikleri kullanılarak yapılmıştır. Sonra,

$$\Delta x = \frac{V \Delta t}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)_0^2}} \quad (62)$$

eşitliği kullanılarak birinci zaman adımı boyunca taşıtın x doğrultusunda aldığı yol hesaplanmıştır. Hesaplanan yol $x_1 = x_0 + \Delta x$ eşitliğinde kullanılarak taşıtın birinci zaman adımının sonunda bulunduğu konum belirlenmiştir. Taşıtın yeni konumu (46) ve (47) eşitliklerinde kullanılarak taşıtın yeni konumunun eğrilik yarıçapı ρ_1 ve eğrilik yarıçapının zaman türevi $\dot{\rho}_1$ hesaplanmıştır. Sonra (14), (25), (38), (39) eşitlikleri kullanılarak açısal ivmelerin yeni değerleri olan $\ddot{\alpha}_1$, $\ddot{\gamma}_1$, $\ddot{\phi}_1$, $\ddot{\mu}_1$ hesaplanmıştır. Açısal ivmeleri takiben (50), (51), (52) ve (53) eşitlikleri kullanılarak üçüncü mertebe türevler $\dddot{\alpha}_1$, $\dddot{\gamma}_1$ ve $\dddot{\phi}_1$ hesaplanmış ve birinci zaman adımının sonundaki veriler tamamlanmıştır. Simülasyonun sonraki adımlarında aynı işlemler tekrarlanmaktadır. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

4. Bulgular

4.1. Taşıtın Özgün Değerleri

Devrilme simülasyonunda kullanılan taşıt geometrisi Şekil 2 de görülmektedir. Bu taşıt Mac Pherson tipi bir salıncak mekanizmasına haizdir. Sağlıklı bir devrilme simülasyonunun yapılabilmesi için gerçekçi özgün değerlerin kullanılması gerekmektedir. Taşıtın salıncak yaylarının taşıta takılmadan önceki uzunluğu, taşıta bağlandıktan sonra statik şartlardaki uzunluğu, yay

sabiti, yayın doğrultusu, yayın O noktasından uzaklığı, salıncak damperlerinin sönümleme sabiti, tekerleklerin çapı, lastik kısmının ölçüleri ve yay sabiti, sönümleme sabiti, Şekil 2 de görülen ψ , θ ve β açılarının değerleri, salıncak kollarının statik şartlardaki doğrultusu, gövdenin ve salıncakların kütle merkezleri, salıncaklar ve gövdenin kütle atalet momentleri, belirlenmesi gereken belli başlı özgün değerlerdir. Devrilme simülasyonunda kullanılacak olan özgün değerlerin bir kısmı yüke bağlı olarak değişim gösterirken bir kısmı sabit kalmaktadır. Tablo 1 de verilen özgün değerler yüklü ve yüksüz taşıtta aynı olan değerlerdir. Taşıt yüklendiğinde değişim gösteren özgün değerler Tablo 2 ve 3 te kıyaslamalı olarak verilmektedir.

Şekil 2 de görülen sağ ve sol tekerleklerin her birisi taşıtın ön ve arka tekerleğinin ikisini temsil etmektedir. Tablo 1 de birinci satırda taşıtın bir tarafındaki ön ve arka tekerler ve salıncaklarının toplam kütle atalet momentinin yaklaşık değeri verilmektedir. İkinci satırda ise yüksüz taşıtın gövdesinin (1200 kg) O noktasına göre kütle atalet momenti verilmektedir. Taşıt yüklendiği zaman kütle artarken kütle merkezinin O noktasından uzaklığı artabilir veya azalabilir. Gövdenin kütle atalet momenti bir miktar değişim sergileyecektir. Bu değişimi belirlemek kapsamlı bir iş olduğu için bu çalışmada kütle atalet momenti sabit kabul edilmiştir. Tablo 1 in üçüncü satırında verilen kütle sol ya da sağdaki ön ve arka tekerleklerin salıncaklar ile beraber toplam kütlesidir. Satır 8 ve 9 da salıncak yayının boyu ve yay sabiti verilmektedir. Boy artarken yay sabiti azalmaktadır. Yayın boyunun azaltılması ve sertliğinin artırılması yolcuların konforu açısından olumsuzdur. Yayın boyu istatistik bilgiler kullanılarak belirlenmiştir. Satır 10 da verilen damper sabiti de ön ve arka tekerleklerin birleşik sabitidir. Satır 15 te takdim edilen OA ve OB mesafeleri keyfi değerler olup taşıtın dış görünümü, Montaj Şartları ve Karayolu Trafik İşaretleme Standartları-1 yönetmeliği (Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı, 2020) dikkate alınarak belirlenmiştir. Yayın sertliği arttıkça OA ve OB mesafeleri kısalmaktadır.

Tablo 2 ve 3 te yüke göre değişen özgün değerlerin kıyaslaması verilmektedir. Yüksüz taşıtın salıncak yayının uzunluğu 298.2 mm iken taşıt 400 kg ile yüklendiğinde yayın uzunluğu 261.4 mm ye düşmektedir. Yayın boyunda yaklaşık 36.8 mm kısalma olmaktadır. Bu değişim taşıtın konforunun yeterli olduğunu göstermektedir çünkü mevcut taşıtlarda değişim daha azdır. Yüksüz taşıtta tekerlek ezilmesi 35.3 mm iken yüklü taşıtta 45.1 mm ye yükselmektedir. Tekerlek ezilmesinin mevcut taşıtlardakine yakın olduğu görülüyor. Yüksüz taşıtta salıncak yayında oluşan kuvvet 7349 N iken yüklü taşıtta 9702 N ye yükselmektedir. Yayıdaki kuvvet artışı 2353 N olup, yayın kısalması ile yay sabiti çarpıldığında aynı değer elde edilmektedir. Bu netice taşıtın statik hesaplarında

kullanılan matematik modelin doğruluğunu teyit etmektedir.

Tablo 1. Yüke Bağlı Olmayan Özgün Değerler

Özgün değerin adı	Sembolü	Birim	Değeri
Ön ve arka teker ve salıncaklarının toplam kütle atalet momenti	I_w	m ² kg	60
Gövdenin kütle atalet momenti	I_b	m ² kg	300
Ön ve arka teker ve salıncaklarının toplam kütlesi	m_w	kg	120
Boş aracın gövdesinin kütlesi	m_b	kg	1200
Salıncak kollarının uzunluğu	OW, OQ	mm	700
Boş araçta tekerlek merkezleri arasındaki mesafe	2L	mm	1400
Tekerleğin taşıta takılmazdan önceki yarıçapı	R_w	mm	300
Salıncağın kütle merkezinin O noktasından uzaklığı	OD, OE	mm	595
Salıncak yayının araca takılmadan önceki uzunluğu	L_{∞}	mm	413
Sağdaki yada soldaki iki salıncağa ait iki yayın toplam sabiti	k_s	N/m	2x32000
Sağdaki ya da soldaki iki salıncağa ait iki damperlerin toplam sabiti	c_d	Ns/m	2x2500
Sağdaki yada soldaki iki tekerleğin toplam yay sabiti	k_w	N/m	2x10000
İki lastik tekerleğin sönümleme sabiti	c_c	Ns/m	2x1500
Gövdenin çatal açısı	ψ	derece	90
Gövdenin kütle merkezinin O dan uzaklığı	S_{gb}	mm	500
Yay tablası ile tekerlek arasındaki mesafe	δ_w	mm	85
Salıncak yayının bağlama noktalarının (Şekil 2 de A ve B noktaları) O dan uzaklığı	OA, OB	mm	580

Tablo 2. Boş Aracın Özgün Değerleri (1200 kg)

Özgün değerin adı	Sembolü	Birim	Değeri
Kritik hız	V	m/s	19.2
Salıncak yayının araç üzerindeki uzunluğu	$(\gamma_0 \times OB)$	mm	298.2
Tekerleğin ezik kısmının yarıçapı	R_{w0}	mm	264.7
Statik şartlarda salıncak yaylarında oluşan kuvvet	F_{b0}	N	7349
α açısının statik değeri	α_0	derece	20.71
μ açısının statik değeri	μ_0	derece	20.71
γ açısının statik değeri	γ_0	derece	29.45
ϕ açısının statik değeri	ϕ_0	derece	29.45
θ açısının statik değeri	θ	derece	56

Tablo 3. Yüklü Aracın Özgün Değerleri (1600 kg)

Özgün değerin adı	Sembolü	Birim	Değeri
Kritik hız	V	m/s	18.22
Salıncak yayının araç üzerindeki uzunluğu	$(\gamma_0 \times OB)$	mm	261.4
Tekerleğin ezik kısmının yarıçapı	R_{w0}	mm	254.9
Statik şartlarda salıncak yaylarında oluşan kuvvet	F_{b0}	N	9702
α açısının statik değeri	α_0	derece	20.00
μ açısının statik değeri	μ_0	derece	20.00
γ açısının statik değeri	γ_0	derece	25.82
ϕ açısının statik değeri	ϕ_0	derece	25.82
θ açısının statik değeri	θ	derece	60.36

Şekil 2 de görülen θ açısı taşıt yüksüz iken 56 derece olup taşıt yüklendiğinde 60.36 dereceye çıkmaktadır. Bu açı taşıtın tabanının (O noktasının) yerden yüksekliğini tayin etmektedir. Taşıta 400 kg yük bindirildiği zaman salıncak kolunun yatayla yaptığı açı 9.64 derece olmaktadır. Azami yük şartlarında salıncak kolunun yatay konuma yaklaşması damperin çalışma genliğini genişleterek yol pürüzlülüğünün sebep olduğu titreşimlerin salıncak damperleri tarafından daha iyi sönümlemesini sağlamaktadır. Bu şartlarda O noktasının yerden yüksekliği en az 372 mm civarında bir değere sahiptir. Bu değer tasarlanan taşıtın kötü yollarda rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Yüksüz taşıtta α_0 ve μ_0 açıları 20.71 derece iken yükleme yapıldığında 20 dereceye düşmektedir. Bu açıların azalması tekerlek ezilmesinin sonucudur. Yukarıda da açıklandığı üzere yükleme yapıldığında tekerlek ezilmesi 9.8 mm daha artmaktadır. Yüksüz taşıtta γ_0 ve ϕ_0 açıları 29.45 derece iken yüklemeden sora 25.82 dereceye düşmektedir. Bu açıların azalması salıncak yayının ksalmasının bir neticesidir. Tablo 2 ve 3 te yer alan θ ve α_0 açılarının toplamı salıncak kolunun eğimini tayin etmektedir. Yüksüz araçta salıncak kolunun yatayla yaptığı açı 13.3 derece iken yüklü araçta 9.64 dereceye düşmektedir. Salıncak kolunun eğimi dikkate alınarak tekerlekler arası dıştan dışa mesafe yüksüz araçta 1562 mm, yüklü araçta 1580 mm olarak belirlenir. Tekerleklerin dıştan dışa mesafesinin azalması devrilme olayının daha düşük hızlarda olması yönünde etki yapmaktadır. Bununla

birlikte fark 18 mm gibi küçük bir sayı olduğu için etkisi oldukça az olacaktır. Tekerleklerin dıştan dışa mesafesi karayolları nizamnamesi ile uyumludur.

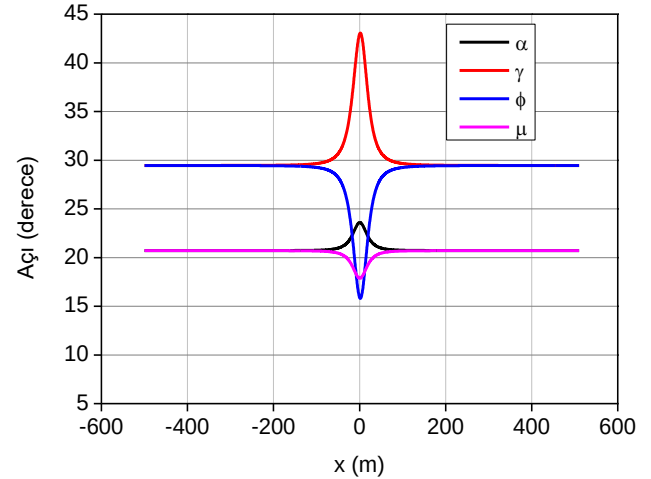
4.2. Aracın Virajdaki Dinamik Davranışları

Aracın yüksüz ve tam yük şartlarında Eşitlik (45) ile tanımlı bir yol üzerinde sabit hızlar ile hareket ederken sergilediği yalpalanmalar Şekil 4 ve Şekil 5 te α , γ , ϕ ve μ açılarının değişimi cinsinden gösterilmiştir. Araç yüksüz iken kritik devrilme hızı 19.2 m/s olarak, tam yükte iken 18.22 m/s olarak belirlenmiştir. Kritik hızlar virajın en dar olduğu yerde sağdaki tekerleğin yere temas basıncının sıfıra düştüğü hızlardır. Bu hızların üzerinde taşıt devrilme sürecine girmektedir. Aracın davranışları $x=-500$ m ile $x=+500$ m arasında incelenmiştir. Başlangıç noktası $x=-500$ m gibi büyük bir değer olmadığı sürece gerçekçi sınır şartları belirlemek mümkün olmamaktadır. Virajın en dar yeri $x=0$ da olup burada eğrilik yarıçapı 25 m ye düşmektedir. Şekil 4 ten görüldüğü üzere araç yüksüz iken γ ve ϕ açılarının değişimi $x=-200$ m civarında belirgin hale gelmektedir. Araç yüklü olduğu zaman γ ve ϕ açılarının değişimi $x=-200$ m den daha önce belirgin hale gelmektedir. Bu açıların sınır değerleri $x=0$ in çok az sağında ortaya çıkmaktadır. Araç yüksüz iken α ve μ açılarının değişimi $x=-150$ m civarında belirgin hale gelmektedir. Araç yüklü olduğu zaman değişim $x=-200$ m den önce belirginleşmektedir. Bu açıların maksimum değerleri de $x=0$ in çok az sağında ortaya çıkmaktadır. Salıncak yayının yay sabiti belirlenirken dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan bir tanesi soldaki yayın virajdaki minimum uzunluğudur. Bu yayın minimum uzunluğunu ϕ açısının minimum değeri tayin etmektedir. Her iki şekilden görüldüğü üzere ϕ açısı aşırı azalmalar sergilememektedir. Yüksüz ve tam yük şartlarında ϕ açısının minimum değerleri 15.82 derece ve 8.76 derece olarak belirlenmiştir. Buna göre tam yükte virajın en dar yerinde soldaki salıncak yayının uzunluğu 89 mm ye düşmektedir. Bu durumda yayın sarımları arasındaki boşluk sıfıra düşmekte ve mekanik temas hali ortaya çıkmaktadır. Kullanılan yayın yay sabiti 32000 N/m olup bu değer kritik bir değer olduğu görülmektedir. Yay sabiti daha da arttırılırsa taşıtın konforundan taviz vermek, daha da azaltılırsa virajda gidiş hızından taviz vermek gerekmektedir. Yay sabitinin matematik tanımı

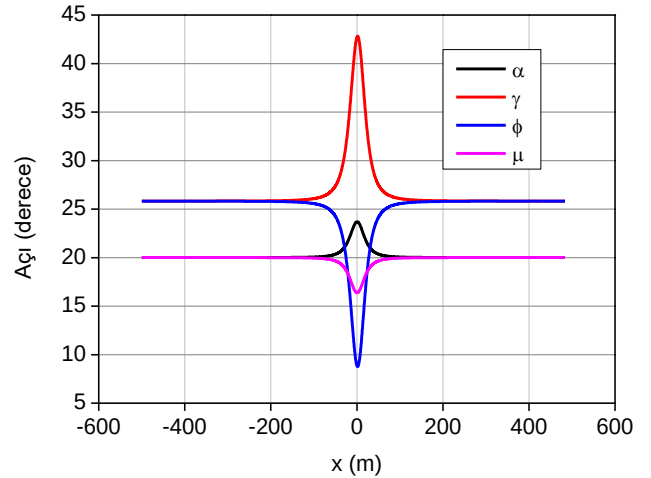
$$k = \frac{dF}{dl} \text{ şeklinde verilmektedir. Eğer } k \text{ sabitse bu}$$

yaylara lineer yay denmektedir. Hem konforu yüksek hem de viraj alma hızı yüksek bir taşıtın tasarlanabilmesi için lineer olmayan bir yay kullanmak gerekmektedir. Lineer olmayan yaylarda k sabit olmayıp esneme miktarı ile değişim göstermektedir. Lineer olmayan yayların farlı çeşitleri bulunmaktadır. Sarımlarının çapı veya tel çapı değişken olan yayalar

lineer olmayan yaylardır. Tel çapı ve sarım çapı aynı olup sarım sıklığı değişen yaylar lineer olmayan yayların bir diğer şekli olup otomotiv sektöründe bunlar daha çok kullanılmaktadır. Viraj denge çubuğu olarak adlandırılan elemanlar da devrilmeyi önlemek için kullanılan teknolojilerden olup, belirli bir yalpa açısını sonra salıncağa ilave kuvvet uygulayarak taşıtın devrilmesini önlemektedir.



Şekil 4. Yüksüz Aracın Kritik Hızda Virajdaki Davranışları



Şekil 5. Tam Yüklü Aracın Kritik Hızda Virajdaki Davranışları

Şekil 4 ve Şekil 5 ten görüldüğü üzere araç $x=0$ civarında iken yüksüz ve tam yük şartlarda μ açısı 17.87 derece ve 16.4 derece olmaktadır. Bu açılar sol tekerleğin yere basan kısmının yarıçapının yaklaşık 74 ve 94 mm küçülmesine karşılık gelmektedir. Bu ölçüde bir ezilme tekerleğin yay sabitinin yetersiz olduğunu göstermekle birlikte, tekerleğin yay sabiti yüklü şartlarda $k_w = 2 \times 150000$ N/m değerine yükseltildiğinde bile ezilme 72 mm civarında olmaktadır. Bu netice tekerleğin yanak genişliğinin en az 150 mm gibi bir değere haiz olmasını gerektirmektedir. Mevcut taşıtlarda ise tekerleklerin yanak genişliği 120 mm yi

geçmemektedir. Bu netice tekerleğin yay sabitinin lineer kabul edilmesinin bir miktar hataya sebep olduğunu göstermektedir. Hakikatte tekerleğin ezilmesi zemin kuvveti ile lineer değişmemektedir. Tekerleğe etkiyen zemin kuvveti arttıkça tekerleğin k_w değeri artış göstermektedir. Bu sebeple μ açısının yüksüz ve yüklü şartlarda 17.87 ve 16.4 dereceye düşmesi mümkün değildir. Wang ve arkadaşları (Wang ve diğ., 2021) tekerleklerin yay sabitinin yüke bağlı olarak değişimini belirlemek için yaptıkları bir deneysel çalışmanın bulgularını bir grafik ile göstermişlerdir. Tablo 3 ten ve Şekil 5 ten görüldüğü üzere tam yükte ve düz yolda α açısı 20.00 derece iken $x=0$ m civarında 23.7 dereceye yükselmektedir. Sağ tekerleğin yere basan kısmının yarıçapı yaklaşık 45 mm genişlemekte ve tekerleğe etkiyen zemin kuvveti sıfıra düşmektedir.

Şekil 6 da ve Şekil 7 de aracın kritik hızla yüksüz ve tam yükte Eşitlik (45) ile tanımlanan virajda ilerlerken tekerleklerine etkiyen zemin kuvvetleri görülmektedir. Aynı şekiller üzerinde Eşitlik (22) ile tanımlanan ivme kuvveti vektörünün eğimi de gösterilmiştir. Yüksüz taşıt düz yolda 19.2 m/s hız ile ilerlerken tekerleklere etkiyen zemin kuvveti 7060 N olup, $x=0$ m civarında sağ tekerleğe etkiyen zemin kuvveti sıfıra düşmekte, sol tekerleğe etkiyen zemin kuvveti 14004 N ye yükselmekte ve devrilme başlangıcı ortaya çıkmaktadır. Şekilde 6 da görülememekle birlikte bu şartlarda eğim

$$E_a = \frac{\rho g}{V^2} = 0.668 \text{ olmaktadır. Yüklü taşıt düz yolda}$$

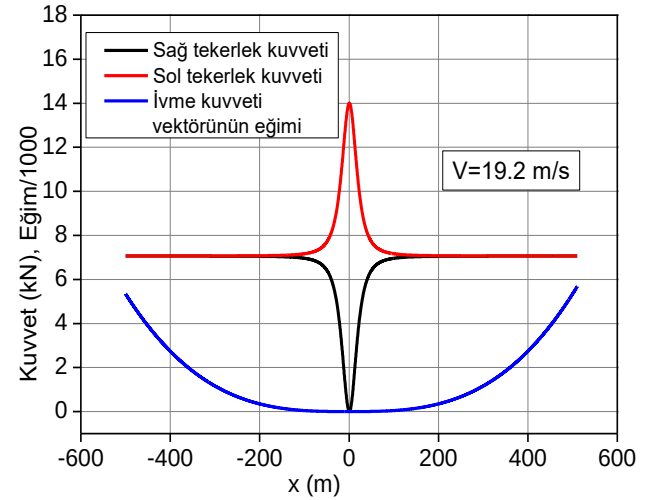
18.22 m/s hızla ilerlerken tekerleğe etkiyen zemin kuvveti 9020 N olup $x=0$ m civarında sağ tekere etkiyen zemin kuvveti sıfıra düşmekte, sol tekere etkiyen zemin kuvveti 17907 N ye yükselmekte ve devrilme başlangıcı ortaya çıkmaktadır. Şekil 7 de görülmemekle birlikte bu

durumda eğim $E_a = \frac{\rho g}{V^2} = 0.688$ olmaktadır. Taşıtın geometrisinden Şekil 2 de görülen σ açısının tanjantı

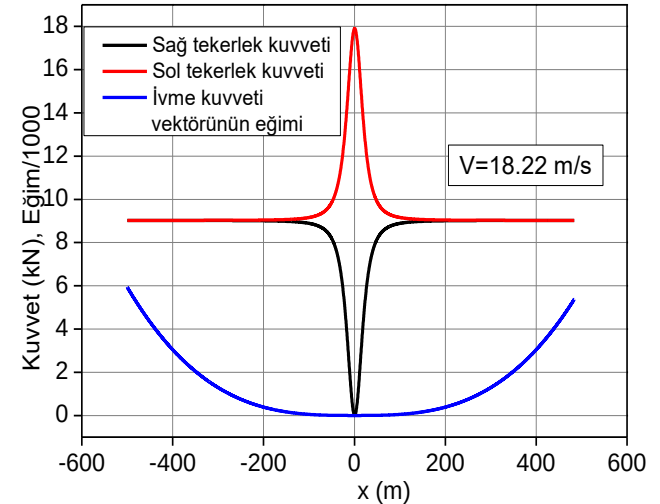
$$tg\sigma \approx \frac{OW}{\left(\frac{cg \text{ nin yerden } }{yüksekliği} \right)} \approx \frac{OW}{R_w + S_{gb}} = 0.875 \quad (63)$$

olarak hesaplanır. $E_a < tg\sigma$ durumunun ortaya çıkması aracın gövdesine etkiyen ivme kuvveti vektörünün taşıtı devirmeye çalışan net bir moment ürettiğini göstermektedir. Bu sebeple $E_a < tg\sigma$ eşitsizliği yaklaşık bir devrilme kriteri olarak kullanılabilir. Kritik hızda, yüksüz durumda taşıtın toplam ağırlığı 14126 N iken virajın en dar yerinde sol tekere binen yük 14004 N, kritik hızda yüklü durumda taşıtın toplam ağırlığı 18050 N iken virajın en dar yerinde sol tekere binen yük 17907 N olmaktadır. Her iki durumda sol tekere binen yük taşıtın toplam ağırlığından çok küçük bir miktarda eksik

kalmaktadır. Bu farkın sebebi net olarak belirlenememiş olmakla birlikte dinamik bir kuvvetin etkisi olabilir.



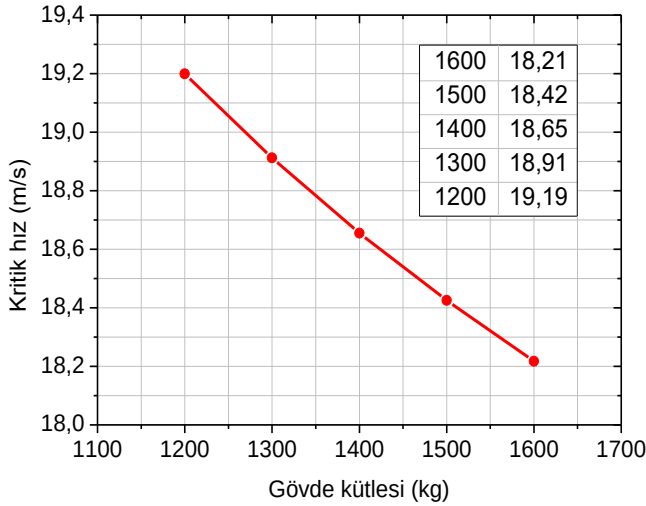
Şekil 6. Yüksüz Araçta Kritik Hızda Zemin Kuvvetleri ve İvme Kuvveti Vektörünün Eğimi



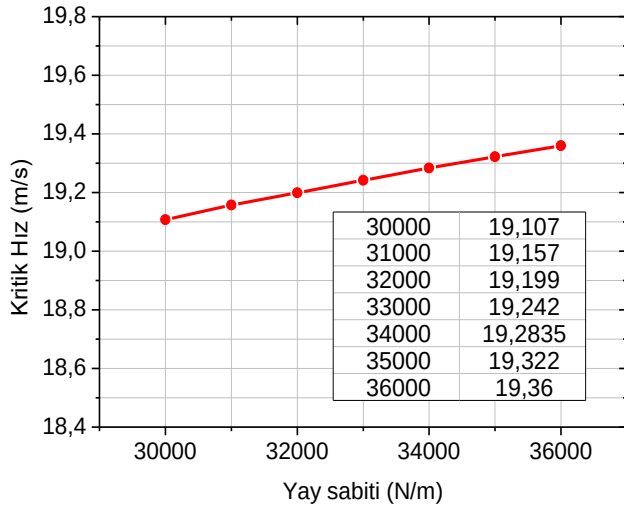
Şekil 7. Tam Yüklü Araçta Kritik Hızda Zemin Kuvvetleri ve İvme Kuvveti Vektörünün Eğimi

Şekil 8 de kritik hızın gövdenin kütlesi ile değişimi verilmektedir. Gövdenin kütlesi taşıta bindirilen yük nedeni ile değişmektedir. İncelemeler yine Eşitlik (45) ile tanımlanan yol kullanılarak yapılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere büyük yüklerde devrilme daha küçük hızlarda olabilmektedir. Bununla birlikte taşıtın kütlesi %33 değişirken taşıtın devrilme hızının değişimi % 5.5 seviyesinde kalmaktadır. Devrilme hızının yük artarken değişiminin başlıca sebebi gövdenin maruz olduğu merkezci ivmeden doğan atalet kuvvetidir. Salıncaklara etkiyen atalet kuvvetlerinin de devrilme üzerinde etkisi vardır. Şekilden görüldüğü üzere yük artarken hız eğrisinin eğimi biraz azalış sergilemektedir. Arabanın ağırlık merkezinin değişmesi, salıncakların ağırlık merkezinin değişmesi ve tekerlekler arasındaki mesafenin değişmesi hız eğrisinin eğiminin azalması üzerinde etkili olabilecek faktörlerdir.

Şekil 9 da devrilme hızının salıncak yayının sertliğinin (yay sabiti) değişimi ile ilişkisi görülmektedir. İnceleme Eşitlik (45) ile verilen yol profili ile yapılmıştır. Taşıt kütlesi 1200 kg olarak seçilmiştir. Diğer girdiler Tablo 1 ve 2 de mevcuttur. Şekilden görüldüğü üzere yay sabitinin artması devrilmeyi geciktirmektedir. Yay sabiti 30 kN den 36 kN ye değişirken devrilme hızının gecikmesi % 1.3 kadar olmaktadır. Yay sabiti artarken devrilme hızı eğrisi yavaşlayan bir artış göstermektedir. Bu yavaşlama kütle merkezinin değişiminden kaynaklanabilir.



Şekil 8. Gövdenin Kütlesinin Kritik Hıza Etkisi



Şekil 9. Kritik Hızın Salıncak Yay Sabiti İle Değişimi

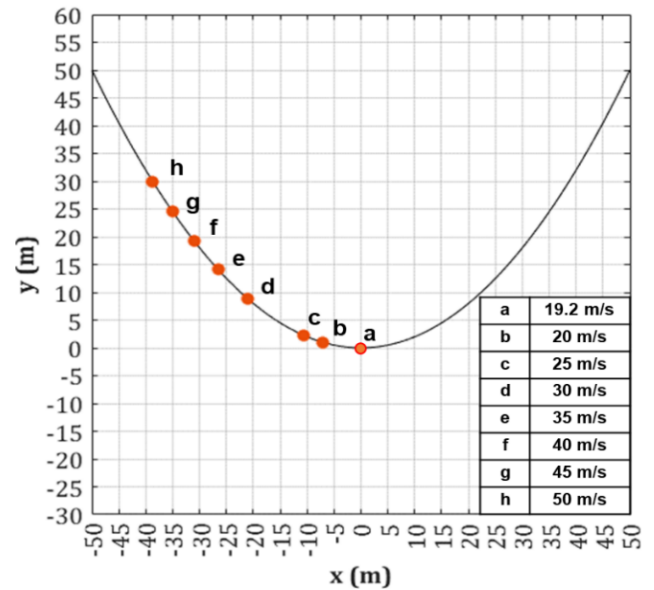
Taşıtların virajlarda devrilme kritik hızının artırılması için kullanılabilecek en etkili yöntem kütle merkezinin yüksekliğinin azaltılmasıdır. Kütle merkezinin yüksekliği azalırken moment kolu kısalmakta, neticede gövdenin kütle atalet momenti de azalmaktadır. Bu durum taşıtın devrilme ivmesini azaltmaktadır. Ancak önceden belirtildiği gibi atalet momentinin değişimini hesaba katmak zor bir iş olup, bu analizde gövdenin kütle atalet momenti sabit kabul edilmektedir. Gövdeye etkiyen atalet kuvvetinin moment kolu Şekil 2 de

görülen O noktası ile gc noktasının arasında kalan mesafedir. Kütle atalet momenti sabit tutularak atalet kuvvetinin moment kolu azaltılırsa virajdaki devrilme kritik hızının değişimi Şekil 10 da görüldüğü gibi olmaktadır. Şekil 10 da kullanılan veriler 1200 kg taşıt gövde kütlesi için elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere gövdenin kütle merkezinin O noktasından uzaklığı azalırken kritik hız ivmelenen bir artış sergileyerek aracın istikrarını iyileştirmektedir.



Şekil 10. Gövdenin Kütle Merkezinin O Noktasından Uzaklığının Kritik Hıza Etkisi

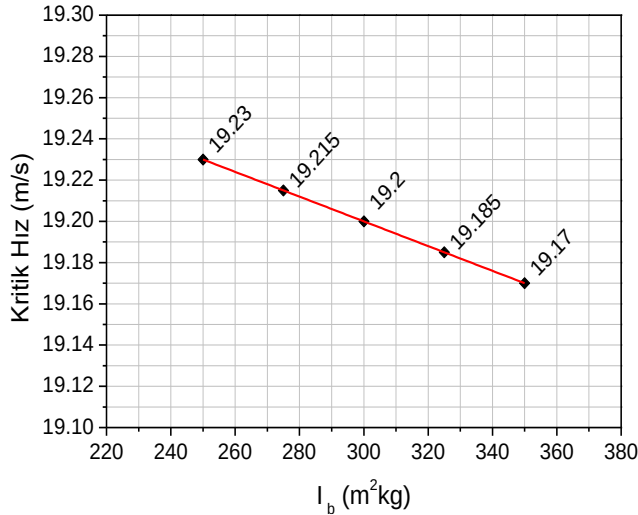
Şekil 11 de yüksüz taşıtın devrilme noktasının taşıt hızına göre değişimi verilmektedir. Görüldüğü üzere taşıt hızı 19.2 m/s iken $x=0$ civarında devrilme meydana gelmektedir. Hız artarken devrilmeyen $x=0$ dan daha önceleri vuku bulduğu görülmektedir. Hız 50 m/s olursa devrilme $x=-39$ m noktasında meydana gelmektedir.



Şekil 11. Taşıt Hızının Devrilme Noktasına Etkisi

Şekil 12 de taşıt gövdesinin ağırlık merkezi ile O noktası arasındaki mesafenin aynı kalması şartıyla, gövdenin kütle atalet momentindeki değişimin kritik hıza etkisi

görülmektedir. Kütle merkezinin yeri O noktasına göre değişmediği halde kütle atalet momentinin değişmesinin sebebi yükü taşıyan yan tarafına doğru genişlemesinden olabilir. Gövdenin kütle atalet momentinin değişimi ile taşıyan istikrarı çok hızlı bir değişim göstermemektedir. Gövdenin kütle atalet momenti 250 m²kg dan 350 m²kg a artarken kritik hız 19.23 m/s den 19.17 m/s ye düşmektedir.



Şekil 12. Gövde Atalet Momentinin Kritik Hıza Etkisi

5. Sonuçlar

Yüksüz iken toplam kütlesi (gövde ile tekerlek-süspansiyon sisteminin toplam kütlesi) 1440 kg, yüklü iken 1840 kg olan bir taşıyan eğrilik yarıçapı 25 m ye kadar düşüş gösteren bir yolda 18 m/s den daha hızlı gidebilmesi için salıncak yayı sabitinin 32000 N/m den daha büyük olması gerekmektedir. Söz konusu taşıyan daha hızlı kullanılabilmesi için lineer olmayan yay kullanmak gerekmektedir.

- Yay sabitinin artma yönündeki değişimi taşıyan devrilme riskini çok düşük seviyede etkilemektedir.
- Araç kütlesinin artması devrilme riskini az miktarda arttırmaktadır.
- Yüksüz iken toplam kütlesi 1440 kg olan bir aracın tekerleklerinin yay sabiti 100000-150000 N/m civarında tahmin edilmektedir.
- İvme kuvveti vektörünün eğimi taşıyan kütle merkezini tekerleğin tabanına birleştiren doğrunun eğiminden daha az ise devrilme şartları oluşmaktadır.
- Gövdenin kütle merkezinin aşağı çekilmesi devrilme riskini azaltan en önemli faktördür.
- Geliştirilen simülasyon programı bir saniyeden daha az bir süre içinde 1000 m uzunluğundaki bir virajlı yolda dinamik simülasyon işlemini tamamlamaktadır.
- Taşıyan gövdesinin ağırlık merkezinin moment alma noktasından uzaklığı sabit kaldığı sürece gövdenin

kütle atalet momentinin değişmesi kritik hızı çok az etkilemektedir.

- Taşıyan kritik hızın üstündeki hızlarda kullanılırsa devrilme noktasının hızla bağlı olarak yer değiştirmesi çok ani olmaktadır.

Araştırmacıların Katkısı

Yazar adı ve soyadı	Katkı
Halit KARABULUT	Fiziki mekanizma ve matematik modelin oluşturulması
Emre YILDIRIM	Analizlerin gerçekleştirilmesi ve literatür araştırması
Mesut DÜZGÜN	Kontrol, uyarılma ve revizyon süreçlerinin gerçekleştirilmesi
Kazım Melih TURGUT	Analizlerin gerçekleştirilmesi ve bulguların elde edilmesi

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Anh, N. T. (2020). Predict the rollover phenomenon of the vehicle when steering. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 20(5), 31-40. <https://www.ijens.org/ijmme.html>
- Cheng, C., & Cebon, D. (2011). Parameter and state estimation for articulated heavy vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 49(1-2), 399-418. <https://doi.org/10.1080/00423110903406656>
- Das, R. K., Hossain, M. A. M., Islam, M. T., & Banik, S. C. (2022). Vehicle dynamics, lateral forces, roll angle, tire wear and road profile states estimation—A review. *International Journal for Engineering Modelling*, 35(2), 65-89. <https://doi.org/10.31534/engmod.2022.2.ri.05b>
- Ertlmeier, R., & Spannus, P. (2008, July). *Expanding design process of the Air bag Control Unit (ACU)—Connection of active and passive safety by using vehicle dynamics for rollover and side crash detection*. In 2008 International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (pp. 1-9). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WISES.2008.4623309>
- Garcia Guzman, J., Prieto Gonzalez, L., Pajares Redondo, J., Montalvo Martinez, M. M., & Boada, M. J. (2018). Real-time vehicle roll angle estimation based on

- neural networks in IoT low-cost devices. *Sensors*, 18(7), 2188. <https://doi.org/10.3390/s18072188>
- Gillespie, T. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International. ISBN: 978-1-4686-0176-3.
- Hamblin, B. C., Martini, R. D., Cameron, J. T., & Brennan, S. N. (2006). *Low-order modeling of vehicle roll dynamics*. In *Proceedings of the American Control Conference* (pp. 4008-4015). <https://doi.org/10.1109/ACC.2006.1657345>
- Hac, A., Brown, T., & Martens, J. (2004). Detection of vehicle rollover. *SAE Technical Paper*, 2004-01-1757. <https://doi.org/10.4271/2004-01-1757>
- Jalali, M., Hashemi, E., Khajepour, A., Chen, S. K., & Litkouhi, B. (2018). Model predictive control of vehicle roll-over with experimental verification. *Control Engineering Practice*, 77, 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.04.008>
- Jeong, H. B., You, S. H., Kang, H. H., & Ahn, C. K. (2017, November). *Vehicle roll angle and bank angle estimation using FIR filtering*. In *Eighth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, pp. 348-352. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICIP.2017.8113969>
- Jung, J., Shim, T., & Gertsch, J. (2009). A vehicle roll-stability indicator incorporating roll-center movements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(8), 4078-4087. <https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2021420>
- Karabulut, H., Öztürk, E., & Cinar, C. (2011). Dynamic modeling and investigation of vibrations of a single cylinder four-stroke diesel engine. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(1), 173-183. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd>
- Menhour, L., Koenig, D., & d'Andréa-Novel, B. (2012). Road bank and vehicle roll angles estimation based on proportional-integral observer. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(20), 1185-1190. <https://doi.org/10.3182/20120829-3-MX-2028.00075>
- National Highway Traffic Safety Administration, 2010. *Traffic Safety Facts: 2008 Data*, DOT HS 811 368, 12 pp, <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/811659>
- Nguyen, D. N., & Nguyen, T. A. (2023). Investigate the relationship between the vehicle roll angle and other factors when steering. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2023, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2023/6069078>
- Öztürk, E., Karabulut, H. (2012). Dynamic and vibration analysis of a single cylinder diesel engine. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(3), 491-500. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd>
- Putgöl, Y., & Altıparmak, D. (2016). Vehicle suspension system types and their effects on front axle geometry. *Journal of Polytechnic*, 19(2), 195-202. <https://doi.org/10.2339/2016.19.2.195-202>
- Rajamani, R. (2012). *Vehicle dynamics and control*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>
- Rajamani, R., Piyabongkarn, D., Tsourapas, V., & Lew, J. Y. (2011). Parameter and state estimation in vehicle roll dynamics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(4), 1558-1567. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2164246>
- Rahimi, S., & Naraghi, M. (2018). Design of an integrated control system to enhance vehicle roll and lateral dynamics. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(5), 1435-1446. <https://doi.org/10.1177/0142331216685389>
- Ryu, J., & Gerdes, J. C. (2004). *Estimation of vehicle roll and road bank angle*. In *Proceedings of the 2004 American Control Conference* (Vol. 3, pp. 2110-2115). <https://doi.org/10.23919/ACC.2004.1383772>
- Simon, D. (2001). Kalman filtering. *Embedded Systems Programming*, 14(6), 72-79. https://engagedscholarship.csuohio.edu/enece_facpub/138
- Solmaz, H., & Karabulut, H. (2015). A mathematical model to investigate effect of misfire and cyclic variations on crankshaft speed fluctuations in internal combustion engines. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(4), 1493-1500. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0322-8>
- Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı. (2020). *Montaj Şartları ve Karayolu Trafik İşaretleme Standartları-1*.
- Wang, C., Wang, Z., Zhang, L., Cao, D., & Dorrell, D. G. (2021). A vehicle rollover evaluation system based on enabling state and parameter estimation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4003-4013. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3012003>
- Xiao, F., Hu, J., Zhu, P., & Deng, C. (2023). Chassis coordinated control based on ideal roll angle to improve vehicle stability. *Vehicle System Dynamics*, 1677

61(8), 2074-2102.
<https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2101479>

Xu, L., & Tseng, H. E. (2007). Robust model-based fault detection for a roll stability control system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(3), 519-528.
<https://doi.org/10.1109/TCST.2006.890287>

Yu, G., Wang, D., Li, Q., Wang, P., & Wang, Y. (2013). Road bank estimation for bus rollover prediction. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 7(5), 2027.
<http://dx.doi.org/10.12785/amis/070543>

Zhang, X., Yan, Y., Guo, K., Yang, Y., & He, G. (2022). Vehicle roll centre estimation with transient dynamics via roll rate. *Vehicle System Dynamics*, 60(2), 699-717.
<https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1838565>

Zhang, N., Dong, G. M., & Du, H. P. (2008). Investigation into untripped rollover of light vehicles in the modified fishhook and the sine maneuvers. Part I: Vehicle modelling, roll and yaw instability. *Vehicle System Dynamics*, 46(4), 271-293.
<https://doi.org/10.1080/00423110701344752>

SÜRDÜREBİLİRLİĞİ SAĞLAMAK AMACIYLA ANKASTRE FIRINLARDA ISIL VERİMLİLİK ARTIRMA

Muharrem KEYFOĞLU^{1*}, S. Fatih KIRMIZIGÖL²

^{1,2} ESALBA Metal Sanayi A.Ş., Eskişehir

¹ ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-6601-0784>

² ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-0986-0691>

Anahtar Kelimeler	Öz
Deney Enerji Fırın HAD Verimlilik	<i>Ev tipi ankastre fırınlar günlük yaşantıda sıkça kullanılan mutfak ekipmanlarıdır. Bu ekipmanların ısı verimliliğinin artırılması, enerji maliyetlerinin yükseldiği ve enerji krizinin yaşandığı günümüz Dünya'sında kritik öneme sahiptir. Farklı boyutlarda üretimleri gerçekleştirilebilen fırınların bu çalışma kapsamında 610 x 545 x 579 mm boyutlarında iç hacmi 72 L olan mevcut bir fırının enerji verimliliğinin iyileştirilmesi hem deneysel hem de Solidworks Flow Simulation (SWFS) ticari yazılımı kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) sayısal çalışması gerçekleştirilmiştir. Deneylerde fırın dış sacları ve iç bölgelerinden alınan sıcaklık değerleri karşılaştırma parametresi olarak ölçülürken HAD sayısal çalışmasında rezistansların ısı gücü, ortam koşulları ($P_s = 101235$ Pa), sıcaklığı ($T_o = 22$ °C), malzemelerin yoğunluğu, ısı iletkenliği, özgül ısı değerleri ve emaye kaplamaların olan yüzeyler için emisivite katsayısı tanımlanarak iletim, ışıınım ve taşınım ısı transferi çalışmaları yapılmıştır. HAD sayısal çalışmasında k-ε Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) türbülans modeli seçilmiş ve doğrulanan ağ yapısında Deney-HAD arasında merkez sıcaklık değerleri arasında %1,02 ve fırının sac yüzeyleri ve soğutma fanı etrafında en fazla %8,56 ve cam bölgesinde 3 bölge haricinde %9 altında fark olduğu tespit edilmiştir. Farklı fan koruma sacı (FKS) tasarımları ile yapılan iyileştirme çalışmalarında 40 Wh ve cam yünü yerine alüminyum kapmalı cam yünü yalıtım kullanımı ile 37 Wh enerji tasarrufu elde edildiği tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan iyileştirmelerin hepsi uygulandığında 131 Wh enerji tasarrufu sağlanarak A+ seviyesine ulaşması sağlanmıştır.</i>

INCREASING THERMAL EFFICIENCY IN BUILT-IN OVENS TO ENSURE SUSTAINABILITY

Keywords	Abstract
CFD Efficiency Energy Oven Experiment	<i>Increasing the thermal efficiency of built-in ovens is crucial due to rising energy costs and the current energy crisis. This study, both experimental and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were conducted to improve the energy efficiency of an existing oven with internal dimensions of 610 x 545 x 579 mm, resulting in a volume of 72 L, which can accommodate productions of different sizes. While temperatures were measured as the comparative parameter for the outer sheets and internal regions of the oven during experiments, in the CFD simulation, heat power of the resistors, ambient conditions ($P_s = 101235$ Pa), temperature ($T_o = 22$ °C), material densities, thermal conductivities, specific heat values, and emissivity coefficients for surfaces with enamel coatings were defined to conduct studies on heat transfer through conduction, radiation, and convection. In the CFD simulation, the k-ε Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulence model was selected, and within the validated mesh structure, it was determined that there was a maximum difference of 1.02% between the central temperature values of the experiment and CFD, and a maximum difference of 8.56% around the oven sheet surfaces and cooling fan, with a difference of under 15% in all areas except for 4 zones in the glass area. Improvement studies conducted with different Fan Protection Sheet designs resulted in an energy saving of 40 Wh with the use of aluminum-coated glass wool insulation instead of glass wool, yielding a total energy saving of 131 Wh when all improvements were applied to reach A+ level.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 07.02.2024

Kabul Tarihi : 09.01.2025

Research Article

Submission Date : 07.02.2024

Accepted Date : 09.01.2025

* Sorumlu yazar: mkeyfoglu16@gmail.com

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1433107>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Fırınlara enerji tüketimine göre sınıflandırılmaya başlanması fırın üretici firmalarını, fırının enerji tüketimi üzerinde de çalışmalar yapıp, yüksek verimli fırınlar üretmeye yöneltmektedir. Ürünlerdeki enerji verimliliği ile ilgili şartlar 2014 yılında Ecodesign ile yayımlanmıştır. Bu direktifin uygulanmasıyla ilgili, kademeli bir geçiş yapılmış ve yıldan yıla enerji tüketim limitleri aşağı çekilmiştir. Son olarak 2019 yılında Avrupa Birliği üye ülkelere satış yapılabilmesi için enerji verimliliği indeksinin (Energy Efficiency Index - EEI) 96 altında olması şartı getirilmiştir. Çalışmanın yürütüldüğü Esalba Metal Sanayi A.Ş. firması bünyesinde üretilen fırın modelinde ise EEI değeri 103 olarak hesaplanmıştır. Avrupa pazarında satışa devam edilebilmesi için enerji verimliliği düşük ürünlerde verimlilik artırma çalışmalarının yapılması kaçınılmaz bir hal almıştır.

Bu çalışma kapsamında çalışmaların yürütüldüğü mevcut fırında, 72 litrelik kavite hacmi ve 801 Wh'lık enerji tüketimiyle "A" enerji sınıfında konumlanmaktadır. Mevcut fırının HAD sayısal çalışması doğrulandıktan sonra yapılan iyileştirmeler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- FKS sacında bulunan deliklerin mevcut kalıp üretim koşulları düşünülerek parametrik olarak bazı deliklerin kapatılması,
- Isı yalıtım boyası kaplanmış cam yünü yalıtım yerleştirilmesi,
- Cam yünü yalıtımın alüminyum folyo kaplamalı cam yünü yalıtım ile değiştirilmesi,
- Fırında kullanılan cam sayısının 3'e çıkarılması.

AB standartlarına göre yapılan enerji verimlilik hesaplaması sonucuna göre fırının 699 Wh ve altındaki tüketim değerleri "A+" enerji sınıfına girmektedir. Çalışmanın nihai amacı enerji tüketiminin bu değerin altına indirilmesidir. Literatür taraması kapsamında tespit edilen yöntem ve tekniklerin HAD çalışmasıyla bilgisayar ortamında simülasyonun yapılması ve laboratuvarında yapılan deneyler sonrasında fırının enerji tüketiminde iyileştirmeler yapılmıştır. İyileştirilmiş fırının enerji verimlilik sınıfı "A+" sınıfına yükseltilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ısıtma, pişirme, kurutma fonksiyonlarının en azından birini içeren cihazlardan verimlilik, hızlı pişirme, homojen pişirme ve hızlı kurutma gibi özelliklerin performanslarında iyileşme giderek artmaktadır. Enerji maliyetlerindeki artış termal işlemler için daha fazla verimlilik ihtiyacı oluşturmaktadır.

Fırın içindeki sıcaklık ve hız dağılımını değerlerini tespit etmek, fırının performansını arttırmak için önemli bir

adımdır. Sıcaklık ve hız dağılımının tespiti deneysel olarak mümkünken prototip maliyetlerini azaltmak, üretim süreci olmadan bilgisayar ortamında doğrulanmış sayısal modelin oluşturulması iyileştirilmiş tasarımı hızlı bir şekilde oluşturmak için faydalı bir yoldur (Mirade, Kondjoyan ve Daudin, 2002) (Mistry, Subbu, Dey, Bishnoi ve Castillo, 2006). Doğrulama çalışmaları için ticari veya basitleştirilmiş model oluşturulabilirken temelde HAD sayısal çalışmaları gereklidir. Kurutma fırını, alüminyum eritme fırını, ısıtma fırını, zincir sertleştirme fırını ve ekmek pişirme fırını gibi endüstrinin kullandığı birçok fırında HAD sayısal çalışmaları yapılarak iyileştirme süreçlerine gidildiği belirtilmektedir (Niamsuwan, Kittisupakorn ve Suwatthikul, 2015). Hem deneysel hem de HAD sayısal çalışma ile küçük ölçekli bir ekmek pişirme fırını inceleyen Khatir ve ark. yüksek hızla çarpan hava jetlerine sahip bir fırını 2 boyutlu modellediğini göstermişlerdir. Fırın nozul boyutu ve fırın derinliği üzerine farklı parametrik tasarımlarla optimum çalışmayı belirlemişlerdir. 25 farklı noktadan yapılan ölçüm sonuçlarına göre HAD ve deney arasında %0,91 sıcaklık farkı olduğu tespit edilmiştir (Khatir, Paton, Thompson, Kapur ve Toropov, 2012) (Khatir, Taherkhani, Paton, Thompson, Kapur ve Toropov, 2015). Penssek ve ark. tarafından yapılan çalışmada bir ankastre fırının enerji tüketimi analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında fırının enerji verimlilik sınıfının AB standartlarına göre "A" sınıfına çıkarılması amaçlanmıştır. Tablo 1'de detayı verilen çalışmada fırının kapak açıklığı, baca çıkışının optimizasyonu, yalıtım kalınlığının artırılması, ısınlı ısı transferinin kesilmesi için alüminyum folyo kaplaması ve fırın camlarının 2 adet 3 adede çıkarılması üzerine çalışılmıştır. Her konfigürasyon test edilerek enerji tüketimine etkisi incelenmiştir. (Penssek, Holecek, Gierkes ve Golobic, 2005)

Tablo 1. Yapılan Revizyonlara Göre Enerji Tüketimi (Penssek ve diğ., 2005)

No	Açıklama	E (Wh)
1	Standart	917
2	Kapakta ve Fırının Geneline Bulunan Isıl Kaçakların Engellenmesi	801
3	Kapakta ve Fırının Geneline Bulunan Isıl Kaçakların Engellenmesi ve Bacaların Kapatılması	772
4	Fırın Merkez Sıcaklığındaki Salınımların Azaltılması (PID)	745
5	Fırın Çevresine 30 mm Kalınlığında Ekstra Yalıtım Eklenmesi	846
6	Fırın Kazanı İçine Alüminyum Folyo Kaplanması	845
7	3 Camlı Fırın Kapağı	837

Buna göre 4 numaralı çalışmada görüldüğü gibi fırın sıcaklık kontrolünün elektronik olarak yapılarak merkez sıcaklık salınımlarının azaltılması enerji tüketimine en olumlu etkiyi sağlayan yöntem olarak

gözlemlenmiştir. Altun ve ark. tarafından yapılan çalışmada fırın kapağından dış ortama ısınlımla ısı transferi ele alınmıştır. Fırın kapağından ısınlımla ısı transferinin azaltılması amacıyla, emisivite katsayısı (ϵ) düşük olan alüminyum folyo ile kapak camının kaplanması enerji tüketimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Fırında iki farklı iyileştirme yapılarak testler gerçekleştirilmiştir. İlk testte fırın iç camı tamamen alüminyum folyo ile kaplanmıştır. İkinci testte ise fırın camında 8x32cm boyutlarında bir pencere açılarak alüminyum folyo kaplanmıştır. Testlerin gerçekleştirildiği fırının mevcut halinde enerji tüketimi 811 Wh olarak ölçülmüştür. Penceresiz alüminyum folyo kaplanmış kapak ile yapılan test sonucunda fırının 720 Wh enerji tüketimi tespit edilmiştir. Pencereci alüminyum folyo kaplanmış fırında yapılan testte ise fırının enerji tüketimi 711 Wh olarak ölçülmüştür. Ayrıca buna göre fırının EEI değeri ise 93'ten 82'ye düşürülmüştür (Altun, Yıldız ve Anık, 2018).

İyileştirme çalışmalarında kullanılan HAD sayısal çalışmasında model doğrulaması ve ağ yapısı önemli bir konudur. k- ϵ RANS türbülans modeli endüstride de sıklıkla kullanılan ve tutarlı sonuçlar verdiği ispatlanmış bir modeldir (Wakes, Maegli, Dickinson ve Hilton, 2008). Wakes ve ark. tarafından yapılan bu çalışmada akış hızı ve sıcaklık ölçümleri belirli noktalarda ölçülerek HAD modeli doğrulanmıştır. HAD modelinin doğrulanmasında fırın ön kapağındaki akış hızları ve fırının çeşitli noktalarındaki sıcaklık ölçümlerine yoğunlaşılmıştır. Sıcaklıklardaki ve akışkan hızındaki HAD - Deney verileri paylaşılarak birbiriyle karşılaştırılmıştır. Fırın kapağındaki hava çıkışında akışkan hızı HAD sayısal çalışmasında %3 hata payı ile gözlemlenmiştir. Sıcaklık ölçümü yapılan noktalarda ise ortalama hata oranı %2 olarak tespit edilmiştir. Ağ yapısının iyileştirilmesiyle daha tutarlı sonuçların alındığı raporlanmıştır. Kayıhan (Kayıhan, 2003) tarafından yapılan çalışmada ise 58L kavite hacmine sahip bir elektrikli fırın ele alınmıştır. Fırında üst ısıtıcıların üzerine yansıtıcı plakaların konması, fırın kavite yüzeylerinin yansıtıcı plakalarla kaplanması, fırın baca çıkışının kapatılması, fırın kapağına "O" conta kullanılması, fırın kapak çerçevesinin-cam aralığının ve alt ısıtıcı koruma sacının cam yünü ile izole edilmesi gibi yöntemler denenmiştir. Çalışmada en fazla enerji verimliliği sağlayan yöntemin fırındaki ısı kayıp ve kaçakların engellenmesi olduğu görülmüştür. İyileştirilmiş fırının mevcut durumuna göre %17 daha düşük enerji tüketimi sağlanmıştır. Piaia ve ark. tarafından yapılan çalışmada içerisinde hava akımı bulunan bir kurutma fırını ele alınmıştır. Fırın içerisindeki sıcaklık dağılımının, pişirilen yiyeceklerin kalitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğundan bahsedilerek tasarım ve performans değerlendirmesinin önemine dikkat çekilmiştir. Fırının performansının tahmin edilmesi için bir HAD sayısal çalışması gerçekleştirilmiştir. RANS yaklaşımı ile k- ϵ

türbülans modeli kullanılmıştır. HAD sayısal çalışması deneyde kullanılan hız sensörlerinden alınan verilerle doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçların gerçek deney verileriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Deneylerle ölçülen değerlerle HAD sayısal çalışmasından alınan değerler arasındaki hata oranı %18,14'tür (Piaia, Claumann, Quadri ve Bolzan, 2018). Niamsuwan ve ark. tarafından yapılan çalışmada toz boya ile boyanmış klima parçalarının pişirilmesi için kullanılan fırının HAD sayısal çalışması ile performansının artırılması ele alınmıştır. Çalışmada büyük ölçekteki boya pişirme fırınının içerisindeki sıcaklık ve akış hızı dağılımını incelemek için HAD sayısal çalışması gerçekleştirilmiştir. HAD sayısal çalışması gerçek deneylerle elde edilen sıcaklık verileriyle doğrulanmıştır. Doğrulama için toplam 14 noktada sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu noktalardaki hata oranları %1,9-2,4 arasında değişmektedir. Fırın içerisindeki ortalama sıcaklık yapılan çalışmalarla 1,3 °C ve 1,9 °C artırılmıştır (Niamsuwan ve diğ., 2015).

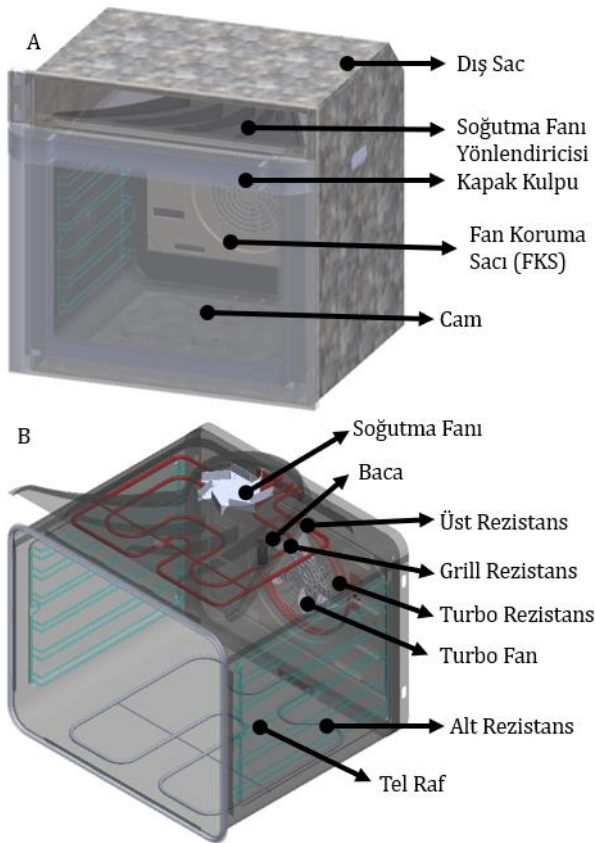
Fırınlarda çalışma prensibi taşınım, zorlanmış ve ısınlımla ısı transferi yaparak içerdeki havayı ya sirkülasyon ile ya da doğrudan ısıtarak gerçekleştirmeye dayanır (Stinger, Scheerlinck, Nicolai ve Impe, 2001). Zorlanmış taşınımla ısıtılan fırınlarda kullanılan soğutma fan sayısı, fanlar arası mesafe ve fanların yüzeye olan mesafeleri akışın fırın içindeki dağılımını etkilemektedir. HAD - Deney sonuçları benzer bir trend gösterirken motor çevresinde ölçüm belirsizliği daha fazlayken %25,58 ölçüm farkı oluşmaktadır (Şahin, 2023). Ürün pişirme süreçleri için kullanılan elektrikli bir fırında sıcaklık dağılımını tespit ederek fırının pişirmeye olan etkisini arttırmaya yönelik SWFS HAD sayısal çalışması kullanılan çalışmada ısı transferi katsayısı, sıcaklık ve basınç değerleri elde edilmiştir. HAD - Deney arasındaki sıcaklık farkının maksimum %7,6 olduğu belirlenmiştir (Constantin, Munteanu, Voicu, Paraschiv ve Ştefan, 2023). Pişirme performansı değerlendirmek için elektrikli fırında ekmek modellemesi yapılabilirken pişirme sürecini değerlendirmek için farklı güçlerde HAD sayısal çalışmasında k- ϵ RANS türbülans modeli kullanılarak çıkan ürün kalitesi iyileştirilmiştir (Khatibi, Zamani ve Mirzababaei, 2023).

Bu çalışma kapsamında mevcut bir fırının enerji verimlilik değerinin iyileştirilmesi üzerine hem deneysel hem de HAD sayısal çalışması yapılmıştır. Fırın koruyan FKS sacında bulunan havalandırma delikleri üzerinde parametrik çalışma ile yeni FKS tasarımının belirlenmesi ve ısıyı fırın içinde tutmaya yarayan cam yünü yalıtımın değiştirilmesi üzerine iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Fırın içi hava sıcaklığı ve komponentlerin sıcaklık değerleri ile doğrulan HAD sayısal çalışması deney sonuçları ile karşılaştırmaları paylaşılırken enerji tüketiminden 131 Wh kazanç tespit edilmiştir.

3. Yöntem

3.1. Standart Performans Deneyi Prosedürü

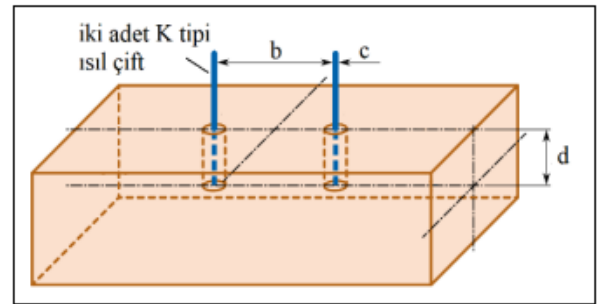
İç hacmi 72 L olan deney çalışmasında kullanılan fırın Şekil 1’de gösterilen dış sac, soğutma fanı yönlendiricisi, kapak kulpu, fan koruma sacı (FKS), cam, soğutma fanı, turbo fan, üst-alt-turbo-grill rezistans, tel raf ve baca gibi parçalardan oluşmaktadır. Çalışma kapsamında iyileştirme parametresi olarak kullanılan parçalardan olan FKS, fırın içinde bulunan turbo fanın korunması sağlarken sac yüzeyinde bulunan delikler (boşluklar) sayesinde fırın içindeki havanın dağılımında rol oynamaktadır. Fırın içi hava sirkülasyonu ile fırın performansı değişirken yemeklerin homojen pişmesine ve enerji verimliliği gibi fırın tasarımı için kritik olan konulara direkt etki etmektedir. Fırında kullanılan baca, iç ortamda oluşan buharın tahliye edilmesini sağlayan bir açıklıktır. Baca, fırın içindeki hava dolaşımını düzenler ve pişirme süreci sırasında meydana gelen buharın etkin bir şekilde dışarıya atılmasını temin eder.



Şekil 1. A) Fırın Dış Parçalar B) Fırın İç Parçalar

Çalışmada kullanılan mevcut fırının performans testleri EN60350-1 (EN 60350-1, 2013) standardında belirtilen performans testine göre Şekil 2’de detayları gösterilen 1 adet hipor tuğla ile gerçekleştirilmiştir. Hipor tuğlanın boyutları 230 x 114 x 64 mm’dir. 32 mm derinliğinde, 50

mm uzaklığında, iki adet 1mm çapında termokupl yuvası bulunmaktadır ve ilgili ölçüler sırasıyla d, b, c ile gösterilmiştir. Fırının merkezinde bulunan tuğlanın yuvalarına montajlanan termokupl ile tuğla içindeki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Enerji verimlilik hesaplamaları için gerekli olan bir diğer veri ise hipor tuğlanın fırına girmeden önceki yaş ağırlığı ve fırından çıktıktan sonraki kuru ağırlığıdır. Hipor tuğla standarda göre iç sıcaklığının 5 ± 2 °C olması gerekirken 1050 ± 50 gram suyu emmesi gerektiğinden dolayı soğutucu dolaplarda su dolu kaplarda tutulmuştur. Soğutucudan çıktıktan sonrasında 1 dakika süre zarfında üstünde bulunan suyun akması beklenir ve süre sonunda fırın içine alınarak deney süreci aktif hale getirilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde Kullanılan Hipor Tuğla Gösterimi (Altun ve diğ., 2018)

Standartta belirtilen koşullara göre deney ortam sıcaklığı ve fırının 23 ± 2 °C olması gerekmektedir. Fırın iç sıcaklığı, fırın merkezine yerleştirilen bir termokupl ile merkez sıcaklığı ölçülerek fırın set sıcaklığının ortam sıcaklığına göre Tablo 2’de belirtilen sıcaklık limitleri içinde olduğu teyit edilmiştir. Bu artışların sonunda fırın merkez sıcaklığının, merkezde kullanılan termokupl aracılığı ile eş zamanlı sıcaklık değerleri alınarak istenen sıcaklık artışının sağlanması kontrol edilmiştir.

Deney, hipor tuğlanın 32 mm derinlikli yuvalarda bulunan termokupllarda okunan sıcaklık değerlerinin başlangıç sıcaklık değerine göre 55 °C artış olduğunda sonlandırılmıştır. Bu süre zarfında elde edilen enerji tüketimi hesaplanır. Enerji tüketimi bir sayaç yardımıyla ölçülürken deney öncesi ve sonrasında oluşan enerji farkına bakılarak elde edilmektedir. Hipor tuğlanın yaş ve kuru ağırlıkları, enerji tüketimi gibi değerler yardımıyla EN60350-1 standardında bulunan hesaplama tekniği ile enerji sınıfı belirlenir.

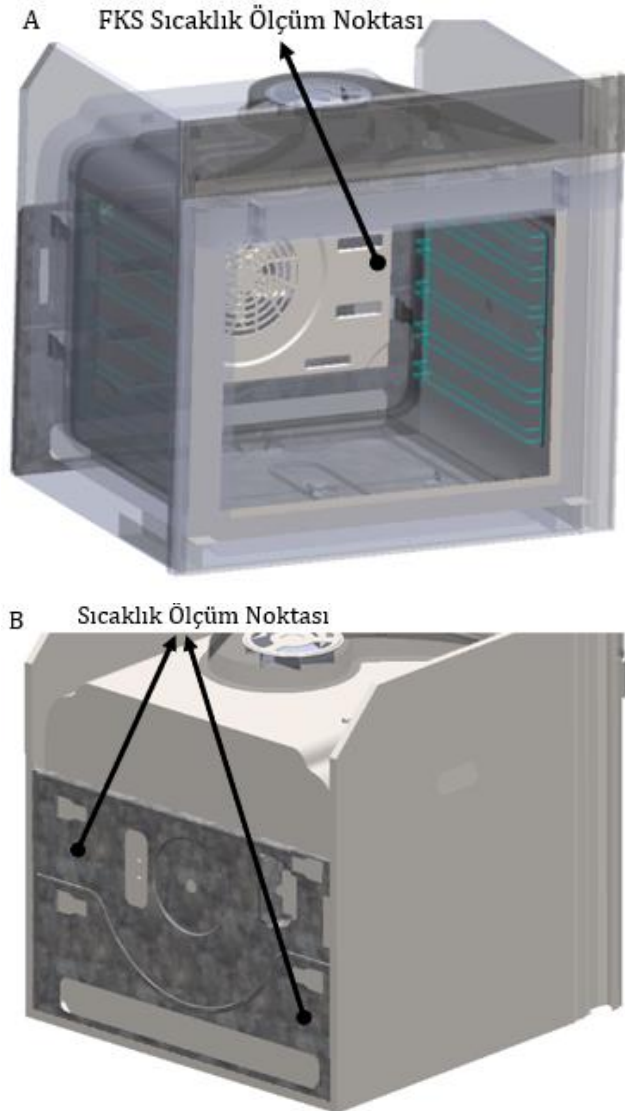
Tablo 2. EN 60350-1 Standardına Göre Test Sıcaklıkları

Sıcaklık Artışı	Isıtma Fonksiyonları		
	Konvansiyonel	Zorlanmış Taşınım	Kızgın Buhar
ΔT_1^i	$140 \pm 10^\circ\text{K}$	$135 \pm 10^\circ\text{K}$	$135 \pm 10^\circ\text{K}$
ΔT_2^i	$180 \pm 10^\circ\text{K}$	$155 \pm 10^\circ\text{K}$	$155 \pm 10^\circ\text{K}$
ΔT_3^i	$220 \pm 10^\circ\text{K}$	$175 \pm 10^\circ\text{K}$	$175 \pm 10^\circ\text{K}$

3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonu

3.2.1. Geometri

Mevcut fırının HAD sayısal çalışmaları gerçekleştirilerek ısı kaçakların tespit edilmesi, kavite içerisindeki ısı dağılımının incelenmesi, performans iyileştirmesi yapılabilecek komponentlerin belirlenmesi ve baca açıklığındaki akış hızının hesaplanması amaçlanmıştır. HAD sayısal çalışmaları SWFS ticari yazılımında yapılmış olup doğrulanabilmesi için mevcut fırın üzerinde çeşitli enerji verimlilik testleri ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te toplamda 3 adet sıcaklık ölçüm noktası gösterilmiştir. Ön kapak camı dahil olmak üzere toplam 170 noktada sıcaklık ölçümü yapılmış ve ortalama sonuçlar alınmıştır.



Şekil 3. Fırın Sıcaklık Ölçüm Noktaları A) FKS B) Arka Sac

Şekil 4'te fırınlarda kullanılan mekanik termostatların sıcaklığı ölçen kısmı olan bulb (fırın termostatu) gösterilmiştir. Fırın aç-kapa mekanik termostatla kontrol edilmektedir. Bulb bulunduğu konum itibarıyla fırın merkezindeki sıcaklık ile aynı sıcaklığa sahip bir

bölgede konumlandırılmalıdır. HAD sayısal çalışmalarında bu bölgedeki sıcaklık kritiktir.



Şekil 4. Bulb

Sıcaklıkların tümü "K" tipi ısı çiftler kullanılarak bir veri toplayıcı üzerinden alınmıştır. Fırın bir mutfak dolabının içine yerleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 Sınır Şartları

RANS türbülans modeli endüstriyel HAD sayısal çalışmalarında sıkça kullanılan bir modelleme yaklaşımıdır (Fahey ve Karagöz, 2007). RANS yaklaşımı çok çeşitli problemler üzerinde yıllarca doğrulanmıştır. RANS, endüstriyel problemlerin çözümü için kullanılan en pratik yaklaşım olarak kabul görmektedir. Tutarlılık ve gerekli hesaplama gücü arasında ideal bir denge yakalamaktadır. Çeşitli türbülans modelleme seçeneklerine rağmen, k-ε modeli kullanılan en yaygın ve doğrulanmış iki denklemlidir. Endüstriyel akışlar için (bir fırın içindeki akış gibi), k ve ε'nun dağılımı önceden bilinmez ve genellikle giriş hızı ve bir uzunluk ölçeği arasında türbülans üretimi bağlantılarından yaklaşık olarak hesaplanır. RANS denklemleri ortalama alınmış süreklilik ve momentum denklemlerini içerir ve akışkanlar için denklem (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada belirtilen u_i hız bileşenlerini, $(\rho u_i' u_j')$ ise türbülans gerilmelerini, ρ akışkanın yoğunluğunu göstermektedir.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho u_i' u_j' \right] \quad (2)$$

Momentum denkleminde ortaya çıkan türbülans gerilmelerinin hesabı için türbülans modelleri kullanılır. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve dissipasyon oranı (ε) için yazılan iki transport denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir. Kaldırma kuvvetleri etkisi ihmal edildiğinde, bu transport denklemleri k ve ε için sırası ile denklem (3) ve (4)'te belirtilmektedir. Denklemlerde belirtilen R kayma oranları akım çizgisi eğriliklerini açısından hesaplanmaktayken kayma oranının (μ) kuvvetli olduğu

bölgelerde ε değeri artmaktadır. Bu denklemlerde yer alan G_k ortalama hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini temsil etmektedir ve denklem (7)'de akışkanın türbülans viskozitesine (μ) ve farklı yönlerdeki hız değişimine (u) bağlı denklemlerle ifade edilmiştir. Türbülans viskozitesi denklem (7)'de belirtildiği üzere SWFS, HAD çalışmasında kullanılan $k - \varepsilon$ türbülans modelinde bulunan türbülans kinetik enerjisini (k) ve dissipasyon oranı (ε) içermektedir. C_μ ise sabit bir katsayıdır (Modelling Turbulence, 2006).

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (4)$$

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Diğer ampirik sabitleri; $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, k ve ε için tanımlanan türbülans prandtl sayıları $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$ tür (Kaya ve Karagöz, 2007).

SWFS HAD çalışmasında RANS türbülans modeli yaklaşımı için standart $k-\varepsilon$ alternatifi olarak Lam-Bremhorst tarafından düzenlenmiş $k-\varepsilon$ modeli kullanılmaktadır. Bu model standart $k-\varepsilon$ modeline göre duvar fonksiyonlarını daha tutarlı hesaplamak için eddy viskozitesi ve dissipasyon oranı formülünde çeşitli katsayılar içermektedir. Lam-Bremhorst $k-\varepsilon$ türbülans modeli için dissipasyon oranı ve eddy viskozitesi denklem (8) ve (9)'da belirtilmiştir (Lam ve Bremhorst, 1981). Burada belirtilen f_μ , f_1 ve f_2 katsayıları denklem (10)-(12) arasında aktarılmıştır. Bu katsayıların 1'e eşit olması durumunda denklem standart $k-\varepsilon$ modeli haline gelmektedir.

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_1}{\sigma_\varepsilon} + \nu_1 \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 f_1 \nu_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 f_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$\nu_1 = \frac{C_\mu f_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$f_\mu = (1 - e^{-A} \mu^{R_k})^2 \left(1 + \frac{A_t}{R_t} \right) \quad (10)$$

$$f_1 = (1 + (A_{C1}/f_\mu))^3 \quad (11)$$

$$f_2 = 1 - e^{-R_t^2} \quad (12)$$

A_t , A_{C1} , C_1 , C_2 , türbülans model sabitleridir ve R_k , R_t türbülans Reynolds sayılarını ifade eder. Burada C_1 , C_2 sabitleri daha önce verilmiş olup A_t , A_{C1} sabitleri ise deneme yanılma yoluyla bulunmaktadır. Ancak ampirik olarak bu değerler $A_t=20,5$ ve $A_{C1}=0,05$ olarak belirlenmiştir (Lam ve Bremhorst, 1981).

$$R_t = \frac{k^2}{\nu_1 \varepsilon} \quad (13)$$

$$R_k = \frac{k^{1/2}}{\nu_1} \quad (14)$$

HAD sayısal çalışmasında incelenen bir diğer konu ise fırının ısı akısıdır. Isı akısı birim alana etkiyen ısı enerjisinin birim zamandaki miktarını ifade etmektedir. Fırınlarda ısı kaçaklarını indirmek için kullanılan cam yününden ve camdan kaçan ısı miktarına göre fırın içindeki minimum-maksimum sıcaklık değerleri değişmektedir. Bu durum enerji verimlilik, fırın içi sıcaklık, merkez sıcaklık ve pişirme performanslarını etkilemektedir. Isı akısı denklem (15)'te belirtildiği üzere sıcaklığa (T), ısıyın geçtiği yüzeyin uzunluğuna (x) ve ısı iletim katsayısına (k) bağlıdır.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (15)$$

Çalışmada iletim, taşınım ve ısıyınım ısı transferleri bulunurken farklı malzemeler içeren fırın HAD sayısal çalışmasında katı cisimler arasındaki ısı iletim denklem (16)'te ifade edilmiştir. Burada Q_H birim hacim başına özısı yayımı, λ_i ısıl iletkenlik tensörü özdeğerleridir. "e" özgül iç enerjidir ve denklem (17)'de verilmiştir. Burada kullanılan c öz ısı ve T sıcaklık olarak ele alınmaktadır. ısıyınım ısı transferi ise HAD sayısal çalışmasında ayrık ordinatlar (DO) modelini kullanır. Bu model denklem (18)'de belirtilmiştir. Burada "s" ısıyınımın yönünü gösteren birim vektördür (Modest, 2013).

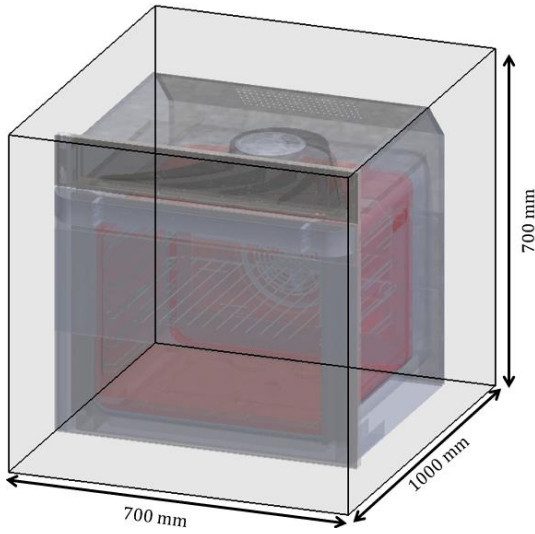
$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H \quad (16)$$

$$e = c \cdot T \quad (17)$$

$$\frac{dI(s,r)}{ds} = -(K + \sigma_s) I(\vec{s}, \vec{r}) + K n^2 I_b(\vec{r}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} \Phi(\vec{s}', \vec{s}) I(\vec{s}', \vec{r}) d\Omega' \quad (18)$$

Mevcut fırın modeli, tahmini akış ve ısınma karakteristiği göz önüne alınarak HAD sayısal çalışması için düzenlenmiştir. Bu düzenleme ile sivri köşeler iç içe geçen parçalar, vida ve vida delikleri gibi tekillik problemleri oluşturması muhtemel yüzey ve komponentlerin ortadan kaldırılmasıyla hesaplama süresinin azaltılması hedeflenmiştir. Yapılan düzenlemeler sonrası gereksiz komponentler ve geometriler kaldırılmıştır. İğnelenmiş cam yünü gibi katlanabilen malzemeler modellenirken fırının kapatılan yüzey alanı esas alınmıştır. Kazan içerisinde, rezistanslarda, fan kanat yapılarında, ısıl yükü yüksek saclarda değişiklik yapılmamıştır. Isıtıcı rezistansların ve fanların HAD sayısal çalışmasında gerçek modeli tanımlanmıştır. Isı transferinin yüksek olduğu ve montajı sebebiyle ısı akısı yüksek olan parçalarda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Hazırlanan fırın modelinin sınır şartları deney ortamında alınan verilere

göre hazırlanmıştır. Çalışmada hem iç akışın hem de dış akışın simüle edilebilmesi için Şekil 5'te boyutları gösterilen dış ortam hazırlanmıştır.



Şekil 5. HAD Modeli Dış Akış Hacı Boyutları

Fırın üzerinde bulunan rezistansların güçleri güç ölçüm cihazı ve fanların devirleri takometre ile ölçülerek HAD sayısal çalışmada tanımlanmıştır. Deneylerde kullanılan rezistansların bütün yüzeyleri ısınmadığı için HAD sayısal çalışmada da bu durum dikkate alınmıştır. Böylelikle rezistanslara Tablo 3'te belirtilen "yüzey güç" sınır şartı tanımlı yapılırken sıcaklığın rezistans üzerinde olduğu ilgili yüzeyler seçilmiştir. Turbo fan ve soğutma fanının RPM değerleri Tablo 4'te aktarılmıştır. Rotasyon sınır şartı soğutma fanı için 126 mm çapında 19 mm kalınlığında ve turbo fanı için 154 mm çapında 22 mm kalınlığında oluşturulan silindir kontrol hacmi ile sağlanmıştır. Bu değerler fanları içine alacak minimum değerlerdir.

Tablo 3. Rezistans Güçleri

Rezistans	Güç (W)
Üst Rezistans	980
Grill Rezistans	1200
Alt Rezistans	1100
Turbo Rezistans	2100

Tablo 4. Fan Devirleri

Fan	Devir (devir/dakika)
Turbo Fan	960
Soğutma Fanı	1160

Fırın rezistansları HAD sayısal çalışmada 200 °C'ye ulaşana kadar aktiftir. 200 °C'yi geçtikten sonra kapanırken 200 °C'nin altına düştüğünde tekrardan aktifleşmektedir. Çalışma kapsamında set sıcaklığının 200 °C seçilmesinin sebebi EN60350-1 standardında merkez sıcaklık gibi birçok testin bu sıcaklık değerinde yapılmasıdır. Fırın rezistansları deneyde set sıcaklığına göre açılıp kapanırken, zamandan bağımsız HAD sayısal

çalışmasında PSEUDO zamanına göre rezistansları sıcaklığa bağlı olarak açıp kapatarak gerçek şartlarda fırının yapmış olduğu sıcaklık salınımlarını simüle edilmiştir. Fırın rezistansları set sıcaklığı kadar aç-kapa yapması durumu fırın içinde merkez sıcaklık değerini ve fırındaki komponentlerin sıcaklıklarının belirli bir aralıkta salınım yapmasına sebep olmaktadır. Bu durumda nihai deney sıcaklık sonuçları fırının 1 saat çalıştırılması ile tespit edilmiştir. 1 saat deney süresi EN60350-1 standardından alınarak elde edilmiştir.

İletim, taşınım ve ışıyım ısı transferinin aktif olduğu fırında kullanılan komponentlerin malzeme özellikleri Tablo 5'deki gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Değerler literatürde bulunan farklı çalışmalardan ve kullanılan ürünlerin kataloglarından sağlanmıştır.

Tablo 5. Malzeme Özellikleri

Kullanılan Komponent	Malzeme	Isı İletkenlik ($\frac{W}{m.K}$)
Camlar	Temperli Cam	1 (Schott, 2004)
Yalıtım	İğnelenmiş Cam Yünü	0,043 (Çengel ve Ghajar)
Arka Yalıtım Plakası	Su Bazlı Akrilik Boya	0,023 (isollat, n.d.) (Yamalı, 2019)
Silikon Yapıştırıcı	Silikon	0,68 (Shanks, Maycock, Dides ve Danielson, 1963)
Tüm Metal Komponentler	Çelik	60 (Material data sheet thermally broken steel USA, 1997)
Kapak Üst Çıtası ve Kapak Profil	PA66	0,233 (Material: Polyamide 66, n.d.)
Kapakları	PA66GF30	0,30 (Material: Polyamide 66 GF 30, n.d.)
Soğutma Fanı	Alüminyum	237 (Çengel ve Ghajar)
Yönlendirici Kanat	Paslanmaz Çelik	15,1 (Material data sheet thermally broken steel USA, 1997)
Kapak Kulpu	Rezistans Dış Kılıfları	0,2 (Guerin, Morin, Chaussy ve Auriault, 2001)
Serigrafi	Serigrafi Boyası	

Fırın içinde bulunan sıcaklığı korumak ve enerji verimliliğini korumak/arttırmak için fırın iç yüzeyindeki sıcaklığa maruz kalan saclar emaye ile kaplanmaktadır. Ayrıca fırın camları da düşük emisitive içeren noktalı bir yapıya sahiptir. Bu komponentlerin ışıyım özellikleri Tablo 6'de ifade edildiği gibi ışıyım ısı transferi içeren komponentlerin için emisivite katsayıları tanımlanmıştır. Ayrıca emaye veya galvaniz (çinko) kaplama olan parçalar için de HAD sayısal çalışması yazılımında bulunan "İşinimsal Yüzey" özelliği kullanılmıştır. Bu özellik sayesinde parçaların üzerine fazladan katı veya cidar modellemesi yapmaya gerek kalmadan emisivite katsayısı seçilen yüzeylere tanımlanabilmektedir. Fırındaki ısı etkilerinin içerisinde ışıyım önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle üst rezistans ve kavite içerisindeki emaye kaplama ışıyım etkisiyle sıcaklığı ve ısı akısı değişecek komponentlerdir. Bu sebeple ışıyım aktif hale getirilmiştir.

Tablo 6. Işınım Yüzeyleri ve Emisivite Katsayıları

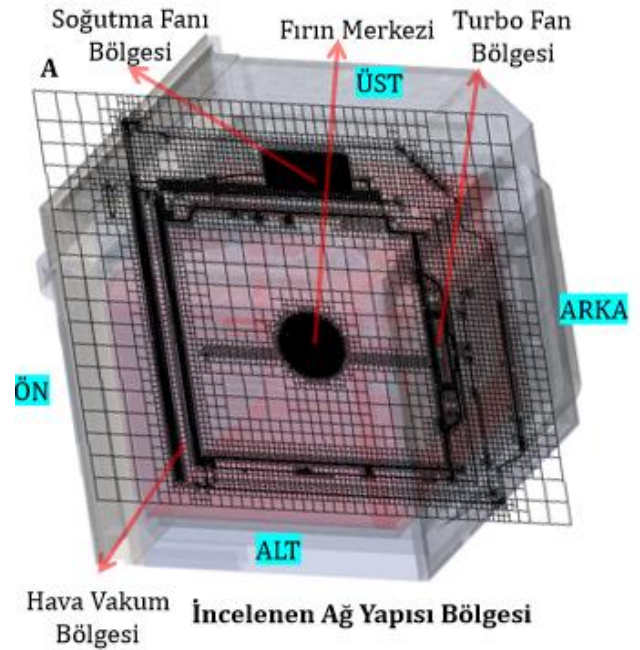
Işınımsal Yüzey	Emisivite Katsayısı
Kavite Emaye Kaplaması	0,90 (Kokolj, Skerget ve Ravnik, 2017)
İç Cam Low-e Kaplama	0,02 (Schott, 2004)
Dış Cam	0,90 (Kokolj, Skerget ve Ravnik, 2017)

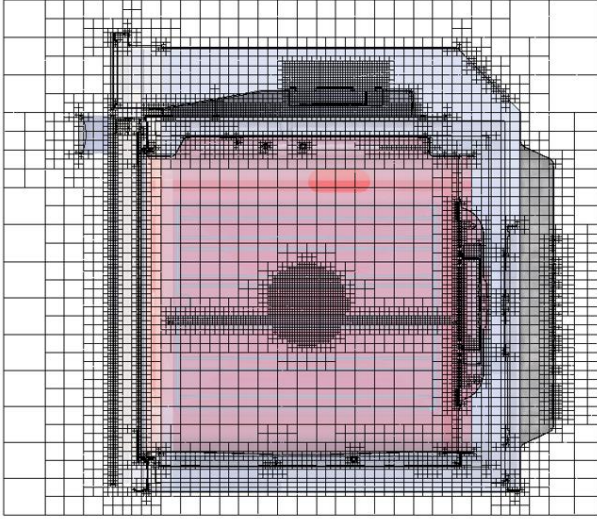
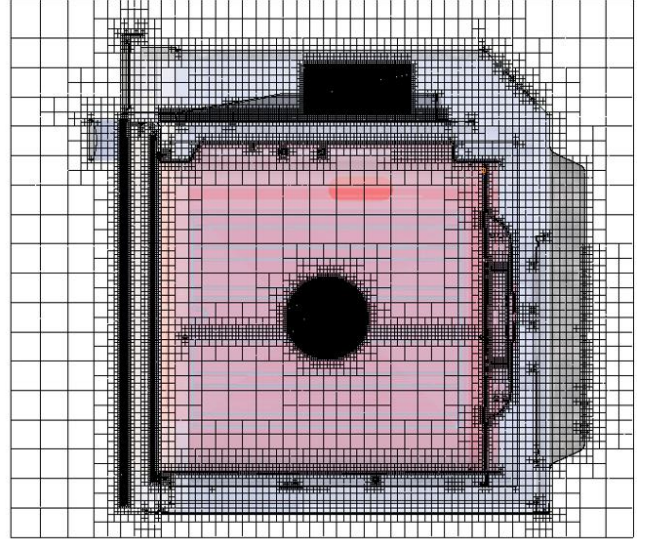
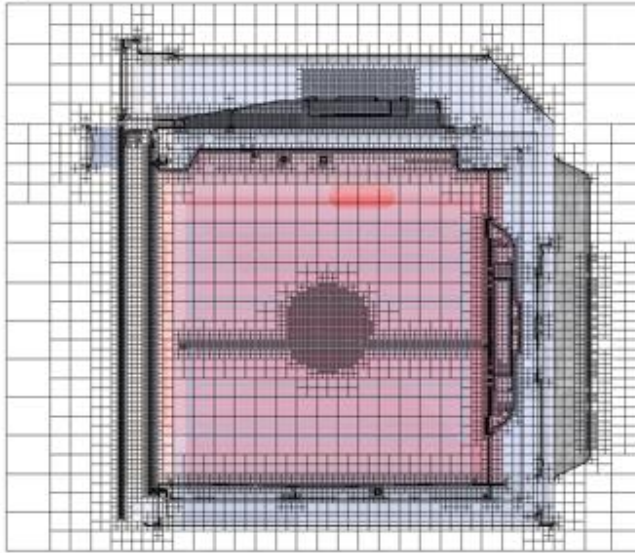
HAD sayısal çalışmasında, fırın dış akış kontrol hacmi fırının boyutlarından daha fazla tanımlanarak (Şekil 5) fırına dış ortamında gelen hava koşulları yansıtılmıştır. Bu koşullar deneylerin gerçekleştiği açık hava basıncı ($P_s = 101235$ Pa), ortam sıcaklığı ($T_o = 22$ °C) ve hız değerleri 0 m/s olarak tanımlanmış böylelikle fırının dış yüzeylerinden gelen taşınım ısı transferi için zemin hazırlanmıştır. İç ortam sıcaklığı fırının çalışmasından dolayı ± 1 °C değişmektedir. HAD sayısal çalışmasında bu değer ihmal edilip sabit 22 °C sıcaklık tanımlanmıştır. Yer çekimi 9,81 m/s² olarak tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında vida delikleri ve vida gibi ısı transferine ve havanın akış çizgilerini çalışmaya olan etkisi yok denecek kadar az olduğu için ihmal edilmiş ve ağ yapısının kalitesini bozacak veya eleman sayısını arttıracak etmenler ihmal edilmiştir.

3.2.3 Ağ Yapısı ve Ağdan Bağımsızlık Çalışması

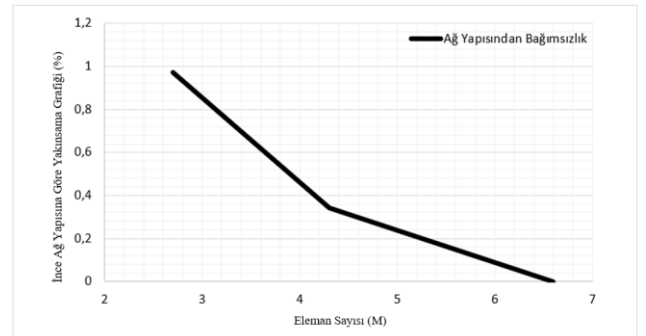
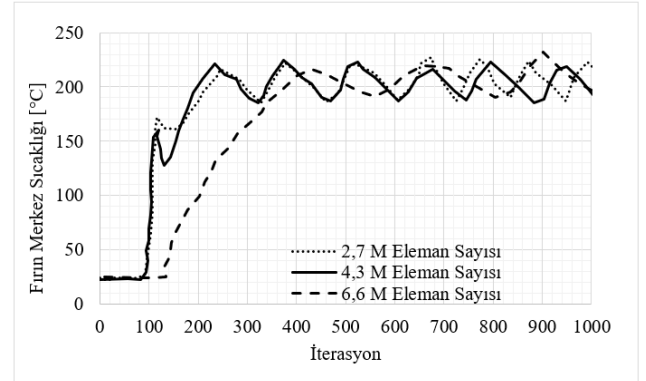
HAD sayısal çalışmasında bir ağ yapısı stratejisi belirlenmesi gerekmektedir. Bu noktada akışın kritik olduğu noktalar, duvarlar, ısı kaynakları ve ölçüm noktaları için bazı ağ yapısı denetimleri uygulanmıştır. Bu noktalara daha ince bir ağ yapısı uygulanarak sonuçların daha tutarlı olması ve analizin yakınsaması amaçlanmıştır. Ağ yapısında bulunan eleman sayısı bu yapılan iyileştirmelerin kuvvetine göre değişmektedir. Ağ yapısında bulunan elemanların sayısı ile hesaplama süresi birbirine paraleldir. Ayrıca bilgisayardaki işlemci çekirdek sayısı (10) ve RAM (128 GB) miktarına bağlı olarak hesaplamaların yapılabilmesi için ağ yapısı eleman sayısının optimize edilmesi gerekmektedir. Optimum dengenin bulunduğu noktada model üzerinde çalışmalara devam edilmektedir. Bu çalışmalara ağ yapısından bağımsızlık (mesh independency study) adı verilmektedir. Modelde farklı ağ yapısı eleman sayıları ile yakınsama grafikleri ve hedef değerler kontrol edilir. Ağ yapısı eleman sayısı düşükten yükseğe doğru giderek denemeler yapılır. Bu denemelerin sonunda eleman sayısının artmasına rağmen bulunan değer veya yakınsama grafiklerinin değişmediği noktada ağ yapısından bağımsızlık çalışması tamamlanır. Ağ yapısından bağımsızlık çalışmasının sonucunda analiz sonuçlarının değişmediği en düşük eleman sayısına sahip ağ yapısı işlem gücü açısından en verimli çözüm olmaktadır. Bu ağ yapısı ile HAD sayısal çalışmasına devam edilmektedir (Lu, Rane ve Kovacevic, 2022). SWFS ağ yapısını üç boyutlu dikdörtgen hücreler şeklinde oluştururken buna sonlu hacim (FV) yöntemi denilmektedir. Akışkanın bulunduğu dikdörtgen

hücrelerde Navier-Stokes (NS) denklemleri çözülmektedir. SWFS sınır katmanları için özgün bir yaklaşım sergilemekte ve duvardaki hız profillerini oluşturmak ve hesaplayabilmek için Prandtl sınır tabaka yaklaşımını kullanır. Sınır tabakası çözümünü kitlesel akış ile birleştirmek için iki yöntemden oluşan İki Ölçekli Duvar Fonksiyonu (2SWF) kullanılır (Kırmızıgöl ve Uçar, 2024). Bunlardan iki akış ve termal profillerin oluşumu için eleman sayısı yeterli değilse ince sınır tabaka işleminin uygulanması ikincisi ise sınır tabaka profillerinin çözümü için katman boyunca kullanılan ağ yapısı gerekenden fazla ise kalın bir sınır katmanı yaklaşımı uygulanmasıdır (Sobachkin ve Dumnov). Bu çalışma kapsamında kaba (2.7 M), seçilen (4.3 M) ve iyi (6.6 M) olmak üzere 3 farklı ağ yapı incelenmiştir. Şekil 66A'da fırın kesiti üzerinde incelenen ağ yapısının bölgelerine yer verilmiştir. Buna göre fırının kritik bölgeleri olan hava vakum bölgesinde, soğutma fanı bölgesi, turbo fan bölgesi, fırın merkezinde ağ yapısı inceltiirerek ele alınmıştır. Hava vakum bölgesi cam üzerinde oluşan sıcaklığı belirlerken, fan bölgeleri içeride oluşan hava dağılımı etkiler ve merkez sıcaklığın değişmesine neden olur. 2,7 M – 4,3 M ve 6,6 M eleman sayılı ağ yapıları ve ilgili bölgelerde oluşan değişimler Şekil 6B-D arasında verilmiştir. Bu ağ yapılarından elde edilen sonuçlar Şekil 7'de paylaşılmıştır.



B**2,7 M Eleman Sayısı****D****6,6 M Eleman Sayısı****C****4,3 M Eleman Sayısı**

Şekil 6. A) İncelenen Ağ Yapısı Bölgeleri B) 2,7 M Eleman Sayılı Kaba Ağ Yapısı C) 4,4M Eleman Sayılı Seçilen (Orta) Ağ Yapısı D) 6,6 M Eleman Sayılı İnce Ağ Yapısı



Şekil 7. Ağ Yapısı Eleman Sayısına Göre Fırın Merkez Sıcaklık Salınımı (Üst), İnce Ağ Yapısına Göre Yakınsama Grafiği (5) (Alt)

Şekil 7'de verilen sonuçlara göre fırın merkez sıcaklık değerlerinin ağ yapısından bağımsızlık çalışmasından elde edilen merkez sıcaklık sonuçları karşılaştırılmıştır.

Ankastre fırınların sıcaklık kontrolü, termal dengeyi sağlamak amacıyla belirli bir set sıcaklığını koruyarak kesikli ısınma süreçlerine dayanır. Fırın içindeki sıcaklık, sürekli bir şekilde ısıtılmak yerine, belirli bir hedef sıcaklık ayarlandığında, elektrikli rezistanslar belirli bir süre boyunca devreye girer ve fırın ortamını ısıtarak hedef sıcaklığa ulaşmayı sağlar. Bu süreç, termokupl adı verilen sıcaklık sensörleri aracılığıyla izlenir ve hedef sıcaklık ayarına ulaşıldığında rezistanslar otomatik olarak kapanır. Ancak, rezistansların kapanmasının ardından fırın içindeki hava ve malzeme, ısı kaybı ile soğuma eğilimindedir. Bu noktada termokupl, iç ortam sıcaklığını algılar ve sıcaklık hedef değerinin altına düştüğünde rezistanslar yeniden devreye girer. Böylece, ısıtıcılar tekrar aktif hale gelir ve ortamın ısısı yeniden yükseltilir. Ancak bu ısınma sırasında, termokupl hâlâ soğuma eğilimindedir, çünkü sensörün algıladığı sıcaklık, rezistanslardan gelen doğrudan ısıdan önce çevresel ısı dengeye ulaşmamaktadır. Bu döngüsel ısınma ve soğuma süreci, iç ortamda sürekli bir termal dalgalanma yaratır. Bu dalgalanmalar, fırın içindeki sıcaklık profilini zamanla stabilize etmeye çalışırken, HAD sayısal çalışmalarında da benzer şekilde modellenir. Termokuplun yanıtı, ısınan rezistanslardan gelen doğrudan ısı ve fırın içindeki hava akışının etkileşimiyle belirlenir. Bu nedenle, modelleme sürecinde sıcaklık dağılımı, hava akışkanlarının davranışı, ısıtıcı elemanlarının yerleşimi ve çevresel koşullar dikkate alınarak zamanla değişen bir termal denge simüle edilir.

Bu tür sayısal çalışmalar, fırın içindeki ısı dağılımı, sıcaklık dalgalanmalarını ve enerji tüketimini daha doğru bir şekilde tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Böylelikle, fırın tasarımı ve sıcaklık kontrol stratejileri, daha verimli ve güvenilir bir çalışma sağlamak için optimize edilebilir.

Deneyel çalışmada ankastre fırın çalışma prensibinden dolayı fırın termokupl sıcaklığı ayarlanan 200 °C set değerine geldiğinde rezistanslar kapanmaktadır. Rezistansların kapanmasına rağmen merkez sıcaklık bir süre daha artarak 200 °C'nin üstüne çıkmaktadır. Aynı şekilde fırın termokupl sıcaklığı 200 °C'nin altına indiğinde fırın rezistansları tekrar aktif olmaktadır. Rezistanslar ısınana kadar geçen sürede merkez sıcaklığı düşmeye devam etmekte ve Şekil 7'de gösterildiği gibi salınım oluşmaktadır. HAD sayısal çalışmasında rezistanslar, deney sürecindeki gibi 200 °C'de aç-kapa sistemi oluşturulmuştur. Şekil 7'de belirsizlik çalışmasında gösterildiği üzere, HAD sayısal çalışmaları 2,7 M-4,3 M-6,6 M eleman sayısı olmak üzere 3 farklı ağ yapısında incelenmiştir. 4,3 M eleman sayısının sonuçları, 6,6 M eleman sayısı sonuçlarına göre %0,4 olarak tespit edilmiştir. Bu koşullar daha fazla ince ağ yapısı denemeye gerek olmaksızın çalışma aşamasında hem bilgisayar gücünü korumak hem de çalışma süresini uzatmamak için 4,3 M eleman sayısı seçilmiştir.

Tablo 7'de gösterilen elde edilen HAD sayısal sonuçlarına göre merkez sıcaklık salınımı 2,7 M eleman sayısı için 203,6 °C 4,3 M eleman sayısı için 206,3 °C ve 6,6 M eleman sayısı için 205,6 °C olarak tespit edilmiştir. Ortalama sıcaklık değerleri sonuçların yakınsağı 400-1000 iterasyonlar arasındaki değerler baz alınarak hesaplanmıştır. Sonuçların ağ yapısından bağımsızlığını değerlendiren çalışma, en ince ağ yapısına ilişkin yakınsama grafiği Şekil 7'de sunulmuştur. 4,3 milyon elemanlı ağ yapısı, bilgisayar gücü ve sayısal çözüm süresi açısından sağladığı verimlilik nedeniyle tercih edilmiştir. Bu ağ yapısının merkez sıcaklık sonuçları ile deneyel veriler arasındaki ortalama fark %1,02 olduğu için bu ağ yapısı seçilmiştir.

Tablo 7. Ağ Yapısına Bağlı Olarak Sıcaklık Değişimi

Ağ Yapısı Eleman Sayısı (Milyon Eleman)	Fırın Merkez Ortalama Sıcaklığı (°C) (İter 400-1000)
2,7	203,6
4,3	206,3
6,6	205,6

Deney ve HAD sayısal sonuçları fırın üzerinden alınan farklı bölgelerde sıcaklık karşılaştırması yapılmış ve Tablo 8'de paylaşılmıştır. Buna göre en fazla hata oranları soğutma fanı etrafında oluşmuştur. Soğutma fanı etrafında oluşan hata oranı, fanın yapısının modellenmesinde oluşan geometrik farklılıklarından gelmektedir. Ayrıca denklem (19)'da belirtilen belirsizlik analizinden gelen %2,4 hata oranı termokupl, takometre ve güç ölçüm cihazından kaynaklanmaktadır. Fırın içindeki sıcaklık değerleri belirsizlik analizi limitleri içinde olup, fırın içinde emaye duvarlardan kaynaklanan ışıyım ısı transferi tahmini daha zor olmaktadır.

Tablo 8. Deneyde Alınan Sıcaklıklar ile HAD Sayısal Çalışması Sıcaklıklarının Karşılaştırılması

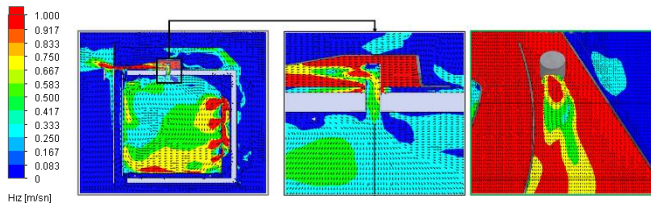
Bölge	HAD	Deney	Hata Oranı (%)
Soğutma Fanı Sensörü (Maksimum)	75,17	80,1	6,15
Fırın Merkez Sıcaklığı (Ortalama)	206,3	204,2	1,02
FKS Sağ Üst (Ortalama)	200,61	200	0,31
Kazan içi sağ duvar (Ortalama)	202,45	197,39	2,56
Kazan içi sol duvar (Ortalama)	198,87	199,26	0,20
Bulp (Ortalama)	212,43	198,9	6,80
Soğutma Sacı Sol (Ortalama)	61,97	67,77	8,56
Soğutma Sacı İç (Maksimum)	72,87	67,5	7,96

Tablo 9'da ise Avrupa Birliği güvenlik standartlarına göre fırın camının belli noktalarından alınmış sıcaklık verileri bulunmaktadır. Bu bölgeler camın üzerinde

belirlenmiş alanın karelere bölünmesiyle oluşmaktadır. Deneyde alınan sıcaklıklar ve HAD sayısal çalışması sonucundaki sıcaklıklara göre 3 bölgenin ortalama sıcaklığı dışındaki tüm bölgelerde %9 hata oranının altında kalmıştır. İlgili 3 bölge sırasıyla camın sol üst (1. Kutu), sağ üst (6. Kutu) ve sol orta (7. Kutu)'dır. Bu bölgeler cam üzerinde yer alan emaye yüzeyler olduğu için bu noktalarda HAD sayısal çalışmanın tahmin kabiliyeti kötü olmakla birlikte diğer noktalarda iyi tahmin edebilmesi çalışmanın iyileştirme yapılabilmesi için yeterli olarak görülmüştür.

Tablo 9. Fırın Camı Deney ve HAD Analizi Sıcaklık Değerleri ve Hata Oranları

1. Kutu	2. Kutu	3. Kutu	4. Kutu	5. Kutu	6. Kutu
HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney
66,8 49,1	72,0 66,4	72,0 67,1	71,2 64,6	70,9 62,2	67,5 53,8
Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)
35,9	8,3	-4,9	-6,6	-8,7	-13,7
7. Kutu	8. Kutu	9. kutu	10. Kutu	11. Kutu	12. Kutu
HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney
63,1 50,4	62,9 62,2	63,1 62,9	63,0 62,2	62,4 60,7	59,8 53,3
Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)
-12,7	-0,7	-0,2	-0,8	-1,6	-6,4
13. Kutu	14. Kutu	15. Kutu	16. Kutu	17. Kutu	18. Kutu
HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney
55,9 47,3	55,4 56,7	55,2 58,6	55,1 59,4	55,2 58,3	54,8 49,2
Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)
-8,6	1,3	3,4	4,3	3,1	-5,6



Şekil 8. Baca Akışı

Fırın bacasının fonksiyonunu yerine getirip getirmediğinin kontrolü için laboratuvarında bulunan fırında turbo fan kapalı modda fırın çalıştırılırken kazan içine bir duman kaynağı konmuştur. Bu kaynaktan çıkan dumanın bacadan vakum edilip edilmediği gözlenmiştir. Ancak duman kazanın içerisinde kalmakta ve bacadan kazan içine doğru (olması gerekenin tam tersi yönde) hava girişi olmaktadır. Bu durum ayrıca HAD sayısal çalışmasında da gözlemlenmiş ve Şekil 8'de paylaşılmıştır.

ESALBA Metal Sanayi A.Ş. Ar-Ge laboratuvarında bulunan enerji tüketimi ölçüm cihazlarının akredite laboratuvarlardaki testlerle aynı sonuçları verip

vermediğinin görülmesi amacıyla iki adet fırın üretilmiştir. Bunların bir tanesi Ar-Ge laboratuvarında bir tanesi ise bağımsız test kuruluşunda test edilmiştir. Bağımsız test kuruluşunda yapılan enerji tüketim testinin sonucu turbo modunda 801 Wh iken Ar-Ge laboratuvarında yapılan testin sonucu ise 791 Wh bulunmuştur. Yaklaşık %1'lik hata oranı kabul edilerek testlere devam edilmiştir.

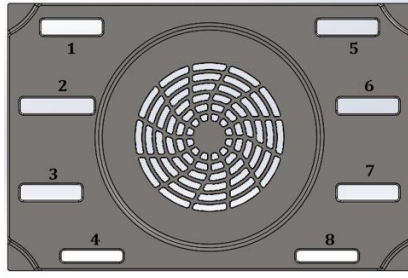
3.2.4 Belirsizlik Analizi

DeneySEL çalışmalar termokuplardan gelen sıcaklık değerleri, takometreden gelen RPM değerleri, ısıtıcı güç ölçüm değerlerinden gelen sistematik belirsizlik içermektedir. Çalışmanın belirsizlik analizi deney çalışmalarında kullanılan ölçüm komponentlerinin hassasiyet değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Deney çalışmalarında kullanılan termokupl $\pm 1,5$ °C hassasiyetle, takometre $\pm 0,03$ RPM ve ısıtıcı güç ölçüm cihazı ise $\pm 0,1$ ölçüm hassasiyetine sahiptir. HAD sayısal çalışmalarda bu değerler hem pozitif hem de negatif yönde değiştirilerek yeni sonuçlar elde edilmiştir. Belirsizlik analizi denklem (19) kullanılarak, ısıtıcı güçleri, fırın set sıcaklığı ve fanların RPM değerleri değiştirilerek belirsizlik çalışması sonucu merkez sıcaklığı pozitif yönde %2,1 ve negatif yönde %2,4 olarak değişmektedir.

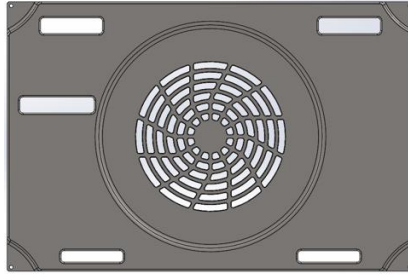
$$\sigma_T = [\Delta T_{T_f \pm 2K} + \Delta T_{f, RPM \pm \% 0.03} + \Delta T_{f, W \pm \% 0.1}]^{0.5} \quad (19)$$

3.3. İyileştirme Çalışmaları

FKS, özellikle fanın aktif olduğu modlar için kritik önem arz etmektedir. Kavitenin ısınma karakterini direkt olarak etkileyen faktörlerden biridir. FKS üzerindeki yönlendirme boşlukları ve fan kanatlarının tasarımı turbo rezistans tarafından üretilen ısı enerjisinin kavite içerisindeki dağılımını etkilemektedir. Isınma karakterinde iki ana ister bulunmaktadır. Bunların birincisi kavite içerisindeki sıcaklık dağılımının mümkün olduğunca homojen olmasıdır. İkincisi ise tuğlanın mevcut duruma göre daha az zamanda ısıtılarak az enerji tüketmesini sağlamaktır. Şekil 9'da mevcut ve iyileştirilmiş FKS tasarımlarına yer verilmiştir. Mevcut FKS'nin üretim şartlarını, kalıp revizyonunu ve maliyeti arttırmayacak şekilde 8 farklı hava çıkış alanını, 38 farklı kombinasyon tasarımlarında farklı bölgeler kapatılarak elde edilen iyi tasarım "iyileştirilmiş tasarım" olarak ele alınmıştır. Bu tasarım Şekil 9B'de gösterilmiş ve mevcut duruma göre 3, 6 ve 7 numaralı hava çıkış alanlarının kapatıldığı FKS tasarımı seçilmiştir.



A) Mevcut FKS



B) İyileştirilmiş FKS

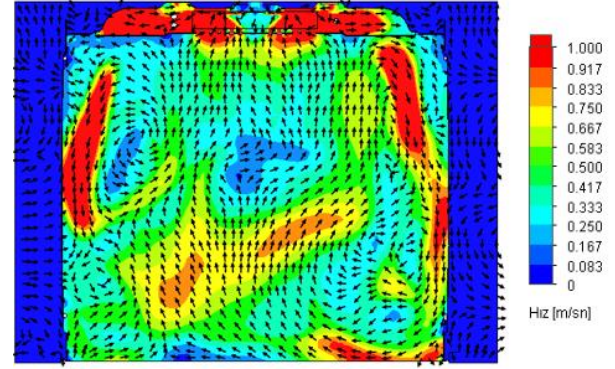
Şekil 9. A) Mevcut FKS B) İyileştirilmiş FKS

Kavite içerisindeki sıcaklık dağılımının homojenize edilmesi, akış hızlarının homojenize edilmesinden geçmektedir. Buna istinaden kavite içerisindeki akış konturları incelenmiştir.

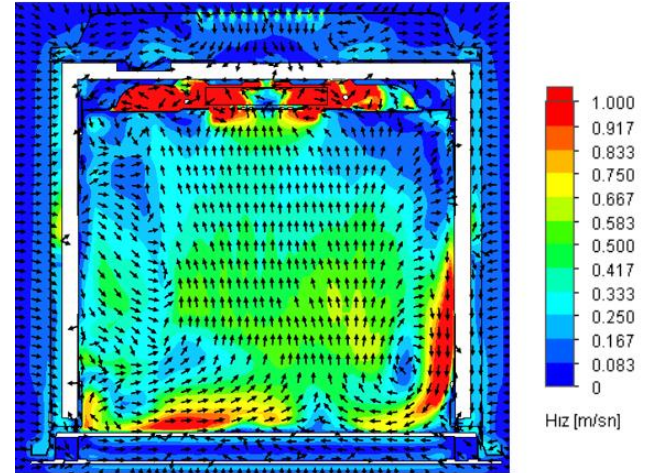
Şekil 10'da kavite merkezinden alınan mevcut FKS'nin akış konturu ve iyileştirilmiş FKS'nin akış konturu Şekil 11'de paylaşılmıştır. Şekil 9A'da gösterilen mevcut FKS'de sağda bulunan delikler fanın dönüşünden dolayı fırının altına doğru akışı yönlendirirken, solda bulunan delikler fırının üstüne doğru akışı yönlendirmektedir. 5,6,7 ve 8 numaralı deliklerden aynı anda gelen hava akışı fırının sağ tarafında kaotik veya girdaplı bir akışa sebebiyet vermektedir. 6 ve 7 numaralı deliklerin kapatılması ile fırının sağ tarafındaki hava akışı mevcut duruma göre daha düz ve girdap oluşturmada ilerlemektedir. Ayrıca hava hız değerleri azaltılarak tepsi üzerinde homojen bir akış olması sağlanmıştır. Diğer bir taraftan fırının sol tarafında 3 numaralı deliğin yok edilmesi ile fırın merkezine yöneltilen akışın kesilmesi sağlanarak sağdan ve soldan gelen akışların birbirleri ile çarpışması azaltılmıştır.

Buna göre;

- Fırın merkezinde akış dağılımı daha homojen hale getirilmiştir.
- Akış hız farkı mevcut duruma göre minimize edilmiştir.
- Deneysel çalışmalarda iyileştirilmiş FKS 40 Wh daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

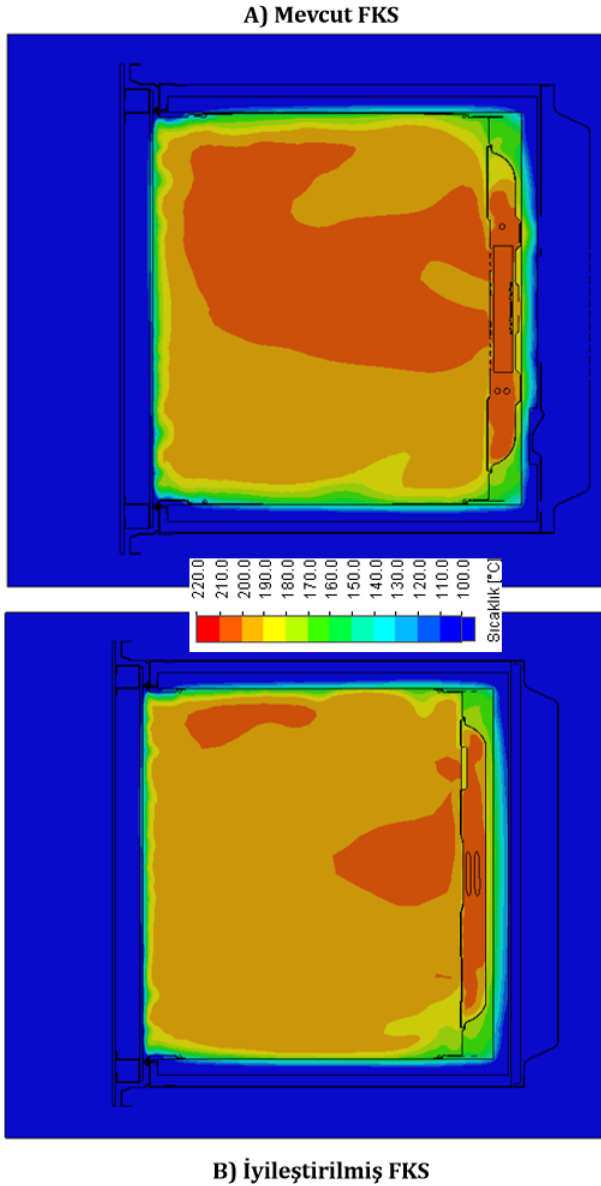


Şekil 10. Mevcut FKS akış hız konturu



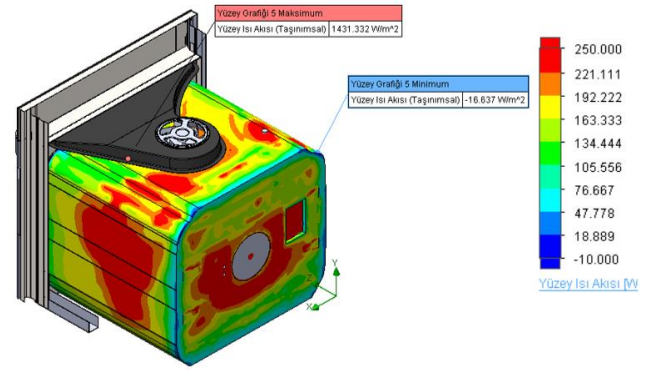
Şekil 11. Revize FKS ile Kavite İçi Akış Konturu

Şekil 12'de 200 °C'de alt, üst rezistansların ve turbo fanın aktif açık olduğu sıcaklık dağılımı görülmektedir. Hem akışkanın homojen dağılması hem de yapılan iyileştirmelerle fırın içindeki sıcaklık dağılımı homojen yayılmıştır. Bu durum merkez sıcaklık değerlerinin daha az bir aralıkta dalgalanmasına, fırın termostatının erkenden soğuyup erkenden ısınmasına yarar sağlamaktadır. Böylelikle iyileştirilmiş FKS tasarımı daha iyi enerji verimliliği sağlamaktadır. Çalışma kapsamında fırın rezistansları aç-kapa ilkesine dayalı olduğu için mevcut ve iyileştirilmiş FKS HAD sayısal çalışmasından elde edilen sıcaklık konturu ± 10 °C fark gözetilerek değerlendirilmelidir.



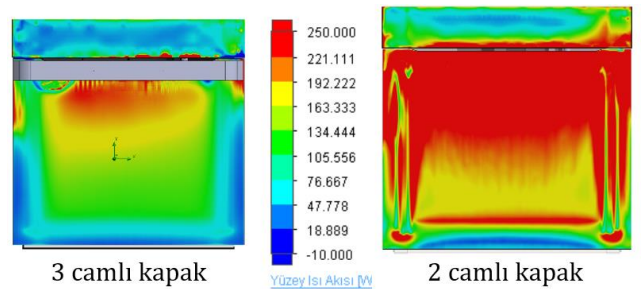
Şekil 12. 200 °C-Alt, Üst Rezistans HAD Sayısal Çalışması
A) Mevcut FKS B) Yeni FKS

Fırında revize edilen FKS ile akış konturunda daha homojen bir dağılım gözlenmektedir. Buna bağlı olarak tuğla daha az sürede ısınarak tüketilen toplam enerji azalmaktadır. Fırında bulunan ısı kaçakların enerji verimliliğine etkisi olumsuz yansımaktadır. Buna istinaden hazırlanan ve doğrulanan HAD modelinde fırının yüksek ısı akısı bulunan bölgeleri incelenmiştir.



Şekil 13. Fırın Yalıtımı Isı Akısı Konturu

Şekil 13’de gösterildiği üzere konturun kırmızı olduğu bölgeler ısı akısının yüksek olduğu bölgelerdir. Turbo fan modunda fırının arka kısmında bulunan ısı akısının engellenebilmesi için bu kısma su bazlı akrilik boya ile kaplanmış 5 mm kalınlığında cam yünü plaka hazırlanarak yerleştirilmiştir. Yapılan çalışmayla birlikte fırının enerji tüketimi azaltılmıştır. Fırının ısı yalıtımı enerji tüketiminin azaltılması açısından büyük önem arz etmektedir. Fırın kavitesinin iç kısmı emisivite katsayısı 0,90 olan siyah emaye kaplama olduğundan ışıyım ile ısı transferi yüksektir. Işıyım ile ısı transferinin azaltılması amacıyla fırında bulunan yalıtımın dış kısmına alüminyum folyo sarılmıştır. Alüminyum folyo ile yapılan enerji verimlilik testlerinde enerji tüketiminin 37 Wh azaldığı gözlenmiştir. Fırın ön kapağı ısı transferinin yoğun olduğu bölgelerden bir diğeridir. Fırın kapağı 2 adet camdan oluşmaktadır. Kapakta bulunan iç camın fırın kavitesine bakan kısmında düşük emisivite katsayısına sahip bir kaplama bulunmaktadır. Buradaki ısı transferinin azaltılması amacıyla kapağa üçüncü cam eklenmiştir. Bununla birlikte HAD sayısal çalışmasında aşağıdaki ısı akısı konturları elde edilmiştir.



Şekil 14. Ön Cam Isı Akısı Konturları Karşılaştırması

Fırın kapağından ısı akısının azaldığı Şekil 14’te görülmektedir. Bu da daha fazla ısıнын fırın kavitesi içinde kaldığını göstermektedir.

4. Bulgular

Yapılan çalışmalar sonucunda ev tipi ankastre fırın için hedeflenen AB standartlarına göre A+ enerji verimlilik sınıfına ulaşılmıştır. Tablo 10’da gösterildiği gibi en

yüksek enerji verimliliği FKS'nin revize edilmesi sonucunda elde edilmiştir. Toplam 38 farklı FKS geometrisi HAD sayısal çalışmada çalışılmış olup maliyet-performans oranı en yüksek model seçilmiştir. Böylelikle ekstra kalıp maliyetine gerek kalmadan kavite içerisindeki akış düzenlenmiş, fırının ısı verimliliği artırılmıştır. FKS revizesi yapılırken HAD modelinin yanında bir alt model oluşturulmuştur. Bu alt modelde yalnızca kavite bulunmaktadır. Böylelikle çözüm süresi 1/10 oranında azaltılmıştır.

Tablo 10. Revizyonlara Göre Enerji Tasarrufu

No	Yapılan Çalışma	Sağlanan Enerji Tasarrufu (Wh)
1	FKS Revizyonu	40
2	Isı Yalıtım Boyası ile Kaplanmış Cam Yünü Plaka Yerleştirilmesi	23
3	Alüminyum Folyo Kaplamalı Yalıtım	37
4	3 Camlı Fırın Ön Kapağı	16
5	4 Çalışmanın Toplam Uygulanışı	131

Tablo 11'de paylaşılan mevcut fırında 801 Wh enerji tasarrufu sağlanırken, iyileştirilmiş tasarımda 670 Wh enerji tasarrufu elde edilirken mevcut duruma göre %16,4 enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Tablo 11. İyileştirme Öncesi ve Sonrası Wh Değerleri

Tasarım	Sağlanan Enerji Tasarrufu (Wh)
Mevcut	801
İyileştirilmiş	670

Soğutma fanı etrafında HAD – Deney arasında en fazla %8,56 (5,8 °C) sıcaklık farkı oluşmaktadır. Fırın merkez sıcaklığında HAD sayısal çalışması deney verisini iyi tahmin ederek ortalamada %1,02 sıcaklık farkı oluşmuştur. Cam yüzeylerinde 3 bölge haricinde sıcaklık farkı %9'in altında olurken diğer 3 bölge, emisivitenin olduğu yerler olduğundan dolayı bu bölgelerde HAD sayısal çalışması tahmini azalmaktadır.

Çalışmada kullanılan standart cam yünü yalıtım yerine alüminyum folyolu cam yünü enerji verimliliği 37 Wh düşürerek mevcut duruma göre %4,6 kazanç getirmiştir. FKS'de yapılan iyileştirme %5 kazanç sağlarken 40 Wh enerji tasarrufu sağlamıştır. Fırın camının sayısının 2'den 3'e çıkarılması 16 Wh enerji tasarrufu sağlarken %2 kazanç getirmektedir. Bütün yapılan değişikliklerde en fazla kazanç FKS'nin değişimi ile elde edilmiştir. Işınım ile ısı transferinin azaltılması fırının enerji verimliliğinin artırılmasında önemli faydalar sağlamaktadır. Özellikle kaviteden dışarıya olan ışınlama ısı transferinin azaltılması yalıtımın emisivite katsayısı düşük olan alüminyum folyo ile kaplanmasıyla mümkün hale gelmiştir. Ayrıca Şekil

14'te gösterilen ön cam ısı akısının azaltılması ile kavite dışına ısı transferinin azaltılması sağlanmıştır.

Diğer bir taraftan çalışma kapsamında değerlendirilmeyen fakat elde edilen homojen akışın ve oluşan iyileştirilmiş enerji verimliliğinin pişirme performansının artırılmasında önemli rol oynamaktadır.

Ankastre fırın sektöründe daha önce kullanılmamış bir yalıtım malzemesi olan su bazlı akrilik boya ile kaplanmış 5mm kalınlığında cam yünü plaka yalnızca turbo rezistansın arka kısmına yerleştirilmesiyle fırın enerji tüketimini %6,6 azaltarak 670 Wh değerinden 626 Wh değere indirerek 44 Wh enerji tasarrufu sağlanmıştır. Su bazlı akrilik boya fırınlarda kullanılmak üzere gelecek çalışması kapsamında kullanılabilir bir ürün olduğu tespit edilmiştir.

5. Tartışma

Yapılan çalışmalarda bir ankastre fırın ele alınarak ısı verimliliğinin artırılarak enerji verimlilik seviyesinin yükseltilmesi amaçlanmıştır. Fırındaki ısı transferi mekanizmaları dikkatlice incelenerek bazı önlemler alınmıştır. Ayrıca HAD sayısal çalışmalarıyla fırın içerisindeki ısının daha verimli kullanılabilmesinin önü açılmıştır. Tüm çalışmaların sonucunda fırının enerji tüketimi 670 Wh'e düşürülerek enerji verimlilik sınıfının AB standartlarına göre "A+" olması sağlanmıştır. Fırında yapılan çalışmalar, literatürdeki çalışmalarla paralel olarak benzer ısı verimliliği sağlamıştır. Ancak bahsi geçen ekstra yalıtım malzemesi parçası ile kayda değer derecede verim elde edilebilmiştir. Özellikle halihazırda bulunan FKS üzerine yatırım maliyeti olmadan yapılan revizyonlarla ısı verimliliğinin artırılması mümkün hale gelmiştir.

6. Sonuçlar

Gerek ülkemizde gerek diğer ülkelerde sıklıkla kullanılan ankastre fırınların enerji verimliliği enerji kriziyle birlikte kritik hale gelmektedir. Yapılan çalışmada çeşitli yöntemlerle ankastre fırınların enerji verimliliği artırılmış olup AB standartlarına göre enerji verimlilik sınıfı "A+"a çıkarılmıştır.

Yapılan literatür araştırmalarına göre ankastre fırınlarda kullanılan mekanik termostatların yerine PID kontrollü termostatların kullanılması fırının ısınma karakteristiğine önemli oranda etki etmektedir. Böylelikle enerji verimliliğinin daha da artırılması mümkün hale gelebilmektedir.

Fırının içerisinde bulunan baca çıkışındaki akış hızının ve baca pozisyonunun HAD simülasyonları ile optimize edilerek enerji verimliliğinin artırılacağı öngörülmektedir. Kavite dışına ısı transferinin yoğun olduğu bir diğer bölge baca çıkışıdır.

FKS üzerinde bulunan açıklıkların ve FKS formunun optimize edilmesiyle kavite içi akışın iyileştirilmesi mümkündür. Farklı FKS çeşitleri ile yapılacak HAD sayısal çalışması sonucunda ısı verimliliğinin artırılmasının önü açılabilir.

Fırının sıcaklık kontrolörü olarak görev yapan mekanik aç-kapa tipi termostatin yerine elektronik olarak PID veya bulanık mantık algoritması ile kontrol edilen bir kontrolör kullanılması enerji verimlilik sınıfını artırılabilir. Kavite içerisine yerleştirilebilecek bir PT100 sıcaklık sensöründen alınan verilen işlenmesi ile merkez sıcaklık salınımı azaltılıp hipor tuğlanın daha çabuk ısınması sağlanabilir. Bu durumda sıcaklık sensörünün kavite içerisindeki konumu kritik olmaktan çıkarılarak daha kolay optimizasyon imkânı sağlanacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Esalba Metal Sanayi A.Ş. bünyesinde yapılmıştır. Ar-Ge laboratuvarında yapılan testler esnasında vermiş olduğu desteklerden dolayı E. Sanlı'ya, M. Çağdaş'a ve F.Ş. Duran'a teşekkür ederiz. Ayrıca bilgi ve tecrübesiyle vermiş olduğu desteklerden dolayı M. Uçar'a teşekkür ederiz.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Muharrem KEYFOĞLU, literatür araştırması, uygulanması, bilgisayar HAD sayısal çalışmasının iyileştirilmesi, laboratuvarında yapılan testler ve iyileştirmeler; Süleyman Fatih KIRMIZIGÖL, HAD sayısal çalışması modelinin hazırlanması, laboratuvarında yapılan testler ve makale revizyonu konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir ve bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır. Makalede yer alan deneysel çalışmaları Esalba Metal Sanayi A.Ş.'de yapılmış olup Ar-Ge merkezi projesinin bir çıktısıdır ve kurum veya kişiden izin alınmasına gerek yoktur.

Kaynaklar

Altun, Ö., Yıldız, Ş., & Anık, T. (2018). Ankastre Ev Tipi fırınlarda fırın Kapağının Enerji Tüketimi ve Enerji Seviyesine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), pp. 403-409. doi: 10.5505/pajes.2018.23922

Constantin, G. A., Munteanu, M. G., Voicu, G., Paraschiv, G., & Ştefan, E. M. (2023). An analysis of air flow in the baking chamber of a tunnel-type electric oven. *Computation*, 11(236), pp. 2-20.

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (n.d.). *Isı ve Kütle Transferi* (4 ed.). Palme Yayıncılık.

EN 60350-1. (2013). Household electric cooking appliances Part 1: Ranges, ovens, steam ovens and grills - Methods for measuring performance. *GENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization Brussels*.

Fahey, M., & Karagöz, İ. (2007). Use of computational fluid dynamics in domestic oven design. *Int. Jnl. Of Multiphyssics*, 2(1). doi:10.1260/175095408784300216

Guerin, D., Morin, V., Chaussy, D., & Auriault, J. L. (2001). Thermal conductivity of handsheets, papers and model coating layers. *12th Fundamental Research Symposium*, pp. 927-945. doi: 10.15376/frc.2001.2.927

isollat. (n.d.). Retrieved from <https://www.isollat.com/>

Kayihan, S. A. (2003). Elektrikli fırınların ısı performansının deneysel olarak incelenmesi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. doi:<http://hdl.handle.net/11527/9850>

Khatibi, M., Zamani, H., & Mirzababaei, S. M. (2023). Flatbread baking process under time-varying input power in a home-scale electric oven: 3D CFD simulation with experimental validation. *Thermal Science and Engineering Progress*, 46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102129>

Khatir, Z., Paton, J., Thompson, H., Kapur, N., Toropov, V., Lawes, M., & Kirk, D. (2012). Computational fluid dynamics (CFD) investigation of air flow and temperature distribution in a small scale bread-baking oven. *Applied Energy*, 89(1), pp. 89-96. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.002>

Khatir, Z., Taherkhani, A. R., Paton, J., Thompson, H., Kapur, N., & Toropov, V. (2015). Energy thermal management in commercial bread-baking using a multi-objective optimisation framework. *Applied Thermal Engineering*, 80, pp. 141-149. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.042>

Kırmızıgöl, F., & Uçar, M. (2024). Bir Hava Temizleme Cihazının Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 458-469. doi:<https://doi.org/10.21205/deufmd.2024267812>

Kokolj, U., Skerget, L., & Ravnik, J. (2017). The validation of numerical methodology for oven design optimization using numerical simulations and baking

- experiments. *Journal of Mechanical Engineering*, 63(4), pp. 215-224. doi:10.5545/sv-jme.2016.4089
- Lam, C. K., & Bremhorst, K. (1981, 09). A modified form of k- ϵ model for predicting wall turbulence. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 103, pp. 456-460.
- Lu, Y., Rane, S., & Kovacevic, A. (2022). Evaluation of cut cell cartesian method for simulation of a hook and claw type hydrogen pump. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(54). doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.110
- Material data sheet thermally broken steel USA. (1997). Retrieved from UNI 10088-2: https://thermallybrokensteelusa.com/wp-content/uploads/2015/10/Material_Data_Sheet-Thermally-Broken-Steel-USA.pdf
- Material: Polyamide 66. (n.d.). Retrieved from Licharz Engineering Plastics : <https://www.holes.hu/public/upload/files/PA66.pdf>
- Material: Polyamide 66 GF 30. (n.d.). Retrieved from Licharz Engineering Plastics: <https://www.holes.hu/public/upload/files/PA66-GF30.pdf>
- Mirade, P. S., Kondjoyan, A., & Daudin, J. D. (2002). Three-dimensional CFD calculations for designing large food chillers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, pp. 67-88. doi:https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00180-6
- Mistry, H., Subbu, G., Dey, S., Bishnoi, P., & Castillo, J. L. (2006). Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens. *Applied Thermal Engineering*, 26, pp. 2448-2456. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.007
- Modelling Turbulence. (2006, 09 29). *Fluent Inc.*, pp. 12-26.
- Modest, M. (2013). *Radiative Heat Transfer*. doi:https://doi.org/10.1016/C2010-0-65874-3
- Niamsuwan, S., Kittisupakorn, P., & Suwatthikul, A. (2015). Enhancement of energy efficiency in a paint curing oven via CFD approach: Case study in an air-conditioning plant. *Applied Energy*, pp. 465-477. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.041
- Pensek, M., Holecek, N., Gierkes, H., & Golobic, I. (2005). Energy consupcion analysis of domestic oven. *Journal of Mechanical Engineering*, pp. 405-410. doi:10.1615/ICHMT.2004.IntThermSciSemin.560
- Piaia, J. C., Claumann, C. A., Quadri, M. B., & Bolzan, A. (2018). Air flow CFD modelling in an industrial convection oven. *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications*. doi:10.1007/978-3-319-70945-1_1
- Schott. (2004). *TIE-31: Mechanical and thermal properties of optical glass*.
- Shanks, H. R., Maycock, P. D., Didles, P. H., & Danielson, G. C. (1963). Thermal conductivity o silicon from 300 to 1400 K. *Physical Review Journal Archive*, 130(5), pp. 1743-1748. doi:https://doi.org/10.1103/PhysRev.130.1743
- Sobachkin, A., & Dumnov, G. (n.d.). Numarical basis of CAD-Embedded CFD . *NAFEMS World Congress*, pp. 1-20.
- Stinger, J. D., Scheerlinck, N., Nicolai, B., & Impe, J. F. (2001). Optimal heating strategies for a convection oven. *Journal of Food Engineering*, 48(4), pp. 335-344. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00176-X
- Şahin, S. (2023). A systematic approach to numerical analysis and validation for industrial oven design and optimization. *Research Square*, pp. 1-22. doi:10.21203/rs.3.rs-3131043/v1
- Wakes, S. J., Maegli, T., Dickinson, K. J., & Hilton, M. (2008). Three-Dimensional Flow Simulation Over a Complex Sand Dune System. *Environmental Problems in Coastal Regions VII*, pp. 221-230. doi:10.2495/CENV080211
- Yamalı, C. (2019). *Isıl iletkenlik test raporu ISOLLAT ısı yalıtımı malzemesi*. Ankara: Makina Mühendisliği Bölümü Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

BINARY HONEY BADGER ALGORITHM ENHANCED WITH TIME-VARYING SIGMOID TRANSFER FUNCTION AND CROSSOVER STRATEGY

Gülnur YILDIZDAN^{1*}, Emine BAŞ²

¹ Selcuk University, Kulu Vocational School, Department of Computer Technologies, Konya

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-6252-9012>

² Konya Technical University, Faculty of Engineering and Nature Sciences, Department of Software Engineering, Konya

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-4322-6010>

Keywords	Abstract
Binary optimization, Crossover strategy, Honey badger algorithm, Knapsack problems, Time-varying transfer function	<i>Modeling the foraging behavior of honey badgers, the Honey Badger Algorithm (HBA) is a recently proposed metaheuristic algorithm. In this study, a binary version of this algorithm that was proposed for solving continuous optimization problems was developed. The S-shaped transfer function and crossover strategy were used to transform the continuous algorithm into a binary algorithm. Eight S-shaped transfer functions with constant and time-varying features were used, and the most successful function was determined. Additionally, the effect of time-varying transfer functions was examined. Three strategies, single-point, two-point, and uniform, were applied as crossover strategies, and the uniform strategy, which was more successful than others, was integrated into the algorithm. The binary algorithm (BinHBA) developed in this way was tested on a total of twenty-seven knapsack problems, fifteen small-scale and twelve large-scale. Statistical tests were employed to analyze the results and compare them with methods found in the existing literature. The results showed that the proposed BinHBA for binary optimization problems is effective and preferable.</i>

ZAMANLA DEĞİŞEN SİGMOİD TRANSFER FONKSİYONU VE ÇAPRAZLAMA STRATEJİSİ İLE GELİŞTİRİLMİŞ İKİLİ BAL PORSUĞU ALGORİTMASI

Anahtar Kelimeler	Öz
İkili optimization, Çaprazlama stratejisi, Bal porsuğu algoritması, Sırt çantası problemleri, Zamanla-değişen transfer fonksiyonu	<i>Bal porsuklarının yiyecek arama davranışını modelleyen Bal Porsuğu Algoritması (HBA), yakın zamanda önerilen bir meta-sezgisel algoritmadır. Bu çalışmada, sürekli optimizasyon problemlerinin çözümü için önerilen bu algoritmanın ikili versiyonu geliştirildi. Sürekli algoritmayı ikili bir algoritmaya dönüştürmek için S-şekilli transfer fonksiyonu ve çaprazlama stratejisi kullanıldı. Sabit ve zamanla değişen özelliklere sahip sekiz adet S-şekilli transfer fonksiyonu kullanıldı ve en başarılı fonksiyon belirlendi. Ayrıca zamanla değişen transfer fonksiyonlarının etkisi de incelendi. Çaprazlama stratejisi olarak tek nokta, iki nokta ve tekdüze olmak üzere üç strateji uygulandı ve diğerlerinden daha başarılı olan tekdüze stratejisi algoritmaya entegre edildi. Bu şekilde geliştirilen ikili algoritma (BinHBA), on beşi küçük ölçekli ve on ikisi büyük ölçekli olmak üzere toplam yirmi yedi sırt çantası problemi üzerinde test edildi. Sonuçları analiz etmek ve mevcut literatürde bulunan yöntemlerle karşılaştırmak için istatistiksel testler kullanıldı. Sonuçlar, ikili optimizasyon problemleri için önerilen BinHBA'nın etkili ve tercih edilebilir olduğunu gösterdi.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 02.05.2024

Kabul Tarihi : 23.01.2025

Research Article

Submission Date : 02.05.2024

Accepted Date : 23.01.2025

* Sorumlu yazar: gavsar@selcuk.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1477088>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The 0-1 knapsack problem optimization problems are binary optimization problems (BOPs), which are an important class of combinatorial optimization problems. BOPs take the value 0 or 1 as the decision variable. The algorithms used to solve these problems, where the solution space is expressed as $\{0,1\}_n$, are inadequate, especially for large-scale problems. For this reason, researchers in this field have turned to non-deterministic algorithms in recent years, and evolutionary algorithms have become the most prominent in this category (He, Zhang, Mirjalili, and Zhang, 2022).

The number of evolutionary algorithms has been increasing rapidly in recent years. Most algorithms are initially proposed for continuous problems and then binarized to solve binary optimization problems. One of these algorithms is the Honey Badger Algorithm (Hashim, Houssein, Hussain, Mabrouk, and Al-Atabany, 2022). The algorithm has advantages such as exhibiting a dynamic search behavior in searching for a food source, thus maintaining the balance between exploration and exploitation, and having few parameters that need to be adjusted (Yasear and Ghanimi, 2022). On the other hand, the local improvement ability of the algorithm is weak, and it is insufficient to escape from the local optimum in solving complex problems (Jin, Li, Zhang, and Zhang, 2023). Despite these drawbacks encountered in most metaheuristic algorithms, it has been used to solve many problems in the literature because it is simple and easy to implement.

Hu et al. proposed a modified HBA algorithm based on the Bernoulli shift map, piecewise optimal decreasing neighborhood, and strategy-adaptive horizontal migration to solve the unmanned aerial vehicle path planning problem (Hu, Zhong and Wei, 2023). Abasi, Aloqaily, and Guizani proposed a modified HBA to optimize the hyperparameters of a convolutional neural network for sleep apnea detection (Abasi, Aloqaily, and Guizani, 2023). A novel honey badger optimization approach utilizing ensemble learning-based vehicle detection and classification methods was presented by Aljebreen et al. (Aljebreen et al., 2023). Majumdar, Mitra, and Bhattacharya proposed a modified HBA using lens opposition-based learning in the initial stage to improve population quality and diversity and achieve better discovery, and they proved the success of the proposed algorithm on CEC functions (Majumdar, Mitra, and Bhattacharya, 2023). Jain, Ding, and Kotecha developed a new fuzzy deep neural network for cloud environments with HBA for privacy-preserving intrusion detection techniques (Jain, Ding, and Kotecha, 2023). Altuwairiqi proposed a model to solve security and energy problems (Altuwairiqi, 2024). He also created enhanced HBA-based multi-hop

routing optimized for wireless sensor networks. In order to effectively forecast COVID-19 situations, Qasem proposed a hybrid intelligent model that combined an artificial neural network with HBA (Qasem, 2024). Huang et al. proposed an advanced HBA that utilizes orthogonal opposition-based learning, a balance pooling strategy, and differential evolution to improve the HBA's performance. The method was tested for CEC 2022 and engineering problems (Huang et al., 2024). Wang et al. developed a novel wrapper feature selection approach based on the binary honey badger algorithm, integrating chaotic sub-swarm and Lévy flight approaches, to identify a traffic-based Internet of Things device (Wang, Kang, Sun, and Li, 2024). Büyüköz and Haklı discretized HBA using transfer functions and used it to solve 0-1 knapsack problems (Büyüköz and Haklı, 2023). To address the portfolio selection problem, Ni et al. created a novel hybrid method that combines quadratic programming and the binary honey-badger algorithm (Ni, Wang, Huang, and Li, 2022).

As can be seen above, although HBA is preferred in many areas for solving continuous optimization problems, its use in solving binary optimization problems is less common. The scarcity of proposed binary HBA versions and the desire to contribute to the literature on the analysis of HBA's performance on binary problems were the motivations for this study.

The following is a list of the study's contributions to the literature:

- The effect of using time-varying transfer functions for the binarization of HBA was investigated for the first time.
- The effect of constant and time-varying S-shaped transfer functions on the algorithm performance was examined.
- The effect of integrating crossover strategies into HBA on performance was evaluated.
- A new binary HBA algorithm was presented to the literature by integrating the most successful transfer function and crossover strategy determined into the algorithm.
- Both small- and large-scale knapsack problems were used to test the proposed algorithm. As a result, it was possible to see how the dimension increase affected the proposed algorithm.
- The results obtained were compared with the algorithms in the literature to demonstrate the success of the algorithm.

The following study sections are arranged as follows: In Section 2, the HBA algorithm, the proposed binary HBA algorithm, and the knapsack problem are explained. Section 3 presents the experimental test

results performed to demonstrate the performance of BinHBA. Section 4 delineates conclusions and prospective works for further research.

2. Material and Methods

2.1. Honey Badger Algorithm

The Honey Badger Algorithm (HBA) is a metaheuristic algorithm proposed by Hashim et al. (Hashim et al., 2022) in 2022. The algorithm is inspired by the behavior of the honey badger when searching for food, such as smelling, digging, and following the honeyguide bird. HBA is divided into two phases, the "digging phase" and the "honey phase", and is mathematically modeled as given below.

- Initialization

The algorithm is initialized with a population of possible solutions. Where N is the number of honey badgers, each individual in the population is placed at their starting position according to Equation 1.

$$X_i = Lb_i + r^1 \times (Ub_i - Lb_i) \quad (1)$$

In the equation, r^1 is a random number between 0 and 1. Lb and Ub indicate the lower and upper bound values of the search space, respectively. X_i represents the i th honey badger's position.

- Intensity (I) definition

Density depends on the concentration power of the prey and the distance between it and the honey badger. The higher the scent, the faster the movement. The opposite situation is expressed in Equation 2 according to the Inverse Square Law (Kapner et al., 2007).

$$I_i = r^2 \times \frac{S}{4\pi D_i^2} \quad (2)$$

$$S = (X_i - X_{i+1})^2 \quad (3)$$

$$D_i = X_p - X_i \quad (4)$$

where S is the concentration power. In Equation 2, D_i represents the distance between the prey and the i th honey badger. r^2 is a random number in the range of 0 to 1. Also, X_p is the prey position.

- Update density factor

The density factor (α) controls the transition from the exploration to the exploitation phase and has a character that reduces randomness by decreasing over time. It is formulated according to Equation 5.

$$\alpha = C \times \exp\left(\frac{-t}{t_{max}}\right) \quad (5)$$

where c is a constant value ($C \geq 1$ (default = 2)). While t is the iteration number, t_{max} indicates the maximum iteration number.

- Escaping from the local optimum

This and the next two steps are used to get out of the local optimum. In order to fully discover the search space, the algorithm makes use of an F flag that permits changing it.

- Updating the position of agents

HBA's position update process is divided into two phases: "digging phase" and "honey phase".

Digging phase: In this phase, a honey badger moves in a manner similar to a cardioid, and this movement is formulated as in Equation 6.

$$X_{new} = X_p + F \times \beta \times I \times X_p + F \times r^3 \times \alpha \times D_i \times [\cos(2\pi r^4) \times [1 - \cos(2\pi r^5)]] \quad (6)$$

In the equation, X_{new} is the new candidate position, and X_p is the best prey position found so far. The honey badger's ability to take in food is denoted by β ($\beta \geq 1$ (default = 6)). r^3 , r^4 , and r^5 are random numbers between 0 and 1. D_i represents the distance between the prey and the i th honey badger. F is the flag that changes the search direction and is formulated using Equation 7.

$$F = \begin{cases} 1 & r^6 \leq 0.5 \\ -1 & else \end{cases} \quad (7)$$

Honey phase: It is the phase in which a honey badger follows the honeyguide bird to reach the beehive and is formulated according to Equation 8.

$$X_{new} = X_p + F \times r^7 \times \alpha \times D_i \quad (8)$$

In the equation, r^7 is a random number between 0 and 1. At this phase, the search is affected by time-varying search behavior (α). In addition, a honey badger might discover disturbance F .

In Figure 1, the HBA pseudocode is presented.

2.2. Binary Honey Badger Algorithm (BinHBA)

The standard HBA is proposed for continuous optimization problems and needs to be redesigned to solve binary optimization problems. In binary optimization, decision variables have a search space

where they can take the value "0" or "1". In these problems, each solution is represented by a series of decision variables that take "0" or "1", where the value 0 represents absence and the value 1 represents presence (Karakoyun and Ozkis, 2022).

1. Determine parameters t_{max} , N , β , C
2. Initialize population of N individuals
3. Evaluate the fitness (f_i) of each honey badger position (X_i).
4. Find best position (X_p) and assign fitness to f_p .
5. While $t \leq t_{max}$ do
6. Utilize Equation 5 to update the decreasing factor α .
7. For $i=1$ to N do
8. Utilize Equation 2 to calculate the intensity I_i .
9. If $r < 0.5$ then
10. Use Equation 6 to update the position X_{new} .
11. Else
12. Use Equation 8 to update the position X_{new} .
13. End if
14. Examine new position (X_{new}) and assign to f_{new} .
15. If $f_{new} \leq f_i$ then
16. Assign $X_i = X_{new}$ and $f_i = f_{new}$
17. End if
18. If $f_{new} \leq f_p$ then
19. Assign $X_p = X_{new}$ and $f_p = f_{new}$
20. End if
21. End for
22. End while
23. Display X_p

Figure 1. HBA's Pseudocode

In this section, a binary HBA algorithm is proposed to solve binary optimization problems, and the steps followed in creating the proposed algorithm are listed below.

- Transfer function

The 0-1 knapsack problems chosen for this study are combinatorial problems, and for HBA to solve these problems, it must be transformed to work in the binary search space. The most common way to perform this transformation is to use the transfer function. Transfer functions are responsible for ensuring that if the candidate solution defined by 0 and 1 turns into a continuous value after the algorithm steps, this value is converted back to 0 or 1 according to Equation 9. In the equation, ∂ represents the value in a certain dimension of the solution, while $F(\partial)$ indicates the value obtained from the transfer function for the value ∂ . Additionally, R is a random number in the range of 0 to 1 (Yildizdan and Bas, 2024; Yildizdan and Baş, 2023).

$$F(\partial) = \begin{cases} 1 & \text{if } F(\partial) > R \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

More generally, transfer functions are used to determine the probability that a position value will change to 0 or 1 based on the value of the step vector (velocity) for a given dimension in the current iteration. The step vector is defined as the movement

magnitude for the current individual. In the exploitation phase of the algorithm, the step vector value is small, and a detailed search is performed in small steps. On the contrary, in the exploration phase, the step vector value is large, and it explores different regions of the search space in large steps. In an algorithm where the probability of changing location is calculated using the transfer function, transfer functions significantly affect the balance between exploration and exploitation. If the transfer function does not change, the probability of changing positions remains the same throughout the optimization process. On the other hand, if the transfer function is changed, the effect of the step vector on position updating is utilized to explore and exploit the search space (Mafarja et al., 2018).

To better balance exploration and exploitation, Mafarja et al. showed that using time-varying transfer functions is an effective strategy (Mafarja et al., 2018). One of the transfer functions frequently used in the literature is the S-shaped transfer function (Al-Betar, Hammouri, Awadallah, and Abu Doush, 2021; Feda et al., 2024). Based on what was mentioned above, in this study, the effect of using constant S-shaped and time-varying S-shaped transfer functions on HBA was examined. Table 1 lists the transfer functions that were employed in the study. Figures 2 and 3 depict these transfer functions graphically. In time-varying transfer functions, the value of τ is formulated as shown in Equation 10 and starts with an initial value and progressively decreases over the iterations, meaning it is a time-varying variable. t_{max} is the maximum number of iterations, t is the current iteration, and τ_{min} and τ_{max} are the min and max values of the control parameter τ in the equation. In this study, $\tau_{min} = 0.01$ and $\tau_{max} = 4$ were used, as in Mafarja et al.'s study (Mafarja et al., 2018).

$$\tau = \left(1 - \frac{t}{t_{max}}\right) \tau_{max} + \tau_{min} \left(\frac{t}{t_{max}}\right) \quad (10)$$

Table 1. S-Shaped Transfer Functions

Constant	Time-varying
S1 $F(c) = \frac{1}{1+e^{-\partial}}$	S1(tv) $F(\partial, \tau) = \frac{1}{1+e^{-\frac{\partial}{\tau}}}$
S2 $F(\partial) = \frac{1}{1+e^{-2 \cdot \partial}}$	S2(tv) $F(\partial, \tau) = \frac{1}{1+e^{-\frac{-2 \cdot \partial}{\tau}}}$
S3 $F(\partial) = \frac{1}{1+e^{-\frac{\partial}{2}}}$	S3(tv) $F(\partial, \tau) = \frac{1}{1+e^{-\frac{\partial}{2\tau}}}$
S4 $F(\partial) = \frac{1}{1+e^{-\frac{\partial}{3}}}$	S4(tv) $F(\partial, \tau) = \frac{1}{1+e^{-\frac{\partial}{3\tau}}}$

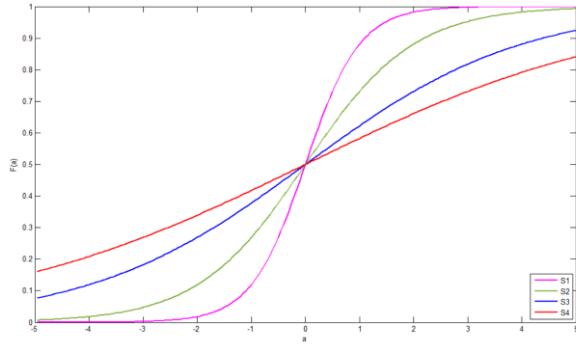
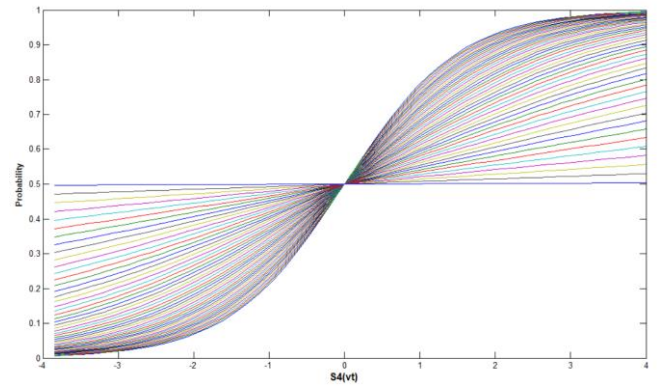


Figure 2. S-Shaped Transfer Functions (Constant)

Figure 3. S-Shaped Transfer Functions (Time-varying ($t_{max} = 50$, $\tau_{min} = 0.01$ and $\tau_{max} = 4$))

- Crossover strategy

The crossover strategy was incorporated into the proposed BinHBA to strengthen its exploitation performance. In the crossover strategy, every solution in the population is combined with a different solution that has been chosen from the population based on the crossover method that has been specified (Awadallah, Hammouri, Al-Betar, Braik, and Elaziz, 2022). In this study, three different crossover strategies, which are frequently used in the literature, were integrated into the algorithm and their effects on performance were examined. The crossover operation is formulated as in Equation 11. In the equation, $\otimes$ denotes the crossover operator between two solutions. $X(t, i)$ is the existing solution at the i th position, and $X(t, b)$ is also the best solution in the population (for this study).

$$X(t, i) = \otimes (X(t, i), X(t, b)) \quad (11)$$

The following is a list of the three kinds of crossover operators that BinHBA uses (Awadallah et al., 2022):

- One-point crossover: In this crossover strategy, a random dimension is selected in the existing solution. All dimensions after this point are then swapped between the two solutions (Figure 4(a)).
- Two-point crossover: In this crossover strategy, two dimensions are determined on the existing solution. Then the dimensions between these two points are swapped between the two solutions (Figure 4(b)).
- Uniform crossover: The dimensions of the existing solution and the dimensions of the best solution are randomly selected in a determined ratio and swapped. For instance, if the ratio is 0.5, the elements of the optimal solution are swapped for half of the existing solution (Figure 4(c)).

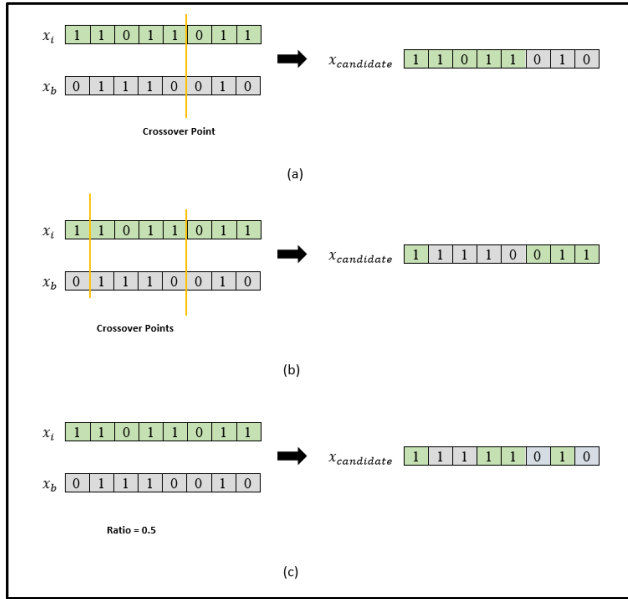


Figure 4. Crossover Strategies

The BinHBA algorithm proposed in this study was created using the transfer function and crossover strategy. In Figure 5, the BinHBA pseudocode is presented.

1. Determine parameters t_{max}, N, β, C
2. Initialize population of N individuals for binary search space (using "0" or "1")
3. Evaluate the fitness (f_i) of each honey badger position (X_i).
4. Find best position (X_p) and assign fitness to f_p .
5. While $t \leq t_{max}$ do
6. Utilize Equation 5 to update the decreasing factor α .
7. For $i=1$ to N do
8. Utilize Equation 2 to calculate the intensity I_i .
9. If $r < 0.5$ then
10. Use Equation 6 to update the position X_{new} .
11. Else
12. Use Equation 8 to update the position X_{new} .
13. End if
14. Apply the selected transfer function to X_{new} .
15. Apply the determined crossover strategy to X_{new} .
16. Examine new candidate position (X_{new}) and assign to f_{new}
17. If $f_{new} \leq f_i$ then
18. Assign $X_i = X_{new}$ and $f_i = f_{new}$
19. End if
20. If $f_{new} \leq f_p$ then
21. Assign $X_p = X_{new}$ and $f_p = f_{new}$
22. End if
23. End for
24. End while
25. Display X_p

Figure 5. BinHBA's Pseudocode

2.3. 0-1 Knapsack Problems

The 0-1 knapsack problem (KP) is an NP-hard optimization problem consisting of a knapsack and a set of items, each with its weight and profit, the aim of which is to place the items in the knapsack to maximize the total profit without exceeding the capacity of the knapsack. The following is a brief definition of the general 0-1 KP (Pisinger, 2005). Let n be the item with

weights $w_1, w_2, \dots, w_n$ and profits $p_1, p_2, \dots, p_n$, and let C denote the maximum capacity of the knapsack. In such a case, the items have two states: the j th item is put in the knapsack ($x_j = 1$) and it is not put ($x_j = 0$). The mathematical formulation of 0-1 KP is given in Equation 12 (Li, Fang, and Zhu, 2023).

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{j=1}^n p_j x_j \\ & \text{subject to} \quad \sum_{j=1}^n w_j x_j \leq C, \quad x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, n \quad (12) \end{aligned}$$

3. Experimental Results

In this section, the performance of the proposed BinHBA algorithm is tested on small and large scale 0-1 KPs. The results were evaluated using statistical tests and compared with methods found in the literature. In this study, the KPs used to analyze the performance of BinHBA are considered two different datasets, as follows:

Dataset1: Includes fifteen small-scale 0–1 KP samples. The following link provides examples: <https://pages.mtu.edu/~kreher/cages/Data.html>. The dataset has between 16 and 24 items.

Dataset2: Includes twelve large-scale 0–1 KP samples. The following link provides examples: http://artemisa.unicauca.edu.co/~johnyortega/instances_01_KP. The dataset has between 100 and 1000 items.

Tables 2 and 3 include the tables for Datasets 1 and 2, respectively.

Table 2. The Small-scale Knapsack Problems Dataset

ID	Capacity	Size	Optimum
Kp1	3,780,355	16	7,850,983
Kp2	4,426,945	16	9,352,998
Kp3	4,323,280	16	9,151,147
Kp4	4,550,938	16	9,348,889
Kp5	3,760,429	16	7,769,117
Kp6	5,169,647	20	10,727,049
Kp7	4,681,373	20	9,818,261
Kp8	5,063,791	20	10,714,023
Kp9	4,286,641	20	8,929,156
Kp10	4,476,000	20	9,357,969
Kp11	6,404,180	24	13,549,094
Kp12	5,971,071	24	12,233,713
Kp13	5,870,470	24	12,448,780
Kp14	5,762,284	24	11,815,315
Kp15	6,654,569	24	13,940,099

Table 3. The Large-scale Knapsack Problems Dataset

Characteristic	ID	Capacity	Size	Optimum
Uncorrelated	Kp16	995	100	9147
	Kp17	1008	200	11,238
	Kp18	2543	500	28,857
	Kp19	5002	1000	54,503
Weakly correlated	Kp20	995	100	1514
	Kp21	1008	200	1634
	Kp22	2543	500	4566
	Kp23	5002	1000	9052
Strongly correlated	Kp24	997	100	2397
	Kp25	997	200	2697
	Kp26	2517	500	7117
	Kp27	4990	1000	14,390

The gathered results were compared using time and gap criteria, and the Wilcoxon signed-rank test (Woolson, 2007) was used for statistical evaluation. Equation 13 provides the formula for the gap, which establishes the percentage error between the optimum value and the obtained mean value.

$$Gap = \frac{Optimum\ value - obtained\ mean\ value}{Optimum\ value} * 100 \quad (13)$$

In all KPs, the population size was determined as 20 and the maximum number of iterations was defined as 5000. Additionally, each problem was run independently 20 times. These parameter values were selected to align with those of the algorithms being compared to guarantee a fair literature comparison.

First, this section evaluated the results obtained by integrating eight different transfer functions, including constant S-shaped and time-varying S-shaped, into the HBA algorithm. The comparative results of the evaluations made according to gap and time are given in Tables 4 and 5, respectively. Based on the total gap values shown in Table 4, the smallest values were obtained from the S1 and S1(vt) transfer functions, respectively, and they were the most successful versions. Moreover, Table 5's total time values indicated that the versions using S4 and S2(vt) transfer functions execute all problems in the shortest time, respectively. In addition to the evaluation in Table 5, the run times are considered as two groups of constant and time-varying S-shaped transfer functions, and the total times obtained are given comparatively in Figure 6. According to Figure 6, time-varying transfer functions solved problems in less time than constant ones.

According to the results above, S1 was more successful in both constant and time-varying transfer functions.

Although the versions using this transfer function lag behind other transfer functions in terms of run time, it can be said that the increase in time is tolerable and the difference between times is not too much. Upon analyzing the gap values, it was observed that the value 0 could not yet be obtained for all problems. Accordingly, it was decided that the algorithm needed further improvement. To achieve this, solution diversity was increased by applying a crossover between the candidate solution and the best individual in the population after the transfer function. The crossover strategy was applied to the most successful versions, namely BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt). As mentioned in the sections above, three crossover strategies—one point, two point, and uniform—were selected, and their contribution to performance was examined. The gap and time results of the versions obtained by separately integrating three different crossover strategies into BinHBA_S1 are given in Table 6. According to the table, the version in which the uniform crossover strategy was integrated obtained a gap value of 0 in all problems except KP10. Accordingly, it became the most successful version. When evaluated in terms of time, it was seen that the version in which the two-point crossover strategy was integrated found solutions faster in thirteen out of fifteen problems. A more detailed evaluation of the results is given in Figure 7. In the graphic, the total gap and run-time values of the versions obtained with different crossover strategies were compared. According to Figure 7, in terms of the total gap, the most successful crossover strategy was uniform, while the least successful strategy was two-point. In terms of total time, the crossover strategy that took the shortest time was two-point, while the strategy that required the longest time was one-point. Despite this, the total time values are quite close to each other and at a tolerable level.

The gap and time results of the versions obtained by separately integrating three different crossover strategies into BinHBA_S1(vt) are given in Table 7. According to the table, the version integrated with the uniform crossover strategy was able to obtain 0 gap values in all problems, and it became the most successful version. When evaluated in terms of time, it was seen that the version with an integrated two-point crossover strategy was faster in eleven out of fifteen problems. A more detailed evaluation of the results is given in Figure 8. According to Figure 8, in terms of total gap, the most successful crossover strategy was uniform, while the least successful strategy was two-point. In terms of total time, the crossover strategy that took the shortest time was two-point, while the strategy that required the longest time was uniform. Despite this, the total time values are quite close to each other and at a tolerable level.

Table 4. The Gap results of BinHBA for Transfer Functions on Small-scale KPs

Gap	S1	S2	S3	S4	S1 (tv)	S2 (tv)	S3 (tv)	S4 (tv)
<i>Kp1</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp2</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp3</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp4</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp5</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp6</i>	0	0	0.087087	0.100851	0	0	0	0.038023
<i>Kp7</i>	0	0.021248	0.088065	0.198782	0	0.063744	0	0.063744
<i>Kp8</i>	0	0.001354	0.012924	0.018281	0	0.002709	0.012496	0.001354
<i>Kp9</i>	0	0.01541	0.068902	0.099723	0	0	0	0.01541
<i>Kp10</i>	0	0	0.00083	0.016758	0.00083	0	0.00904	0.002491
<i>Kp11</i>	0.059247	0.119325	0.283389	0.459879	0.155572	0.209475	0.15182	0.223807
<i>Kp12</i>	0.010593	0.117434	0.339589	0.374163	0.016356	0.031779	0.083946	0.262456
<i>Kp13</i>	0.010928	0.10126	0.28258	0.318272	0.136092	0.147541	0.089782	0.116231
<i>Kp14</i>	0.017821	0.191986	0.338926	0.279588	0.075097	0.09552	0.134309	0.216103
<i>Kp15</i>	0.0108	0.103534	0.177068	0.388096	0.02835	0.145135	0.084037	0.108163
Total	0.109389	0.671551	1.67936	2.254393	0.412297	0.695903	0.56543	1.047782
Rank	1	4	7	8	2	5	3	6

Table 5. The Time Results of BinHBA for Transfer Functions on Small-scale KPs

Time	S1	S2	S3	S4	S1 (tv)	S2 (tv)	S3 (tv)	S4 (tv)
<i>Kp1</i>	6.65069	5.892792	4.872831	4.507016	5.325669	4.439543	4.711883	5.009465
<i>Kp2</i>	6.629714	5.695539	4.969793	4.988711	5.406604	4.717382	4.504029	4.739923
<i>Kp3</i>	6.816617	5.546846	4.890418	4.650769	4.84883	4.345735	4.752857	4.765454
<i>Kp4</i>	6.473288	5.340374	5.351684	4.830218	5.092839	4.552444	4.545971	4.984927
<i>Kp5</i>	4.426726	5.125402	5.242635	4.663558	5.073189	3.367428	4.722582	4.650742
<i>Kp6</i>	6.769689	4.226241	5.458453	5.3677	5.85826	5.141575	4.849339	4.513609
<i>Kp7</i>	6.829454	5.92239	5.33276	5.237071	5.711099	4.980693	5.152497	5.227866
<i>Kp8</i>	5.370071	5.83809	5.747943	5.080702	6.837116	5.230434	3.731661	5.358518
<i>Kp9</i>	5.594199	5.479169	5.235293	3.617332	5.73581	4.990484	3.734037	5.08305
<i>Kp10</i>	4.867781	5.674898	5.373873	6.15694	5.507986	4.972808	5.199535	5.274221
<i>Kp11</i>	5.383256	6.051872	5.466676	3.781263	6.052793	5.397622	5.741501	5.141686
<i>Kp12</i>	7.892347	6.112406	5.473513	4.582532	6.19244	5.4342	5.995793	5.564137
<i>Kp13</i>	5.694487	6.549463	5.34437	5.647101	6.579839	4.273229	5.385772	5.932589
<i>Kp14</i>	6.157034	6.814908	5.487054	4.056518	4.467437	5.380495	4.934439	5.40607
<i>Kp15</i>	8.141763	5.789737	5.381136	3.767247	4.834168	5.440346	5.683747	5.451694
Total	93.69712	86.06012	79.62843	70.93468	83.52408	72.66442	73.64564	77.10395
Rank	8	7	5	1	6	2	3	4

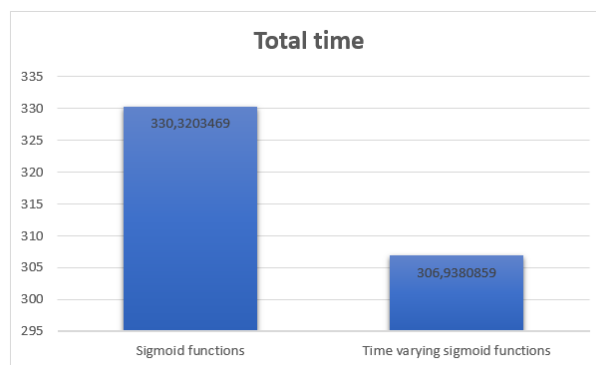


Figure 6. Total Times for S-shaped and Time-varying S-shaped

Table 6. Comparison Results of BinHBA_S1 With Crossover Strategy

Crossover	BinHBA_S1					
	One-point		Two-point		Uniform	
	Gap	Time	Gap	Time	Gap	Time
<i>Kp1</i>	0	4.38319	0.412793	4.03508	0	4.109804
<i>Kp2</i>	0.033756	4.242462	1.056551	3.893201	0	4.080178
<i>Kp3</i>	0.501881	4.175273	0.736159	3.89766	0	4.273908
<i>Kp4</i>	0.130475	4.781753	0.374374	4.113133	0	4.076676
<i>Kp5</i>	0	4.366115	0.680832	3.775772	0	4.078058
<i>Kp6</i>	0	4.415716	0.088375	4.122253	0	4.608072
<i>Kp7</i>	0.377662	4.837716	1.134329	4.277449	0	4.441237
<i>Kp8</i>	0.071377	4.678485	0.187971	4.245522	0	4.478014
<i>Kp9</i>	0	4.12813	0	4.179539	0	4.652959
<i>Kp10</i>	0	4.495505	0.122016	4.293849	0.00083	4.51974
<i>Kp11</i>	0.36519	4.729588	0.700267	4.580302	0	4.818838
<i>Kp12</i>	0.2942	4.489277	0.555171	4.389614	0	4.824257
<i>Kp13</i>	0.402994	4.891271	0.992989	4.696395	0	4.841823
<i>Kp14</i>	0.839502	5.297324	0.275875	4.556759	0	4.822083
<i>Kp15</i>	0.101273	4.712998	0.068385	4.306862	0	4.800877

Table 7. Comparison Results of BinHBA_S1(vt) With Crossover Strategy

Crossover	BinHBA_S1(vt)					
	One-point		Two-point		Uniform	
	Gap	Time	Gap	Time	Gap	Time
<i>Kp1</i>	0	3.790519	0.414203	3.358378	0	3.64086
<i>Kp2</i>	0.033756	3.773799	0.776256	3.505204	0	3.768489
<i>Kp3</i>	0.390352	3.609998	0.751007	3.554214	0	3.763693
<i>Kp4</i>	0.117428	4.038579	0.38316	3.523191	0	3.800585
<i>Kp5</i>	0	3.86185	0.680832	3.175116	0	3.657917
<i>Kp6</i>	0.061043	3.786714	0.079537	3.583831	0	4.115571
<i>Kp7</i>	0.188831	4.385487	0.446363	3.637944	0	4.060471
<i>Kp8</i>	0.060578	5.494723	0.163389	4.383684	0	3.840681
<i>Kp9</i>	0	4.661513	0.039671	4.290042	0	3.919826
<i>Kp10</i>	0	4.743587	0.140522	4.344328	0	4.19987
<i>Kp11</i>	0.47381	5.57457	0.490837	4.659348	0	4.20154
<i>Kp12</i>	0.343233	4.892168	0.566566	4.09707	0	6.714814
<i>Kp13</i>	0.301536	4.421041	0.831091	4.10336	0	4.204954
<i>Kp14</i>	0.222046	4.381411	1.005966	4.309546	0	5.829603
<i>Kp15</i>	0.121527	4.196752	0.068124	3.916412	0	5.96857

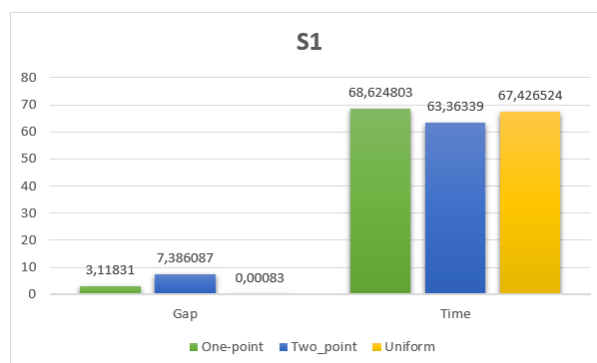


Figure 7. Total Gap and Time Graphics for BinHBA_S1 Version

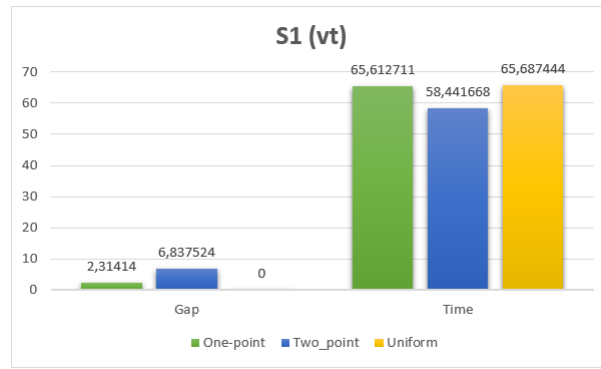


Figure 8. Total Gap and Time graphics for BinHBA_S1(vt) Version

Figure 9 shows the comparative convergence graphics of the best versions of BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) algorithms using the uniform crossover strategy in small-scale KPs. Graphics are drawn according to the best value obtained. When the graphics were examined, it was determined that BinHBA_S1(vt) converged to the optimal value faster in KP1, KP3, KP4, KP10, KP11, KP12, KP13, and KP15. In six of the remaining problems, BinHBA_S1 converged to the optimal faster, while in KP8, the two algorithms converged to the optimal in similar iterations.

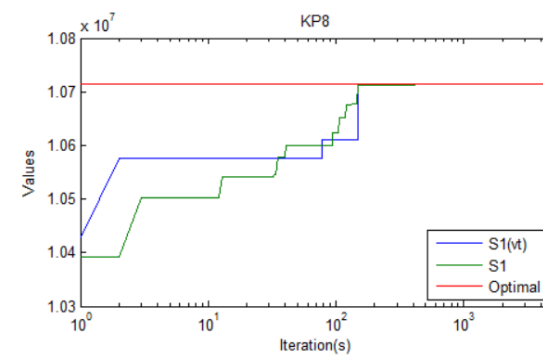
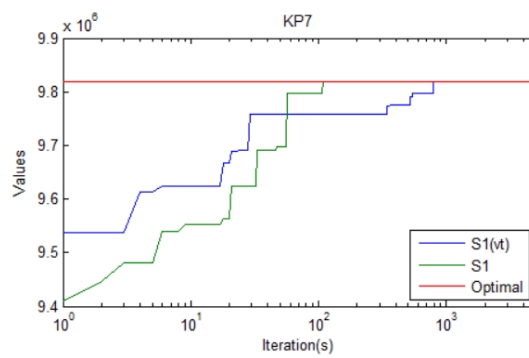
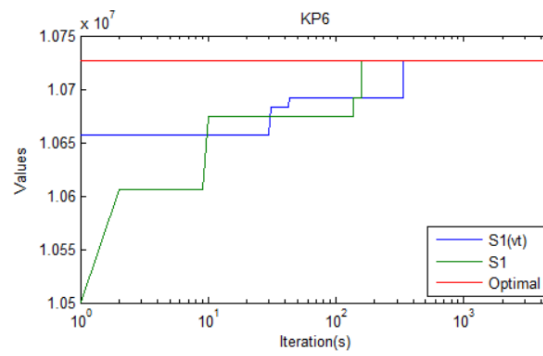
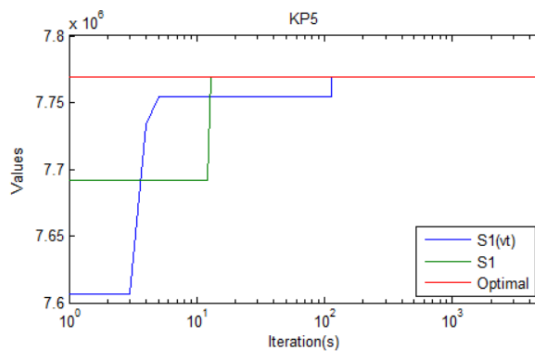
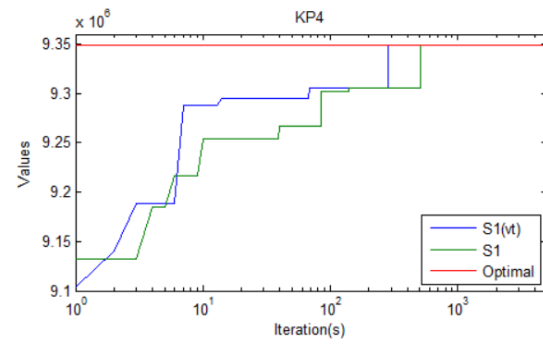
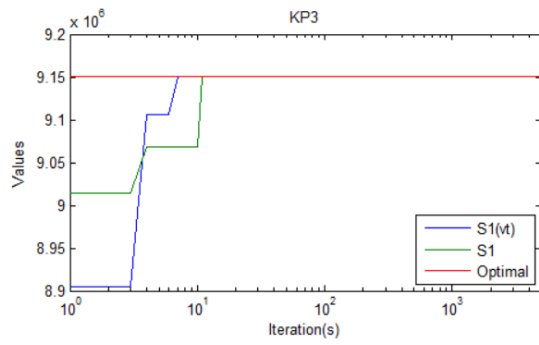
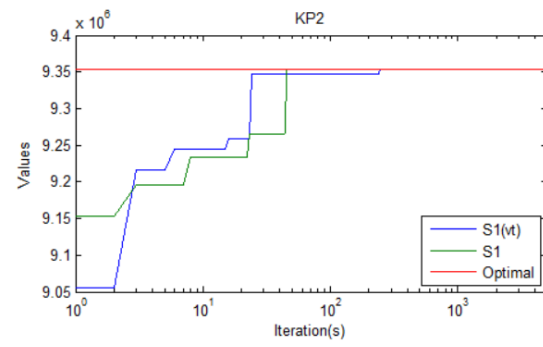
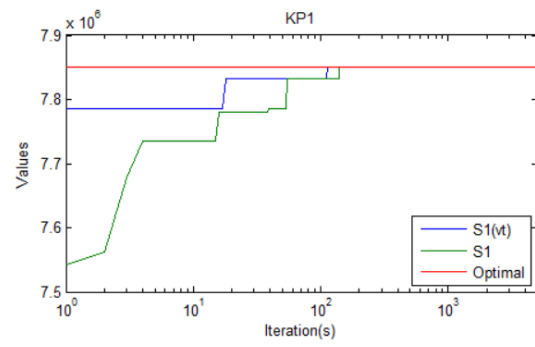
The results obtained for the best BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) versions were evaluated with the help of statistical testing. Wilcoxon signed rank test (García, Molina, Lozano, and Herrera, 2009) was used to determine whether the algorithms had a significant performance difference at the 5% confidence level when compared to each other and algorithms in other literature. In this study, the Wilcoxon signed-rank test was applied to gap values. In Table 8, the p and h values obtained as a result of the pairwise Wilcoxon signed rank test for the BinHBA_S1(vt) and BinHBA_S1 algorithms were presented. An h value of 0 in the table indicates that the results of the two algorithms are similar (p-value >0.05), in contrast to an h value of 1 in the table, which indicates that there is a significant difference between the two algorithms and that their results are not similar (p-value <0.05). The results in Table 8 demonstrated that the algorithms performed similarly in all problems, with no significant differences between them. Because both algorithms found the optimum values in other problems except KP10. However, it can be concluded that the BinHBA_S1(vt) algorithm is more successful due to reasons such as finding the optimum values in all problems, converging faster in most of the problems, and taking a shorter total time.

BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) algorithms were also compared with algorithms in the literature. For this purpose, Binary Aquila Optimizer with Crossover and Mutation methods (BAO-CM) (Baş, 2023), Binary Artificial Jellyfish Search algorithm (Bin_AJS) (Yildizdan

and Baş, 2023), Binary Equilibrium Optimization Algorithm with V3-shaped transfer function (BEOV3) (Abdel-Basset, Mohamed, and Mirjalili, 2021), Binary Slime Mould Algorithm (BSMA) (Abdollahzadeh, Barshandeh, Javadi, and Epicoco, 2022), and Enhanced Binary Coati Optimization Algorithm (EBinCOA) (Yildizdan and Bas, 2024) algorithms, which were run under the same conditions, were selected from the literature. Based on Table 9, which presents the comparison results according to the gap values, the Bin_AJS, EBinCOA, and BinHBA_S1(vt) algorithms, which found the value 0 in all problems, were the most successful and ranked first in the ranking. According to this result, it was revealed that the proposed time-varying BinHBA version was a successful algorithm that competes with the algorithms in the literature. Table 10 shows the pairwise Wilcoxon-signed rank test results of the proposed BinHBA_S1(vt) with other algorithms. The '+', '-', and '=' lines indicate how many problems BinHBA_S1(vt) found better, worse, and equal gap values than the other algorithm, respectively. After analyzing the results, it was found that there was no significant difference between the algorithms' performance in most problems.

Table 8. The Results of the Wilcoxon Signed-rank Tests for BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) on Small-scale KPs

ID	BinHBA_S1(vt) – BinHBA_S1	
	p-value	h-value
Kp1	1.0000	0
Kp2	1.0000	0
Kp3	1.0000	0
Kp4	1.0000	0
Kp5	1.0000	0
Kp6	1.0000	0
Kp7	1.0000	0
Kp8	1.0000	0
Kp9	1.0000	0
Kp10	0.3173	0
Kp11	1.0000	0
Kp12	1.0000	0
Kp13	1.0000	0
Kp14	1.0000	0
Kp15	1.0000	0



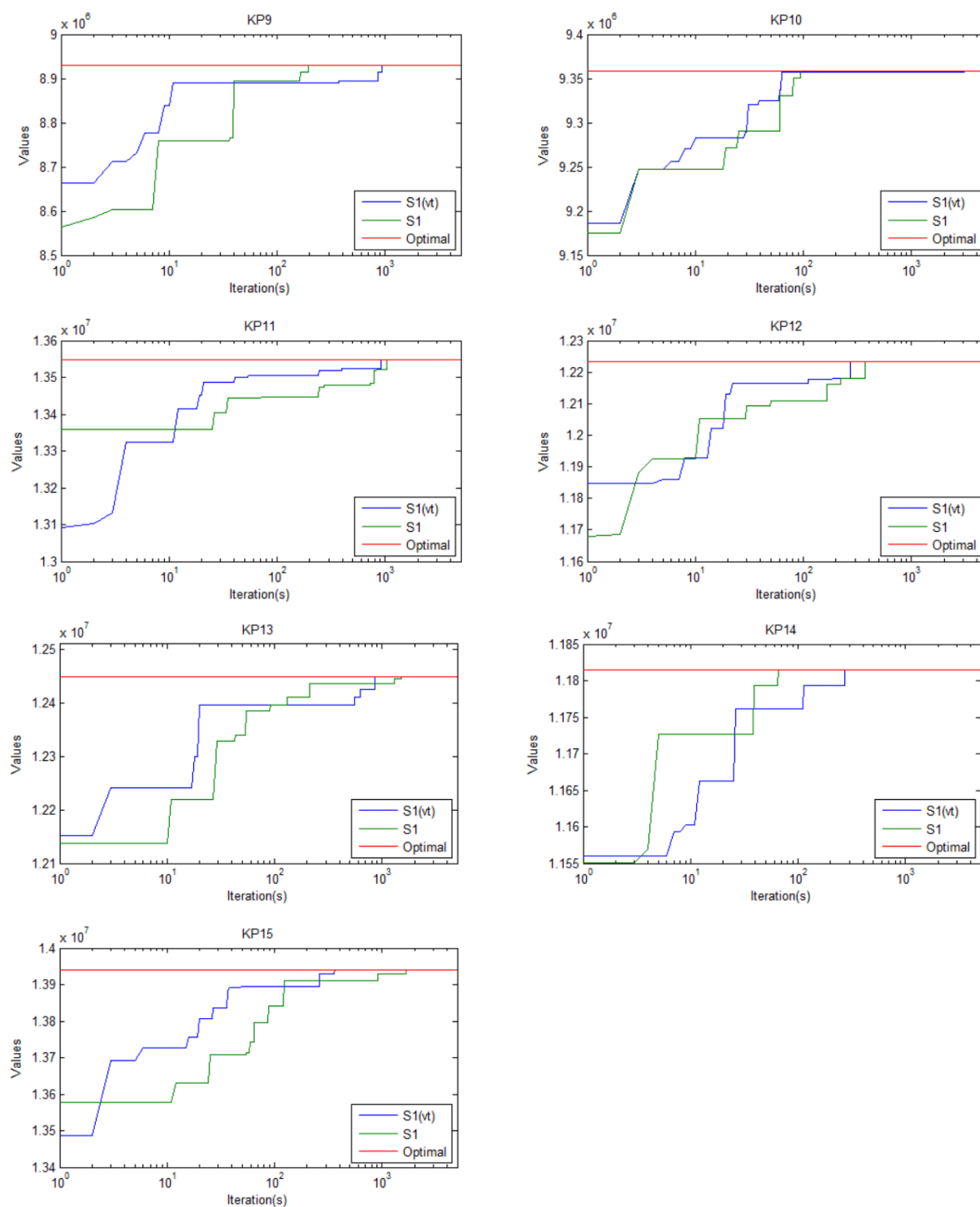


Figure 9. Convergence Graphics for BinHBA_S1 and BinHBA_S1 (vt) Versions

Table 9. Comparison of the Gap results of BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) With Algorithms in the Literature

	BAO-CM	Bin_AJS	BEOV3	BSMA	EBinCOA	BinHBA_S1	BinHBA_S1(vt)
<i>Kp1</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp2</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp3</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp4</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp5</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp6</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp7</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp8</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp9</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp10</i>	0	0	0	0	0	0.00083	0
<i>Kp11</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp12</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp13</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Kp14</i>	0.0017	0	0.0036	0.004	0	0	0
<i>Kp15</i>	0	0	0	0	0	0	0
Total	0.0017	0	0.0036	0.004	0	0.00083	0
Rank	3	1	4	5	1	2	1

Table 10. The pairwise Wilcoxon signed-rank Test Results of BinHBA_S1(vt) and Other Algorithms

	BinHBA_S1(vt) BAO-CM	BinHBA_S1(vt) Bin_AJS	BinHBA_S1(vt) BEOV3	BinHBA_S1(vt) BSMA	BinHBA_S1(vt) EBinCOA	BinHBA_S1(vt) BinHBA_S1
+	1	0	1	1	0	1
-	0	0	0	0	0	0
=	14	15	14	14	15	14
p-value	0.317	1.000	0.317	0.317	1.000	0.317
h-value	0	0	0	0	0	0

Secondly, in this section, the performance of the proposed algorithms was tested on the large-scale KPs listed in Table 3. In Table 11, the gap and time values obtained as a result of these tests are presented for BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt). According to Table 11, BinHBA_S1(vt) was more successful by obtaining smaller gap values in eight of the twelve problems. In terms of time, BinHBA_S1 solved six problems more quickly, whereas BinHBA_S1(vt) resolved the other six in less time. The total gap and time graphics obtained according to the results in Table 11 are given in Figures 10 and 11. According to the graphic in Figure 10, the total gap value obtained for BinHBA_S1(vt) was smaller. According to the time graphic in Figure 11, BinHBA_S1(vt) completed the problems in a shorter time. Accordingly, in large-scale KPs, BinHBA_S1(vt) was more successful by obtaining smaller gap values in a shorter time. The proposed algorithms and the algorithms found in the literature were compared as well. For this purpose, Binary Evolutionary Mating Algorithm (BinEMA) (Yildizdan and Bas, 2024), Binary

Fire Hawk Optimizer (BinFHO) (Yildizdan and Bas, 2024), and Binary Mountain Gazelle Optimizer (BinMGO) (Yildizdan and Bas, 2024) algorithms, which were run under the same conditions, were chosen. Comparison results are given in Table 12. In this comparison made according to gap values, the smallest values were mostly obtained from BinMGO. In the ranking, BinMGO was in first place, while BinHBA_S1(vt) was in second place. Based on the results of the pairwise Wilcoxon signed-rank test provided in Table 13, BinHBA_S1(vt) showed better performance by obtaining better gap values than BinEMA and BinFHO in all problems. When evaluated by p-values, it was seen that there was a significant difference between them. BinHBA_S1(vt) found better gap values than BinHBA_S1 in eight problems and showed better performance. There was a significant difference between the algorithms. On the other hand, BinMGO found a better gap value in ten of the problems and performed better than BinHBA_S1(vt). There was also a significant difference between the algorithms.

When all results are evaluated in general, the proposed BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) algorithms achieve successful results in a reasonable time. BinHBA_S1(vt) achieved more successful results compared to BinHBA_S1 in both small and large-scale KPs. In comparisons made with the literature, BinHBA_S1(vt) generally showed better or similar performances than the compared algorithms. As encountered in most

metaheuristics, the proposed BinHBA versions were also affected by the dimension increase. Despite this, BinHBA_S1(vt) ranked second in the literature comparison. This result revealed that new modifications may be needed to address the performance decrease caused by the dimension increase.

Table 11. Comparison Results of BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) on Large-scale KPs

ID	Gap		Time	
	BinHBA_S1	BinHBA_S1(vt)	BinHBA_S1	BinHBA_S1(vt)
Kp16	0.90	1.59	361.02	360.56
Kp17	1.67	2.22	1221.15	982.88
Kp18	6.77	5.17	7142.54	2966.64
Kp19	11.94	7.68	15539.14	17127.80
Kp20	3.15	1.54	175.38	218.02
Kp21	14.89	12.28	520.28	1440.49
Kp22	22.47	12.64	3144.10	4588.00
Kp23	23.75	20.08	17941.32	14898.59
Kp24	4.23	4.27	239.53	170.82
Kp25	8.69	9.89	523.32	1003.96
Kp26	13.59	9.84	3491.35	6947.49
Kp27	18.08	14.45	17215.86	12804.83

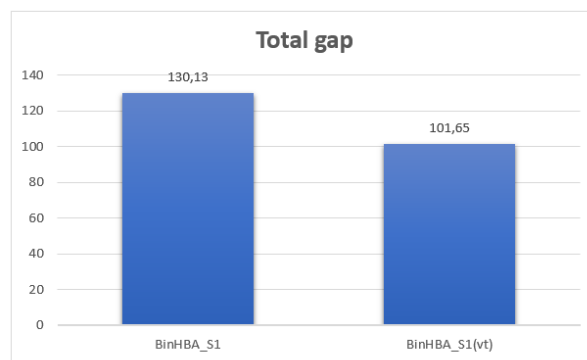


Figure 10. Total Gap for BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) Versions

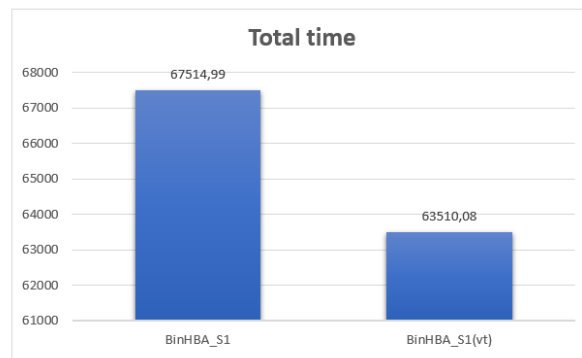


Figure 11. Total Time for BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) Versions

Table 12. Comparison of the Gap results of BinHBA_S1 and BinHBA_S1(vt) With Algorithms in the Literature

ID	BinEMA	BinFHO	BinMGO	BinHBA_S1	BinHBA_S1(vt)
Kp16	2.79	2.98	0.00	0.90	1.59
Kp17	5.18	20.03	2.29	1.67	2.22
Kp18	13.59	38.95	2.94	6.77	5.17
Kp19	26.09	49.80	5.88	11.94	7.68
Kp20	6.26	15.85	1.47	3.15	1.54
Kp21	19.47	19.23	11.13	14.89	12.28
Kp22	24.59	33.53	13.54	22.47	12.64
Kp23	29.50	37.04	14.62	23.75	20.08
Kp24	7.63	10.96	3.40	4.23	4.27
Kp25	11.49	24.90	5.24	8.69	9.89
Kp26	18.62	36.31	8.74	13.59	9.84
Kp27	25.48	40.88	12.51	18.08	14.45
Total	190.70	330.46	81.75	130.13	101.65
Rank	4	5	1	3	2

Table 13. The Pairwise Wilcoxon Signed-rank Test Results of BinHBA_S1(vt) and Other Algorithms

	BinHBA_S1(vt)	BinHBA_S1(vt)	BinHBA_S1(vt)	BinHBA_S1(vt)
	BinEMA	BinFHO	BinMGO	BinHBA_S1
+	12	12	2	8
-	0	0	10	4
=	0	0	0	0
p-value	0.002	0.002	0.009	0.023
h-value	1	1	1	1

4. Conclusion and future works

The Honey Badger Algorithm (HBA) is a metaheuristic algorithm proposed in 2022, inspired by the honey badger's foraging behaviors such as sniffing, digging, and following the honeyguide bird. In this study, a new binary version of the Honey Badger algorithm (BinHBA) was proposed. Transfer functions were used for the binarization of HBA, which was proposed for continuous optimization problems. S-shaped transfer functions, which are frequently used in the literature, were chosen as the transfer function. At the same time, time-varying S-shaped transfer functions were used for the HBA in this study to provide a better balance between exploration and exploitation. Binary HBA versions created with eight different transfer functions obtained this way were first tested on small-scale KPs. After this test, it was determined that the most successful transfer functions were S1 and time-varying S1. The results obtained revealed that using only the transfer function was insufficient in terms of performance. That's why the crossover strategy that supports diversity was integrated into the algorithm. The performance was examined by applying three different crossover strategies: one-point, two-point, and uniform. It was seen that the strategy that contributed the most was uniform. The BinHBA algorithm, which was finalized with the time-varying S1 transfer function and uniform crossover strategy, found the optimum value for all problems in small-scale KPs. It has reached the performance of successful algorithms in the literature. The algorithm was secondary tested on large-scale KPs. The results obtained from the test revealed that the version of BinHBA using the time-varying S1 transfer function is more successful. In literature comparisons, the BinMGO algorithm ranked first, while the BinHBA_S1(vt) ranked second. The BinHBA_S1(vt) performed better than all the algorithms except BinMGO, and there was a statistically significant difference between them.

Most algorithms in the literature find values that are very close to the optimum or optimal in small-scale KPs. Therefore, the performance differences between algorithms are revealed mostly by the tests performed in large-scale KPs. In this context, when the BinHBA_S1(vt) results are examined, the success of the algorithm in large-scale KPs compared to the literature proves that the algorithm is preferable and effective. In light of all these results, it can be said that the proposed algorithm is a promising algorithm for different binary optimization problems.

Future research can apply the BinHBA to a variety of binary optimization problems, including uncapacitated facility location and set-union knapsack problems.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

- Abasi, A. K., Aloqaily, M., and Guizani, M. (2023). Optimization of CNN using modified Honey Badger Algorithm for Sleep Apnea detection. *Expert Systems with Applications*, 229, 120484. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120484>
- Abdel-Basset, M., Mohamed, R., and Mirjalili, S. (2021). A Binary Equilibrium Optimization Algorithm for 0–1 Knapsack Problems. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106946. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106946>
- Abdollahzadeh, B., Barshandeh, S., Javadi, H., and Epicoco, N. (2022). An enhanced binary slime mould algorithm for solving the 0–1 knapsack problem. *Engineering with Computers*, 1–22.
- Al-Betar, M. A., Hammouri, A. I., Awadallah, M. A., and Abu Doush, I. (2021). Binary β -hill climbing optimizer with S-shape transfer function for feature selection. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(7), 7637–7665.
- Aljebreen, M., Alabdullah, B., Mahgoub, H., Allafi, R., Hamza, M. A., Ibrahim, S. S., . . . Alsaid, M. I. (2023). Integrating IoT and honey badger algorithm based ensemble learning for accurate vehicle detection and classification. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(11), 102547. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102547>
- Altuwairiqi, M. (2024). An optimized multi-hop routing protocol for wireless sensor network using improved honey badger optimization algorithm for efficient and secure QoS. *Computer Communications*, 214, 244–259. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.08.011>
- Awadallah, M. A., Hammouri, A. I., Al-Betar, M. A., Braik, M. S., and Elaziz, M. A. (2022). Binary Horse herd optimization algorithm with crossover operators for feature selection. *Computers in Biology and Medicine*, 141, 105152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2021.105152>
- Baş, E. (2023). Binary aquila optimizer for 0–1 knapsack problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 118, 105592. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105592>
- Büyüköz, G. O., and Haklı, H. (2023). Binary Honey Badger Algorithm for 0-1 Knapsack Problem. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 6(2), 108–118. doi: <https://doi.org/10.38016/jista.1200225>
- Feda, A. K., Adegboye, M., Adegboye, O. R., Agyekum, E. B., Mbasso, W. F., and Kamel, S. (2024). S-shaped grey wolf optimizer-based FOX algorithm for feature selection. *Heliyon*, 10(2).

- García, S., Molina, D., Lozano, M., and Herrera, F. (2009). A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms' behaviour: a case study on the CEC'2005 special session on real parameter optimization. *Journal of Heuristics*, 15, 617-644.
- Hashim, F. A., Houssein, E. H., Hussain, K., Mabrouk, M. S., and Al-Atabany, W. (2022). Honey Badger Algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 192, 84-110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2021.08.013>
- He, Y., Zhang, F., Mirjalili, S., and Zhang, T. (2022). Novel binary differential evolution algorithm based on Taper-shaped transfer functions for binary optimization problems. *Swarm and evolutionary computation*, 69, 101022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.101022>
- Hu, G., Zhong, J., and Wei, G. (2023). SaCHBA_PDN: Modified honey badger algorithm with multi-strategy for UAV path planning. *Expert Systems with Applications*, 223, 119941. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119941>
- Huang, P., Zhou, Y., Deng, W., Zhao, H., Luo, Q., and Wei, Y. (2024). Orthogonal opposition-based learning honey badger algorithm with differential evolution for global optimization and engineering design problems. *Alexandria Engineering Journal*, 91, 348-367. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.024>
- Jain, D. K., Ding, W., and Kotecha, K. (2023). Training fuzzy deep neural network with honey badger algorithm for intrusion detection in cloud environment. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 14(6), 2221-2237. doi: [10.1007/s13042-022-01758-6](https://doi.org/10.1007/s13042-022-01758-6)
- Jin, C., Li, S., Zhang, L., and Zhang, D. (2023). The Improvement of the Honey Badger Algorithm and Its Application in the Location Problem of Logistics Centers. *Applied Sciences*, 13(11), 6805. doi: <https://doi.org/10.3390/app13116805>
- Kapner, D. J., Cook, T. S., Adelberger, E. G., Gundlach, J. H., Heckel, B. R., Hoyle, C., and Swanson, H. E. (2007). Tests of the gravitational inverse-square law below the dark-energy length scale. *Physical review letters*, 98(2), 021101. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.021101>
- Karakoyun, M., and Ozkis, A. (2022). A binary tree seed algorithm with selection-based local search mechanism for huge-sized optimization problems. *Applied Soft Computing*, 129, 109590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109590>
- Li, X., Fang, W., and Zhu, S. (2023). An improved binary quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for knapsack problems. *Information Sciences*, 648, 119529. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119529>
- Mafarja, M., Aljarah, I., Heidari, A. A., Faris, H., Fournier-Viger, P., Li, X., and Mirjalili, S. (2018). Binary dragonfly optimization for feature selection using time-varying transfer functions. *Knowledge-Based Systems*, 161, 185-204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2018.08.003>
- Majumdar, P., Mitra, S., and Bhattacharya, D. (2023). Honey Badger algorithm using lens opposition based learning and local search algorithm. *Evolving Systems*, 1-26. doi: <https://doi.org/10.1007/s12530-023-09495-z>
- Ni, B., Wang, Y., Huang, J., and Li, G. (2022). Hybrid Enhanced Binary Honey Badger Algorithm with Quadratic Programming for Cardinality Constrained Portfolio Optimization. *International Journal of Foundations of Computer Science*, 33(06n07), 787-803. doi: <https://doi.org/10.1142/S0129054122420151>
- Pisinger, D. (2005). Where are the hard knapsack problems? *Computers & Operations Research*, 32(9), 2271-2284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.03.002>
- Qasem, S. N. (2024). A novel honey badger algorithm with multilayer perceptron for predicting COVID-19 time series data. *The Journal of Supercomputing*, 80(3), 3943-3969. doi: <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05560-1>
- Wang, B., Kang, H., Sun, G., and Li, J. (2024). Efficient traffic-based IoT device identification using a feature selection approach with Lévy flight-based sine chaotic sub-swarm binary honey badger algorithm. *Applied Soft Computing*, 155, 111455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111455>
- Woolson, R. F. (2007). Wilcoxon signed-rank test. *Wiley encyclopedia of clinical trials*, 1-3.
- Yasear, S. A., and Ghanimi, H. M. (2022). A modified honey badger algorithm for solving optimal power flow optimization problem. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 15(4), 142-155.
- Yildizdan, G., and Bas, E. (2024). A new binary coati optimization algorithm for binary optimization problems. *Neural Computing and Applications*, 36(6), 2797-2834.
- Yildizdan, G., and Baş, E. (2023). A novel binary artificial jellyfish search algorithm for solving 0-1 knapsack problems. *Neural Processing Letters*, 55(7), 8605-8671.

TARIMSAL SENSÖR VERİLERİ KULLANILARAK BİTKİ HASTALIKLARININ ERKEN TESPİTİ İÇİN LSTM TABANLI DERİN ÖĞRENME MODELİ

Elif GENÇ^{1*}, Cem BAĞLUM², Osman ÇAĞLAR³, Yusuf KARTAL⁴, Erol SEKE⁵, Kemal ÖZKAN⁶

^{1,2,3,4,6} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Eskişehir

⁵ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Eskişehir

¹ ORCID No: <https://orcid.org/0009-0008-0889-9192>

² ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-9072-3664>

³ ORCID No: <https://orcid.org/0009-0000-2837-0861>

⁴ ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-0402-1701>

⁵ ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-4860-7130>

⁶ ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-2252-2128>

Anahtar Kelimeler	Öz
Bitki hastalıkları Erken Tespit Toprak Sensörleri LSTM Salatalık	<i>Bitki hastalıklarının güvenilir ve zamanında tanımlanması modern tarımda çok önemli bir zorluktur. Geleneksel yöntemler gözle görülür semptomların manuel olarak gözlemlenmesine dayanır. Görünür semptomlar, enfeksiyonun orta veya geç aşamalarında ortaya çıkma eğilimindedir; bu da yayılma veya verim azalması olasılığını artırır. Bitki hastalıkları gözle görülebilir hale geldikten sonra hastalık bulaşmış olmakta ve tedavi için geç kalınmış olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı bitki hastalıkların gözle görülmeden önce tespit edilebilmesi için daha düşük maliyetli olan çözümlere ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, serada yetiştirilen hıyar bitkilerinde ortaya çıkabilecek virüs etkilerinin derin öğrenme ve yapay zeka uygulamaları yardımıyla erken dönemde tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla bitki hastalıklarının erken tespiti için LSTM tabanlı bir derin öğrenme modeli önerilmiştir. Bu modelde kullanılan veriler için, hastalık inoküle edilen ve sağlıklı bitkilerin bulunduğu iklim odaları kurulmuştur ve toprak sensörleri kullanılarak hıyar bitkisinden zamansal veriler toplanmıştır. Daha sonra veri hazırlama süreci içerisinde verilerin temizlenmesi, öz niteliklerinin çıkarılması ve etiketleme gibi işlemler yapılmıştır. Eğitim aşamasından sonra model, tarımsal sensörlerden gelen zaman serisi verilerini analiz ederek anomali tespiti yapabilmekte, bu sayede bitki hastalıkların görsel belirtileri ortaya çıkmadan hastalıklı olduklarını söylemektedir. Modelin performansını değerlendirmek için doğruluk, sınıflandırma raporu, karışıklık matrisi gibi metrikler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar oldukça başarılı; model %99.95 doğruluk sağlamış ve anomali tespiti konusunda yüksek başarı göstermiştir. Yapılan çalışma sonucunda bitki hastalıkların erken tespiti ile minimum zirai ilaçlama ile maliyet düşürücü tedbirler en üst seviyede alınabilecek insan ve çevre maksimum seviyede korunmuş olacaktır.</i>

CROP DISEASES USING AGRICULTURAL SENSOR DATA LSTM-BASED DEEP LEARNING MODEL FOR EARLY DETECTION

Keywords	Abstract
Plant Diseases Early Detection Agricultural Sensors LSTM Cucumber	<i>Reliable and timely identification of plant diseases is a crucial challenge in modern agriculture. Traditional methods rely on manual observation of visible symptoms. Visible symptoms tend to appear in the middle or late stages of infection, which increases the likelihood of spread or yield reduction. Once plant diseases become visibly detectable, the infection has already occurred, and it may be too late for effective treatment. Therefore, cost-effective solutions are needed to detect plant diseases before they become visually apparent. This study aims to detect the effects of viruses on cucumber plants grown in greenhouses at an early stage using deep learning and artificial intelligence applications. For this purpose, an LSTM-based deep learning model for early detection of plant diseases is proposed. To collect data for the model, climate chambers housing both diseased and healthy plants were established, and temporal data were gathered from cucumber plants using soil sensors. During the data preparation process, steps such as data cleaning, feature extraction, and labeling were performed. After the training phase, the model can analyze time-series data from</i>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

agricultural sensors to detect anomalies, identifying diseased plants before visual symptoms appear. Metrics such as accuracy, classification report and confusion matrix were used to evaluate the performance of the model. The results obtained are quite successful; the model achieved 99.95% accuracy and showed high success in anomaly detection. As a result of the study, with the early detection of plant diseases, cost-reducing measures can be taken at the highest level with minimum pesticides, and humans and the environment will be protected at the maximum level.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 06.08.2024

Kabul Tarihi : 05.03.2025

Research Article

Submission Date : 06.08.2024

Accepted Date : 05.03.2025

* Sorumlu yazar: eelfgnc@gmail.com

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1529025>

1. Giriş

Tarım sektörü, dünya nüfusunun beslenme gereksinimlerini karşılamak için vazgeçilmez bir rol oynar. Ancak, bitki hastalıkları tarımsal üretimde önemli bir tehdit oluşturarak verim kaybına, kalite düşüşüne ve ekonomik zararlara yol açar (Akbaş, 2019). Bu durum, sürdürülebilir tarım uygulamalarının gerekliliğini ve bitki sağlığının korunmasının kritik önemini gözler önüne sermektedir. Bitki hastalıklarının erken teşhisi ve etkin yönetimi, sadece tarımsal üretimin sürekliliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ekosistem dengelerini koruyarak gıda güvenliğine de katkıda bulunur (Kelman, Pelczar, Pelczar ve Shurtleff, 2023). Son yıllarda, makine öğrenimi ve derin öğrenme tekniklerinin hızla gelişmesi, bitki hastalıklarının tespiti ve yönetiminde devrim niteliğinde ilerlemeler kaydedilmesini sağlamıştır (Patel, 2023; Jackulin ve Murugavalli, 2022). Bu teknolojiler, hastalıkların erken evrede tespit edilmesine olanak tanıyarak kimyasal ilaç kullanımını minimize etmekte ve daha sürdürülebilir tarım uygulamalarını teşvik etmektedir (Bischoff, Farias, Menzen ve Pessin, 2021). Çoğu durumda bitki hastalığı salgınlarıyla başa çıkmak için hastalıkların klasik yöntemlerle önceden tespit edilmesi zorlu bir problemidir. Bu nedenle, bir bitkinin sağlıklı olup olmadığını veya hangi hastalığa sahip olduğunu belirlemek için çiftçiler için otomatik bir bitki hastalık tanıma sistemi önemlidir. Son zamanlarda bilgisayarlar, kameralar (RGB, 3D, termal, yakın kızıl ötesi, multi ve hiper spektral kamera vb.) ve görüntü işleme / yapay zeka tekniklerindeki gelişmeler ile birlikte bir bitkinin hastalığını teşhis etmek için pek çok araştırma yapılmıştır (Abade, Ferreira ve Vidal, 2021; Barbedo, 2016). Bilgisayarlı görme ve yapay zekanın gelişmesiyle birlikte, birçok derin öğrenme yöntemi bitki hastalıklarının tanınmasında uygulamalar bulmuştur.

Ancak yapılan çalışmaların birçoğunda görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu durum ise hastalık belirtilerin ortaya çıktıktan sonra tespit edilebilmesi gibi sorunları ortaya çıkarmaktadır. Şöyle ki bitki hastalıkları gözle görülebilir hale geldikten sonra hastalık bulaşmış olmakta ve tedavi için geç kalınmış

olmaktadır. Bu problemin önüne geçilebilmesi adına hiper ve / veya multi spektral kameralar kullanmak mümkündür. Ancak görünür ışık dalga boyu dışında ölçümler alabilen ve daha detaylı bilgi sunan bu tür yüksek çözünürlüklü algılayıcıların hem maliyeti yüksek olmakta hem de ölçümlerin alınması sırasında örtüşme problemi, ortamdaki ışık faktörleri ve en önemlisi de örneklemenin tüm sahada yapılamaması gibi halen çözülmesi gereken problemleri içermektedir. Bu sebeplerden dolayı bitki hastalıklarının gözle görülmeden önce tespit edilebilmesi için daha düşük maliyetli olan çözümlere ihtiyaç vardır. Bu amaçla bu çalışmada, toprak sensör verilerini kullanarak bitki hastalıklarını erken tespit etmek amacıyla LSTM (Long Short-Term Memory) tabanlı bir derin öğrenme modeli önerilmiştir. LSTM, özellikle uzun süreli bağımlılıkları öğrenmede etkili olan bir tür tekrarlayan sinir ağıdır. Geliştirilen model, sıcaklık, pH, iletkenlik ve nem gibi zaman serisi verilerini analiz ederek anomali (bitki hastalıkları) tespiti yapmaktadır. Önerilen yöntem, verilerin geçmiş değerlerini kullanarak gelecekteki olası anormallikleri tahmin etmeye yönelik olarak tasarlanmış ve gerçek saha koşullarında uygulanmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Ürünlerin uzmanlar tarafından görsel olarak değerlendirilmesi, bitki hastalıklarının tespiti ve teşhisi için en sık kullanılan yöntemdir. Öte yandan, bitki patojenlerinin insan gözü semptomları algılamadan önce tespit edilmesi, etkili bir hastalık kontrol stratejisinin zamanında uygulanmasında çok önemli olmaktadır (Cohen, Edan, Levi ve Alchanatis, 2022). Bitkilerde yaprak morfolojisi ve renginde değişiklikler olarak belirgin semptomlar gelişir; ancak görsel bir teşhis yapıldığında, patojenin konakçı popülasyonlarında iyi bir şekilde yerleşmiş olması muhtemeldir ve bu durumda hastalığın tedavisi için geç kalınması muhtemeldir. Bu nedenle, belirgin semptomlar göstermeyen gizli enfeksiyon bilgisinin bilinçli ve etkili bir hastalık yönetimi sağlamada anahtar rol olabileceğini yazarlar bildirmişlerdir (Dyussebayev ve diğ., 2021). Hiperspektral görüntüleme ve yüksek çözünürlüklü spektrometri gibi

uzaktan algılama yaklaşımlarının, patojen saldırısı değişiklikleri tespit edebildiği gösterilmiştir (Thomas ve diğ., 2024). Bu nedenle, hassas tarım bağlamında bitki hastalıklarını zamanında tespit etmek ve erken ürün koruma önlemleri uygulamak mümkündür (Thomas ve diğ., 2024; Terentev, Dolzhenko, Fedotov ve Eremenko, 2022). Örneğin, Mohanty, Hughes ve Salathé (2016), akıllı telefon destekli hastalık teşhisi yapmıştır. Kontrollü koşullarda toplanan 54.306 bitki yaprağı görüntüsünü kullanarak 14 mahsul türü ve 26 hastalığı tanımlayan derin öğrenme modeli %99.35 doğruluk oranına ulaşmıştır. Nguyen ve diğ. (2021), 400-1000 nm hiperspektral sensörle elde edilen görüntüler üzerinde sınıflandırma yapmışlardır. Sağlıklı ve hastalıklı bitkilerin yansıma spektrumlarını ayırt etmek için istatistiksel yöntemler kullanmış ve hastalık merkezli bitki indeksleri oluşturmuşlardır. Derin öğrenme ve geleneksel makine öğrenme yöntemleri ile piksel ve görüntü bazlı sınıflandırmalar gerçekleştirmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise Abdu, Mokji ve Sheikh, hassas tarımda bitki hastalıklarının görüntü tabanlı tespiti için kullanılan destek vektör makineleri (DVM) ve derin öğrenme (DL) modellerinin karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır. Bitki hastalıklarının %70-80'i patojenlerden kaynaklanmakta olup, bunların %60-70'i yapraklarda görülmektedir. Çalışmada, geniş bir bitki yaprağı hastalık görüntü veri seti kullanılarak, her iki modelin performansı, mimarisi, hesaplama gücü ve eğitim verisi miktarı gibi faktörler göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Ferentinos (2018) ise, bitki hastalıklarının tespiti ve teşhisi için yaprak görüntüleri kullanarak derin öğrenme yöntemleriyle evrimsel sinir ağı (ESA) modelleri geliştirmiştir. Modeller, 87.848 görüntüden oluşan ve 25 farklı bitkiyi kapsayan, 58 farklı bitki, hastalık kombinasyonunu içeren açık bir veri tabanı ile eğitilmiştir. En iyi performansa sahip model, ilgili bitki, hastalık kombinasyonunu (veya sağlıklı bitkiyi) %99.53 başarı oranıyla tanımlamıştır. Radovanović ve Đukanović (2020), bitkilerde hastalık tespiti amacıyla bitki hastalıkları içeren imgeleri derin öğrenme yaklaşımının klasik makine öğrenme algoritmalarıyla karşılaştırmasını sunmaktadır. Yazarlar yaptıkları karşılaştırma sonucunda DVM, k-en yakın komşuluk, tam bağlamli sinir ağı ve ESA modellerinin sırasıyla 0.894, 0.72, 0.892 ve 0.99 F1 skorları raporlamışlardır. Chin, Ng ve Palanichamy (2024) tarafından yapılan çalışma, YOLOv8 modelini kullanarak bitki hastalıklarının tespit ve sınıflandırılmasını incelemiştir. YOLOv8, nesne tespiti için hızlı ve doğru sonuçlar veren bir derin öğrenme modelidir. Çalışmada, YOLOv8 modeli dikkat mekanizması yaklaşımıyla entegre edilmiştir. Bu entegrasyon, modelin doğruluğunu artırırken hesaplama maliyetini düşürmeyi amaçlamaktadır. Araştırma sonucunda, YOLOv8s modeli ile %72.2 doğruluk elde edilmiştir. Smetanin,

sırasında bitkilerin metabolizmasındaki ince Uzhinskiy, Ososkov, Goncharov ve Nechaevskiy (2021) tarafından geliştirilen çalışma, derin öğrenme ve transfer öğrenme tekniklerini kullanarak bitki hastalıklarının tespitini incelemiştir. Çalışmada, MobileNetV2 ile transfer öğrenme ve üçlü kayıp (triplet loss) fonksiyonu kullanılarak eğitilmiş bir görüntü sınıflandırma modeli kullanılmıştır. Model, %98 sınıflandırma doğruluğuna ulaşmıştır.

Bitki hastalıkları, zamanla değişen olgular olduğu için derin öğrenme modelleri arasında son yıllarda sıklıkla kullanılan LSTM modelleri zamansal veri analizi için uygun bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin, Pattle ve diğ. (2022), yaptıkları çalışmada LSTM ağı kullanarak bitki hastalıklarının tahmini için akıllı sensör sisteminin saha değerlendirmesini yapmış ve %96 doğruluk oranı elde ettiklerini raporlamışlardır. Benzer şekilde, mısır yaprağındaki hastalıkların tahmini için LSTM modelinin kullanıldığı bir başka çalışma Ashwini ve Sellam tarafından yapılmıştır. Bu çalışma, %90'ın üzerinde bir başarı oranıyla hastalıkları tespit edebildiklerini göstermektedir (Ashwini ve Sellam, 2024).

Bununla birlikte, hiperspektral görüntüleyiciler ve yüksek çözünürlüklü spektrometreler hala maliyetlidir ve hiperspektral görüntüleme durumunda büyük miktarda çok boyutlu verinin işlenmesi karmaşık olmaya devam etmektedir. Gerçek saha ortamında bu tür geniş spektrumlu kameraların maliyetinin fazla olması nedeniyle şu an ki teknolojik duruma göre ticari uygulamalarda (özellikle küçük ve orta büyüklükte seralarda) kullanılması ekonomik ve kullanışlı değildir. Ayrıca bu tür kameraların maliyetinin fazla olması nedeniyle sahanın her tarafında konumlandırılması mümkün olmayıp sahanın her tarafını örneklemesi sağlanamamaktadır. Bu tür kameraların konumlandırılmış olduğu ve çekim alabildiği alan dışındaki bir koordinatta oluşabilecek hastalıkları tespit edebilmesi mümkün değildir. Seranın her tarafından örnek alınabilmesi için bu tür algılayıcıların seranın tüm bölgelerine taşınması ve örnek görüntülerin alınması gerekmektedir. Son zamanlarda otomatik robot, dron vb. yöntemler ile taşınma işlemi veya bir kişinin taşınması ile mümkün olabilmektedir. Ancak robot, dron vb. sistemlerle taşınması sera ortamı düşünüldüğü zaman şu an için gerçek saha uygulamaların da kullanışlı değildir. İnsan tarafından taşınma işi ise insana bağımlı olduğu için alınan örneklerin doğruluk problemini ortaya çıkardığı gibi zaman ve maliyet olarak yine gerçek saha uygulamalarında gerçekçi bir çözüm değildir. Bu tür geniş spektrumlu kameraların şu an sadece laboratuvar ortamlarında veya kontrollü ortamlarda kullanılması mümkündür.

3. Yöntem

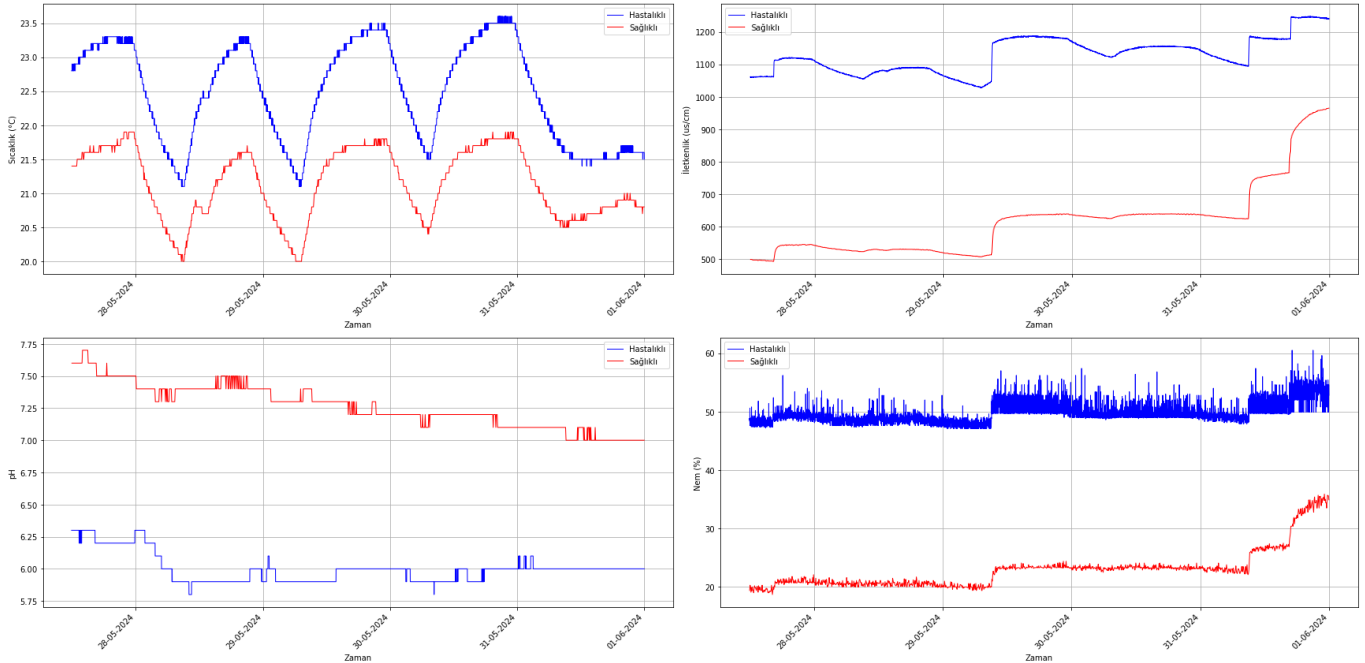
Derin öğrenmeye dayalı mevcut bitki hastalığı tanıma yöntemi, derin ağlar oluşturarak özellikleri otomatik olarak öğrenebilir (Thakur, Khanna, Sheorey ve Ojha, 2022; Gao, Wang, Lu, Li ve Wu, 2021; Shin ve diğ., 2021). Bu, özellik çıkarma işleminde manuel müdahale gerektiren geleneksel yapay görme teknolojisine göre otomatik sorununu etkili bir şekilde çözmektedir. Bununla birlikte, derin öğrenmeye dayalı yöntemler, eğitim veri setinin boyutuna yüksek oranda bağımlıdır (Jadon, 2020; Argüeso vd., 2020). Aynı zamanda, karmaşık uygulama senaryoları ve yüksek veri etiketleme maliyeti nedeniyle tarımsal alanda büyük miktarda yüksek kaliteli etiketli veri elde etmek zordur. Veri eksikliği, tarımsal otomatik tanımlama sürecinin gelişimini de sınırlamaktadır (Lu, Chen, Olaniyi ve Huang, 2022; Sharma, Tripathi ve Mittal, 2022). Hastalıklı veriyi toplamak hemen hemen tüm çalışmaların karşılaştığı en büyük sorundur. Hastalıklı veri toplamak için ürünün izlenmesi ve hastalığın ortaya çıkmasının beklenmesi gerekmektedir. Bu süreç her zaman can sıkıcı olmuştur. Çoğu zaman sağlıklı veri kadar hastalıklı veri toplanamamakta ve toplanan veriler uzmanlar tarafından doğru olarak etiketlenememektedir. Bunun temel sebebi her ürün için farklı çok sayıda hastalık olması, hastalık belirtilerin çoğu zaman birbirine benzer olması, hastalığın ortaya çıkma süresinin uzun olması, hastalığı etiketleyecek uzmanların yeterli sayıda olmaması vb. sayılabilir. Bu çalışmada örnek uygulama ürünü olarak örtü altı yetiştiricilik uygulamalarıyla yıl boyu yetiştirilebilen kabakgiller familyasından tek yıllık bitki olan hıyar tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında birbirinden izole ve farklı alanlarda birbirinin ikizi iki üretim hattı oluşturulmuştur.



Şekil 1. Birbirinin ikizi Üretim Hatları

Her bir üretim hattında bitkiler 4 litre hacme sahip torf içeren tekli saksılarda yetiştirilmiştir. İlk üretim ortamında sağlıklı ürün üretilmiştir (Şekil 1. a). Sağlıklı hıyarda önemli verim ve kalite kayıplarına neden olan Cucumber mosaic virüs hastalıklı odada bulunan saksılardaki bitkilere bulaştırılmıştır (Şekil 1b). Her bir saksıda sıcaklık, pH, iletkenlik ve nem değerleri Cucumber mosaic virüs bulaştırıldığı zamandan itibaren hem sağlıklı hem de hastalık bulaştırılmış bitkilerden her beş dakikada bir toplanmıştır. Veri toplama işlemi bahse konu olan virüse ait belirtilerin yapraklarda görülmesine kadar devam etmiştir.

Sağlıklı üretim yapılan ortamın ikizinde ise yapay hastalıklandırma sayesinde ürünün hangi hastalığa uğradığı bilindiği için etiketleme (hastalıklı olup olmadığının tespiti) işlemine gerek kalmamıştır. Ayrıca ürünün ilk dikiminden hastalık belirtisi olasıya kadar geçen sürede algılayıcılarla izlenmesi mümkün olmuştur. Böylece çoğu çalışmada hastalık belirtisine göre çalışan sistemlerin aksine baştan itibaren izlenen hastalıklı üründen elde edilen veriler analiz edilerek hastalık belirtisi ortaya çıkmadan tespit edilebilmesi için gerekli çalışmaların / analizlerin yapılması mümkün hale gelmiştir.



Şekil 2. Hastalıklı ve Sağlıklı Bitkilere Ait Sensör Verileri

Veri seti, topraktan alınan sıcaklık, pH, iletkenlik ve nem ölçümlerini içermektedir. Bu ölçümler, sıcaklık, pH, iletkenlik ve nem bilgilerini aynı anda ölçebilen bir toprak sensörü kullanılarak toplanmıştır. Sensörlerinden alınan bilgilerin iş istasyonu üzerindeki veri tabanına kaydedilmesi için öncelikle LoRaWAN ağı oluşturulmuştur.

Toprak sensörleri, LoRaWAN ağına radyo frekansları aracılığıyla bağlanabilmek için bir modül ile donatılmıştır. Bu modül, sensörlere kablo ile bağlanarak verilerin LoRaWAN ağına iletilmesini sağlamaktadır. LoRaWAN ağına gelen bilgiler, benzersiz cihaz kimlik bilgileri (cihaz ID) ile LoRa sunucularına aktarılmakta ve ardından iş istasyonu üzerinde koştan PostgreSQL veri tabanına kaydedilmektedir. Verilerin toplanması ve işlenmesi için Java programlama dili ile geliştirilmiş web tabanlı bir uygulama yer almaktadır. Veri seti, 2024 yılı Mayıs ve Haziran ayları arasında kaydedilen sıcaklık, pH, iletkenlik ve nem ölçümlerini içermektedir. Toprak sensöründen elde edilen verilerin ham hali örnek olması açısından Şekil 2’de resmedilmiştir. Veriler, belirli zaman aralıklarında kaydedilerek zaman serisi formatında sunulmuştur. Hastalık belirtilerin görsel olarak tespit edilebilmesi amacıyla her ürün kameralarla izlenmiş ve aynı toprak sensörlerinde olduğu gibi her beş dakikada yakalanan görüntüler zaman damgasıyla birlikte veri tabanına kaydedilmiştir. Şekil 3’te hastalık inoküle edilmiş bitkilere ait örnek fotoğraflar gösterilmektedir.



Şekil 3. Hastalık İnoküle Edilmiş Bitki Örnekleri

Ön işlemler kapsamında, zaman damgaları kontrol edilerek veri seti zaman serisi analizine uygun hale getirilmiştir. Elde edilen veriler, modelin daha hızlı ve stabil öğrenmesini sağlamak için standart hale getirmek ve normalize edilmesi amacıyla scikit-learn kütüphanesindeki StandardScaler¹ kullanılmıştır. StandardScaler aykırı değerlere karşı duyarlıdır ve aykırı değerlerin varlığında özellikler birbirinden farklı ölçeklenebilir. Ayrıca, veriler belirli bir zaman adımı kullanılarak sekanslar halinde düzenlenmiş ve anomalilerin tespiti için etiketlenmiştir. Verilerin etiketlenmesi aşamasında, görsel olarak sunulan veri setinde bitki üzerinde virüs görünümünün tespit edildiği tarih baz alınarak, veri seti içerisindeki

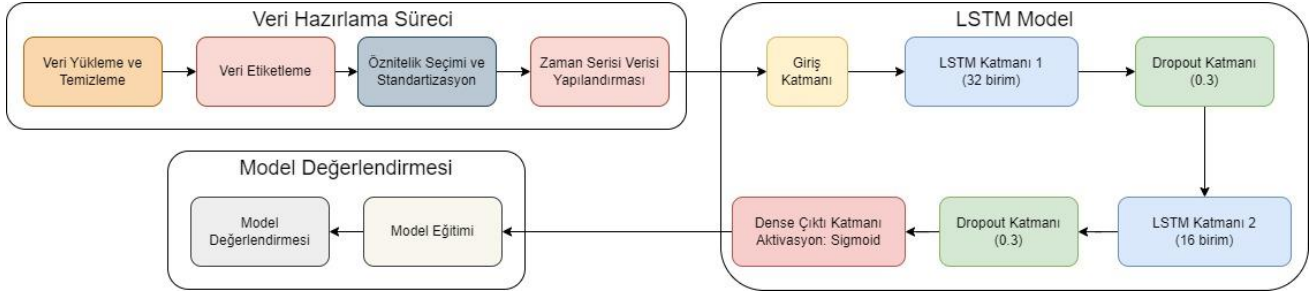
verilerde ilgili tarihten itibaren sunulan veriler virüslü olarak etiketlenmiştir.

Ön işlemde geçirilmiş sıcaklık, pH, iletkenlik ve nem zaman serisi verilerini analiz etmek amacıyla bu çalışmadaki problem ve girdi verilerine en uygun olan derin öğrenme mimarisi olan LSTM tercih edilmiştir. LSTM birimi, tekrarlanan modüllerde hiçbir etkinleştirme işlevini kullanmamasından dolayı uzun veya kısa zaman periyotlarını hatırlar. Dolayısıyla, depolanan değer yinelemeli olarak değiştirilmez. Yalnızca anlık veriyi (resim gibi) değil, veri dizilerini (konuşma ve video gibi) de işleyebilir. Örneğin Fischer ve Krauss (2018) karmaşık ve dinamik piyasa veriler finansal zaman serisi tahmininde LSTM modellerinin kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Bununla birlikte doğal dil işleme alanında, metin verilerinin dil modellerini oluşturmak ve dil çevirisi gibi uygulamalarda LSTM modelleri etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Sutskever, Vinyals ve Le, 2014). Ayrıca, medikal zaman serisi analizinde, LSTM modelleri kalp atış hızı veya EEG sinyalleri gibi biyomedikal sinyallerin analizinde kullanılmakta ve hastalık teşhisinde önemli roller oynamaktadır. Lipton, Kale, Elkan ve Wetzel (2015), LSTM modellerinin geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu ve çeşitli zaman serisi verilerinde başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler sürekli zamanda (her ne kadar beş dakikada bir veri toplanmış olsa da bitkilerdeki değişimlerin beş dakikalık periyotta fazla değişmeyeceği kabullenmesi ile sürekli zaman serisi olarak ele alınabilir) elde edilmesinden dolayı LSTM mimarisi için uygundur. Çalışmada, zaman serisi veri yapısının oluşturulması için veriler belirli bir zaman adımı kullanılarak sekanslar halinde düzenlenmiştir. Bu sayede model, geçmiş bilgileri kullanarak tahmin yapabilmektedir. Modelin aşırı öğrenmesini önlemek amacıyla erken durdurma tekniği kullanılmıştır. Erken durdurma, doğrulama kaybı belirli bir süre iyileşmediğinde eğitimi durdurarak en iyi model ağırlıklarını geri yüklemektedir. Önerilen model mimarisi, iki katmanlı bir LSTM yapısından oluşmaktadır. İlk LSTM katmanı, 32 birim ile yapılandırılmış olup geri dönüşlü olarak ayarlanmıştır. Bu katman, sonraki LSTM katmanına tüm zaman adımlarının çıktısını sağlamaktadır. İlk LSTM katmanının ardından %30 sönümleme (dropout) uygulanarak modelin aşırı öğrenmesi önlenmiştir. İkinci LSTM katmanı ise 16 birim ile yapılandırılmış olup sadece son zaman adımının çıktısını vermektedir. Bu katmanın ardından da %30 sönümleme (dropout) uygulanmıştır. Çıkış katmanı olarak tek bir nörona sahip Dense katmanı, sigmoid aktivasyon fonksiyonu ile anomali tespiti için kullanılmıştır. Model, Adam optimizasyon algoritması ve binary_crossentropy kayıp fonksiyonu ile derlenmiş ve doğrulama veri setindeki performansa göre erken durdurma geri çağırması ile eğitilmiştir. Çalışmada kullanılan mimari Şekil 4’te

¹ <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.StandardScaler.html>

resmedilmiştir. Şekil 4'te görüleceği üzere genel mimari üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm genel itibari ile verilerin hazırlanması ve ön işleme adımlarından oluşmaktadır. LSTM mimarisi için hazır

hale getirilen veriler LSTM mimarisine girdi olarak verilmiştir. En son bölüm ise modelin eğitimi ve test sonuçlarının elde edildiği bölümdür.



Şekil 4. Çalışmada Kullanılan Mimarinin Blok Diyagramı

Bu çalışma kapsamında yapılan testler ve sonuçların sunulmasında araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, sağlıklı ürünlerden toplanan eğitim verileri ile eğitilen sistemin hastalık/zararlı inokülasyonu yapılan ürünlerden algılayıcılarla elde edilen veriler test edilerek erken uyarı verecek sistem geliştirilmiştir. Buradaki erken uyarı sistemi hastalık belirtisinin insan gözü ile tespit edilmesinden önceki zamanı belirtmektedir.

Sınıflandırma problemlerin başarısı, doğru sınıfa atanan örnek sayısı ve yanlış sınıfa atanan örnek sayısı nicelikleri ile alakalıdır. Test sonucunda ulaşılan sonuçların başarımları bilgileri karışıklık matrisi ile ifade edilmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. Karışıklık Matrisi

		Gerçek Sonuçlar	
		Doğru	Yanlış
Tahminlenen Sonuçlar	Doğru	DP	YN
	Yanlış	YP	DN

Tablo 1'de yer alan;

DP: Gerçekte hastalıklı olan örnekleri doğru bir şekilde hastalıklı olarak tahmin etme durumunu ifade eder.

DN: Gerçekte sağlıklı olan örnekleri doğru bir şekilde sağlıklı olarak tahmin etme durumunu ifade eder.

YP: Gerçekte hastalıklı olan örnekleri yanlış bir şekilde sağlıklı olarak tahmin etme durumunu ifade eder.

YN: Gerçekte sağlıklı olan örnekleri yanlış bir şekilde hastalıklı olarak tahmin etme durumunu ifade eder.

Karışıklık matrisinde satırlar test kümesindeki örneklerle ait gerçek sayıları, kolonlar ise modelin tahminlenmesini ifade etmektedir. Doğruluk

ölçmesinin en yaygın kullanımlarından doğru bir şekilde sınıflandırılan verinin bütüne oranının bir raporu olan yüzde doğruluğudur. Çoğunlukla yüzde doğruluk bir hata matrisi olmaksızın basit bir doğruluk ölçmesi olarak tek başına kullanılır. Yüzde doğruluk tek başına bir sınıflandırmanın göreceli olarak faydası hakkında fikir verebilir. Ancak bütün hata matrisini inceleme fırsatının olmaması durumunda sınıflandırma doğruluğunu kanıtlayacak kadar ikna edici değildir. Tam bir değerlendirme sınıflandırmada kullanılan kategorileri içermelidir. Ayrıca belirli sınıfların doğruluklarındaki değişimlere sınıfların hassasiyetlerinde olduğu gibi dikkat edilmelidir. Sadece genel sınıfların kullanıldığı bir sınıflandırmada yüksek doğruluk elde edilebilir. Model başarımının ölçülmesinde kullanılan en popüler ve basit yöntem, modele ait doğruluk oranıdır. Doğru sınıflandırılmış örnek sayısının (DP+DN), toplam örnek sayısına (DP+DN+YN+YP) oranıdır ve aşağıdaki eşitlik (Eşitlik 1) ile ifade edilmektedir.

$$\text{doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YN+YP} \quad (1)$$

Hata oranı ise bu değer 1'e tamlayanıdır. Diğer bir ifadeyle yanlış sınıflandırılmış örnek sayısının (YP+YN), toplam örnek sayısına (DP+DN+YN+YP) oranıdır. Kesinlik ise hastalıklı olan verilerin hangi oranda tespit edilebildiğini göstermektedir. Hastalıklı olarak doğru sınıflanmış (DP) veri sayısının, hastalıklı olarak tahminlenmiş tüm örnek sayısına oranıdır ve matematiksel olarak gösterimi Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$\text{kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (2)$$

Doğru sınıflandırılmış pozitif örnek sayısının toplam pozitif örnek sayısı oranı duyarlılık olarak isimlendirilmekte ve formülü aşağıdaki eşitlikte sunulmuştur (Eşitlik 3);

$$\text{duyarlılık} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (3)$$

Kesinlik ve duyarlılık ölçütleri tek başına anlamlı bir karşılaştırma sonucu çıkarmamıza yeterli değildir. Her iki ölçütü beraber değerlendirmek daha doğru sonuçlar verir. Bunun için f-ölçütü tanımlanmıştır. F-ölçütü, kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve Eşitlik 4'te gösterilmektedir.

$$F \text{ Skoru} = 2 * \frac{\text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (4)$$

Çalışma kapsamında elde edilen karışıklık matrisi Tablo 2'de, kesinlik, doğruluk ve F Skoru ise Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2. Elde Edilen Karışıklık Matrisi

		Gerçek Sonuçlar	
		Hastalıklı	Sağlıklı
Tahminlenen	Hastalıklı	1142	0
Sonuçlar	Sağlıklı	2	2646

Tablo 2'de 1144 adet olan hastalıklı verilerin sadece 2 tanesinin yanlışlıkla sağlıklı olarak tahmin edildiği, buna karşılık 2646 adet olan sağlıklı verinin hepsinin doğru olarak tahmin edildiği görülmektedir.

Tablo 3. Model Sonucu Elde Edilen Başarım Metrikleri

	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru
Başarım (%)	0.9994	0.9982	1.0000	0.9990

Yukarıdaki başarım metrikleri tablosu incelendiği zaman çalışma kapsamında sensör verilerin kullanılarak başarılı bir şekilde bitkilerin hastalıklı olup olmadığı tespit edilebilmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada serada yapılan hıyar yetiştiriciliğinde ortaya çıkabilecek virüs etkisinin derin öğrenme ve yapay zeka uygulamaları yardımıyla erken dönemde tespit edilmesi amaçlanmıştır. Gelişen teknoloji ile algılayıcıların artık kolay ulaşılabilmesi hem de bu algılayıcılardan gelen çok boyutlu bilgiyi analiz edebilen yapay zeka destekli çözümler bitkilerin başlangıç aşamasından hasata kadar olumsuz durumların hassasiyetle ve hızlı bir şekilde tespit edilmesini kolaylaştırmak için gereklidir. Bu çalışmada sağlıklı ve yapay hastalık oluşturulabilecek iki üretim merkezi algılayıcılar ile sürekli izlenerek hastalıkların erken tespitini gerçekleştirilebilmek adına bir sistem mimarisi oluşturma, algılayıcıların birleştirilerek veriden elde edilecek bilgi miktarını artırmak ve uçtan uca eğitim yapabilecek ve gerçek saha ortamında çalışabilecek özgün bir yaklaşım önerilmiştir. Çalışmada Beit Alpha tipi standart bir hıyar çeşidi kullanılmıştır. Fide dönemindeki hıyar bitkilerine

Cucumber mosaic virusünü (CMV) hastalıklı bitki elde edebilmek için yapraktan zararlı nematod için bitkinin yetiştirme ortamına inoküle edilerek verilmiş ve belirti oluşumu gözlemlenmiştir. Bitki hastalık yönetimi için yerinde örnekleme sağlayan hassas, spesifik, kullanıcı dostu ve hızlı yöntemlere duyulan ihtiyaç giderek daha belirgin hale gelmektedir. Bu sayede hastalık serada yetiştirilen bitkilerin birkaçında yayılmaya başladığında aksiyon almak mümkün olacaktır. Bu çalışmada zaman serilerini analizi için kullanılan LSTM mimarisi yerine ARIMA gibi istatistiksel yöntemlerin kullanılması ve toprak sensörlerinden elde edilen verilerin görüntülerle füzyon edilerek yeni derin öğrenme mimarileri oluşturulması planlanmaktadır. Hastalık ve zararlıların sonraki yapılacak çalışmalar kapsamında geliştirilecek yenilikçi ve sürdürülebilir teknoloji sayesinde erken dönemde tespit edilmesiyle zirai mücadele uygulamalarının zamanında ve etkin bir şekilde uygulanmasıyla olası verim ve kalite kayıplarının önüne geçilebilecektir. Ayrıca minimum zirai ilaçlama ile maliyet düşürücü tedbirler en üst seviyede alınabilecek insan ve çevre maksimum seviyede korunmuş olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1230928 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Elif GENÇ, Yusuf KARTAL ve Erol SEKE sera ortamının kurulması ve verilerin elde edilmesi, verilerin bilgisayar ortamına aktarılması; Cem BAĞLUM ve Osman ÇAĞLAR derin öğrenme mimarilerin kodlanması ve sonuçların elde edilmesi, uygulanması, bilgisayara ortamına aktarılması; Erol SEKE, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması, istatistiki analizler, Kemal ÖZKAN ise çalışmanın her aşamasında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Abade, A., Ferreira, P. A. ve Vidal, F. B. (2021). Plant diseases recognition on images using convolutional neural networks: A systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 185, 106125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106125>
- Abdu, A. M., Mokji, M. M. ve Sheikh, U. U. (2020). Machine learning for plant disease detection: An investigative comparison between support vector machine and deep learning. *IAES International*

- Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI), 9(4), 670-683. doi: <https://doi.org/10.11591/ijai.v9.i4.pp670-683>
- Akbaş, B. (2019). Bitki sağlığının sürdürülebilir tarımdaki yeri. Ziraat Mühendisliği (368), 6-13. doi: <https://doi.org/10.33724/zm.606199>
- Ashwini, C. ve Sellam, V. (2024). An optimal model for identification and classification of corn leaf disease using hybrid 3D-CNN and LSTM. Biomedical Signal Processing and Control, 92, 106089, ISSN 1746-8094. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106089>
- Barbedo, J. G. A. (2016). A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images. Biosystems Engineering, 144, 52-60. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.017>
- Bischoff, V., Farias, K., Menzen, J. P. ve Pessin, G. (2021). Technological support for detection and prediction of plant diseases: A systematic mapping study. Computers and Electronics in Agriculture, 181, 105922. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105922>
- Chin, P.-W., Ng, K.-W. ve Palanichamy, N. (2024). Plant disease detection and classification using deep learning methods: A comparison study. Journal of Informatics and Web Engineering, 3(1), 156-167. doi: <https://doi.org/10.33093/jiwe.2024.3.1.10>
- Cohen, B., Edan, Y., Levi, A. ve Alchanatis, V. (2022). Early detection of grapevine (vitis vinifera) downy mildew (peronospora) and diurnal variations using thermal imaging. Sensors, 22, 3585. doi: <https://doi.org/10.3390/s22093585>
- Dyussebayev, K., Sambasivam, P., Bar, I., Brownlie, J. C., Shiddiky, M. J. A. ve Ford, R. (2021). Biosensor technologies for early detection and quantification of plant pathogens. Frontiers in Chemistry. doi: <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.636245>
- Gao, R., Wang, R., Lu, F., Li, Q. ve Wu, H. (2021). Dual-branch, efficient, channel attention-based crop disease identification. Computers and Electronics in Agriculture, 190, 106410. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106410>
- Ferentinos, K. (2018). Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. Computers and Electronics in Agriculture, 145, 311-318. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.009>
- Fischer, T. ve Krauss, C. (2018). Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions. European Journal of Operational Research, 270(2), 654-669. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.054>
- Kelman, A., Pelczar, M. J., Pelczar, R. M. ve Shurtleff, M. C. (2023, December 28). Plant disease. Encyclopedia Britannica. Erişim adresi: <https://www.britannica.com/science/plant-disease>.
- Lipton, Z. C., Kale, D. C., Elkan, C. ve Wetzell, R. (2015). Learning to diagnose with LSTM recurrent neural networks. arXiv Preprint arXiv:1511.03677. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.03677>
- Lu, Y., Chen, D., Olaniyi, E. ve Huang, Y. (2022). Generative adversarial networks (gans) for image augmentation in agriculture: A systematic review. Computers and Electronics in Agriculture, 200, 107208. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107208>
- Jackulin, C. ve Murugavalli, S. (2022). A comprehensive review on detection of plant disease using machine learning and deep learning approaches. Measurement: Sensors, 24, 100441, ISSN 2665-9174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100441>
- Mohanty, S. P., Hughes, D. P. ve Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. Frontiers in Plant Science, 7, 1419. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>
- Nguyen, C., Sagan V., Maimaitiyiming, M., Maimaitijiang, M., Bhadra, S. ve Kwasniewski, M. (2021). Early detection of plant viral disease using hyperspectral imaging and deep learning. Sensors, 21, 742. doi: <https://doi.org/10.3390/s21030742>
- Patel, P. (2021). A review on plant disease diagnosis through biosensor. International Journal of Biosensors and Bioelectronics, 7, 50-52. doi: <https://doi.org/10.15406/ijbsbe.2021.07.00212>
- Radovanović, D. ve Đukanovic, S. (2020), Image-based plant disease detection: a comparison of deep learning and classical machine learning algorithms, 24th International Conference on Information Technology (IT), Zabljak, Montenegro, 2020, 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/IT48810.2020.9070664>
- Sharma, V., Tripathi, A.K. ve Mittal, H., (2022). Technological revolutions in smart farming: current trends, challenges and future directions. Computers

and Electronics in Agriculture 201, 107217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107217>

Shin, J., Chang, Y. K., Heung, B., Nguyen-Quang, T., Price, G. W. ve Al-Mallahi, A. (2021). A deep learning approach for RGB image-based powdery mildew disease detection on strawberry leaves. Computers and Electronics in Agriculture 183, 106042. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106042>

Smetanin, A., Uzhinskiy, A., Ososkov, G., Goncharov, P. ve Nechaevskiy, A. (2021). Deep learning methods for the plant disease detection platform. AIP Conference Proceedings, 2377, 060006. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0068797>

Sutskever, I., Vinyals, O. ve Le, Q. V. (2014). Sequence to sequence learning with neural networks. Advances in Neural Information Processing Systems, 27. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.3215>

Terentev, A., Dolzhenko, V., Fedotov, A. ve Eremenko, D. (2022). Current state of hyperspectral remote sensing for early plant disease detection: A review. Sensors 22, 757. doi: <https://doi.org/10.3390/s22030757>

Thakur, P.S., Khanna, P., Sheorey, T. ve Ojha, A. (2022). Trends in vision-based machine learning techniques for plant disease identification: A systematic review. Expert Syst Appl 208, 118117. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118117>

Thomas, V., Maria, B., Patricia, G., Guillem, S., Isabel, T., Iker, A., Shawn, K. ve Araus, J. (2024). Comparing high-cost and lower-cost remote sensing tools for detecting pre-symptomatic downy mildew (*Pseudoperonospora cubensis*) infections in cucumbers. Computers and Electronics in Agriculture, 218, 108736. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108736>

DİNAMİK YÜKLER ALTINDA FARKLI YÜKSEKLİKTE YAPILARIN KAZIK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Süleyman GÜCEK^{1*}, Gülbahar ÜNAL²

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Geoteknik Anabilim Dalı, Afyon

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-4839-1851>

² Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon

ORCID No: <https://orcid.org/0009-0001-9906-3460>

Anahtar Kelimeler	Öz
Sonlu elemanlar yöntemi Dinamik analiz Statik analiz Zemin iyileştirme Plaxis	<i>Bu çalışma kapsamında farklı kat yüksekliğine sahip yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışları sonlu elemanlar yöntemini kullanan iki boyutlu Plaxis programı ile düzlemsel şekil değiştirme ve 15 düğüm noktalı elemanlar yardımıyla modellenmiştir. Modelleme işleminde zemin iyileştirmesi yapılarak ve zemin iyileştirmesi olmadan, düşey yükler altında statik ve dört farklı deprem ivme kaydı kullanılarak dinamik yükler altında analizler yapılmıştır. Çalışma alanının zemin etüt ve jeofizik raporu incelendiğinde zeminin alüvyon (kil, silt ve kum) ve yüksek deformasyonların oluşabileceği bir zemin olduğu görülmektedir. Zeminin taşıma kapasitesi düşük olduğu için kazık gruplarıyla iyileştirme yapılması gerektiği düşünülmüştür. Kazık tasarımında değişken parametre kazık boyu olmuştur. En doğru sonuca ulaşabilmek ve kapsamlı bir çalışma yürütebilmek için üç farklı yükseklikteki kazık grupları kullanılmıştır. Zemin iyileştirme yapılmadan önce, statik analiz çalışma sonuçlarına bakıldığında, oluşan düşey deformasyon miktarlarının oturma sınır koşuluna yakın değerlerde çıktığı gözlemlenmiştir. Dinamik analiz çalışma sonuçlarında ise, temel seviyesinde ve yapıda ciddi hasara sebep olabilecek düşey ve yatay deformasyon değerleri gözlemlenmiştir. Zemin iyileştirme çalışmaları sonrasında, statik analizler neticesinde deformasyonların ciddi oranda azaldığı görülmektedir. İyileştirme sonrası yapılan dinamik analiz sonuçlarına göre, kazık boyu arttıkça düşey ve yatay deformasyon değerlerinde azalma görülmektedir. Çalışma sonrasında elde edilen veriler dikkate alındığında, iyileştirme çalışmasının zeminin taşıma gücünü artırdığı, statik ve dinamik yükler altında meydana gelen deformasyon değerlerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.</i>

INVESTIGATION OF PILE PERFORMANCE OF STRUCTURES OF DIFFERENT HEIGHTS UNDER DYNAMIC LOADS

Keywords	Abstract
Finite element method Dynamic analysis Static analysis Soil improvement Plaxis	<i>In this study, the behavior of buildings with different storey heights under static and dynamic loads was modeled with the help of planar deformation and 15-node elements with the two-dimensional Plaxis program using the finite element method. In the modeling process, analyses were performed with and without ground improvement, under vertical loads, under static loads, and under dynamic loads using four different earthquake acceleration records. When the ground survey and geophysical report of the study area is examined, it is seen that the ground is alluvial (clay, silt and sand) and a ground where high deformations can occur. Since the bearing capacity of the ground is low, it was thought that improvement should be made with pile groups. The variable parameter in pile design has been pile length. In order to achieve the most accurate result and to conduct a comprehensive study, pile groups with three different heights were used. When the static analysis results were examined before the soil improvement, it was observed that the vertical deformation amounts were close to the settlement boundary condition. In the dynamic analysis study results, vertical and horizontal deformation values that could cause serious damage to the foundation level and the structure were observed. After the ground improvement studies, it is seen that the deformations have decreased significantly as a result of the static analyses. According to the results of the dynamic analysis conducted after the improvement, a decrease is observed in the vertical and horizontal deformation values as the pile length increases. When the data obtained</i>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

after the study is taken into consideration, it has been determined that the improvement study increases the bearing capacity of the ground and positively affects the deformation values occurring under static and dynamic loads.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 25.08.2024

Kabul Tarihi : 09.01.2025

* Sorumlu yazar: sgucek@aku.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1538486>

Research Article

Submission Date : 25.08.2024

Accepted Date : 09.01.2025

1. Giriş

Mühendisler uzun zamandır yumuşak ve kaya zeminlerin özelliklerinin iyileştirilebileceğini bilmektedirler (Evans vd. 2021). Zemin iyileştirme, Milattan önce 3000 yılına dayanan en eski inşaat mühendisliği uygulamalarından birisidir (Selçukhan ve Ekinci 2021). Modern zemin iyileştirme teknikleri, 1960'larda gelişmeye başlamış ve o zamandan beri hızlı bir şekilde ilerleme sağlanmıştır (Evans vd. 2021). Zemin iyileştirme yöntemlerinin yaygınlaşma sebebi, nüfus artışına bağlı olarak artan bina talebi ile taşıma gücü elverişsiz yumuşak zeminlere yapı inşaatlarının yapılmak istenmesinden kaynaklanmaktadır. Son yıllarda yumuşak zemin üzerine inşa edilen birçok yapı projesi bulunmaktadır. Yumuşak zeminin özelliğinden dolayı üzerine inşa edilen yapılar farklı oturmalarla maruz kalmaktadırlar (Wulandari ve Tjandra 2015). Taşıma gücü düşük zeminlerde meydana gelen depremlerin de etkisi sonucunda oturma miktarları artış göstermektedir. Depremlerin oluşmasını önlemek imkansızdır (Nomaler 2018). Bu nedenle depremler neticesinde dinamik yüklemelere maruz kalan zemin-yapı davranışının değerlendirilmesi önem kazanmıştır (Zein vd. 2021). Günümüzde zemin ile yapıyı birlikte analiz etmek ve dinamik analizlerinin yapılması sonlu elemanlar yöntemi ile mümkün hale gelmektedir. Son yıllarda çok fazla tercih edilen Plaxis 2D, geoteknik mühendisliği analizi için tasarlanmış sonlu elemanlar yazılımıdır. Sonlu elemanlar yöntemi "parçadan bütüne gitme" genel prensibine dayanmaktadır (Liu ve Quek 2003). Plaxis programı, kazıklı radye temeller de dahil olmak üzere karmaşık zemin-yapı etkileşim problemlerinin modellenmesi için gelişmiş yetenekler sunmaktadır (Chimdesa vd. 2023). Zemin ve yapıyı birlikte analiz etmek Türkiye içinde büyük bir önem taşımaktadır. Çünkü Türkiye bir deprem ülkesidir (Sümbül 2010). Ülkemizde meydana gelen başlıca büyük depremler; 1999 Kocaeli, 1999 Düzce, 2011 Van, 2020 İzmir, 2020 Elazığ ve son olarak 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleridir. Yaşanan büyük depremler sonrasında çok fazla mal ve can kaybı yaşanmıştır. Bu depremlerin ardından, ders alınması gereken birçok konu ortaya çıkmıştır. Bu konuların başında zeminin taşıma kapasitesinde düşüş ve depreme bağlı yatay ve düşey deformasyonlardaki artışlar zemin büyütmesinden kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu problemler dikkate alınarak yapılmış olan çalışma kapsamında, Afyonkarahisar ili, Merkez ilçesi, Selçuklu mahallesi, 21J-3C Pafta, 631 Ada ve 198 Parsel'de bulunan, nüfus yoğunluğunun çok fazla olduğu alüvyon zeminden oluşan bölge seçilmiştir. Çalışma kapsamında zemin tabakaları ve yapı Plaxis 2D ile modellenmiştir. Modelleme sonrasında, zeminin doğal hali ve iyileştirilmiş zeminler üzerinde farklı kat yüksekliklerine bağlı statik ve farklı deprem ivmelerine bağlı dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Zemini iyileştirmek için farklı yüksekliklerdeki kazık grupları kullanılmıştır (10-20-30m). Son yıllarda depremlerin, kazıklı temeller üzerindeki etkisine ilişkin araştırma faaliyetleri büyük ölçüde artmıştır (Kwaak 2015). Kazık grupları, zeminin rijitliğinin ve taşıma kapasitesinin yetersiz olduğu durumlarda temel derinliğini artırmak ve yükleri, taşıma kapasitesi daha yüksek olan zemin katmanlarına (kalın çakıl, çakıllı kum, sert kil veya kaya gibi) aktarmak amacıyla kullanılırlar (Chimdesa vd. 2023). Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen zemindeki oturma miktarları ve yatay-düşey yer değiştirmeler dikkate alınarak kazık boylarının performansı değerlendirilmiştir.

2. Materyal Ve Yöntem

2.1. Materyal

Çalışma alanını oluşturmak için bölgeye ait zemin etüt ve jeofizik raporlarında bulunan arazi ve laboratuvar deneyleri incelenmiştir. Zemin tabakaları oluşturulurken Şekil 1'de verilmiş olan SPT-N tablosu kullanılmıştır. Zemin parametreleri bulunurken laboratuvar deney sonuçları ve arazide yapılmış olan jeofizik ölçüm sonuçları kullanılmıştır. Laboratuvar deney sonuçları Şekil 2'de ve jeofizik ölçüm sonuçları ise Şekil 3'te görülmektedir. Bölgede yer altı su seviyesi 5 metre olarak tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılacak olan temel kotu (-2,5) ile (-4,00) m arasındadır. Temel genişliği 34 metre ve radye temeldir.

KORELASYON				
SPT- ort	BİRİM	DERİNLİK	KIVAM	SIKILIK
18	CL	1,50-2,00	ÇOK KATI	-
		2,00-2,50		
		2,50-3,00		
10	CH	3,00-3,50	KATI	
		3,50-4,00		
		4,00-4,50		
12		4,50-5,00		
		5,00-5,50		
		5,50-6,00		
		6,00-6,50		
3	CL	6,50-7,00	YUMUŞAK	-
		7,00-7,50		
		7,50-8,00		
2		8,00-8,50		
		8,50-9,00		
		9,00-9,50		
30		9,50-10,00		
		10,00-10,50		
31		10,50-11,00		
		11,00-11,50		
		11,50-12,00		-
31		12,00-12,50		
		12,50-13,00		
		13,00-13,50		
25		13,50-14,00		
		14,00-14,50		
		14,50-15,00		
18		15,00-15,50		
		15,50-16,00		
		16,00-16,50		
18		16,50-17,00		-
		17,00-17,50		
		17,50-18,00		
10		18,00-18,50		
		18,50-19,00		
		19,00-19,50		
24		19,50-20,00		
		20,00-20,50		
		20,50-21,00		
27	CL	21,00-21,50	ÇOK KATI	-
		21,50-22,00		
		22,00-22,50		
24	CH	22,50-23,00		
		23,00-23,50		
		23,50-24,00		
34		24,00-24,50		
		24,50-25,00		
		25,00-25,50		
37	CL	25,50-26,00	SERT	
		26,00-26,50		
		26,50-27,00		
42		27,00-27,50		
		27,50-28,00		
		28,00-28,50		
41		28,50-29,00		
		29,00-29,50		
		29,50-30,00		
45	CH	30,00-30,50		

Şekil 1. SPT-N Tablosu

Sıra No	Kuyu No	Numune No	Derinlik (m)	Birim	Doğal Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Üç Eksenli Basınç Deneyi c (kg/cm ²)	Φ (°)
1	SK-1	UD-1	2,50	CH	1,92	0,64	5,00
2	SK-1	UD-2	4,00	CH	1,91	0,69	6,00
3	SK-1	UD-3	7,00	CL	1,90	0,61	6,00
4	SK-2	UD-1	2,50	CH	1,93	0,59	5,00
5	SK-2	UD-2	5,50	CL	1,94	0,55	7,00
6	SK-2	UD-3	8,50	CL	1,95	0,63	6,00
7	SK-3	UD-1	2,50	CH	1,90	0,46	5,00
8	SK-4	UD-1	4,00	CH	1,89	0,57	7,00
9	SK-4	UD-2	7,00	CL	1,92	0,68	4,00
10	SK-4	UD-3	2,50	CH	1,93	0,65	7,00
11	SK-5	UD-1	4,00	CH	1,89	0,53	5,00
12	SK-5	UD-2	7,00	CL	1,96	0,58	6,00
13	SK-5	UD-3	2,50	CH	1,93	0,59	7,00
14	SK-6	UD-1	5,50	CL	1,94	0,46	5,00
15	SK-6	UD-2	8,50	CL	1,92	0,58	7,00
16	SK-6	UD-3	2,50	CH	1,90	0,66	4,00

Şekil 2. Laboratuvar Deney Sonuçları

Zemin parametreleri, Şekil 2’de verilmiş olan deney sonuçları ve Şekil 3’te verilmiş olan jeofizik ölçüm sonuçları incelenerek, verilen sonuçların ortalama değerleri bulunarak elde edilmiştir.

Tabaka	Elastisite Modülü (kg/cm ²)	Poisson Oranı	Tabaka Aralığı (m)
1.Tabaka	903,68	0,41	0,0-4,0
2.Tabaka	3394,29	0,48	4,0-18,0

Şekil 3. Jeofizik Ölçüm Sonuçları

Çalışmada kullanılacak olan zemin parametreleri, bina yükleri ve deprem kayıtları sırasıyla Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 1. Zemin Parametreleri

Derinlik (m)	Zemin Sınıfı (UCS)	Y _{unsat} (kN/m ³)	Y _{sat} (kN/m ³)	E _{ref} (kN/m ²)	C _{ref} (kN/m ²)	v (nu)	Φ (°)	k (m/gün)
0-2,5	CL	19,1	19,13	8,862e4	57,3	0,41	5,9	0,001
2,5-4,5	CH	18,8	18,8	8,862e4	58,6	0,41	5,7	0,001
4,5-9,0	CL	19,1	19,13	3,329e5	57,3	0,48	5,9	0,001
9,0-20,5	SM-SC	18,4	18,84	3,329e5	5	0,48	28	0,04
20,5-22,0	CL	19,1	19,13	3,329e5	57,3	0,48	5,9	0,001
22,0-24,0	CH	18,8	18,84	3,329e5	58,6	0,48	5,7	0,001
24,0-28,0	CL	19,1	19,13	3,329e5	57,3	0,48	5,9	0,001
28,0-80,0	CH	18,8	18,8	3,329e5	58,6	0,48	5,7	0,001

Y_{unsat} : Doygun olmayan birim hacim ağırlık

Y_{sat} : Doygun birim hacim ağırlık

E_{ref} : Elastisite modülü

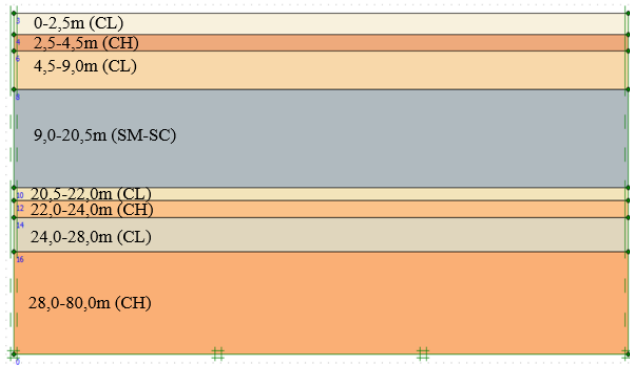
C_{ref} : Kohezyon

v : poisson oranı

Φ (°) : İçsel sürtünme açısı

k : Permeabilite katsayısı

Tablo 1’de verilmiş olan zemin parametreleri sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan programa aktarılarak 80 m derinliğinde 240 m genişliğinde bir zemin profili oluşturulmuştur (Şekil 4). Zemin 8 farklı tabakadan oluşmaktadır. Bu tabakalar genellikle siltli-killi zemin sınıflarından oluşmaktadır.



Şekil 4. Çalışma Alanı Zemin Profili

Çalışma alanında inşa edilmiş yapıların betonarme projeleri dikkate alınarak farklı kat yüksekliklerine sahip yapıların bina yükleri, kat yüksekliklerine göre detaylandırılarak elde edilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Farklı Kat Yüksekliğine Sahip Bina Yükleri

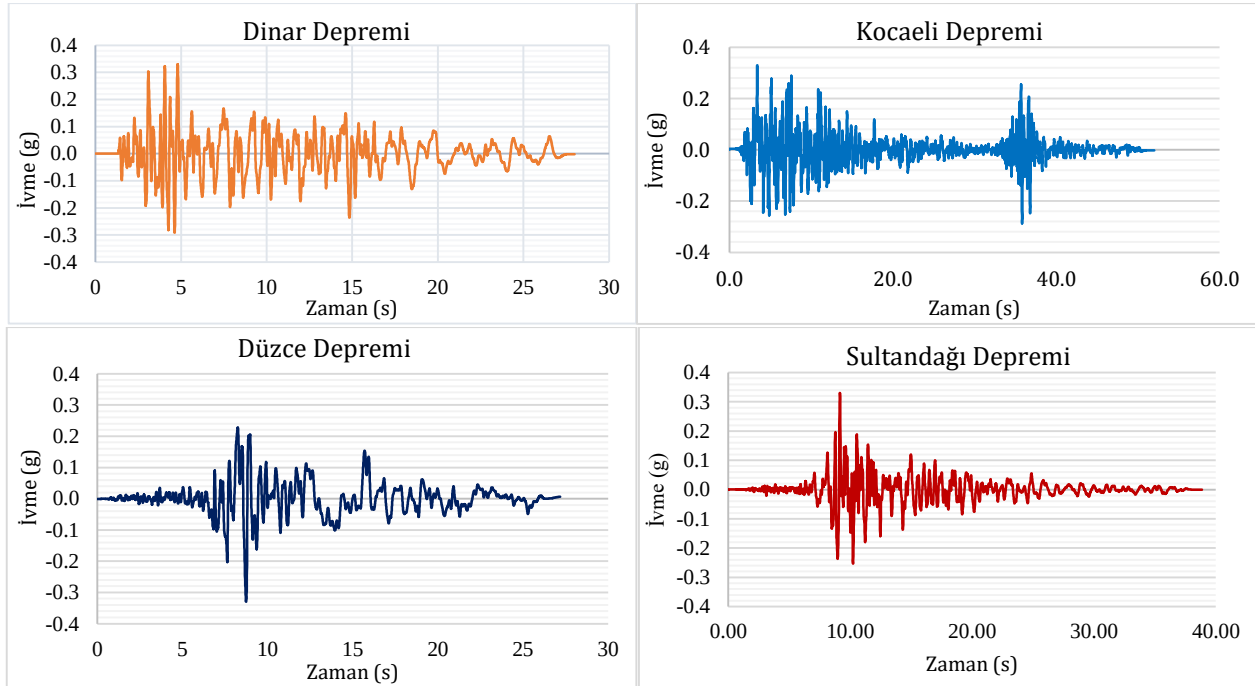
Kat Yükseklikleri	Bina Yüğü
B+3 Kat	114,3 kN/m ²
B+6 Kat	164,8 kN/m ²
B+9 Kat	215,2 kN/m ²
B+12 Kat	267,7 kN/m ²
B+15 Kat	316,1 kN/m ²

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanmak amacıyla elde edilen deprem kayıtları İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü (AFAD) (İnt. Kyn. 1) interaktif uygulamasından elde edilmiştir. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları, fay atım türüne ve bölgede oluşabilecek deprem büyüklüklerine göre seçilerek özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Analizlerde Kullanılan Deprem Kayıtları

Sıra	Deprem	Yıl	İstasyon	M _w	PGA (g)
1	Dinar	1995	Afyonkarahisar /Dinar	6,4	0,27
2	Kocaeli	1999	Kocaeli/İzmit	7,6	0,16
3	Düzce	1999	Düzce/Merkez	7,1	0,31
4	Sultandağı	2002	Afyonkarahisar /Merkez	6,5	0,11

Tablo 3'te verilmiş olan deprem kayıtları, çalışma alanının PGA değeri olan 0,33 g'ye göre sahaya özel olarak ölçeklendirilmiştir. Sahaya özel ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafikleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Sahaya Özel Ölçeklendirilmiş İvme-Zaman Grafikleri

2.2. Yöntem

Günümüz geoteknik modelleme çalışmalarında hem statik hem dinamik durum için zemin ve yapı birlikte analiz edilerek, depreme dayanıklı yapı tasarımı konusunda daha doğru hesaplar yapılması sağlanmaktadır. (Mungan ve Sünbül 2018). Bu analizler neticesinde meydana gelebilecek olan hasarlar en aza indirilerek can ve mal güvenliği sağlanmaktadır. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis 2D programı kullanarak statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Güler ve Şen (2015)'e göre sonlu elemanlar yönteminde, çözüm bölgesi çok sayıda sonlu ve birbirine bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Çözüme gidilirken, sonlu elemanların hepsinde çeşitli teoriler kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerinin tanımlanmasıyla yaklaşık sonuçlar bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında zemin profili, iyileştirilmiş zemin ve iyileştirilmemiş zemin olarak iki grupta incelenmiştir. Zemin iyileştirme yöntemi olarak kazık grubu kullanılmıştır. İyileştirme öncesi ve sonrası için dört farklı deprem kaydı kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. Zemin iyileştirme için kullanılan kazık parametreleri Tablo 4 'te verilmiştir.

Tablo 4. Analizlerde Kullanılan Kazık Parametreleri

Malzeme Türü	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)	d(m)	v
Elastik	3,2e7	2,667e6	1	0,15

Betonarme projeye göre kazıkların imalatında C30 beton kullanılmıştır. Tablo 4'te verilmiş olan kazık parametreleri bulunurken, EA ve EI değerleri (1) ve (2) numaralı eşitliklerden elde edilmiştir. Elastisite modülü, TS 500 (2000)'e göre C30 betonunun 28 günlük değeri baz alınarak 32000 MPa olarak alınmıştır.

$$EA = E.h.b \quad (1)$$

$$EI = E. \frac{h^3.b}{12} \quad (2)$$

EA=Normal Sertlik

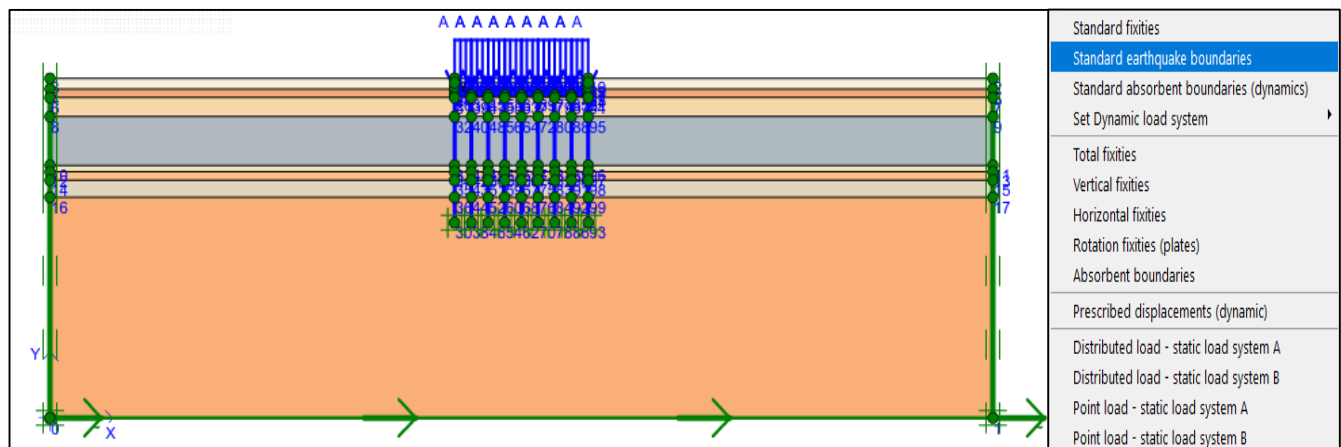
EI=Eğilme Dayanımı

E=Elastisite Modülü

h=Eleman Kalınlığı

b=Eleman Genişliği

Kullanılacak materyaller ve uygulanacak yöntem belirlendikten sonra analizlerin programda hangi model ile ve kaç düğüm noktasında yapılacağı kararlaştırılmıştır. Analizler düzlemsel şekil değiştirme ve 15 düğüm noktalı olarak yapılmıştır. Çalışma alanının uzunluğu, genişliği ve kazı yapılacak derinlik programa aktarılmıştır. Zemin tabakaları geometri doğrusu komutu yardımıyla çizilmiş ve Tablo 1'de verilmiş olan zemin parametreleri materyal setleri yardımıyla programa atanmıştır. Temelin kazılacağı alan belirlenerek geometri doğrusu komutu ile çizilmiştir. Bina yükü yayılı yük şeklinde programa aktarılmıştır. Kazık grupları plaka komutu yardımıyla programa aktarılmış ve materyal setleri ile Tablo 4'te verilmiş olan kazık parametreleri atanmıştır. Deprem yer hareketi programa aktararak analizler başlatılmıştır. Şekil 6'da zemin tabakalarının, bina yükünün, kazık gruplarının ve deprem yer hareketinin Plaxis'e aktarılmış hali sunulmuştur.



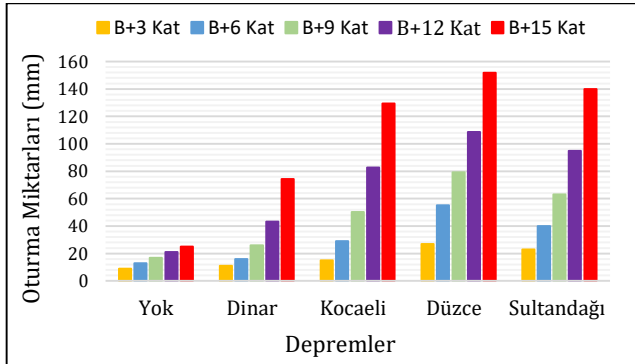
Şekil 6. Zemin Tabakalarının, Bina Yükünün, Kazık Gruplarının Ve Deprem Yer Hareketinin Programa Aktarılması

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada; B+3, B+6, B+9, B+12 ve B+15 katlı bina yükleri dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis programı yardımıyla iki boyutlu statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Analizler, zemin iyileştirme öncesi ve iyileştirme sonrası olarak iki farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Zemin iyileştirme analizleri için, 10m, 20m ve 30m olmak üzere farklı yüksekliklerdeki kazık grupları kullanılmıştır. Dinamik analizler sonrasında, zeminin iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş durumlarına bakılarak oturma (U_y) ve yataydaki yer değiştirme (U_x) miktarları incelenmiştir. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri, kazık parametreleri, bina yükleri ve deprem kayıtları dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler tartışılmıştır.

3.1. Kazıklı İyileştirme Öncesi Oturma Analizi ve Deprem Etkisi ile Birlikte Oluşan Oturma Analizi Sonuçları

Çalışmada, Tablo 2’de verilmiş olan beş farklı kat yüksekliğine bağlı, yapının kendi yükü altında oluşan statik analizler yapılmıştır. Zeminde meydana gelen düşey deformasyon miktarları incelenmiştir. Dinamik analizler için Tablo 3’te verilmiş olan Dinar ($M_w=6,4$), Kocaeli ($M_w=7,6$), Düzce ($M_w=7,1$) ve Sultandağı ($M_w=6,5$) depremleri kullanılmıştır. Analizler sonucunda oluşan düşey deformasyon (oturma) miktarları incelenmiştir. Oluşan oturma miktarları Şekil 7’de verilmiştir.

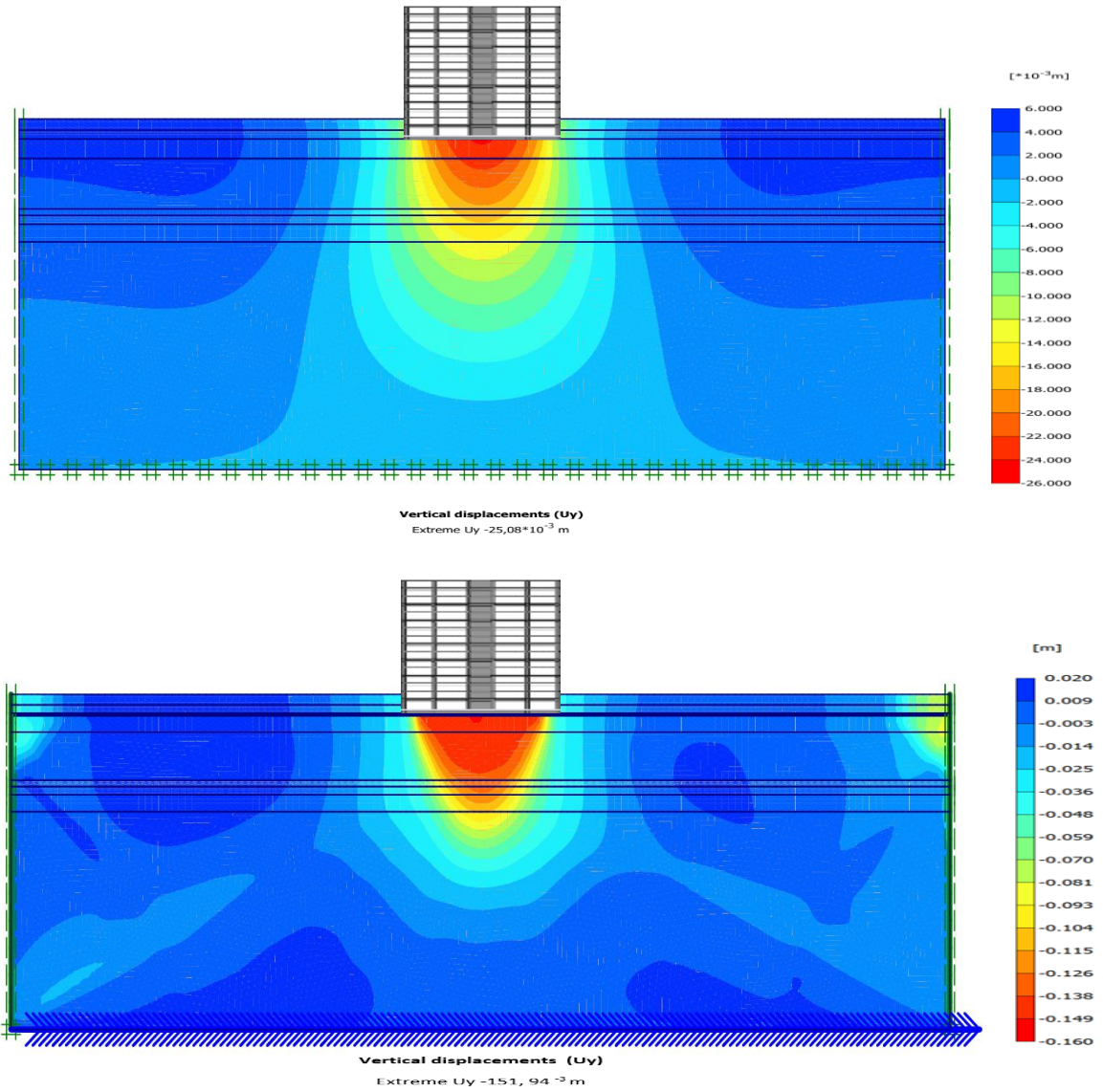


Şekil 7. Zemin İyileştirme Öncesi Meydana Gelen Oturma Miktarları

Dinamik ve statik analizler dikkate alındığında, artan kat yüksekliği ile birlikte oluşan oturma miktarlarının artış gösterdiği açıkça görülmektedir. Şekil 7’de görüldüğü üzere, depremler arasındaki oturma miktarlarına bakıldığında en büyük oturmanın B+15 katlı yapıda ve Düzce depreminde 151,94 mm, en düşük oturmanın ise B+3 katlı yapıda ve Dinar depreminde 11mm olarak meydana geldiği görülmektedir. En büyük ve en düşük oturma miktarları referans olarak verilmiştir. Deprem etkisi göz ardı edilse bile binaların kendi yükleri altında oluşan oturma miktarları yapıları riskli hale getirmektedir. Kat yüksekliği arttıkça zemine iletilen yük miktarı artacağından oturma miktarı da aynı doğrultuda artmaktadır. Bu sebepten dolayı zemin iyi analiz edilerek iyileştirme işlemi gerçekleştirilmelidir.

Önalp ve Sert’e (2010) göre, radye temeller için izin verilen oturma miktarları kumlu zeminlerde 60mm, killi zeminlerde ise 100mm olarak belirlenmiştir. Analizler sonrasında yalnızca B+3 katlı binanın deprem sonrası oturma miktarları bu değerlerin altında kalmıştır. Bu yüzden zemin iyileştirme B+3 kat hariç diğer yapılarda gerçekleştirilmiştir.

Şekil 8’de B+15 katlı yapının statik analiz sonrasında 25 mm düşey deformasyon yaptığı görülmektedir. Dinamik analizler sonrasında ise, en yüksek düşey deformasyon miktarının meydana geldiği Düzce depreminin etkisiyle deformasyon değeri 151,94 mm olarak hesaplanmıştır. Deprem etkisiyle birlikte oturma miktarının yaklaşık 6 kat arttığı görülmüştür.



Şekil 8. Oturma Miktarları a) B+15 Kat 25 mm, b) B+15 Kat-Düzce Depremi 151,94 mm

3.2. Kazıklı İyileştirme Sonrası Oturma Analizi ve Deprem Etkisi ile Birlikte Oluşan Oturma Analizi Sonuçları

Çalışmada zemin iyileştirme yöntemi olarak farklı yüksekliklere sahip kazık grupları kullanılmıştır. Kullanılan kazık parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Şekil 9'da B+6, B+9, B+12 ve B+15 katlı binalar için farklı kazık boyları ile iyileştirilmiş zeminlerin, bina yükleri altındaki ve dinamik yükler altındaki oturma miktarları görülmektedir. Şekil 9'a göre, en büyük oturma miktarlarının Düzce depremi sırasında meydana geldiği görülmektedir.

B+15 katlı yapıda iyileştirme öncesinde, Düzce depremi etkisiyle meydana gelen oturma miktarı 151,94 mm olarak görülmüştür. İyileştirme sonrasında ise bu oturma miktarları, 10 metrelik kazık uygulamasında

8,96 mm, 20 metre kazık uygulamasında 1,39 mm ve 30 metre kazık uygulamasında 1,33 mm'lere kadar düştüğü görülmektedir.

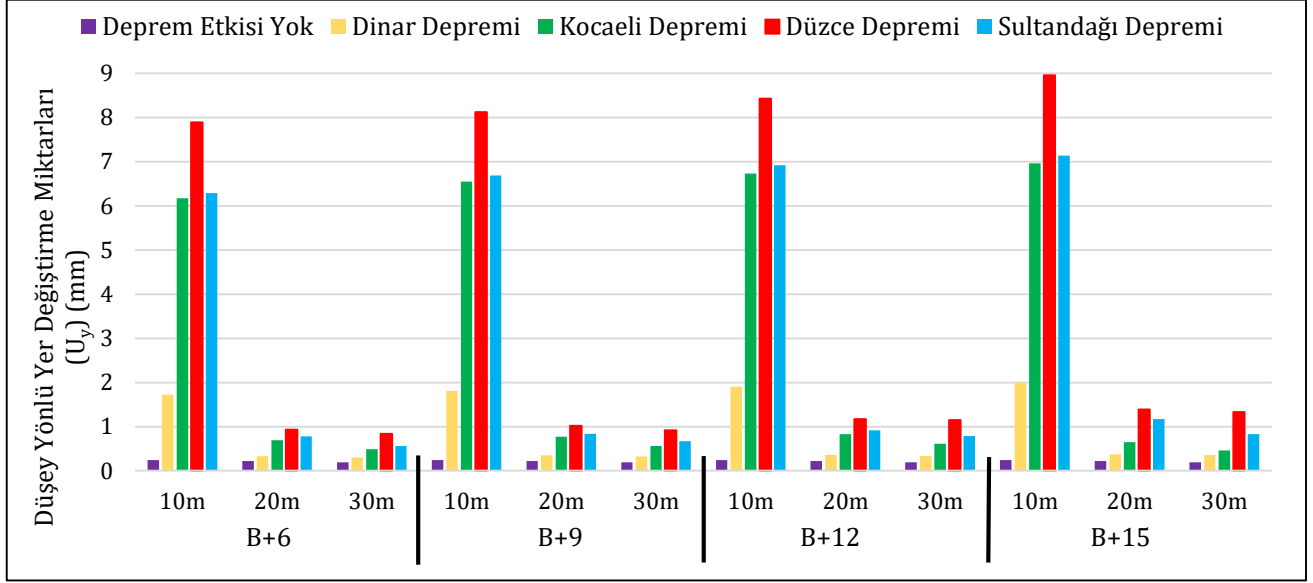
B+12 katlı yapıda ise iyileştirme öncesinde Düzce depremi etkisiyle meydana gelen oturma miktarı 108,67 mm olarak görülmüştür. İyileştirme sonrasında ise bu oturma miktarları, 10 metrelik kazık uygulamasında 8,43mm, 20 metre kazık uygulamasında 1,17 mm ve 30 metre kazık uygulamasında 1,15 mm'lere kadar düşmüştür.

B+9 katlı yapıda ise iyileştirme öncesinde Düzce depremi etkisiyle meydana gelen oturma miktarı 79,3 mm tespit edilmiştir. Kazıklı iyileştirme sonrasındaki oturma miktarları ise, 10 metre kazık uygulamasında 8,12 mm, 20 metre kazık uygulamasında 1,02 mm ve 30

metre kazık uygulamasında 0,92 mm'lere kadar düşmüştür.

B+6 katlı yapıda ise iyileştirme öncesinde Düzce depremi etkisiyle meydana gelen oturma miktarı 55,17 mm olarak görülmüştür. İyileştirme sonrasında ise bu oturma miktarları, 10 metrelik kazık uygulamasında 7,89 mm, 20 metre kazık uygulamasında 0,93 mm ve 30 metre kazık uygulamasında 0,85 mm'lere kadar düştüğü görülmektedir.

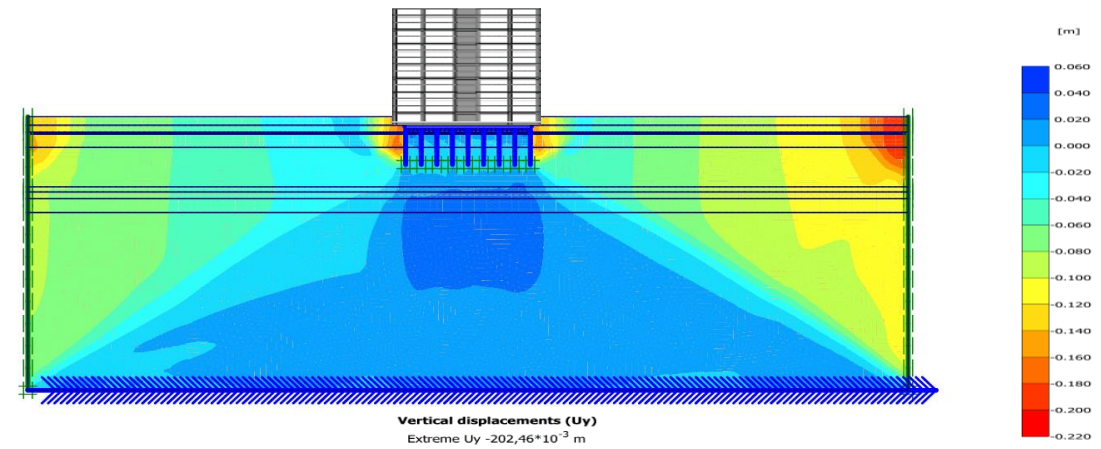
İyileştirme sonrası, depremli ve depremsiz farklı kat yüksekliklerine bağlı tüm oturma miktarları Şekil 9'da görülmektedir. Zemin iyileştirme için uygulanan 10 m kazık grubunun performansının diğerlerine göre daha ekonomik olduğu görülmektedir. İyileştirme analiz sonuçlarına göre 20 m ve 30 m kazık gruplarının ise birbirine yaklaşık performans gösterdiği tespit edilmiştir.



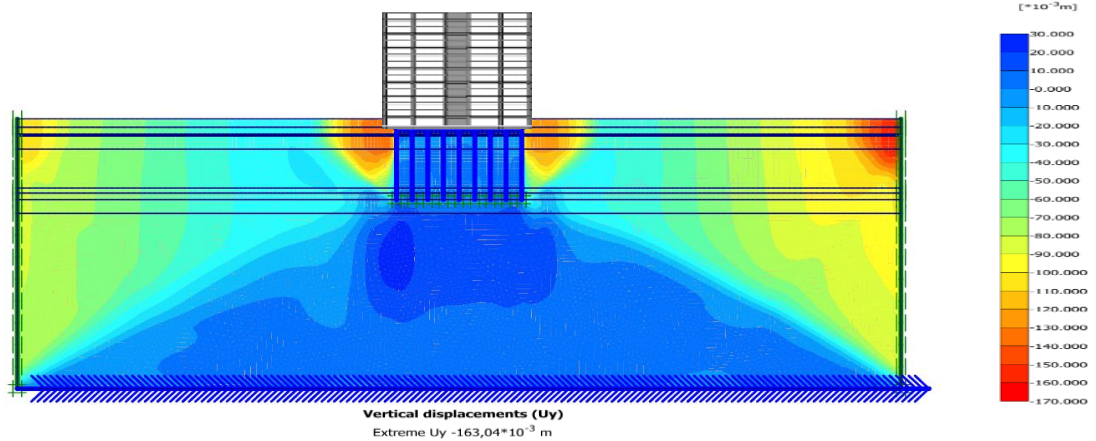
Şekil 9. İyileştirme Sonrası, Depremli ve Depremsiz Farklı Kat Yüksekliklerine Bağlı Düşey Yönlü Yer Değiştirme Miktarları (U_y)

Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de B+15 katlı yapının farklı boylardaki kazık gruplarıyla iyileştirilme sonrasında meydana gelen düşey yönlü yer değiştirme miktarları ve zeminde oluşan deformasyonların,

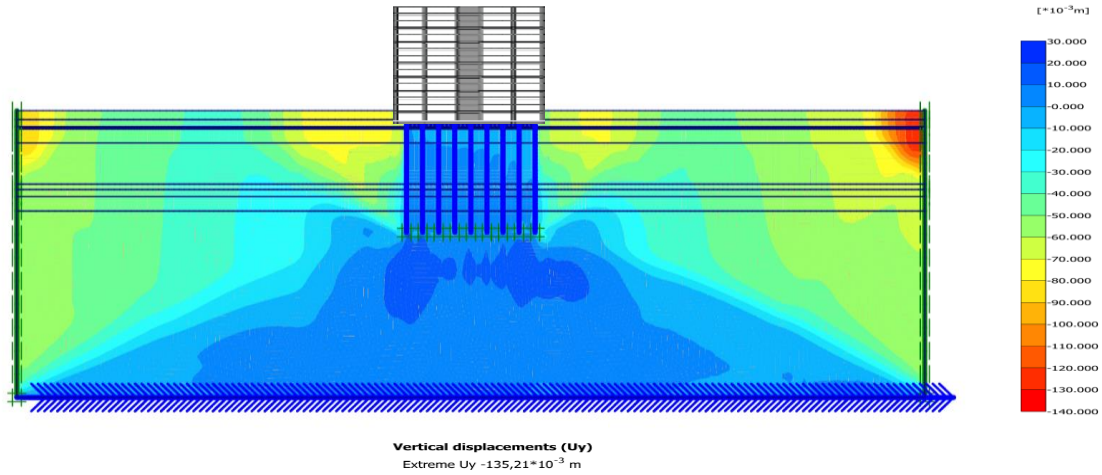
PLAXIS 2D sonlu elemanlar programının analiz çıktısı görülmektedir. Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de zeminde en fazla deformasyona sebep olan Düzce depremi verileri ile birlikte örnek olarak sunulmuştur.



Şekil 10. B+15 Kat, 10m Kazık, Düzce Depremi



Şekil 11. B+15 Kat, 20m Kazık, Düzce Depremi



Şekil 12. B+15 Kat, 30m Kazık, Düzce Depremi

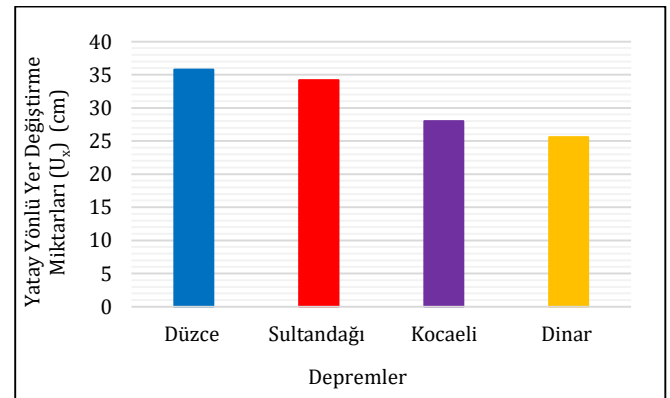
3.3. İyileştirme Öncesi ve İyileştirme Sonrası Deprem Etkisiyle Birlikte Zeminde Meydana Gelen Yatay Yer Değiştirme Sonuçları

Dinamik analizler neticesinde, iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zeminde meydana gelen yatay yer değiştirme sonuçları elde edilmiştir. Yatay yer değiştirme miktarları yapının ve zeminin periyoduna göre farklılık gösterebilmektedir.

3.3.1. İyileştirme Öncesi Zeminde Meydana Gelen Yatay Yer Değiştirme Sonuçları

Farklı deprem ivmeleri altında zemin iyileştirme işlemi yapılmadan önce meydana gelen yatay yönlü yer değiştirme analiz sonuçları Şekil 13'te verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre örneğin Düzce depremi sonrasında zeminin 35,8cm, Sultandağı depremi sonrasında 34,2cm, Kocaeli depremi sonrasında 28cm ve Dinar depremi sonrasında ise zeminin 25,6cm yer değiştirmeye maruz kaldığı tespit edilmiştir. Dinamik

yüklere bağlı meydana gelen yatay yer değiştirmeler Şekil 13'te verilmiştir.

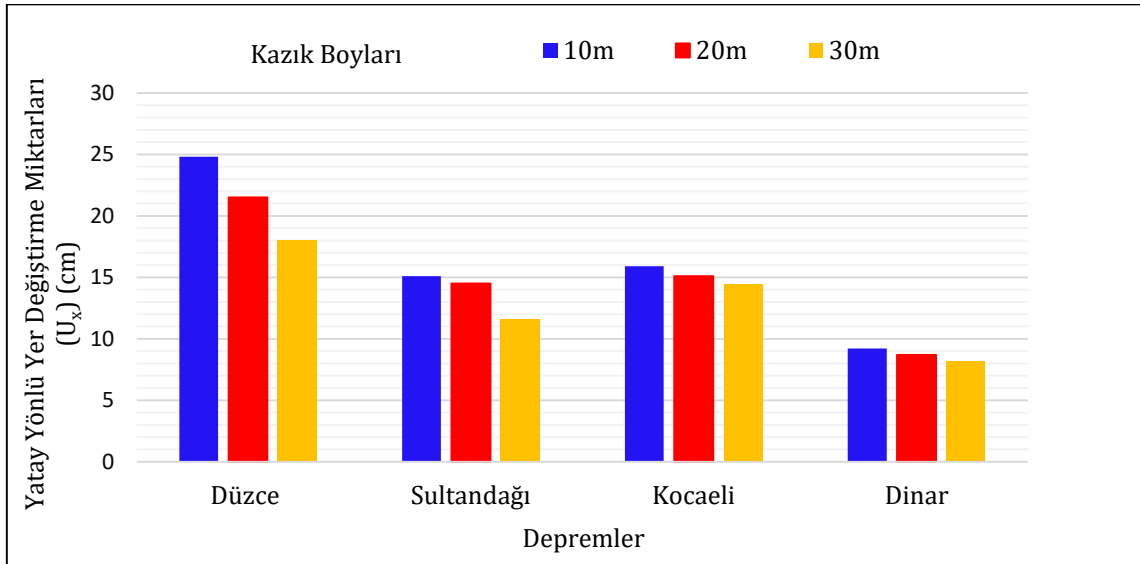
Şekil 13. İyileştirme Öncesi Yataydaki (U_x) Toplam Yer Değiştirme Değerleri

3.3.2. İyileştirme Sonrası Zeminde Meydana Gelen Yatay Yer Değiştirme Sonuçları

Farklı yüksekliklere sahip kazık grupları ile yapılan zemin iyileştirmesi sonrasında meydana gelen yatay yönlü yer değiştirme analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre örneğin, Düzce depremi etkisiyle zeminde 30,7 cm yer

değiştirme meydana gelirken, 10 m, 20 m ve 30 m kazık uygulaması sonrasında yatay yer değiştirme miktarları sırasıyla 24,8cm, 21,4cm ve 17,9 cm olarak tespit edilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, kazık boyu arttıkça yatay yönlü yer değiştirme miktarının azaldığı görülmektedir (Şekil 14).



Şekil 14. İyileştirme Sonrası, Yataydaki (U_x) Toplam Yer Değiştirme Sonuçları

4. Sonuç

Taşıma gücü düşük zemin tabakaları üzerinde, farklı kat yükseklikleri ve dört farklı deprem kaydı ele alınarak sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan program yardımıyla statik ve dinamik analizler yapılmıştır.

Meydana gelme ihtimali yüksek olan oturma miktarları ve yatay yer değiştirme miktarları değerlendirilmiştir.

Statik durumda ve zemin iyileştirilmesi yapılmayan çalışmalarda, en fazla oturma B+15 katlı binada 25mm ve en az oturma B+3 katlı binada 9mm olarak tespit edilmiştir. Dinamik durumda ve zemin iyileştirilmesi yapılmayan analiz sonuçlarına göre, en fazla oturma B+15 katlı binada ve Düzce depreminde 151,4 mm oturma tespit edilirken, en az oturma ise B+3 katlı binada ve 11 mm oturma ile Dinar depreminde tespit edilmiştir. Statik ve dinamik durumlar için kat yüksekliği arttıkça oturma miktarları artmıştır. İyileştirme sonrasında oturma miktarının maksimum olduğu durumda 14 kat azalma görülmüştür.

Yapılan statik ve dinamik çalışmalar sonucunda, artan kat yüksekliği ile zeminde oluşan düşey deformasyonların doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmüştür. Yatay yer değiştirme sonuçları ise dinamik yükün farklılıklarına göre değişiklik göstermektedir. Bununla birlikte zeminin iyi analiz edilmesi, deprem

etkisinin göz ardı edilmemesi ve analizlerin yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Deprem etkisinin dikkate alınmadığı durumlarda oturma ve yer değiştirme hesaplarının güvenli olmayacağı tespit edilmiştir. Yapılacak olan dinamik analizler neticesinde güvensiz durumların oluşması engellenmektedir.

Kazıklı zemin iyileştirme analiz sonuçlarına göre, tasarımı yapılan kazık gruplarının, statik ve dinamik analizler için oturma miktarları kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı tespit edilmiştir. Zemin profili ve sahaya uygulanacak olan yapı yüküne göre dinamik ve statik analizler yapılar sahaya özel uygun iyileştirme yöntemi belirlenmelidir.

Kazık boylarının dinamik analizler neticesinde belirlenmesi mühendislik ekonomisi açısından da önem arz etmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; S. Gücek, sonuçların yorumlanması ve makalenin kontrolü ve analizler, G. Ünal, literatür hazırlığı, analizlerin yapılması ve makalenin oluşturulması konularında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Chimdesa, F. F., Jilo, N. Z., Hulagabali, A., Babalola, O. E., Tiyaşa. T. vd. (2023). Numerical analysis of pile group, piled raft, and footing using finite element software PLAXIS 2D and GEO5. Scientific Reports, 13, 1-19. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42783-x>

Evans, J., Ruffing, D., & Elton, D. (2021). Fundamentals of Ground Improvement Engineering. London: CRP Press Taylor&Francis Group.

Güler, M. S. ve Şen, S. (2015). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 56-66. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/113923>

Kwaak, B. (2015). Modelling of dynamic pile behaviour during an earthquake using PLAXIS 2D: Embedded beam (rows) (Yüksek Lisans Tezi). Delft University of Technology Faculty of Civil Engineering and Geosciences Section Geo-Engineering, Delft.

Liu, G. R. ve Quek, S. S. (2003). The Finite Element Method: A Practical Course: Computational Modelling. Oxford: Butterworth Heinemann.

Mungan, H. ve Sünbül, A. B. (2018). Sonlu Elemanlara Dayalı Dinamik Analiz; Zemin İyileştirme – Derin Temel Örneği. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 1(1), 206-215. doi: <https://doi.org/10.33793/acperpro.01.01.41>

Nomaler, G. Ş. (2018). 1999 Kocaeli Depreminde Adapazarı'nda Yapı Yüğü Altında Zemin Davranışı

(Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Önalp, A. ve Sert, S. (2010). Geoteknik Bilgisi III. İstanbul: Birsan Yayınevi.

Selçukhan, O. ve Ekinci, A. (2021). Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 23, 481-496. doi: <https://doi.org/10.31590/ejosat.881603>

Sünbül, A. B. (2010). Yüzeysel Temelli 4-6 Katlı Binaların Deprem Sırasındaki Davranışlarının Parametrik İncelenmesi (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

TS500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Standart TS500. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Zein, Z. H., Jaber, L. & Temsah, Y. (2021). Dynamic Soil-Structure Interaction Analysis: Detecting The Reliability Of Modelling The Piles As A Plate Element For A Multistory Building Resting On Deep Foundation. Bau Journal- Science And Technology, 2(2), 8, 1-11. doi: <https://doi.org/10.54729/2959-331X.1051>

Wulandari, P. S. ve Tjandra, D. (2015). Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), 125, 363 – 367. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.083>

T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, “Deprem Dairesi Başkanlığı Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi” Erişim: 19.10.2023. <https://tadas.afad.gov.tr/map> (İnt. Kyn. 1)

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ST-37 AND STREX-960 STEELS BY A-TIG WELDING METHOD

Emre KASIM¹, Mehmet Fahri SARAÇ^{2*}, İlyas GENÇ³

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Taşıt Teknolojileri ABD, Isparta,

ORCID No: <http://orcid.org/0009-0009-9979-8713>

^{2*}Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Isparta,

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-0760-5569>

³Anka Hidrolik Ürünleri San. Tic. Ltd. Şti., Bursa, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0000-9287-6795>

Keywords	Abstract
Dissimilar metal welding A-TIG method ZrO ₂ flux Al ₂ O ₃ flux Mechanical properties	The place of welding methods in-vehicle technologies is well established, significantly enhancing production speed and product quality. High toughness is crucial for welded metallic structures that require high strength and good processability. However, challenges such as reduced toughness and reliability in welds impact overall quality. This study focused on improving the weld seam quality of dissimilar metals, specifically St-37 and Strenx-960 steels, using the active tungsten inert gas (A-TIG) welding method with ZrO ₂ and Al ₂ O ₃ fluxes. Experimental results showed that using ZrO ₂ flux yielded the highest mechanical performance, with a hardness of 494.8 HV, tensile strength of 1298 MPa, and impact energy of 113 J/cm ² . These findings highlight the superior adhesion and crystalline structure of ZrO ₂ , which minimized defects in the weld seam and HAZ, ensuring consistency in mechanical properties. The study concludes that ZrO ₂ flux significantly enhances the mechanical integrity of welded joints, offering potential benefits for vehicle manufacturing.

ST-37 VE STREX-960 ÇELİKLERİNİN MİKROYAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN A-TIG KAYNAK YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler	Öz
Benzer olmayan metal kaynaklama A-TIG metod ZrO ₂ akısı Al ₂ O ₃ akısı Mekanik özellikler	Kaynak yöntemlerinin taşıt teknolojilerindeki yeri iyi bilinmektedir ve üretim hızını ve ürün kalitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Yüksek tokluk, yüksek mukavemet ve iyi işlenebilirlik gerektiren kaynaklı metalik yapılar için çok önemlidir. Ancak, kaynaklarda tokluğun ve güvenilirliğin azalması gibi zorluklar genel kaliteyi etkilemektedir. Bu çalışma, özellikle St-37 ve Strenx-960 çelikleri olmak üzere farklı metallerin kaynak dikişi kalitesini, ZrO ₂ ve Al ₂ O ₃ akıları ile aktif tungsten inert gaz (A-TIG) kaynak yöntemini kullanarak iyileştirmeye odaklanmıştır. Deneysel sonuçlar, ZrO ₂ akısının kullanılmasının 494,8 HV sertlik, 1298 MPa çekme dayanımı ve 113 J/cm ² darbe enerjisi ile en yüksek mekanik performansı sağladığını göstermiştir. Bu bulgular, kaynak dikişindeki ve Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)'de ki kusurları en aza indirerek mekanik özelliklerde tutarlılığı sağlayan ZrO ₂ 'nin üstün yapışma özelliğini ve kristal yapısını vurgulamaktadır. Çalışma, ZrO ₂ akısının kaynaklı bağlantıların mekanik bütünlüğünü önemli ölçüde artırdığı ve araç üretimi için potansiyel faydalar sağladığı sonucuna varmıştır.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 02.09.2024

Kabul Tarihi : 23.01.2025

* Sorumlu yazar: fahrisarac@sdu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1542071>

Research Article

Submission Date : 02.09.2024

Accepted Date : 23.01.2025

1. Introduction

Welding joints play a critical role in various industrial sectors, including shipbuilding, pressure vessel manufacturing, railways, crane production, and agriculture (Korkmaz, Çetin, Adar, and Orak, 2020; Vidyarthi and Sivateja, 2020; Singh and Khanna, 2021).

The process of welding joins two metals, whether similar or dissimilar, using heat and/or pressure, and the most common methods include submerged arc, gas-submerged arc (TIG, MIG, and MAG). These methods allow joining parts that experience significant mechanical stresses in their applications using high-strength materials (Akgün, Buran and Sarac, 2023;



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Vidhyarthi and Dwivedi, 2016; Sharma and Dwivedi, 2021a). However, using high-strength materials can increase production costs and present challenges in material acquisition.

Steels are widely used in industries ranging from construction to healthcare due to their availability, cost-effectiveness, and customizable mechanical properties achieved through alloying and heat treatment. The combination of different steel types is essential in applications where a balance of mechanical properties, such as strength, wear resistance, and workability, is needed (e.g., in machine elements and structural components). However, joining different steels poses challenges, including potential welding defects such as pores, insufficient melting, penetration issues, distortion, axial misalignment, cracks, and weld foaming (Vijay, Mohanasundaram, Ramkumar, Kim, Tugriumbano, and Go, 2020; Sharma and Dwivedi, 2021b).

Examples of alloy sources used were examined to prevent the increase in costs. In the study of İpekoğlu, Küçükömeroğlu, Aktarer, Sekban, and Çam (2018), the mechanical properties and changes in the microstructure of St-37/St52 different low carbon steels were investigated by friction stir welding (FSW) welding method, while Kulkarni, Dwivedi and Vasudevan (2018) investigated the effects of different steel combinations consisting of 8 mm thick sheets of modified 9Cr-1Mo (P91) steel and 2.25Cr-1Mo (P22) steel welded by active flux TIG welding method on the weld seam geometry under different gas flows such as SiO₂, TiO₂, Cr₂O₃, MoO₃ and CuO, and the integrity of the weld joint made with MoO₃ flux, metallurgical and mechanical properties after welded and post-weld heat treatment (750°C and 2 hours) method. Adar (2019) investigated the weldability of Hardox-500 and St-52 steels by robotic arc welding method at different current and voltage values. Ahola, Lipiäinen, Riski, Koskimäki, Pyörret, and Björk (2023) compared the fatigue strength improvement of shot peened and clean blast welded joints by considering butt welded and fillet welded components, fatigue tests of joints under post-weld process conditions on TIG clad and HFMI processed S355, S700 and S1100 fillet welded specimens in their study. Güzey and Irsel (2023) investigated the microstructural and mechanical aspects of joining high-temperature and pressure-resistant P355GH and austenitic stainless 316L steels by the Tungsten Inert Gas (TIG) welding method.

The motivation for combining St-37, a general-purpose low-carbon steel, with Strenx-960, a high-strength structural steel, lies in leveraging the complementary properties of these materials. St-37 offers good ductility and ease of processing, while Strenx-960 provides exceptional strength and toughness. Combining these steels aims to achieve a weld joint that balances ductility

and strength, meeting the stringent requirements of various industrial applications. Despite the potential advantages, no comprehensive study has examined welded joints' microstructural and mechanical behaviour between Strenx-960 and St-37 using A-TIG welding with ZrO₂ and Al₂O₃ fluxes (Teker, Yılmaz ve Karakurt, 2018; Tümer, Mert and Karahan, 2020; Aras and Ertan, 2024). This study seeks to fill that gap, focusing on how these fluxes influence weld quality, mechanical performance, and structural properties.

The use of metal oxide powders such as ZrO₂ and Al₂O₃ in A-TIG welding has been shown to enhance penetration depth, minimize distortion, and improve overall weld quality. These materials were selected due to their high adhesion and crystalline structures, contributing to superior mechanical properties in the welded joint (Vidhyarthi and Dwivedi, 2016; Singh and Khanna, 2021; Afzali and Asghari, 2022). This study aims to determine the impact of ZrO₂ and Al₂O₃ fluxes on the weld zone mechanics and structure of Strenx-960 and St-37, thus providing valuable insights for industrial applications that demand high-quality welded joints.

2. Material and methods

2.1. Material

Heray Filtration and Water Technologies Inc. provided Strenx-960 and St-37 materials, each 8 mm thick. Additionally, Al₂O₃ and ZrO₂ metal oxide powders of sub-1 micron size were purchased from Sigma Aldrich. The chemical compositions of the materials provided by the supplier are outlined in Table 1. Each plate to be welded was 100 mm × 100 mm × 8 mm.

Table 1. Chemical Composition (in wt. %)

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al
St-37	Bal.	0.11	0.03	0.56	0.01	0.01	-
Strenx-960	Bal.	0.18	0.5	1.7	0.02	0.01	0.02

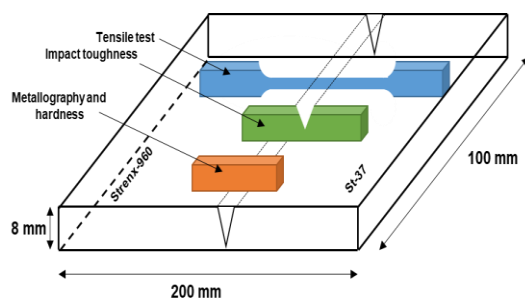
2.2. Welding Step

The surfaces of St-37 and Strenx-960 steels were smoothed using 800 mesh sandpaper. Sub-1 micron 10-gram weight Al₂O₃ and ZrO₂ powders were mixed with 32 ml of ethanol and then applied to the welding interface. The welding process was initiated after the ethanol evaporated for 1 hour.

The welding parameters were set as follows: 2 mm arc height, 4 mm/s arc speed, and welding current values of 120A and 160A (Singh and Khanna, 2021). Two plates were prepared for each parameter set and classified according to the test parameters in Table 2, which provides details of the test samples' classification.

Table 2. Sample Classifications

Sample Code	A-TIG Procedure	Welding Current
A	No flux	120A
B	No flux	160A
C	ZrO ₂ flux	120A
D	ZrO ₂ flux	160A
E	Al ₂ O ₃ flux	120A
F	Al ₂ O ₃ flux	160A



(a)



(b)

Figure 1. (a) Dimensions of Test Samples to be Cut with a Water Jet, (b) Prepared Samples for Tensile Test.

2.3. Characterization

All samples were subjected to standard metallographic procedures, including grinding (80 mesh to 1200 mesh), polishing, and etching. Both stereo (Zeiss Stemi 508 model) and optical (Olympus BX51TRF-6 model) microscopes captured images of the weld area and surrounding grain structures.

The mechanical properties of the weld region were evaluated through microhardness, tensile, and Charpy impact toughness analyses. Vickers microhardness was measured on the weld cross-section using a 200 g load for a 10-second dwell time, following the ASTM E92-16 standard. Measurements were taken at 10 mm intervals using a microhardness tester (VH1 MD, Make: Chennai Metco Economet). Each sample was tested at five points, and an average value was calculated to compare them. Tensile tests were operated on transverse weld specimens prepared according to ASTM E-8 standard using an INSTRON 5980 tensile testing machine at a 1 mm/min speed. The Charpy impact toughness test was performed on specimens with dimensions of 55 mm × 10 mm × 5 mm with a V-notch machined in the middle of the sample according to the ASTM E370 standard. Five samples were prepared for each tensile and Charpy impact toughness test measurement set. Scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze the fractured surfaces and investigate the fracture modes during the tensile tests. This study complies with research and publication ethics.

3. Results

The stereo-microscope images in Figure 2 show the entire weld area of each sample. It was observed that the weld connection of the samples without flux and with Al₂O₃ flux was not sufficiently formed, resulting in weld gaps (weld groove, colored with blue circle). This was likely due to insufficient welding current. Conversely, the weld connection of the ZrO₂ flux sample showed no surface defects. Furthermore, the HAZ region exhibited a homogeneous and flawless internal structure.

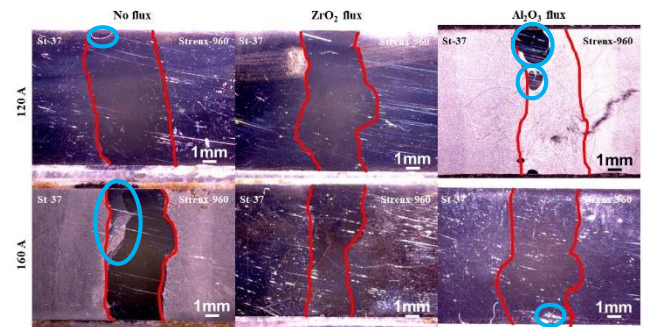


Figure 2. The Stereomicroscope Images Show the Welding Region Located Between The Two Red Lines

In Figure 3, the optical microscope images of Strenx960, St-37, and the HAZ region show that the internal structure of the St-37 material has a tightly lamellar pearlite phase. On the other hand, the Strenx-960 material displays the presence of the martensite structure. Despite similar internal structures in all samples, the distinct mechanical properties of both materials clearly and decisively differentiate the transition line.

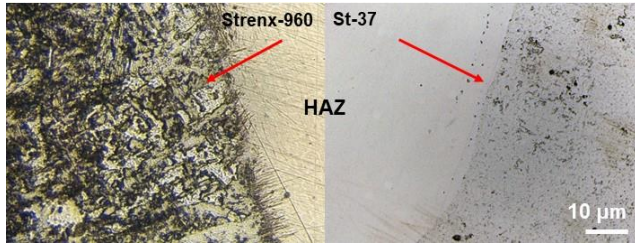


Figure 3. Optical Microscope Images of Strenx-960 and St-37 After Welding

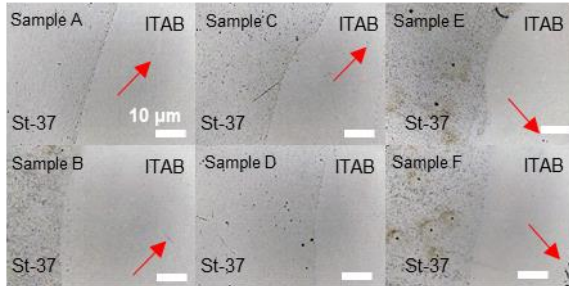


Figure 4. Optical Microscope Images of All Samples Showing Welding Grooves

Figure 4 presents optical microscope images of the welding transition zones across all samples. The weld grooves are indicated as points in the areas marked by the red arrows. Each sample was imaged at the same magnification, with a scale bar of 10 μm accompanying each image. A closer examination reveals that the transition zones from the weld area to the St-37 material are clearly defined. Particularly noteworthy is the flawless surface formation observed in Sample D.

In Figure 5, hardness values were measured at five different horizontal points of each sample. During each measurement, hardness values were taken from 5 points perpendicular to the determined point, and average hardness values were calculated. Standard deviation is less than 10 HV for each set of samples. Upon examining the hardness test measurement results, it was observed that both St-37 (310 HV) and Strenx-960 (360 HV) had higher average hardness values than the weld area. This is contrary to the general expectation in the literature, which suggests that the hardness of the weld area would be higher than that of two different metals. However, in this study, the region's toughness value decrease can be explained by the high hardness values of both main materials and the high heat input to the weld area (Adar, M., 2019).

Furthermore, when the graph is examined, it is evident that hardness significantly decreases in the absence of flux materials. In contrast, the hardness values improve or increase in the presence of Al_2O_3 and ZrO_2 flux materials, respectively. This observation indicates a direct relationship between the internal structure and the adhesion effect (Afzali and Asghari, 2022).

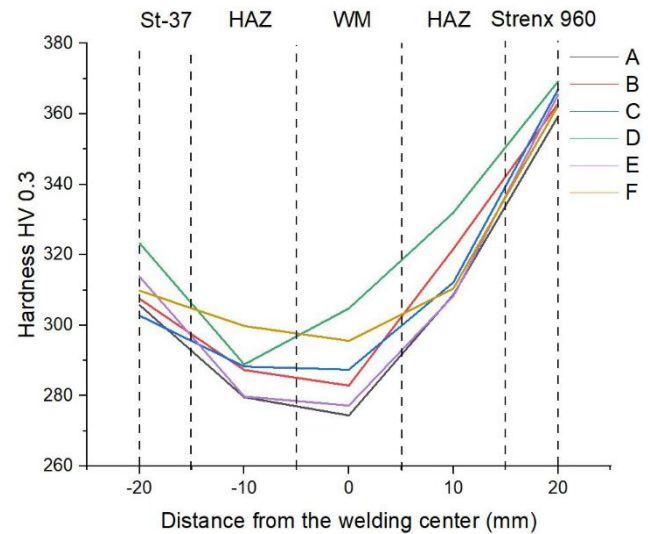


Figure 5. The Vickers Microhardness Measurement (HV 0.3) Demonstrates the Variance in Hardness Throughout the Welding Zone.

Five different materials were prepared from each set of samples in the tensile, and Charpy impact tests were performed on all samples. The average values of the experiment involved preparing five different materials from each set of samples for tensile and Charpy impact tests. The average values of the measurements were calculated and shown in Figure 6. Upon examining the results of the tests, it was noted that the values were very similar. It was observed in all experiments that the deformation occurred within the weld and heat-affected zone (HAZ) region. This suggests that the weld seam quality was consistent across all samples. However, it was also noted that the mechanical properties of the ZrO_2 fluxed materials exhibited a more ductile behavior than the other samples.

In particular, the impact energy increased from 60J/cm² to 113J/cm², and the tensile strength increased by 40MPa compared to the non-flux welded materials. The measurements were calculated and shown in Figure 6. When the results of the tensile and Charpy tests were examined, it was seen that the values were very close to each other. In all experiments, it was determined that the deformation occurred within the weld and HAZ region. This situation shows that the weld seam quality was obtained at similar values in each sample. However, it can still be said that the mechanical properties of ZrO_2 fluxed materials exhibited a more ductile behavior compared to other samples. Especially when compared to no flux welded materials, it was observed that the impact energy increased from 60J/cm² to 113J/cm², and the tensile strength increased by 40MPa.

Moreover, the observed low percentage elongation values in Samples A, B, and E can be primarily linked to factors that affect the mechanical properties of the

welded joints. Samples A and B were subjected to welding processes that did not utilize any flux material. This omission may have resulted in inadequate adhesion in the weld region, leading to the development of defects such as pores. While Sample E employed Al_2O_3 flux, the strong adhesion afforded by ZrO_2 , coupled with the absence of a crystal structure, may have adversely affected the mechanical integrity of the weld bead. In the cases of Samples A and B, the lack of flux contributed to reductions in hardness and strength within the weld area, ultimately resulting in low elongation values. Additionally, the effectiveness of Al_2O_3 flux in Sample E was inferior to that of ZrO_2 , which explains the persistently lower percentage elongation values compared to the other samples. This phenomenon can be attributed to the distinct structural properties of the various fluxes and their respective impacts on the weld area.

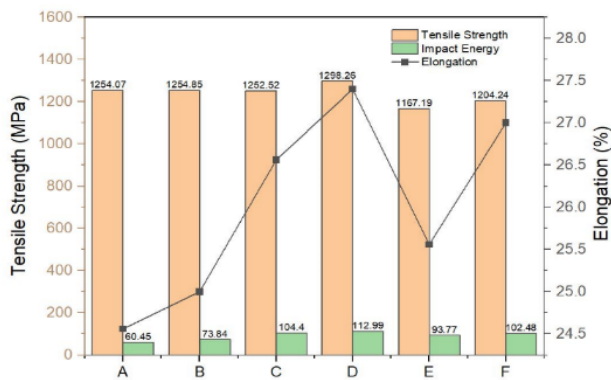


Figure 6. Mechanical Properties (Tensile and Charpy Impact) of All Samples After the Welding Process

In Figure 7, SEM was used to capture cross-sectional area images of the fracture surfaces following the tensile test at 3000x magnification for 10µm. A typical ductile shear fracture mechanism exhibits a cup-and-cone fracture morphology when examining the images. The pattern and size distribution of the pits on the fracture surface are related to the distribution of martensite particles. The minor smooth background on the No-flux fracture surfaces reflects the void nucleation in the fibrous martensite structures (Avramovic-Cingara, Saleh, Jain and Wilkinson, 2009). The different pit sizes seen in the ZrO_2 and Al_2O_3 flux samples reveal the deformation of the ferrite at the final stress moment. This observation caused several large voids due to the significant plastic deformation of the sample before rupture.

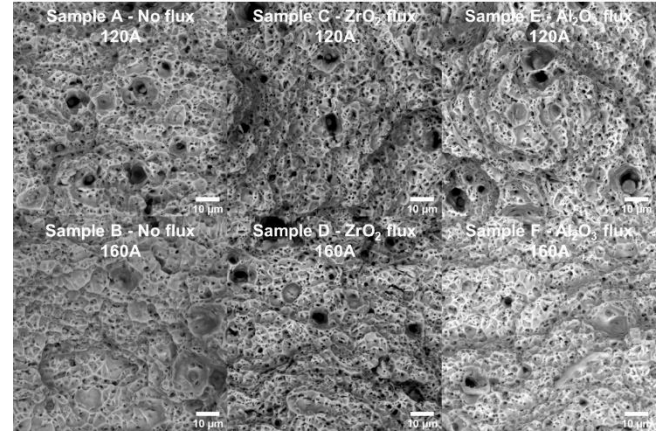


Figure 7. Cross-section Image of Fractured Surfaces on the Welding Zone for All Samples After Tensile Test

4. Conclusions

This study comprehensively investigated the welding of high-strength and high-hardness structural steel Strenx-960 and low-carbon general-purpose steel St-37 using different flux materials (ZrO_2 and Al_2O_3) and variable current conditions using the A-TIG welding method.

When ZrO_2 flux was used with 160A welding current, the average tensile strength was measured as 1298 MPa, impact strength as 113 J/cm², and hardness as 494.8 HV. These results provided the highest mechanical performance compared to other samples and revealed the positive effect of ZrO_2 flux on weld quality. The high adhesion and crystal structure of ZrO_2 minimized the defects in the weld bead and heat-affected zone (HAZ). They increased the homogeneity in the microstructure, thus ensuring consistent mechanical properties. In welding processes using Al_2O_3 flux, tensile strength remained around 1220 MPa and impact strength around 85 J/cm². Although these values were lower than ZrO_2 , they provided better results than those without flux. This situation shows the limited effect of the crystal and adhesion properties of Al_2O_3 . Samples without flux (A and B) showed low values, such as tensile strength of 1100 MPa and impact strength of 60 J/cm². This situation shows that insufficient adhesion and welding defects occurred in the weld area due to the lack of flux and insufficient mechanical properties. These qualitative differences observed in the samples using flux emphasize the importance of selecting the suitable flux material to obtain the desired welding properties. ZrO_2 flux has effectively created durable welded joints that can be used in the automotive and heavy machinery industries, primarily by increasing mechanical properties such as ductility and toughness.

In conclusion, using ZrO_2 flux in the A-TIG welding process significantly improved the mechanical and microstructural quality of welds between St-37 and Strenx-960 steels. These findings provide practical

information for projects requiring robust, high-performance welded joints in industrial applications.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Scientific Research Fund for the Suleyman Demirel University (FYL-2024-9283). The authors are grateful for all this support.

Contributions of the Researchers

In this study, Emre KASIM contributed to the literature review, methodology, test analysis, and manuscript writing; Mehmet Fahri SARAÇ contributed to the conceptualization, manuscript writing, revision, and data evaluation; and İlyas GENÇ contributed to test execution and material procurement.

Conflict of Interest

The authors have no competing interests relevant to this article's content.

References

- Adar, M. (2019). Investigation of Weldability of Hardox-500 and St-52 Steel by Mechanical Tests and Statistical Methods, Karabük University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, M.Sc. Thesis, September 2019, Karabük.
- Afzali, M., and Asghari, V. (2022). Study of the effect of nano ZrO₂ and TiO₂ and rotation speed on friction behavior of rotary friction welding of HIPS and PP, *Functional Composites and Structures*, 4, 015002. <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ac407d>
- Ahola, A., Lipiäinen, K., Riski, J., Koskimäki, M., Pyörret, J., Björk, T. (2023). Fatigue Strength Of Shot-Peened As-Welded Joints And Post-Weld-Treated And Subsequently Clean-Blasted Fillet Weld Joints, *Welding in the World*, 67, 1559–1574. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01498-3>
- Akgün, G., Buran, D., Sarac, M.F. (2023). Investigation of Microstructure and Wear Behaviors of AZ91 Alloy Under Different Heat Treatment, *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 16, 516-527. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.1254273>
- Aras, S. and Ertan, R. (2024). Studying the Strength of Dissimilar Joints of AISI 430 and 301 Stainless Steel Welded at Different Welding Parameters, *Materials and Technology*, 58, 121-127. <https://doi.org/10.17222/mit.2023.1054>
- Avramovic-Cingara, G., Saleh, Ch.A.R., Jain, M.K., Wilkinson, D.S. (2009). Void Nucleation and Growth in Dual-Phase Steel 600 during Uniaxial Tensile Testing, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40, 3117-3127. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0030-z>
- Güzey, B.N. and Irsel, G. (2023). Investigation of Mechanical and Microstructural Properties in Joining Dissimilar P355GH and Stainless 316L Steels by TIG Welding Process, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 205, 104965. <https://doi.org/10.1016/j.iipvp.2023.104965>
- İpekoğlu, G., Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S.M., Sekban, D.M., Çam, G. (2019). Investigation of microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar St37/St52 joints, *Materials Research Express*, 6, 046537. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aafb9f>
- Korkmaz, Ş., Çetin, M.H., Adar, M., Orak, A. (2020). Investigation of Tensile Strength and Hardness Behaviour of Hardox500 – St52 Specimen Joined by GMAW Method, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8 (2), 300-317. <https://doi.org/10.36306/konjes.610889>
- Kulkarni, A., Dwivedi, D.K., Vasudevan, M. (2018). Study Of Mechanism, Microstructure And Mechanical Properties Of Activated Flux TIG Welded P91 Steel-P22 Steel Dissimilar Metal Joint, *Materials Science And Engineering: A*, 731, 309-323. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.054>
- Sharma, P. and Dwivedi, D.K. (2021a). A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes*, 44, 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.06.003>
- Sharma, P. and Dwivedi, D.K. (2021b). Wire-feed Assisted A-TIG Welding of Dissimilar Steels, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21, 81. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00235-1>
- Singh, S.R., Khanna, P. (2021). A-TIG (activated flux tungsten inert gas) welding:- A review, *Materials Today: Proceedings*, 44(1), 808-820. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.712>
- Teker, T., Yılmaz, S.O., Karakurt, E.M. (2018). Effect of different rotational speeds on mechanical and metallurgical properties of friction welded dissimilar steels, *Materials Testing*, 60, 135-141. <https://doi.org/10.3139/120.111135>
- Tümer, M., Mert, T., Karahan, T. (2020). Investigation of microstructure, mechanical, and corrosion behavior of nickel-based alloy 625/duplex stainless steel UNS

S32205 dissimilar weldments using ERNiCrMo-3 filler metal, *Welding in the World*, 65, 171-182.
<https://doi.org/10.1007/s40194-020-01011-0>

Vidyarthi, R.S. and Dwivedi, D.K. (2016). Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration, *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 211-228.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.012>

Vidyarthi, R.S. and Sivateja, P. (2020). Influence of activating flux tungsten inert gas welding on mechanical and metallurgical properties of the mild steel, *Materials Today: Proceedings*, 28(2), 977-981.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.33>

Vijay, S.J., Mohanasundaram, S., Ramkumar, P., Kim, H.G., Tugriumubano, A., Go, S.H. (2020). Experimental Investigations on Activated-TIG Welding of Inconel 625 and AISI 304 Alloys, *Advances in Materials and Manufacturing Engineering*, 311-317.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-1307-7_34

FRACTURE RESISTANCE AND SELF-HEALING POTENTIAL OF VERY THIN ASPHALT OVERLAY ENHANCED BY MICROWAVE HEATING

Ezgi EREN^{1*}, Jan VALENTIN², Peter GALLO³, Perviz AHMEDZADE⁴

¹ Department of Civil Engineering, Adana Alparslan Turkes Science and Technology University, Adana/ Turkey

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-8129-8659>

² Department of Road Structures, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University, Prague, Czech Republic

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-9155-1921>

³ Department of Road Structures, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University, Prague, Czech Republic,

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-7794-2176>

⁴ Department of Civil Engineering, Ege University, Izmir, Turkey

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-8348-5901>

Keywords	Abstract
Self-healing Fracture resistance Microwave heating Very-thin asphalt overlay SCB test	<i>Very-thin asphalt overlay mixtures require a careful balance of competing demands, such as enhancing skid resistance, reducing noise, and improving rutting resistance, due to their reduced thickness. Achieving this balance involves reducing the nominal maximum aggregate size (NMAS) and incorporating coarser aggregate gradations. This design complexity is particularly critical for semi-dense graded very-thin overlays, which are more susceptible to cracking. In this context, investigating the healing potential of very-thin asphalt overlays through microwave heating offers a promising opportunity to extend pavement life while minimizing economic and environmental impacts. This study investigates and compares the cracking resistance and self-healing capabilities of two mixtures by applying Fracture-Healing-Fracture (FHF) cycles using Semi-Circular Bending (SCB) testing under microwave heating. The mixtures examined include a semi-dense aggregate gradation (BBTM8) designed for very-thin overlays, and a dense-graded aggregate mixture (ACL 16+) intended for binder courses and containing 50% reclaimed asphalt pavement (RAP). As a result, the ACL mixture exhibited a fracture toughness (KIC) value of 37.1 N/mm^{3/2}, attributed to its denser gradation, larger NMAS, higher stiffness, and greater RAP content. In contrast, the initial KIC value of the BBTM8 mixture was 18.4 N/mm^{3/2}. However, following microwave heating, the KIC value of the BBTM8 mixture increased significantly and approached that of the ACL mixture, aided by its higher air void content. The FHF cycle results revealed that the BBTM8 mixture demonstrated higher fracture resistance and more efficient recovery performance than the ACL mixture.</i>

MİKRODALGA ISITMA İLE GELİŞTİRİLEN ÇOK İNCE ASFALT KAPLAMANIN KIRILMA DİRENCİ VE KENDİ KENDİNİ İYİLEŞTİRME POTANSİYELİ

Anahtar Kelimeler	Öz
Kendi kendini iyileştirme Kırılma direnci Mikrodalga ısıtma Çok ince asfalt kaplama SCB testi	<i>Çok ince asfalt kaplamalar, azaltılmış kalınlıkları nedeniyle kayma direncinin artırılması, gürültünün azaltılması ve tekerlek izi direncinin iyileştirilmesi gibi birbirleriyle çelişen ihtiyaçların dikkatli bir şekilde dengelenmesini gerektirir. Bu dengenin sağlanması, nominal maksimum agrega boyutunun (NMAS) küçültülmesini ve daha kaba agrega derecelendirmelerinin kullanılmasını içerir. Bu tasarım karmaşıklığı, çatlamaya daha yatkın olan yarı yoğun dereceli çok ince kaplamalar için özellikle kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, çok ince asfalt kaplamaların mikrodalga ısıtma yoluyla iyileşme potansiyelinin araştırılması, ekonomik ve çevresel etkileri en aza indirirken kaplama ömrünü uzatmak için umut verici bir fırsat sunmaktadır. Bu çalışma, mikrodalga ısıtma altında Yarım Dairesel Eğilme (SCB) testi kullanılarak uygulanan Kırılma-İyileşme-Kırılma (FHF) döngüleri aracılığıyla iki farklı karışımın çatlama direnci ve kendi kendini iyileştirme yeteneklerini incelemekte ve karşılaştırmaktadır. İncelenen karışımlar; çok ince kaplamalar için tasarlanmış yarı yoğun agrega derecelendirmesi (BBTM8) ve %50 geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) içeren, bağlayıcı tabaka için kullanılan yoğun dereceli agrega karışımıdır (ACL 16+). Sonuç olarak, ACL karışımı daha yoğun derecelendirme yapısı, daha büyük NMAS değeri, daha</i>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

yüksek sertliği ve daha fazla RAP içeriği sayesinde 37,1 N/mm^{3/2} değerinde kırılma tokluğu (KIC) sergilemiştir. Buna karşılık, BBTM8 karışımının başlangıçtaki KIC değeri 18,4 N/mm^{3/2} olarak ölçülmüştür. Ancak mikrodalga ısıtma sonrasında, daha yüksek hava boşluğu içeriğinin de katkısıyla BBTM8 karışımının KIC değeri önemli ölçüde artarak ACL karışımının seviyesine yaklaşmıştır. FHF döngüsü sonuçları, BBTM8 karışımının ACL karışımına kıyasla daha yüksek kırılma direnci ve daha etkin bir iyileşme performansı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 11.11.2024

Kabul Tarihi : 03.03.2025

Research Article

Submission Date : 11.11.2024

Accepted Date : 03.03.2025

* Sorumlu yazar: eeren@atu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1582913>

1. Introduction

Concerns about climate change problems caused by greenhouse gas (GHG) emissions have gained importance as awareness about the impact of human activities on the environment has grown. Research conducted by the World Bank revealed that emissions from the transportation sector account for 14% of the global total, with 72% of these emissions generated by road construction, maintenance, rehabilitation, and operation (World Bank, 2010). Road construction, production of raw materials, road operation, maintenance during the service life, and rehabilitation all result in significant GHG emissions, as noted by (Fernández-Sánchez et al., 2015). In the USA, road construction, maintenance, and rehabilitation contribute to 28% of GHG emissions (Melanta et al., 2013). Maintenance is the second largest source of GHG emissions (Strippel, 2001). Therefore, using more sustainable techniques, such as microwave heating to trigger asphalt mix self-healing ability, can reduce gas emissions by minimizing maintenance and rehabilitation activities.

The self-healing mechanism needs activation energy to wet the crack interface, with the energy provided, the necessary molecular diffusion takes place to close the cracks. The most widely recognized molecular diffusion model for polymer materials was introduced by Wool and O'Connor (1981). Subsequently, based on this model, researchers have further investigated the two-stage self-healing process of bitumen (D. Sun et al., 2017; G. Sun et al., 2020):

- The first stage is wetting, that is, molecular diffusion, which is expressed as the closure of the microcrack formed in the asphalt pavement.
- The second stage is the recovery of asphalt pavement strength due to diffusion and random distribution of bitumen molecules from one crack surface to the other.

The macroscopic healing observed at a specific temperature T and time t includes the instantaneous

strength gain dependent on temperature and the rate of strength recovery that varies with temperature. Healing temperature is one of the most effective parameters on the healing ability of asphalt. However, determining the optimum healing temperature to ensure the healing ability of bituminous binder and asphalt mixture is a difficult and complex task (Tang et al., 2016).

To determine the best self-healing temperature for bitumen, the viscosity-frequency scanning test was performed in the Dynamic Shear Rheometer (DSR) (Tang et al., 2016). The study found that the optimal self-healing temperature was the softening point of the bitumen, based on the results from a Fatigue-Healing-Fatigue test. However, Xiang et al. (2019) conducted a Fatigue-Healing-Fatigue test using the time sweep mode of DSR and determined the optimal healing temperature for PEN70 matrix base bitumen to be 47.6 °C, which is a little higher than the softening point. D. Sun et al. (2018) also found that the self-healing ability of bitumen was higher at the phase transition temperature, where the molecular diffusion rate and range were more prominent. Based on the Fatigue-Healing-Fatigue and Differential Scanning Calorimetry results of these studies, the optimal healing temperature range is between 40.3 °C and 48.7 °C. He et al. (2022) reported that healing time decreases as temperature increases, particularly when it comes closer the glass transition temperature of 300 K (27 °C). For example, Xiang et al. (2019) found that the optimal healing temperature for base bitumen was 47.6 °C, while the optimal temperature for 4.5% linear styrene-butadiene-styrene (SBS) modified bitumen was 76.7 °C. Yoo et al. (2019) investigated the effect of carbon-based materials on the self-healing properties of asphalt pavement, and determined the optimal heating temperatures for carbon fiber, carbon nanotube, and graphite nanofiber to be 108 °C, 105 °C, and 104 °C, respectively. Although various suggestions exist regarding healing temperatures in studies on bituminous binders, there is a general consensus on the optimal healing temperature in research focused on the self-healing ability of asphalt mixtures. The widely accepted view is that asphalt mixtures exhibit the best healing performance at 85 °C

(Liu, Schlangen, van de Ven, et al., 2012; Liu, Schlangen, and Van De Ven, 2012; W. Liu et al., 2024). Finally, we should keep the heating temperature as low as possible to prevent bitumen aging acceleration.

Self-healing studies on asphalt mixtures have gained significant attention in recent years, particularly due to their potential to enhance the service life and performance of pavement structures. These studies utilize various heating methods, such as induction heating and microwave heating, based on the Fracture-Healing-Fracture (FHF) test cycle and semi-circular bending (SCB) tests. Research indicates that the fracture resistance and recovery ability of asphalt mixtures can vary significantly depending on the types and gradations of aggregates used. This highlights the need for a comprehensive understanding of how different materials interact within the mixture. For instance, Wang et al. (2022) investigated the microwave heating-based self-healing ability of asphalt mixtures that incorporated both basalt and limestone aggregates using the FHF test. Their findings revealed that microwave heating not only enhanced flexural strength by at least 65% but also improved fatigue resistance by 23%. These improvements underscore the effectiveness of microwave heating as a viable method for enhancing the mechanical properties of asphalt mixtures. Furthermore, the study indicated that both the type and size of the aggregate significantly influenced the microwave heating rate, suggesting that material selection is crucial for optimizing healing performance. In addition to aggregate properties, other factors such as temperature and nominal maximum aggregate size (NMAS) also play a critical role in the healing process. Atakan and Yıldız (2024) observed that a higher degree of aggregate damage during fracture corresponded with a lower healing rate. They explained that the extent of healing is influenced by the increase in cohesive damage and a decrease in adhesive damage as the temperature rises during fracture. Garcia-Gil et al. (2019) further noted that a larger NMAS contributes to increased aggregate damage, emphasizing the importance of careful design in asphalt mixtures.

Very-thin overlay is widely used as a wearing course in various regions, including the EU, China, and the USA, either as a reinforcement layer or as a surface course to mitigate noise. The layer thickness prescribed for the very-thin overlay in the ČSN 73 6121:2023 national technical standard used in the Czech Republic is 20-30 mm. However, very-thin overlay presents unique challenges; it requires a reduction in NMAS while necessitating a coarser grading to enhance skid resistance, noise reduction, and rutting resistance. This conflicting requirement complicates the design process, particularly since open-graded or semi-open-graded very-thin overlays are more susceptible to cracking compared to dense-graded overlays. Recent studies, such as the work of Eren et al. (2024), have investigated

the fracture resistance of waste steel fiber (WSF) reinforced very thin overlay through SCB tests and explored their healing ability via induction heating. Their research highlighted that the healing potential, measured in terms of fracture toughness, diminishes as the stiffness modulus of WSF increases. Yu et al. (2024) investigated the cracking resistance of the designed cold asphalt mixture for basalt fiber reinforced ultra thin overlay according to the SCB test. However, the investigation of fracture resistance and microwave healing ability of ultra-thin overlay is a new and current topic in the literature and further research is needed in this area (Guo et al., 2024).

The self-healing capabilities of asphalt mixtures have been widely studied in the literature, focusing on factors such as the type and content of modifiers, aggregate type and gradation, and heating methods like microwave and induction heating. Despite the advantages of very-thin wearing courses, such as noise reduction and extending the service life of asphalt roads, their limited durability remains a significant challenge within the sustainability framework. To address this, examining and enhancing the self-healing capabilities of very-thin wearing courses has become increasingly important. Developing policies aimed at improving their performance and durability is essential for overcoming these challenges and maximizing their potential benefits. This study investigates and compares the fracture resistance and microwave healing ability of two asphalt mixtures: one with a semi-dense aggregate gradation designed for thin overlays and another with a dense aggregate gradation containing 50% reclaimed asphalt (RA) material used as binder layer in asphalt pavements. The findings aim to provide valuable insights into how different aggregate types and mixture designs especially very-thin-wearing courses influence the self-healing capabilities of asphalt pavements, contributing to more sustainable and durable road infrastructure.

In the following section, a detailed explanation of the materials and production processes utilized in the asphalt mixtures developed for this study is provided. Additionally, the FHF test procedure, which is based on the SCB test used in this research, is outlined to clarify the experimental framework. Experimental results from the SCB tests and FHF cycles are then discussed in relation to the fracture resistance and self-healing potential of the asphalt mixtures, supported by relevant literature. Consequently, the study's key findings are clearly presented in the conclusion section.

2. Materials and Methods

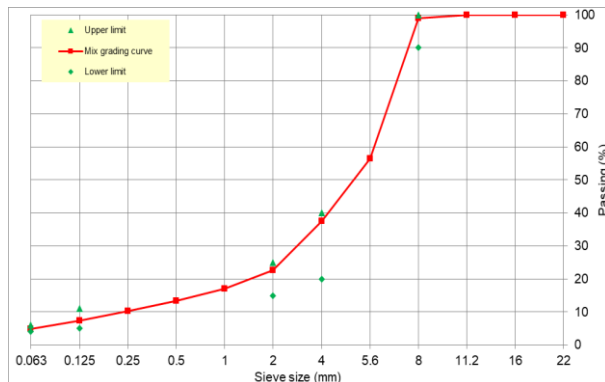
2.1. Materials

In this study, two different hot mix asphalt (HMA) were prepared according to the BBTM8 mixture type and ACL16+50RA mixture type according to the ČSN 73 6121:2023. To do so, the Marshall Design method

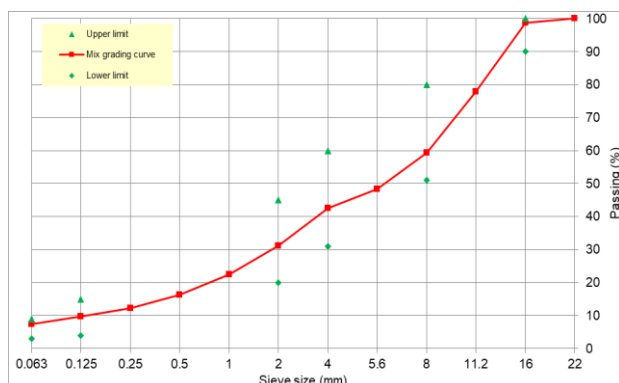
specified in the EN 12697-30 standard was followed in the preparation of asphalt mix samples. For each mix type, 3 Marshall test specimens were prepared for the Marshall Stability test, 6 for the Stiffness Modulus test from which 3 (equivalent to 6 semi-circular specimens) were used for the SCB test.

- BBTM8: for the very-thin wearing layer, a bituminous binder with a penetration grade of 50/70 was obtained from the Litvinov refinery in the Czech Republic. The aggregates used in the mixture were sourced from the Brant quarry, also located in the Czech Republic.
- ACL16+50RA: for the binder layer, a bituminous binder with a penetration grade of 70/100 was sourced from the Litvinov refinery in the Czech Republic. The aggregates used in this mixture were obtained from the Bělice quarry, also in the Czech Republic. Additionally, the binder layer contains 50% RAP.

Figures 1(a) and Figure 1(b) show the grading curves of the mixtures BBTM8 and ACL16+50RA, respectively.



(a)



(b)

Figure 1. Aggregate Gradations Used in the Study (a) BBTM8 (b) ACL16+50RA

2.2. Determination of volumetric and mechanical properties by production of samples

In this study, asphalt mixtures were prepared by compacting specimens with 2x50 blows according to EN 12697-30 standard. The volumetric and mechanical properties of the prepared asphalt mixtures were determined and are presented in Table 1.

Table 1. Detailed of the Volumetric and Mechanical Properties of Asphalt Mixtures

	ACL16+50RA	BBTM8	Standard
Bitumen content (%)	4.2	5.2	ČSN 73 6121:2023
Maximum density (g/cm ³)	2.549	2.544	EN 12697-5
Bulk density (g/cm ³)	2.400	2.178	EN 12697-6
Air void (%)	5.8 (3%- 10%)	14.4 (11%- 15%)	ČSN 73 6121:2023
Marshall Stability (kN)	17.4	6.2	EN 12697-30
Stiffness modulus (MPa)	16093	7974	EN 12697-26

2.3. Semi-circle bending (SCB) test

The SCB test, as standardized in EN 12697-44:2019, is widely recognized for its effectiveness in evaluating the fracture resistance of asphalt pavements under real-world conditions. While the standard specifies conducting the test on 150 mm specimens, previous studies have proposed a modified SCB test suitable for standard Marshall specimens. Based on the procedures outlined in EN 12697-44:2019, this modified protocol is designed to assess the resistance of asphalt mixtures to crack propagation and evaluate their fracture behavior under various conditions (Vackova and Valentin, 2022). Details of the modified test method are provided in Table 2. The principle of this method is the three-point bending of a semi-circular test specimen with a 10 mm notch at the bottom. As shown in Figure 2, a typical SCB sample has a diameter of 100 mm, a notch width of 0.90 ± 0.20 mm, and a notch length of 10 mm. The modified SCB test can be performed at loading speeds of 2.5 mm/min at test temperatures of 0°C, 15°C, and 27°C. In this study, samples were subjected to SCB testing at 15 °C in FHF test cycles and their cracking behavior and healing abilities were investigated at medium temperatures. Bui and Saleh (2021) performed SCB

tests on mixtures including thin wear samples of 150 mm and 100 mm sizes with different loading conditions and test temperatures and showed that the results were consistent and convertible with each other.

Table 2. Modified SCB Test Procedure

Conditions	Modified SCB test
Test temperature	0 °C, 15°C and 27°C
Specimen dimensions	100x50x50 mm
Notch height	10 mm
Loading rate	2.5 mm/min

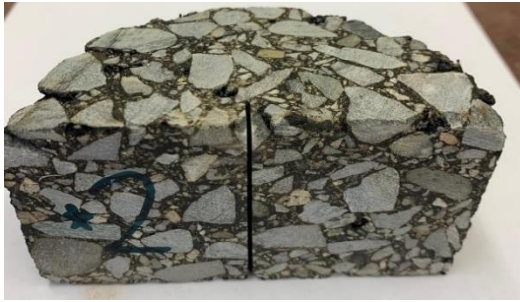


Figure 2. Typical SCB Specimen with 100 mm Length

After the SCB test, the load-deformation curve is obtained. According to the obtained load-deformation curve, the fracture parameters are determined. The fracture parameters can be listed as fracture toughness (K_{IC}), fracture work (W_f), fracture energy (G_f) and flexibility index (FI) and are calculated using the equations given in Equations (1)-(5), respectively (Vackova and Valentin, 2022).

$$K_{IC} = \sigma_{max} Y_1 \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{2rt} \quad (2)$$

$$Y_1 = 4,782 - 1,219 \left(\frac{a}{r} \right) + 0,063 \exp(7,045 \left(\frac{a}{r} \right)) \quad (3)$$

K is the fracture toughness ($N/mm^{1.5}$); σ_{max} is the maximum applied stress (N/mm^2); F_{max} is the maximum applied load (N); a is the notch length (mm); r is the radius of the sample; t is the sample thickness. Y_1 represents the normalized K parameter.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (4)$$

$$FI = A \times \frac{G_f}{|m|} \quad (5)$$

The fracture work W_f is defined as the area under the load-deformation curve. The fracture energy G_f is calculated by dividing the fracture work by the ligament area A_{lig} . The flexibility index (FI) is an index based on the fracture energy G_f divided by the absolute value $|m|$

of the slope of a load-displacement curve at the inflection point of crack propagation phase (post-peak, after F_{max}). A is a scaling factor.

2.4. Fracture Healing Fracture test procedure

Fracture-Healing-Fracture (FHF) test cycles represent a series of testing processes designed to investigate the self-healing capacity of asphalt mixture. The primary objective of this method is to evaluate the effects of repeated heating cycles during the service life and the potential decline in self-healing capacity due to repetitive cracking. To achieve this, a microwave healing procedure is applied after the specimens are fractured using the SCB test. If the nearly separated specimen parts are in contact, the healing is considered successful. Therefore, many studies use wooden, plastic, or steel molds to hold the fractured parts together. Additionally, plastic zip ties are a practical alternative due to their resistance to microwave heating temperatures. In this study, plastic zip ties were used to hold the specimens together.

Based on preliminary laboratory testing, it was determined that the samples needed to be heated for 30 seconds to reach a self-healing temperature 85°C. Therefore, during the FHF test cycles, the samples were heated in the microwave for 30 seconds to heal. Figure 3 shows the process of SCB testing of the FHF test cycle and microwave heating. In this study, the FHF test cycle was conducted five times to assess how aging or service-related damage affects the self-healing capacity of road pavements. Consequently, the microwave healing index (HI) was determined for asphalt mixtures subjected to repeated cracking and healing cycles. The results of the first cycle included both the HI_1-G_f and HI_1-K_{IC} values, while the subsequent evaluations focused on $HI_{i,cycle}-K_{IC}$ over the course of all five cycles. The evaluation parameters were defined Equation (6) and (7) (Zhang et al., 2023).

$$HI_{i,cycle}-K_{IC} = \frac{K_{ICi+1}}{K_{IC1}} \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (6)$$

Where, K_{ICi} is the fracture toughness K_{IC} value in the i -th cycle, K_{IC1} represents the fracture toughness K_{IC} value in the first cycle. $HI_{i,cycle}$ the relative retention of fracture toughness through each cycle, providing insight into the healing efficiency of the asphalt mixtures over multiple cycles. Additionally, HI_1-G_f represents the healing index of fracture energy in the first cycle, where G_{f1} the initial fracture energy before the heating and G_{f2} is second fracture energy after heating in the first cycle.

$$HI_1-G_f = \frac{G_{f2}}{G_{f1}} \quad (7)$$

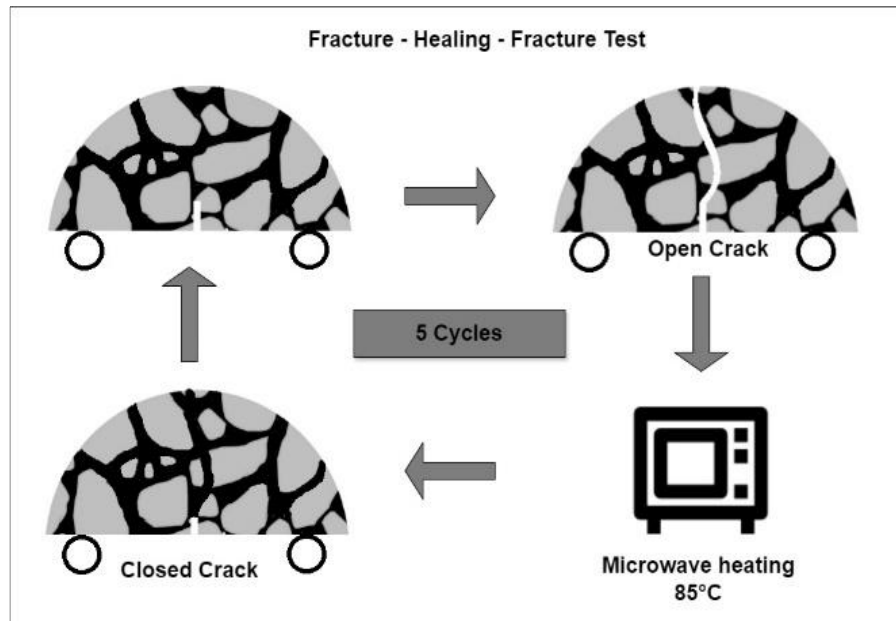


Figure 3. Fracture-Healing-Fracture (FHF) Test Procedure Used in This Study

3. Results and Discussion

3.1. Effect of microwave heating on crack resistance of asphalt mixtures

SCB test was performed to evaluate the crack resistance of asphalt mixtures. An example of the load-displacement curve obtained as a result of the SCB test of ACL16+ and BBTM8 mixtures before and after healing is given in Figure 4.

Before heating, the mixture with semi-dense aggregate gradation and slightly higher bitumen content, designed for the very-fine wearing course, had a significantly lower F_{max} . However, it was observed that this mixture displaced slightly more under load compared to the densely graded ACL16+ mixture with a high RAP content. In addition, before reaching F_{max} , the linear region covering 40-80% of the F_{max} . The linear region represents the elastic deformation of the material. When the slope starts to change, microcracks occur. After F_{max} , macrocrack is developed. For the ACL it is less or nearly invisible because of high RAP content and thus, high stiffness.

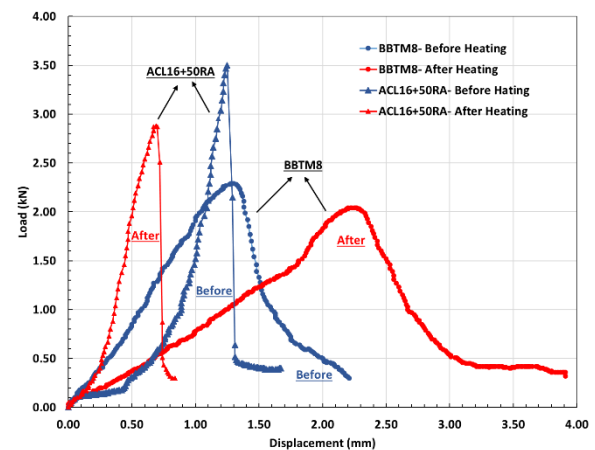


Figure 4. Load-Displacement Curves for Asphalt Mixtures Before and After Microwave Heating

This result indicates the asphalt mixture's effective ability to handle micro cracks. As observed, the ACL16+ mixture exhibits a much more brittle behavior than the BBTM8 mixtures, showing a steep deformation slope under load before the formation of macrocracks. This behavior was further illustrated by the sudden fracture of the ACL16+ mixture blends after reaching F_{max} . Additionally, the ACL mixture reached its maximum deformation capacity much sooner, emphasizing the key difference between the ACL16+ and BBTM8 mixtures. Unlike the ACL16+ mixture, the BBTM8 mixture gradually and steadily reached its maximum deformation capacity under load, despite the propagation of macrocracks that continued to expand. The primary reasons for these results are related to the ACL16+ dense aggregate gradation and high RAP content, enabling them to withstand greater loads but

exhibiting more brittle behavior due to aged bitumen and aggregates from the RAP content. Similarly, BBTM8 mixture contains slightly younger and more bitumen than ACL16+ mixture, and their NMAS value is 8 mm, significantly smaller than that of the ACL16+ mixture. Altogether, these factors enable BBTM8 mixtures to better manage the propagation of micro- and macrocracks, as they have high deformation capacity despite achieving lower maximum load.

According to the load-displacement curves for the mixtures healed through microwave heating, the F_{max} values decreased in both the ACL and BBTM8 mixtures. While the F_{max} required for macrocrack formation decreased for both mixtures, the maximum deformation of BBTM8 mixtures approximately doubled after healing. This indicates that BBTM8 blends exhibit a higher recovery ability in fracture work and energy after healing. In contrast, the deformation capacity of ACL16+ mixture decreased by approximately 50%, showing a much more brittle behavior post-healing due to the reduced deformation capacity. Since fracture toughness is a fracture parameter influenced by F_{max} and the geometric properties of the specimen, a decrease in fracture toughness values is expected in both mixture types following healing as shown in Figure 5.

The pre-healing fracture toughness of the BBTM8 mixture was determined to be $18.4 \text{ N/mm}^{3/2}$, while for the ACL16+ mixture, it was measured at $37.1 \text{ N/mm}^{3/2}$. The dense gradation, high NMAS value, and the presence of RAP in the ACL16+ mixture led to achieving a higher F_{max} , resulting in greater fracture toughness. On the other hand, due to the high air void content of the BBTM8 mixture, the observed F_{max} decreased, leading to a decrease in fracture toughness. However, when examining the $HI_{K_{Ic}}$ values of samples self-healed by microwave, the healing rate for BBTM8 mixtures was found to be 50.63%, whereas, for ACL16+50RA mixtures, it was 19.73%. It can be concluded that the high air voids content in BBTM8 mixtures due to gradation and higher binder content enhances the healing capability. Gómez-Meijide et al. (2016) also demonstrated that porous asphalt, characterized by a higher air void content, exhibits significantly better healing abilities compared to dense asphalt.

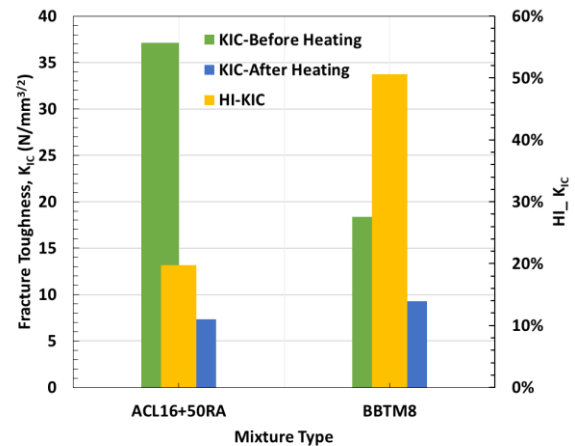


Figure 5. $HI_{K_{Ic}}$ Values of Asphalt Mixtures

To determine the fracture energy, it is first necessary to measure the fracture work. Fracture work represents the area under the load-displacement curve and can be defined as fracture work until F_{max} and total fracture work, measured in Joules (J). The fracture works up to F_{max} and the total fracture work of the BBTM8 mixture, which has a high deformation capacity, are higher than those of the ACL16+ mixture both before and after healing, as clearly shown in Figure 6. As a result, it was determined that the increase in the fracture work with microwave heating after F_{max} was greater than before F_{max} for both ACL16+ and BBTM8 mixtures.

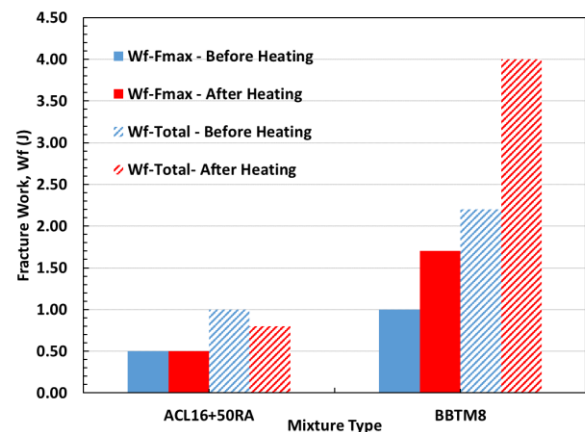


Figure 6. Fracture Work (W_f) of Asphalt Mixtures

Fracture energy results are illustrated in Figure 7 and presented in detail in Figure 8. Fracture energy represents the amount of energy required to create a fracture surface per square meter (Bui and Saleh, 2021). It was found that BBTM8 mixtures had three times the fracture energy of ACL16+ mixture before healing. Similarly, after healing, the recovery in fracture energy was seven times higher in BBTM8 mixture.

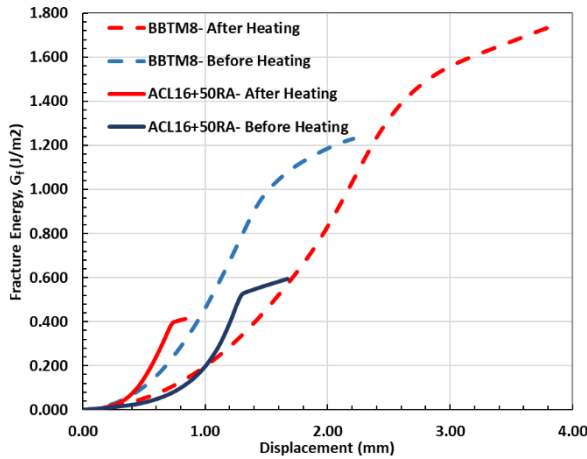


Figure 7. Fracture Energy (Gf) of Asphalt Mixtures

This accounts for the mixture's increased resistance to crack propagation. Therefore, it was concluded that with microwave heating, the fracture energy recovery ability of BBTM8 mixture was significantly higher than that of ACL16+ mixture. As a result, it was determined that more improvement could be observed if healing was performed by microwave heating after the occurrence of macro cracks in very-thin asphalt pavements with semi-dense aggregate gradation.

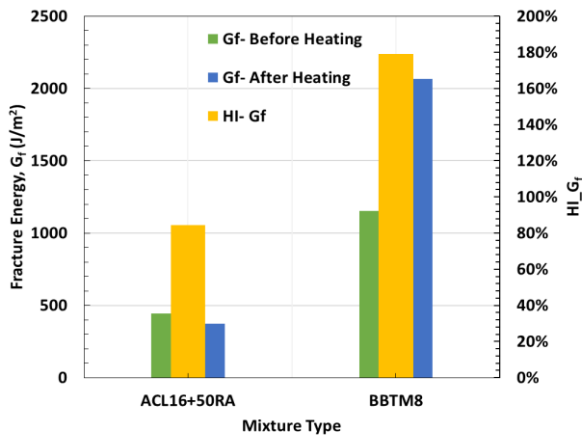


Figure 8. HI_Gf Values of Asphalt Mixtures

Another recently proposed fracture energy-based index for evaluating the cracking resistance of asphalt mixtures is the FI value. A high FI value indicates greater resistance to cracking, reflecting the mixture's fracture behavior during crack propagation. Jiang et al. (2022) demonstrated that FI offers a more effective approach than fracture energy, especially for mixtures containing RAP. They also highlighted that the post-peak FI is strongly influenced by binder properties. As illustrated in Figure 9, the FI value of the BBTM8 mixture increased after healing, whereas it decreased for the ACL16+ mixture. Furthermore, the FI results revealed that the BBTM8 mixture exhibited significantly higher resistance to fracture propagation than the ACL16+ mixture, both before and after healing.

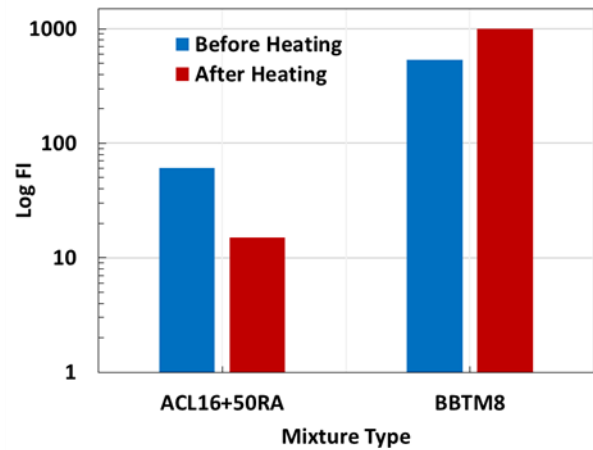


Figure 9. FI Values of Asphalt Mixtures

3.2. Results of the Fracture-Heating-Fracture test cycle

The FHF test is a test cycle consisting of the first fracture with SCB, then self-healing with microwave heating, and a second fracture with SCB. Figure 10 shows images of ACL16+ and BBTM8 samples before and after healing. Figure 11 illustrates the $HI_i K_{IC}$ after the FHF test cycles. In addition, error bars in the Figure 11 indicate the standard error calculated from six independent measurements of the same sample. In BBTM8 mixtures, the healing capacity decreased by 8.94% after five healing cycles. A primary factor contributing to this decline in fracture toughness is the formation of microcracks within the asphalt structure due to repeated fracture cycles, as noted by Chen and Solaimanian (2019). These microcracks weaken the material, making it more susceptible to fracture under mechanical stresses. Thus, it is generally expected that the healing capacity will progressively decrease over successive heating and healing cycles.

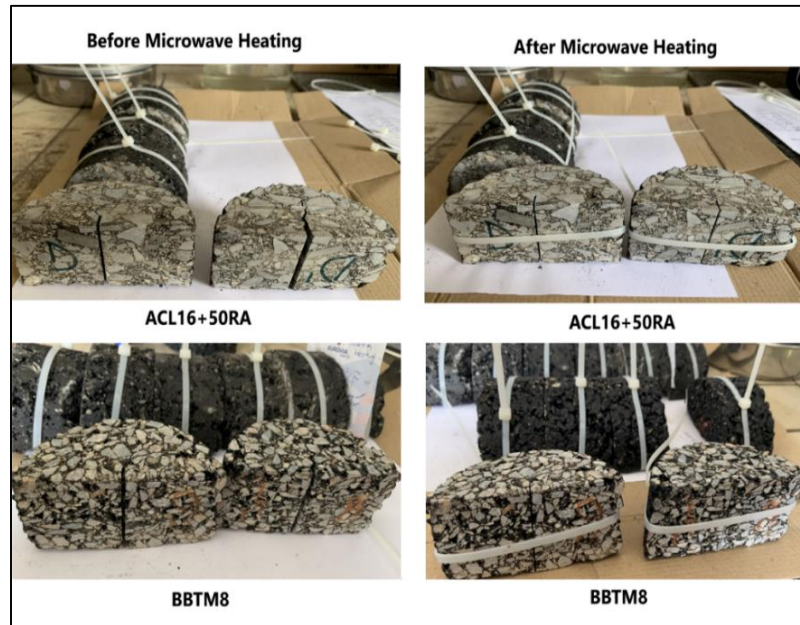
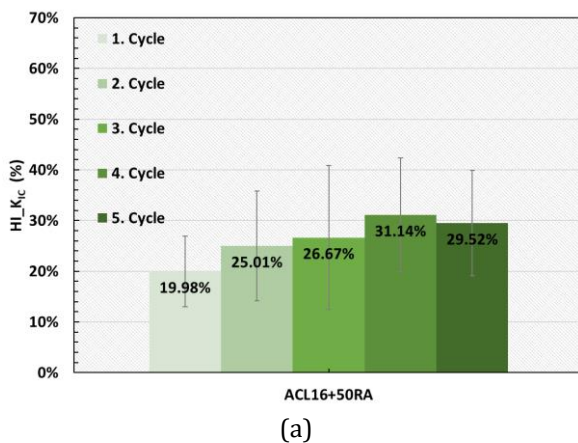
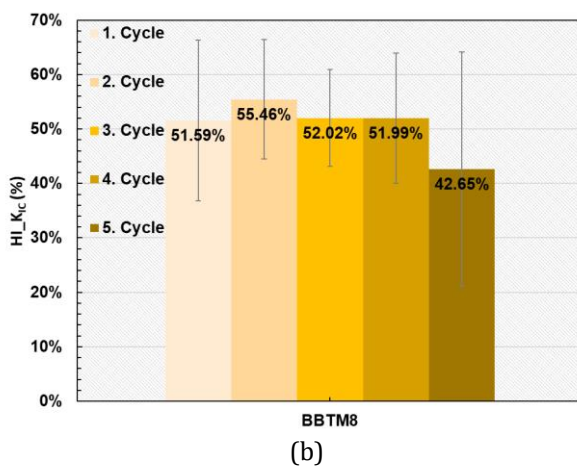


Figure 10. Before and After Microwave Heating



(a)



(b)

Figure 11. HI_KIC Values of Asphalt Mixtures During FHF Cycles (a) ACL16+50RA (b) BBTM8

However, in the ACL16+ mixture, an increase of 9.54% in the healing rate of fracture toughness was observed after repeated cycles. In a study by Yıldız et al. (2020), the FHF test cycle was repeated three times, and samples with significant crack damage showed an increase in fracture toughness alongside aging. This phenomenon was explained by the possible enhancement of the mechanical strength of the asphalt concrete due to changes in the distribution of air voids within the asphalt samples during the microwave heating and healing process. Additionally, it is thought that the aged binder in the ACL16+ mixture may harden further through FHF cycles, potentially providing a marginal contribution to fracture toughness. On the other hand, as the number of FHF test cycles increases, a gradual decline in the healing index in fracture toughness is projected. After the 5th cycle, significantly pronounced reduction is anticipated. Similarly, Wan et al. (2018) conducted four FHF cycles to investigate the healing abilities of ultra-thin asphalt mixtures containing steel slag and steel fibers. The AC-5 mixture, which included steel slag and 3% steel fibers, achieved a HI_KIC of 80% at the end of the first cycle. However, this value decreased to approximately 35% by the end of the fourth cycle.

During the repeated microwave heating process in FHF cycles, the self-healing of asphalt pavements is facilitated by reducing the viscosity of asphalt binders and accelerating capillary flow and molecular diffusion (Gallego et al., 2013). In field applications, microwave heating technology is preferred for both self-healing and deicing processes due to its advantages over traditional methods, including high efficiency, low pollution, energy

savings, and ease of control (Huang et al., 2021; Zhang et al., 2023). However, significant temperature differences may occur within the pavement due to variations in the microwave absorption capacity and heat transfer ability of the aggregate and bitumen components (X. Liu et al., 2024; Zhang et al., 2023). The healing of micro-cracks in asphalt specimens during repeated cycles may vary as a result of these temperature differences. This can be attributed to the substantial influence of temperature on the healing process.

Overall, the healing capacity of BBTM8 mixtures is, on average, 24.28% higher than that of ACL16+ samples across all test cycles. However, based on the experimental work conducted during the FHF test cycles, it is worth noting that the heating temperature of 85°C may be too high for mixtures produced for very-thin wearing courses. In repeated tests, some of the BBTM8 samples heated to 85°C broke down and were discarded. In contrast, this problem was not observed in the ACL16+ samples.

4. Conclusion

Cracking behavior is a significant research topic in fracture mechanics, with the SCB test playing a crucial role in analyzing the fracture properties of asphalt pavements. In this study, SCB test-based FHF test procedure was applied in the scope of the study for the comparative analysis of the fracture behavior and microwave healing ability of very-thin asphalt overlay. In asphalt pavements with increased crack damage over time through FHF test cycles, the damage level of cracks in asphalt pavement directly affects the pavement's healing ability. As the damage level increases, cracks in the asphalt expand and multiply, which can lead to stripping and the formation of deep potholes under repeated loading and adverse environmental conditions. In very-thin asphalt pavements, where stability issues are expected under repeated loading, microwave heating of cracks has the potential to extend pavement life and reduce the use of bituminous binder in asphalt mixtures. This approach could enhance the economic and environmental benefits of very-thin asphalt pavements.

The key conclusions and overall assessment of the research are summarized below.

- The pre-healing fracture toughness of the BBTM8 mixture was measured at 18.4 N/mm^{3/2}, while the ACL16+ mixture exhibited a significantly higher value of 37.1 N/mm^{3/2}.
- The ACL16+ mixture achieved a higher F_{max} due to its dense gradation, higher NMAS, and the presence of RAP, resulting in increased fracture toughness compared to the BBTM8 mixture.

- Microwave healing improved the HI_{KIC} of the BBTM8 mixture by 50.63%, while the ACL16+ mixture resulted in only 19.73% improvement, indicating higher healing efficiency in BBTM8.
- Due to its high air void content (14.4%), the BBTM8 mixture demonstrated greater healing potential, as the voids enhance microwave heating's effectiveness in healing cracks.
- Before and after healing, the fracture work for the BBTM8 mixture, which has high deformation capacity, was consistently higher than for the ACL16+ mixture.
- The BBTM8 mixture had three times the fracture energy of the ACL16+ mixture before healing and achieved seven times the recovery after healing, indicating greater crack propagation stability. Its lower stiffness modulus, higher bitumen content and air voids resulted in a HI_{Gr} of over 100%.
- The FI value, which measures cracking resistance, increased for the BBTM8 mixture after healing but decreased for the ACL16+ mixture, highlighting BBTM8's higher post-healing crack resistance.
- During FHF testing, BBTM8's healing capacity decreased by 8.94% over five cycles due to microcrack formation, while ACL16+ exhibited a 9.54% increase in fracture toughness, potentially due to changes in air void distribution.
- The average healing capacity of BBTM8 mixtures across FHF test cycles was 24.28% higher than that of ACL16+ mixtures.
- Microwave heating to 85°C caused some BBTM8 samples to break down, while no problems were observed in ACL16+ samples, indicating potential limitations for very-thin asphalt pavements.

Moreover, the results of the study indicate that microwave heating can enhance the healing capacity of asphalt mixtures. This finding highlights the potential benefits of applying microwave heating methods to repair cracks in pavement layers in field applications. During the application of microwave heating, it is essential to establish proper energy sources and connections for microwave generators. Additionally, the heating duration and energy intensity must be carefully adjusted based on the surface type, damage level, and desired temperature. Although this study observed that very-thin asphalt pavements should not be subjected to high temperatures for healing, further research is necessary to better understand this limitation. Future studies could explore topics such as the long-term effects of microwave heating methods or the impact of climate conditions on the performance and durability of very-thin-wearing courses.

Acknowledge

We would like to thank the Czech Technical University in Prague, Road Structures Department for providing us with the opportunity to use their laboratory facilities. The part of the activities provided by CTU in Prague was supported by project No. GA22-04047K funded by The Czech Scientific Foundation (GACR).

Author Contributions

Ezgi EREN contributed to the experimental design, data collection, and manuscript writing. Jan VALENTIN was involved in the implementation, data analysis, and manuscript revision. Peter GALLO contributed to the laboratory work, data analysis, writing, and editing. Perviz AHMEDZADE contributed to the experimental design, supervised the study, and provided critical feedback and revisions.

Conflict of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Atakan, M., and Yıldız, K. (2024). Effect of aggregate damage on self-healing characteristics of asphalt concrete: An image processing-based method. *Construction Building Materials*, 425, 135924.
- Bui, H. H., and Saleh, M. J. E. F. M. (2021). Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test. 242, 107452.
- Chen, X., and Solaimanian, M. (2019). Effect of long-term aging on fracture properties of virgin and recycled asphalt concrete. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(1), 527-543.
- Eren, E., Valentin, J., and Ahmedzade, P. (2024). Assessment of the Effects of Induction Heating Induced-Healing on the Fracture Properties of Very Thin Asphalt Concrete. Paper presented at the International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements.
- Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Barandica, J. M., Cornejo, E., and Serrano, J. M. (2015). Opportunities for GHG emissions reduction in road projects: a comparative evaluation of emissions scenarios using CO2NSTRUCT. *Journal of Cleaner Production*, 104, 156-167.
- Gallego, J., del Val, M. A., Contreras, V., Páez, A. J. C., and Materials, B. (2013). Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. 42, 1-4.
- Garcia-Gil, L., Miró, R., and Pérez-Jiménez, F. E. J. A. S. (2019). Evaluating the role of aggregate gradation on cracking performance of asphalt concrete for thin overlays. 9(4), 628.
- Gómez-Meijide, B., Ajam, H., Lastra-González, P., Garcia, A. J. C., and Materials, B. (2016). Effect of air voids content on asphalt self-healing via induction and infrared heating. 126, 957-966.
- Guo, M., Zhang, R., Du, X., and Liu, P. J. E. (2024). A state-of-the-art review on the functionality of ultra-thin overlays towards a future low carbon road maintenance. 32, 82-98.
- He, L., Zhou, Z., Ling, F., Alexiadis, A., Van den Bergh, W., Cannone Falchetto, A., . . . Kowalski, K. J. (2022). A Coarse-Grained Molecular Model for Simulating Self-Healing of Bitumen. *Applied Sciences*, 12(20), 10360.
- Huang, H., Xu, J., Liu, J., and Chen, H. (2021). Comparative Study on Microwave Absorbing Heating Characteristics and Microwave Deicing Performance of Airport Pavement Modified Concrete.
- Jiang, J., Chen, H., Bahia, H. U. J. M., and Structures. (2022). Factors controlling pre-and post-peak behavior of asphalt mixtures containing RAP in the SCB test. 55(6), 160.
- Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., van Bochove, G., van Montfort, J. J. C., and Materials, B. (2012). Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test. 29, 403-409.
- Liu, Q., Schlangen, E., and Van De Ven, M. J. T. r. r. (2012). Induction healing of porous asphalt. 2305(1), 95-101.
- Liu, W., Wan, P., Wu, S., Liu, Q., Wang, J., Jiang, Q., . . . Materials, B. (2024). Effect of aging level on the healing properties of an induction-heated ultra-thin wearing course and its mechanism. 430, 136506.
- Liu, X., Zhao, Y., Wei, D. J. C., and Materials, B. (2024). The effect mechanism of microwave enhanced aggregates on the microwave heating performance of asphalt mixtures. 411, 134314.
- Melanta, S., Miller-Hooks, E., and Avetisyan, H. G. (2013). Carbon footprint estimation tool for transportation construction projects. *Journal of Construction Engineering Management*, 139(5), 547-555.
- Strippel, H. (2001). Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis. In: IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Sun, D., Sun, G., Zhu, X., Pang, Q., Yu, F., and Lin, T. (2017). Identification of wetting and molecular diffusion stages during self-healing process of asphalt binder

- via fluorescence microscope. *Construction Building Materials*, 132, 230-239.
- Sun, D., Sun, G., Zhu, X., Ye, F., and Xu, J. (2018). Intrinsic temperature sensitive self-healing character of asphalt binders based on molecular dynamics simulations. *Fuel*, 211, 609-620.
- Sun, G., Hu, M., Sun, D., Deng, Y., Ma, J., and Lu, T. (2020). Temperature induced self-healing capability transition phenomenon of bitumens. *Fuel*, 263, 116698.
- Tang, J., Liu, Q., Wu, S., Ye, Q., Sun, Y., and Schlangen, E. (2016). Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders. *Construction Building Materials*, 113, 1029-1033.
- Vackova, P., and Valentin, J. (2022). Semi-circular Bending (SCB) Test—Modified Method and New Test Parameters. Paper presented at the CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures.
- Wan, J., Xiao, Y., Song, W., Chen, C., Pan, P., and Zhang, D. J. M. (2018). Self-healing property of ultra-thin wearing courses by induction heating. 11(8), 1392.
- Wang, F., Zhu, H., Shu, B., Li, Y., Gu, D., Gao, Y., . . . Materials, B. (2022). Microwave heating mechanism and self-healing performance of asphalt mixture with basalt and limestone aggregates. 342, 127973.
- Wool, R., and O'connor, K. (1981). A theory crack healing in polymers. *Journal of applied physics*, 52(10), 5953-5963.
- World Bank, G. (2010). Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation: A Toolkit for Developing Countries.
- Xiang, H., He, Z., Chen, L., Zhu, H., and Wang, Z. (2019). Key factors and optimal conditions for self-healing of bituminous binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), 04019172.
- Yıldız, K., Atakan, M. J. C., and Materials, B. (2020). Improving microwave healing characteristic of asphalt concrete by using fly ash as a filler. 262, 120448.
- Yoo, D.-Y., Kim, S., Kim, M.-J., Kim, D., and Shin, H.-O. (2019). Self-healing capability of asphalt concrete with carbon-based materials. *Journal of Materials Research Technology*, 8(1), 827-839.
- Yu, J., Feng, Z., Chen, Y., Yu, H., Korolev, E., Obukhova, S., . . . Zhang, Y. (2024). Investigation of cracking resistance of cold asphalt mixture designed for ultra-thin asphalt layer. *Construction Building Materials*, 414, 134941.
- Zhang, L., Zhang, Z., Yu, W., and Miao, Y. J. P. (2023). Review of the application of microwave heating technology in asphalt pavement self-healing and de-icing. 15(7), 1696.

INVESTIGATION INTO PRYING FORCE AND BOLT MOMENT IN WELDED STEEL T-STUBS

Tchabremane Jean de la Croix KOMBATE¹, Kivanç TAŞKIN^{2*}, Kerem PEKER³

¹ Department of Civil Engineering, Eskişehir Technical University, Eskişehir, Türkiye

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-5366-0315>

² Department of Civil Engineering, Eskişehir Technical University, Eskişehir, Türkiye

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-8024-4600>

³ Erdemli Engineering and Consulting Ltd., İstanbul, Türkiye

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-0760-6964>

Keywords	Abstract
Steel connections Bolted connection T-stub Prying effect Bolt bending	<i>Prying action may develop in bolted T-stub connection due to the flange deformation. In this paper, an extensive numerical study was carried out on welded plate T-stubs to investigate prying action. Using experimental data in the literature, a finite element model was constructed and validated in ABAQUS. Good agreement was obtained, and over 200 FE models were generated to study the influence of flange thickness, edge distance, and gauge distance on the behavior of bolted T-stubs, including prying effects. The resistance predictions provided in EN 1993-1-8 were found to be conservative. This study's novelty was the focus on the bending moment that may develop in the bolts. Tests have highlighted the flexural engagement of the bolts. Combined with tensile action in the bolts, it may induce substantial stresses and cause premature failure. Few studies have been dedicated to investigating the bending moment in the bolts. Consequently, the actual codes do not account for the bending moment in the bolts. It was found that the bolt moment could be considerable and should be accounted for in the design procedure. The influence of several geometrical properties on the bolt moment was investigated. Additionally, the M-N interaction curves examined the combined action of tension and bending in the bolts.</i>

BULONLU ÇELİK BİRLEŞİMLERDEKİ KANIRTMA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Anahtar Kelimeler	Öz
Çelik birleşimler Civatalı bağlantılar T-parça Kanırtma etkisi Civata bükülme	<i>Çelik yapılarda taşıyıcı elemanların en yaygın birleşim şekli olan T birleşim bölgelerinde ortaya çıkan davranışın ortak özelliği çekme yükünden dolayı başlık bölgelerinde oluşan deformasyonlardır. Buna sebep olan etki de kanırtma (prying) etkisidir. Bulonlardaki eğilme momentinin incelenmesine yönelik çok az çalışma yapılmıştır. Literatürde verilen testler bulonların eğilme etkisini vurgulamaktadır. Bu çalışmada, kanırtma etkilerini araştırmak için kaynaklı plakalar ile oluşturulan T-birleşimler üzerinde kapsamlı bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. ABAQUS'ta oluşturulan gelişmiş sonlu eleman modellerini kalibre etmek ve doğrulamak için literatürdeki deneysel veriler kullanılmıştır. Flanş kalınlığı, kenar mesafesi ve bulonların arasındaki mesafe gibi parametrelerin bulonlu T-birleşimlerin davranışı ve özellikle kanırtma etkisi üzerindeki etkilerini incelemek için 200'den fazla sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. EN 1993-1-8'de verilen dayanım tahminlerinin çok güvenli olduğu görülmüştür. Bu çalışmadaki bir yenilik de bulonlarda oluşabilecek eğilme momentine odaklanılmasıdır. Bulonlardaki çekme kuvvetleri ile birleştğinde, önemli gerilmelere neden olmakta ve taşıma kapasitesine gelmeden erken göçmeye yol açabilmektedir. Sonuç olarak, mevcut standartlar bulonlardaki eğilme momentini hesaba katmamaktadır. Bulonda oluşacak momentin önemli olabileceği ve tasarım aşamasında hesaba katılması gerektiği görülmektedir. Farklı geometrik özelliklerin bulon momenti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, bulonlardaki gerilme ve eğilmenin birleşik etkisi M-N etkileşim eğrileri aracılığıyla incelenmiştir.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 22.04.2024

Kabul Tarihi : 19.12.2024

Research Article

Submission Date : 22.04.2024

Accepted Date : 19.12.2024

* Sorumlu yazar: kivanct@eskisehir.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1471916>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Connections play a crucial role in the safety and stability of structures. Due to their easy fabrication, installation, and ductile behavior, bolted connections are now preferred to welded connections in steel structures. However, steel bolted connections involve various components and nonlinearities (such as material nonlinearities and contact nonlinearities), resulting in a nonlinear behavior that is complex to determine. Approximations are often necessary to incorporate the actual behavior into everyday design because of its complexity. One of these approximations is the equivalent T-stub model, which has been widely investigated before its implementation in EN 1993-1-8.

Finite element modeling can be used as an alternative to experimentation. In fact, besides being less demanding, FE models can yield results that are in agreement with experiments. Also, they can describe phenomena such as contact stress distribution that cannot be accurately measured experimentally. Finally, various configurations can be covered, allowing for parametrical studies and analytical formulations. The last decades have seen increasing use of FE modeling due to progress in computer technology and non-linear numerical algorithms. The contributions of Sherbourne and Bahaari (1996); Mistakidis, Baniotopoulos, Bisbos, and Panagiotopoulos (1997); Bursi and Jaspart (1997, 1997, 1998); Wanzek and Gebbeken (1999); Swanson, Kokan, and Leon (2002); and Lemonis and Gantes (2003) helped put in place guidelines for the construction of efficient finite element models that could realistically reproduce the behaviour of bolted T-stub connections.

One common and significant behavioral characteristic of nearly all types of tensile bolted connections is prying action. Tests have shown that the flexural deformation of the flanges of the connected members can subject bolts to additional forces and moments. Prying action can significantly increase the bolt load and cause bolts to fail before the applied tension has reached the design tension load. Therefore, not taking into consideration prying action could lead to unsafe design. Although several researchers reported the bending of bolts at failure and its influence on the performance of T-stubs, the prying effect is commonly taken into account by only increasing the axial force in the bolt.

The earliest studies on T-stubs and prying action include that of Nair, Birkemoe, and Munse (1969) who carried out an experimental and analytical study to determine the behavior of ASTM A325 and A490 high strength bolts loaded in direct tension in tee-connections, and formulate methods for the design of such connections. Douty and McGuire (1974) performed experiments on various T-stubs and developed a semi-empirical equation for evaluating the prying force Q at the

ultimate load. Zoetemeijer (1974) studied the tension side of bolted beam-to-column connections and emphasized the role of prying force in the failure mode of the T-stub. He expressed the maximum prying force Q_{max} as a function of the moment of the flange and the edge distance. Agerskov (1977) conducted a series of tests to measure prying force for different geometries. In some significant respects, the author presented a formulation similar to that of Douty and McGuire (1974), with the difference being that the effect of shear stresses was considered. The actual formulations presented in AISC are the fruition of the work of Thornton (1985); Swanson and Leon (2000); Kulak, Fisher and Struik (2001); and Swanson, Kokan, and Leon (2002).

Several other others conducted studies about prying forces. Chasten, Lu, and Driscoll (1992) investigated the contact force distribution. Following an analytical study aiming to determine the magnitude and location of the prying forces, the authors found that the prying force resultant is not located at the plate edge and recommended using a conservative $x = 0.6l_v$ for design purposes.

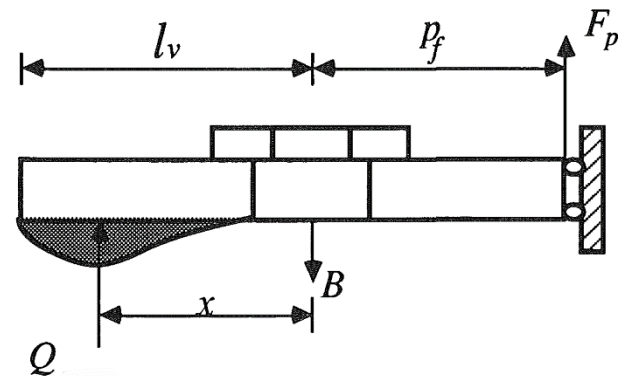


Fig. 1. Contact pressure bulb

Using the results of 1800 FE analyses of L and T bolted connections, Atasoy (2012) suggested some corrections for the expressions formulated by Douty and McGuire and Struik and de Back, depending on the ratio of the flange thickness to the bolt diameter. Rassati, 2012; Hantouche and Abboud, 2014; Hantouche, Kukreti, and Rassati, 2015; Hantouche, Kukreti, Rassati, and Swanson, 2015) were used to develop two prying models that predict the failure strength of thick-flange built-up T-stub connections with complete joint penetration (CJP) and fillet welds.

Through an experimental and numerical program, Yang, Kim, Park, and Back (2013) and Yang, Park, Kim, and Back (2013) suggested an analytical model which takes into account prying action for the prediction of the initial axial stiffness and the ultimate strength. The authors also suggested correcting the bolt action line based on bolt stress distribution obtained from the numerical analysis. A mechanical proposed a

mechanical model, based on an improved beam model and validated using 3D finite element models, was proposed by model Couchaux, Hjiat, Ryan, and Bureau (2017) allowing for the assessment of the total bolt force, separation length, and prying force location. The authors concluded that the magnitude of the external load did not affect the contact zone length in a non-preloaded connection. Bezerra, Bonillab, Silvaca, and Matias (2020) conducted a numerical investigation into the influence of the flange thickness on the magnitude and location of the prying force. The authors concluded that the existing analytical models, which assumes a fixed location of the prying force, could not adequately represent the prying action (Kombate and Taşkın, 2022).

In most studies, the prying effect is taken into account by only considering the supplementary axial force in the bolt, although several researchers reported the bending of bolts at failure (Kulak et al., 2001; Piluso, Faella, and Rizzano, 2001; Swanson et al., 2002; Girão Coelho, 2004; Girão Coelho, Bijlaard, and Gresnigt; 2004; Baoa et al., 2019; Yuan et al., 2020). Authors such as Piluso and Rizzano (2008) and Hu, Leon, and Park (2011, 2012) recommended that bolt bending should be considered in the design model.

The deformation of the connected parts can result in the bending of the bolt even when there is no significant increase in bolt axial force (Kulak et al., 2001). Few studies have been dedicated to evaluating the bending moment in bolts. Using 3D finite element analysis of T-stubs, Abidelah, Bouchair, and Kerdal (2014) studied the influence of bolt bending. Furthermore, the authors suggested considering the effect of the bolt bending by adding rotational springs. Herrera, Desjouis, Gomez, and Sarrazin (2008) performed a series of tests on one-half-scale built-up T-stubs specimens. Detailed 3D finite element models of the tested specimens were generated and could adequately capture the bending of the tension bolts produced by the prying of the T flange. Stamatopoulos and Ermopoulos (2010) proposed a design procedure for T-stubs, considering bolt bending. The influence of the developed bending on the strength of bolts was determined by evaluating the interaction between the bending moment and the axial tensile force (Abidelah et al., 2014; Stamatopoulos and Ermopoulos, 2010). More studies devoted to flexural engagement are necessary to provide more insight into the behavior of bolted T-stubs, allowing for improved formulations and adequate design of bolted connections.

A parametric study incorporating 226 models has been carried out to examine the influence of the flange thickness, the edge distance, and the gauge distance on prying effects in bolted T-stubs. Various elements related to prying action were investigated, including total bolt force, the prying force, and the magnitude and location of the resultant contact forces. Furthermore,

the moment the bolts may be subjected to was considered, and its variation in function of the flange thickness, the edge distance, and the gauge distance was examined.

2. Finite Element Modelling

A finite element model is developed in ABAQUS and calibrated with data obtained from the experiments conducted by Girão Coelho (2004) and Bursi and Jaspart (1997).

The specimens WT1g and T1 are selected for the calibration procedure. The geometrical characteristics of the specimens are depicted in Fig. 2 and specified in Table 1.

Table 1. Geometrical Properties of the Specimens

	Specimen WT1g	Specimen T1
n	30 mm	30 mm
w	90 mm	90 mm
e_1	20 mm	20 mm
p	50 mm	40 mm
t	10 mm	10.7 mm
t_w	10 mm	7.1 mm
a_w	5 mm	-
ϕ_b	12 mm	12 mm
n : edge distance	t : flange thickness	
w : gauge distance	t_w : web thickness	
e_1 : end distance	a_w : weld throat thickness	
p : pitch of the bolts	ϕ_b : bolt diameter	

2.1. Model Description

It is possible to avoid modeling the whole T-stub using symmetry, if any. Generally, YZ and YX planes may be geometrical planes of symmetry. However, the XZ plane cannot be strictly considered a symmetry plane because the bolt heads and nuts generally possess different rigidities. For this reason, only YZ and YX symmetry planes were considered, allowing for a reduction, as illustrated in Fig. 3. The hot-rolled T-stub was modeled in one block, including the web, flange, and fillet radius. In contrast, the different elements were modeled separately and assembled using adequate boundary and contact interactions for the welded plate T-stub. The components-webs, flanges, welds, and bolts – were meshed using solid elements C3D8R (i.e., 8-node linear brick with reduced integration). C3D8R elements, which present advantages such as reduced computation time and hourglass control, yielded satisfactory results. The bolt hole and shank were taken equal to the nominal bolt diameter. Considering that the bolt head and nut dimensions were not provided, the nominal values mentioned in DIN EN 14399-4 were used (See Table 2). Also, the washers were not modeled in compliance with the experimental conditions.

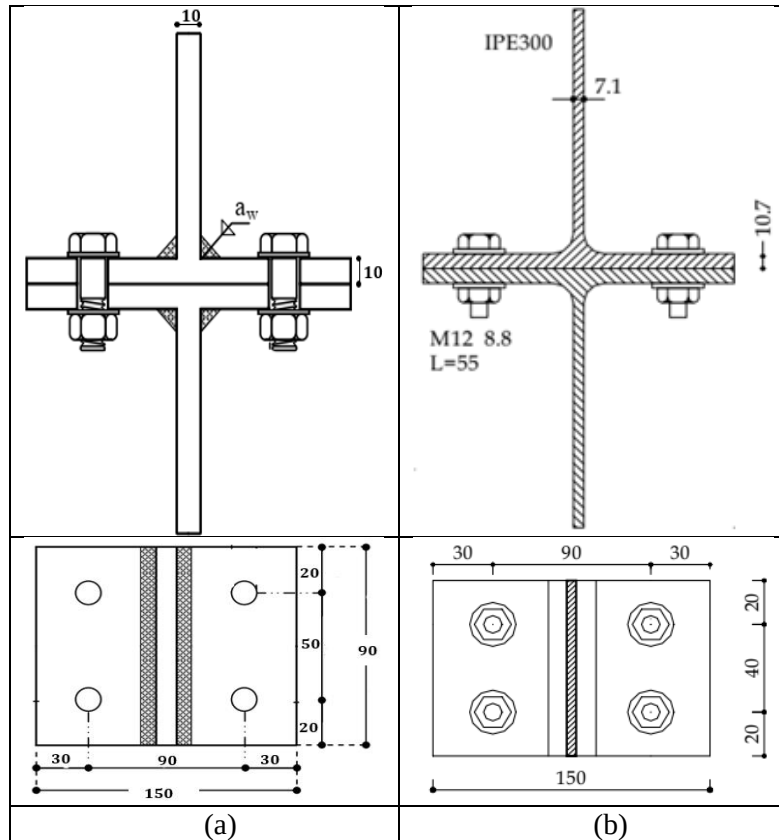


Fig. 2. Geometrical Characteristics and Cross-section of (a) WT1g Specimen and (b) T1 Specimen

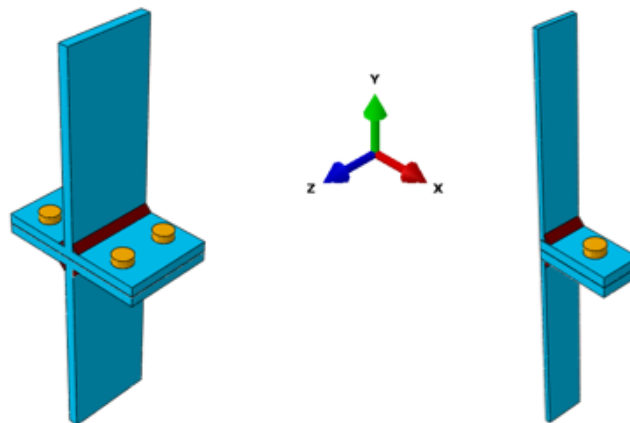


Fig. 3. Original WT1g model and its reduced model

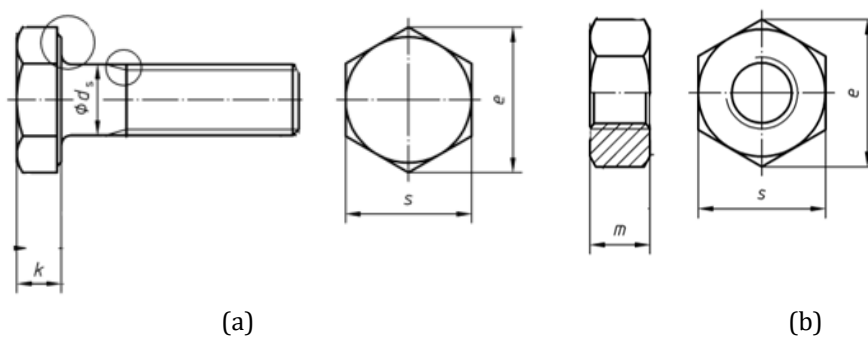


Fig. 4. Bolt head and nut Dimensions

Table 2. Bolt Head and Nut Dimensions for M12 bolts

Bolt Head		Nut	
k	s	m	s
8 mm	22 mm	10 mm	22 mm

The FE models included all nonlinearities, such as contact nonlinearities and material behavior. An elastoplastic constitutive law with isotropic strain hardening based on the Von Mises yield criterion was adopted for material nonlinearity. The failure condition was set as the attainment of the ultimate strain (ε_u), either for the bolt or any component of the T-section.

2.2. Material Properties

An elastoplastic constitutive law with isotropic strain hardening based on the Von Mises yield criterion is adopted for material nonlinearity. The failure condition was set as the attainment of the ultimate strain other than the bolt or any component of the T-section. For good correlation with experimental results, the entire stress-strain curves of the materials were adopted in the FE models (see Fig. 5). As a simplification, the welds in the WP-T-stubs were provided the same material properties as the T-flanges and T-webs. For the parametrical study, the same material properties were used for all the thicknesses based on the similarities of the actual stress-strain curves for flange thicknesses of 10, 15, and 20 mm (Faralli, Latour, Tan, Rizzano, and Wrobel; 2021). To extend the study of the behavior of T-stubs with thin flanges, 8 mm thickness was also included.

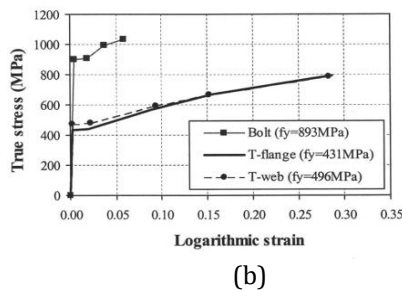
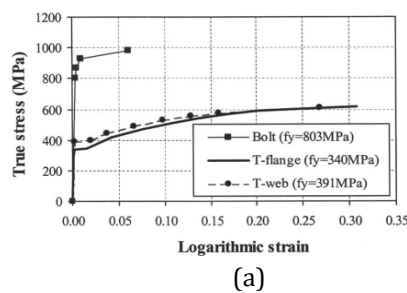


Fig. 5. Strain-Stress Material Laws: (a) Specimen WT1g (Girão Coelho, 2004) and (b) Specimen T1 (Bursi and Jaspart, 1997)

2.3. Boundary Conditions and Loading

Adequate boundary conditions and loading patterns are among the requirements for an efficient numerical simulation. The boundary conditions should reflect those of the tests. Hence, the end of the lower T-web was fully fixed; only the end of the upper T-web was allowed to move in the direction of the applied load. In the model intended for validation, a reduced model could be obtained using both X- and Z-symmetry boundary conditions (See Fig. 6). As for the models included in the parametrical study, only X-symmetry was considered. In fact, unlike the initial T-stubs that had four bolts and a width $2b = 2e_1 + p$ (see Fig. 2), the T-stubs involved in the parametrical study had only two bolts and a width $b = 2e_1$ (see Fig. 7).

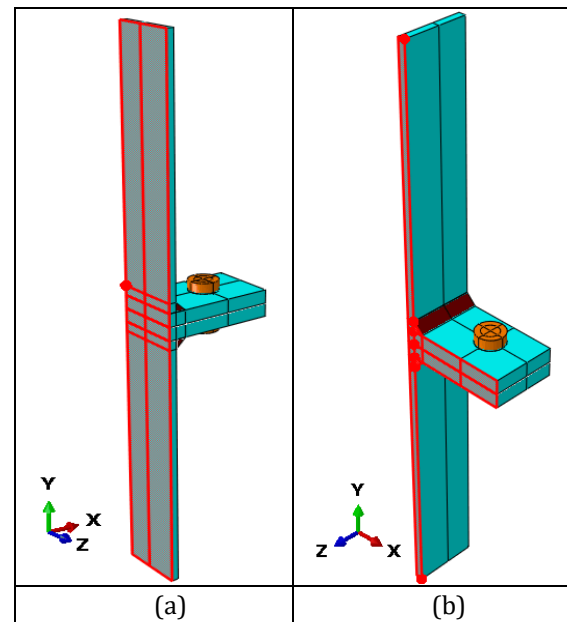


Fig. 6. Symmetry Applied in (a) X-Direction And (b) in Z-Direction

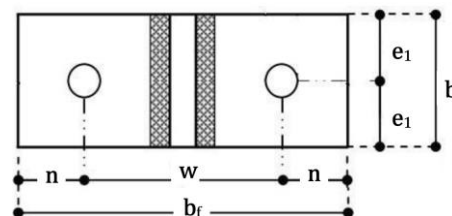


Fig. 7. Geometrical Characteristics of the Specimens Involved in the Parametrical Study

Regarding contact interactions, standard surface-to-surface formulation with finite sliding was defined. The considered pairs were:

- Bolt head and nut – flanges
- Flanges – webs
- Upper flange – Lower flange
- Bolt shank – Bolt hole

The contact properties were defined such that the expected behavior was simulated with hard contact, while the classic isotropic Coulomb friction law was used to model the tangential behavior. A penalty friction coefficient of 0.25 was taken, as suggested by Coelho et al. (2004). In reality, the bolt holes are more significant than the bolt diameters, so frictionless contact properties were considered in the hole area. Additionally, tie constraints attached the welds to the T-web and the T-flange.

The load was applied at the top of the upper T-web in the positive Y-direction using displacement control (See Fig. 8). Although both displacement-controlled and load-controlled analyses were compared and yielded similar results, displacement control was selected because it could offer better convergence conditions [30].

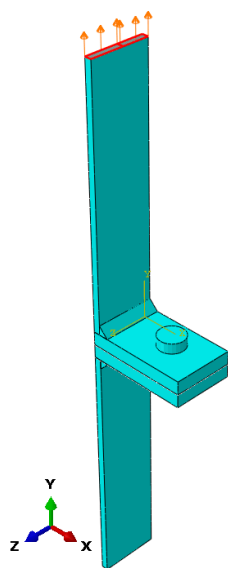


Fig. 8. Load Application

2.4. Model validation

A mesh sensitivity study was carried out to obtain a model with satisfactory results and acceptable computation time, and the mesh size and the flange discretization (number of elements through the thickness) were investigated. The bolt and the T-stub mesh sizes were identical and chosen proportionally to the thickness of the T-stub flange. Three mesh sizes were examined: $t_f/3$, $t_f/5$ and $t_f/10$. An element size of $t_f/3$ was deemed adequate. In the aftermath, T-stub models with different flange discretizations were

investigated. Previous studies concluded that for bending problems, a minimum of three elements through the plate thickness is recommended to ensure accurate results (Bursi and Jaspart, 1997). Consequently, models with 3, 4, 5, 7, and 10 elements through the flange thickness were compared. The model with seven elements through the flange was chosen because it yielded satisfactory results within a reasonable computation time.

For the model validation, it is essential to compare the load-deformation curve, which is the most significant characteristic describing the overall behavior of the model, as well as the failure mode. The force-displacement curve obtained from the FE analysis showed satisfactory agreement with the experimental force-displacement curve (Fig. 8). For the T-stub specimen WT1g, the experimental observations indicated that, at a deformation level around 14 mm, there was a smooth drop of load that continued until bolt fracture at 20.5 mm. Consequently, the curve obtained from the finite element modeling stopped at a deformation level of 13.5 mm, showing a good agreement with the experimental results. As for the T-stub specimen T1, an ultimate deformation of 9.20 mm was reached, which is very close to the experimental value of 9.49 mm. For both specimens, the experimental observations revealed combined failure involving significant flange yielding (with cracking of the flange in the heat-affected zone of the welds for WT1g) and bolt fracture. Although the experimental cracking in the welded zone was not observed in the finite element model, a pronounced yielding was observed. The difference may derive from the modeling the fillet weld and the heat-affected zone near the weld toe. The welding process can render the material more brittle. These effects are complex to quantify and take into consideration. Therefore, they were not included in the simulations, and the welds in the WP-T-stubs were provided with the same material properties as the T-flanges and T-webs.

3. Parametric Investigation

Following the validation of the numerical model, 226 models were generated to study the influence of parameters such as flange thickness, t , edge distance, n , and gauge distance, w . The edge distance and gauge distance value ranges were chosen in agreement with the provisions of EN 1993-1-8 (Table 3). The geometrical characteristics of the specimens are depicted in Fig. 7 and specified in Table 4.

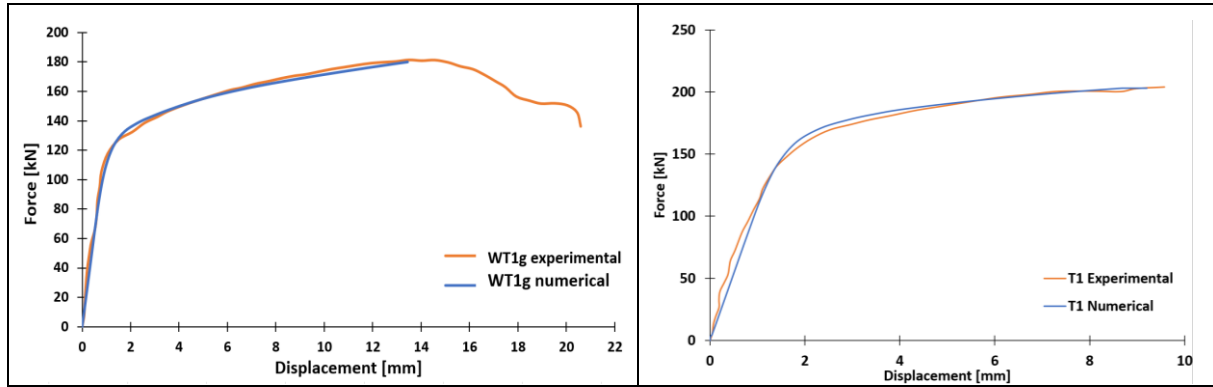


Fig. 9. Experimental and Numerical F-D Curves of (a) WT1g and (b) T1 Specimens

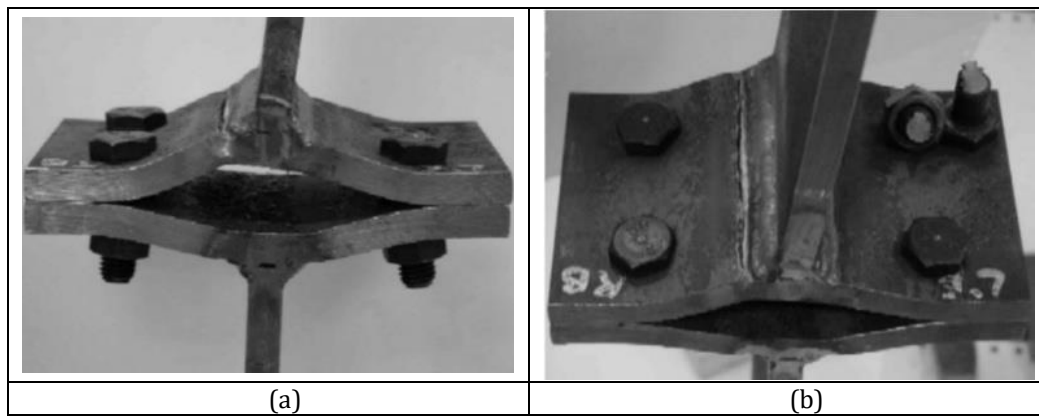


Fig. 10. Front View and Top View of Specimens WT1g After Failure

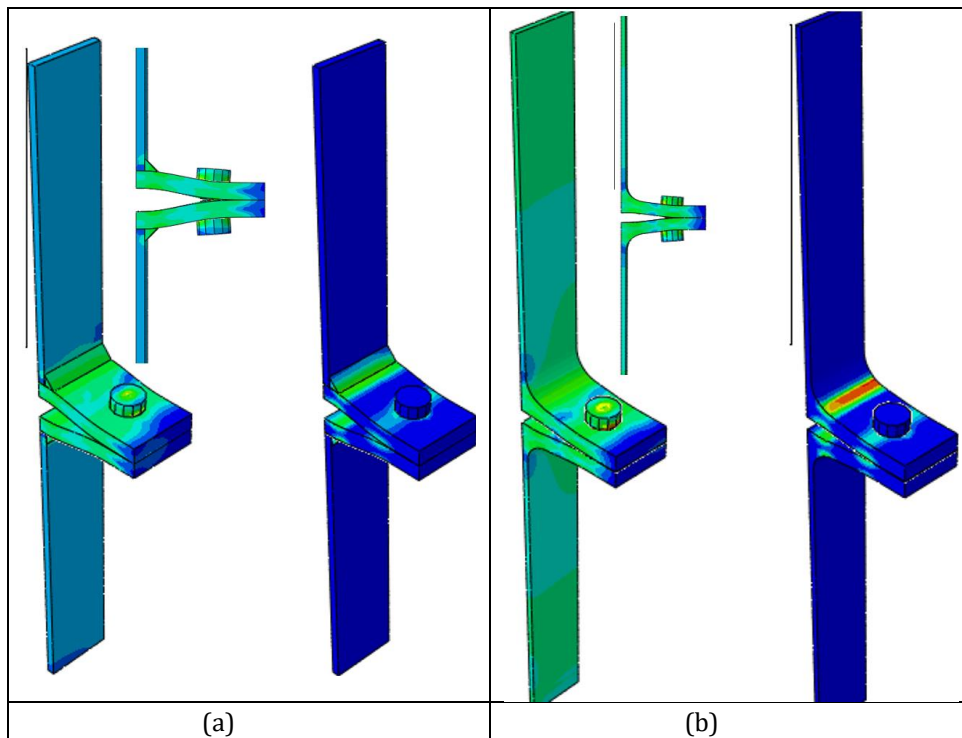


Fig. 11. Deformation and Yielding Status at the Ultimate Stage of (a) Specimen WT1g and (b) Specimen T1

Table 3. Minimum and Maximum Edge Distance and Gauge Distance Allowed by EN 1993-1-8

Parameter	Minimum value according to EN 1993-1-8	Maximum value according to EN 1993-1-8
Edge Distances	14.4 mm	50 mm for $t = 8$ mm 80 mm for $t = 10$ mm 100 mm for $t = 15$ mm 120 mm for $t = 20$ mm
Gauge Distances (spacing)	26.4 mm	110 mm for $t = 8$ mm 140 mm for $t = 10$ mm 200 mm for $t = 15$ mm 200 mm for $t = 20$ mm

Table 4. Geometrical Properties of the Specimens of the Parametrical Study

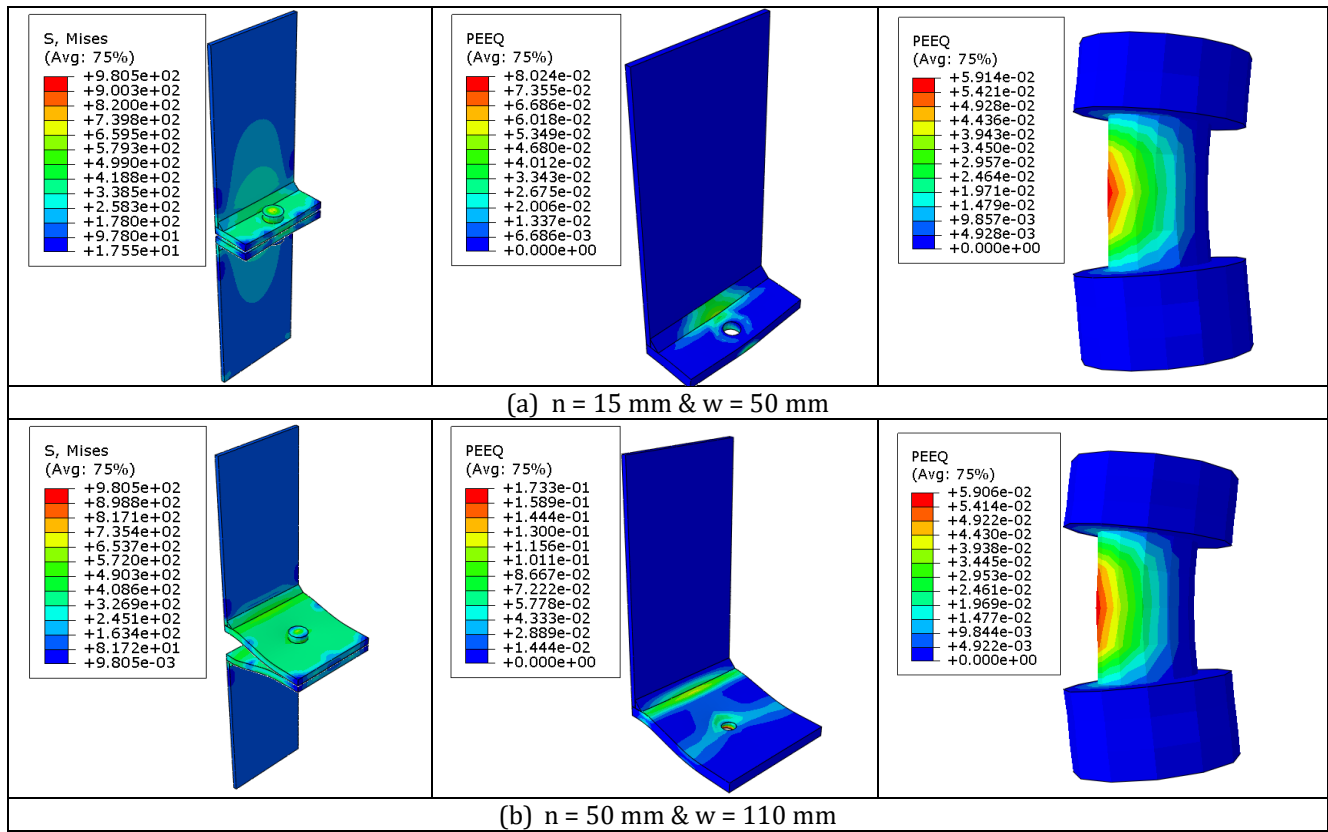
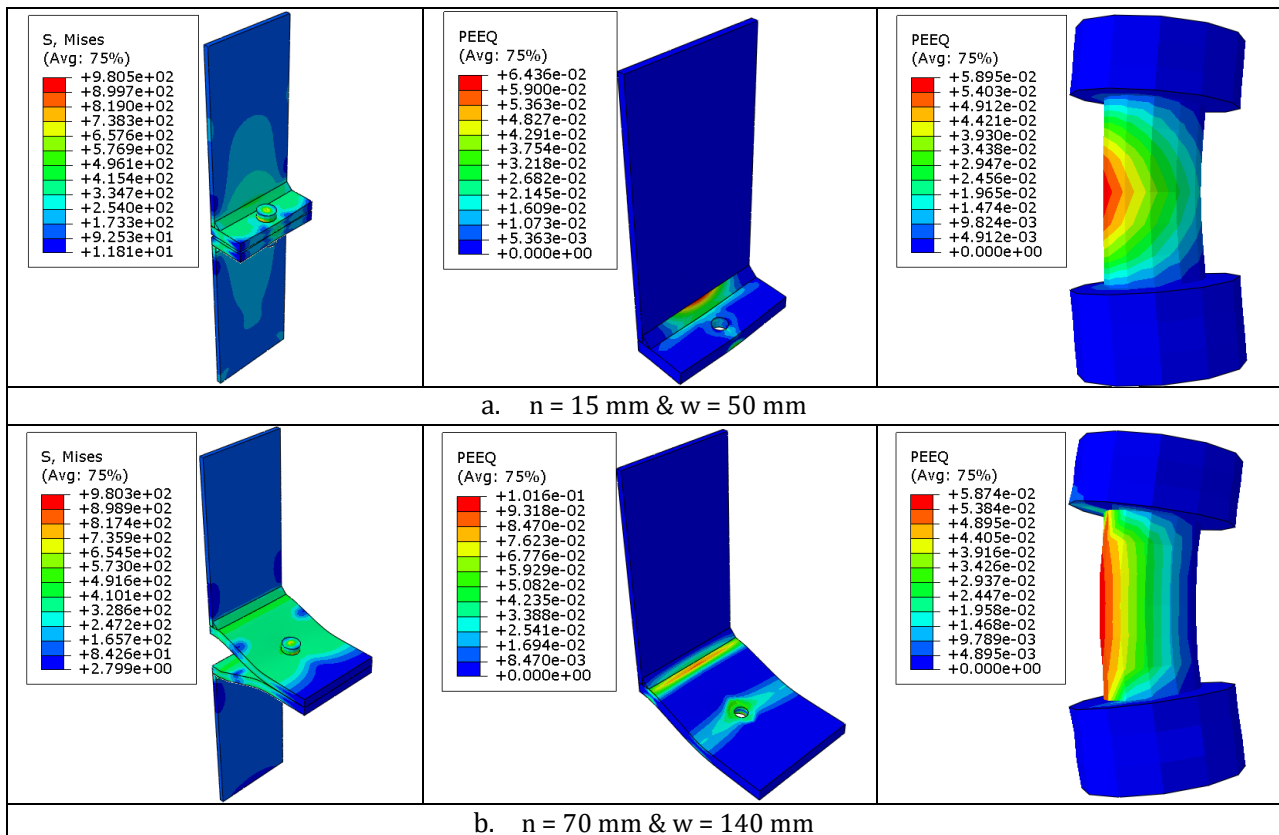
	Parametrical study			
	$t = 8$ mm	$t = 10$ mm	$t = 15$ mm	$t = 20$ mm
n	15 – 50 [mm]	15 – 70 [mm]	15 – 100 [mm]	15 – 100 [mm]
w	50 – 110 [mm]	50 – 140 [mm]	60 – 200 [mm]	70 – 200 [mm]
e_1	50 mm	50 mm	50 mm	50 mm
$t = t_w^*$	8 mm	10 mm	15 mm	20 mm
a_w	5 mm	5 mm	8 mm	8 mm
ϕ_b^*	12 mm	12 mm	12 mm	12 mm
* t: flange thickness t_w : web thickness ϕ_b : bolt diameter				

The same material properties were used for all the thicknesses based on the similarities of the accurate stress-strain curves for flange thicknesses of 10, 15, and 20 mm (Faralli et al., 2021). To extend the study of the behavior of T-stubs with thin flanges, 8 mm thickness was also included. Considering the different flange thicknesses, the number of elements through the flange was also examined for each thickness, while keeping the initial mesh size.

3.1. Failure Modes

Regarding steel T-stubs, the EN 1993-1-8 highlights three possible failure modes: complete

yielding of the flange (Mode 1), bolt failure with yielding of the flange (Mode 2), and bolt failure (Mode 3). Failure mode 2 was observed in specimens with 8 mm and 10 mm flange thickness. Minor flange deformation occurred for short gauge distances, and the bolt was subjected to minor flexural deformation. As the gauge distance increased, the failure mechanism shifted closer to mode 1. The flange exhibited double curvature deformation, and the bending of the bolt was more pronounced (Fig. 12, Fig. 13).

Fig. 12. Ultimate Stage of Specimens of $t = 8 \text{ mm}$ Fig. 13. Ultimate Stage of Specimens of $t = 10 \text{ mm}$

With a flange thickness of 15 mm or 20 mm, the T-stubs failed by bolt fracture (Mode 3) for short gauge distances. Negligible deformation took place in the flanges. The bolt exhibited a straight shank at the end of the loading, corresponding to only tensile deformation (Fig. 14.a, Fig. 15.a). For larger values of gauge distances, specimens with a flange thickness of 15 mm exhibited a failure mode 2. A double curvature of the flange and bending of the bolt were observed despite being

less pronounced than for thinner flanges. Additionally, yielding was observed at both the web-to-flange toe and bolt line regions (see Fig. 14.b). It can hence be said that the specimens failed in Mode 2 close to 1. With a thickness of 20 mm flanges, the yielding of the flange affected only the web-to-flange toe region. The flange and the bolt exhibited negligible flexural deformation (Fig. 15.b).

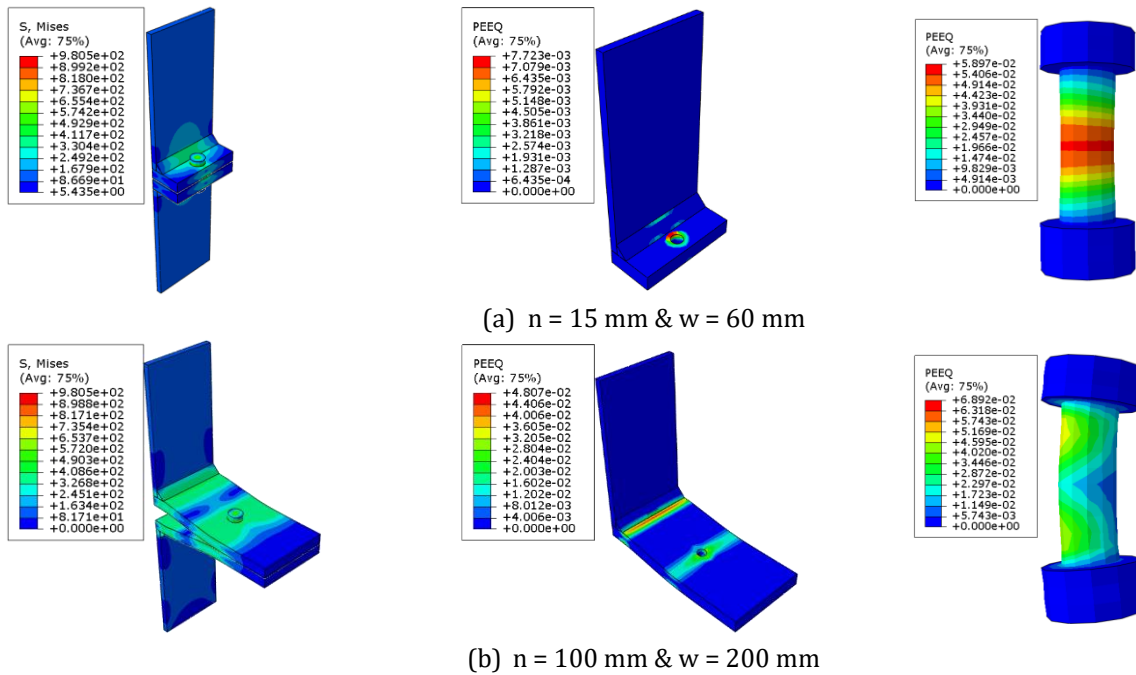


Fig. 14. Ultimate Stage of Specimens of $t = 15$ mm

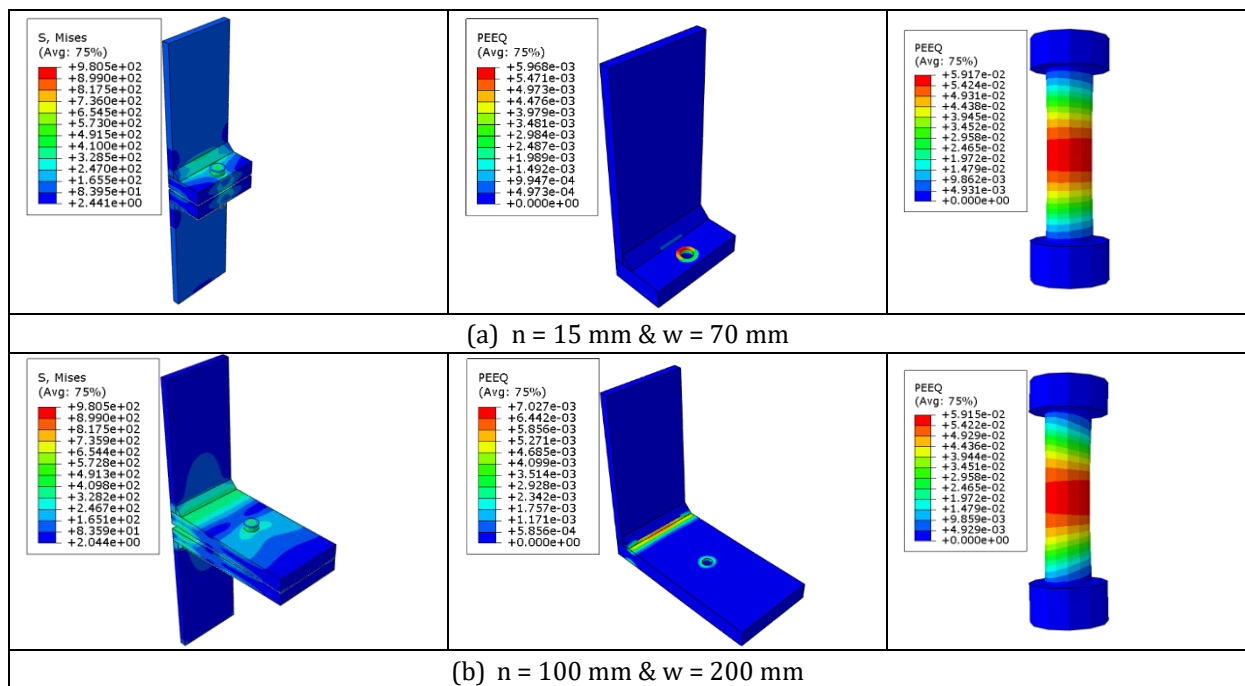


Fig. 15. Ultimate Stage of Specimens of $t = 20$ mm

For the T-stubs that exhibited a failure of the bolt in addition to yielding at the web-to-flange toe region and bolt line region, the failure mechanism at the plastic resistance stage differed from the failure mechanism at the ultimate stage. When the plastic resistance is attained, yielding may be

observed at the bolt line and the flange-to-web connection (failure mechanism 1). However, a reserve of resistance would allow the T-stub to continue deforming until the bolt fails, leading to a failure mechanism 2 (See Fig. 16).

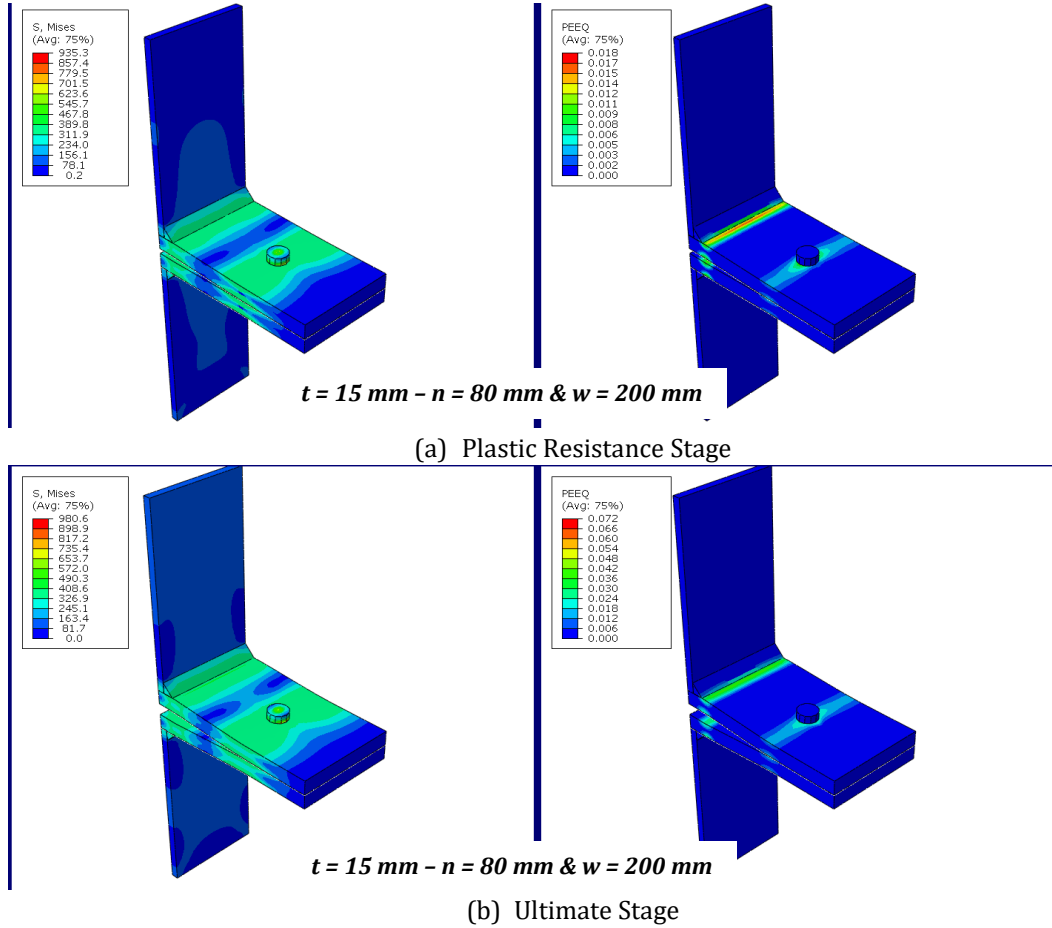


Fig. 16. T-stub with Two Different Failure Modes at (a) Plastic Resistance Stage and (b) Ultimate Stage

3.2. Plastic Resistance

Although plastic resistance was not the focus of this study, it was examined to obtain insight into the failure modes and the behavior of the flanges and the bolts when plastic resistance was reached. The plastic resistance of the T-stub (F_r) was set as the intersection between the two tangent lines of the load-displacement curve of the T-stubs at the initial and the final stages of the monotonic load (see Fig. 17.a). For a given edge distance, F_r decreased when the gauge distance was increased. Conversely to the gauge distance, as the edge distance was increased, the plastic resistance F_r is also increased. However, for high values of the gauge distance, there was a value of the edge distance for which the increased ratio of the plastic resistance in the function of the edge distance would be low. The influence of the edge distance and gauge distance on the plastic resistance is illustrated in Fig. 18. As for the

flange thickness, it had a significant impact on the plastic resistance: an increase in thickness resulted in a higher resistance (see Fig. 19). For specimens exhibiting a failure mode 3, the resistance had a value of approximately 198 kN. This value corresponds to the tensile resistance of the bolts, which can be assessed using eq. (1) and (2).

$$F_r = \sum F_{tb} \quad (1) \quad F_{tb} = A_b \cdot f_{ub} \quad (2)$$

A_b is the cross-sectional area of the bolt. In general, the tensile stress area A_s is used but in our case the nominal gross area was used. f_{ub} is the ultimate tensile strength of the bolt.

It is worth noting that the rate of change in the plastic resistance was higher in the case of thickness or gauge distance variation.

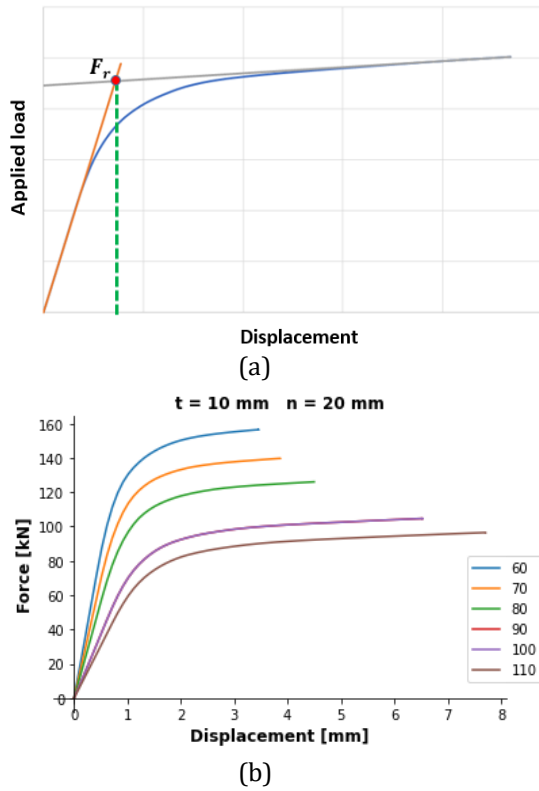


Fig. 17. Plastic Resistance and F-D Curves for Different Values of w for $t = 10$ mm & $n = 20$ mm

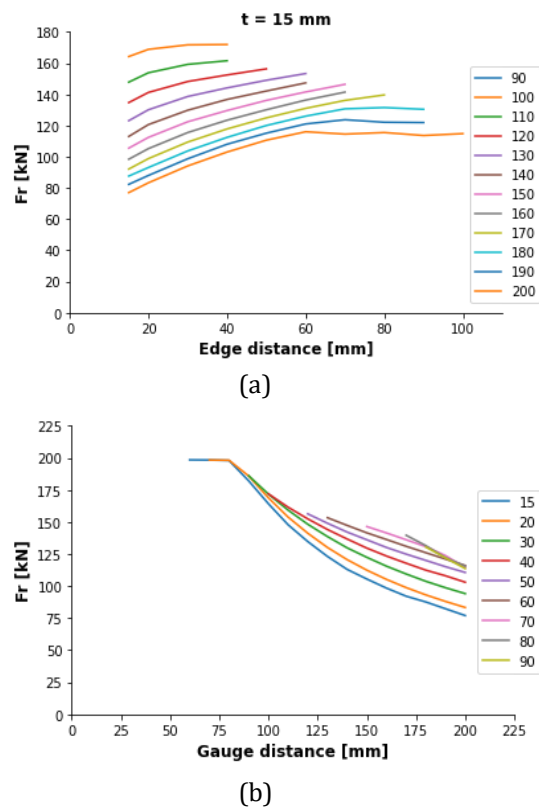


Fig. 18. Variation of the T-stub Resistance in function of n and w for $t = 15$ mm

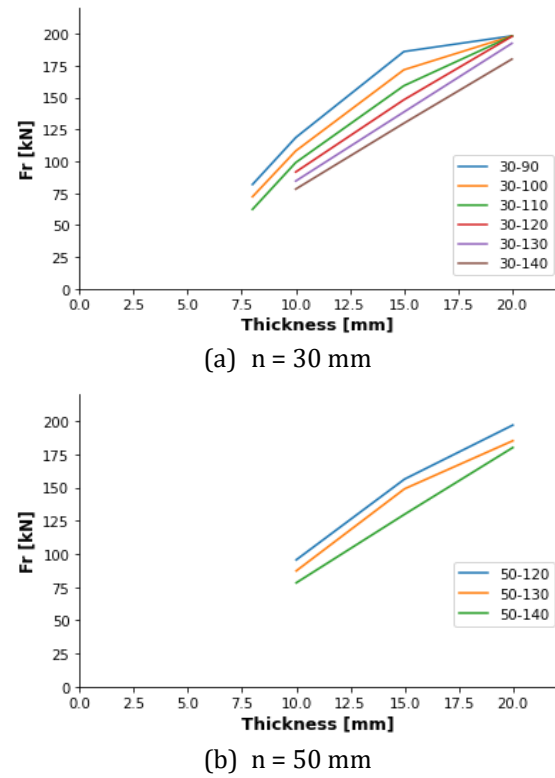


Fig. 19. Variation of the Resistance in function of the Flange Thickness for Different n - w Combinations

Furthermore, as depicted in Fig. 20 and Fig. 21, it can be seen that the resistance F_{EC3} , predicted by Eurocode 3 formulation and using the experimental material properties, was lower than the numerical plastic resistance F_r ; showing that the Eurocode predictions are conservative. The ratio between the predicted and the numerical plastic resistances ranged from 1.15 to 1.38 for a flange thickness of 8 mm and 1.3 to 1.47 for a flange thickness of 10 mm. With $t = 15$ mm and $t = 20$ mm, the ratio ranged from 1.3 to 1.63 to 1.28 to 1.63. A ratio of 1.63 was found common to all the specimens involving a mode three failure.

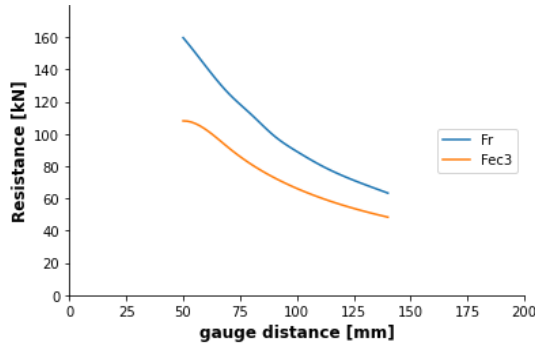
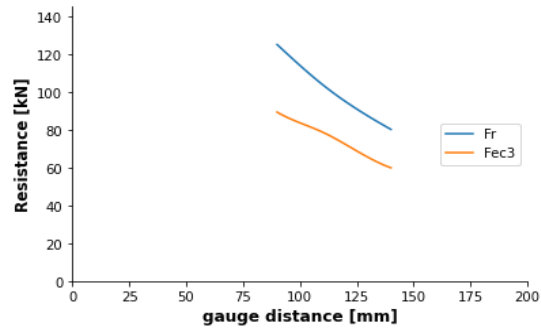
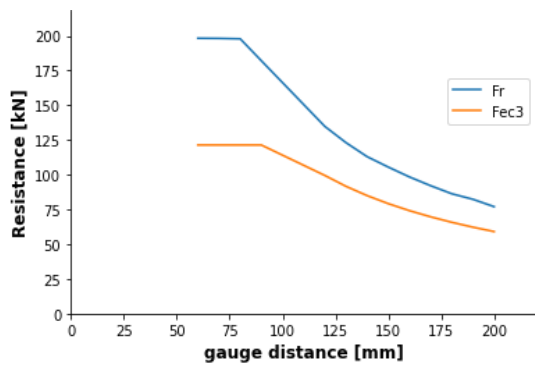
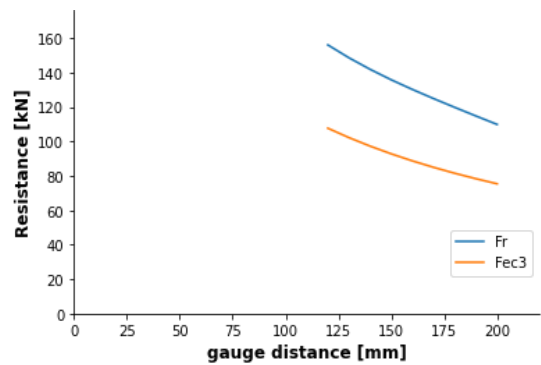
3.3. Prying Effect in the Bolt

The effects of prying can be evaluated by examining the induced prying force Q , the total bolt force B and the moment in the bolts M . Two situations were considered: the values corresponding to the attainment of the plastic T-stub resistance and the maximum values.

3.3.1. Prying Force

The difference between the total bolt force B and the applied load expresses the prying force Q arising in the bolt.

$$Q = B - F \quad (3)$$

(a) $n = 15$ mm(b) $n = 40$ mmFig. 20. Variation of F_r and F_{ec3} in function of the Gauge Distance for $t = 10$ mm(a) $n = 15$ mm(b) $n = 50$ mmFig. 21. Variation of F_r and F_{ec3} in function of the Gauge Distance for $t = 15$ mm

Prying action, especially prying force, has long been considered related to contact phenomena. The average contact stress distribution between the connected parts induces prying forces. In the case of non-preload bolts, the prying forces can be obtained by the integral of the normal stress distribution over the contact zone (Couchaux et al., 2017). The prying forces, assessed by using eq. (3), were compared to the force-resultant (CF2) of the contact stresses throughout the loading. As illustrated in Fig. 22, the graphs coincide.

An increase in the gauge distance for all the specimens increased the prying force, as observed in previous studies (Swanson and Leon, 2000; Girão Coelho, 2004). The deformability of the T-stub flange is correlated to the gauge distance. A flange with a longer gauge distance will deform more. The deformation of the flange will induce contact stresses between the flanges, causing prying forces.

The observations reported by Nair et al. (1969) show an optimum value for the edge distance. For values of n below the optimum value, increasing

the edge distance increased the prying forces. Beyond the optimum value, prying forces decrease as the edge distance increases. This trend is more noticeable for specimens involved in failure Mode 3 (the specimens with a flange thickness of 20 mm or specimens with a flange thickness of 15 mm and low values of the gauge distance). With specimens involved in failure Mode 2 or Mode 1, only a decrease in the prying forces was observed as the edge distance was increased.

The variations of prying force in the function of the edge distance and the gauge distance are illustrated in Fig. 23-26. The prying forces at the attainment of the plastic T-stub resistance Q_r and the maximum prying force, Q_{max} were considered.

An increase in the flange thickness expectedly resulted in a substantial decrease in the prying force (See Fig. 27). When the flange thickness increases, the rigidity of the flange increases substantially. Consequently, the flanges are less deformable, and less contact stresses develop

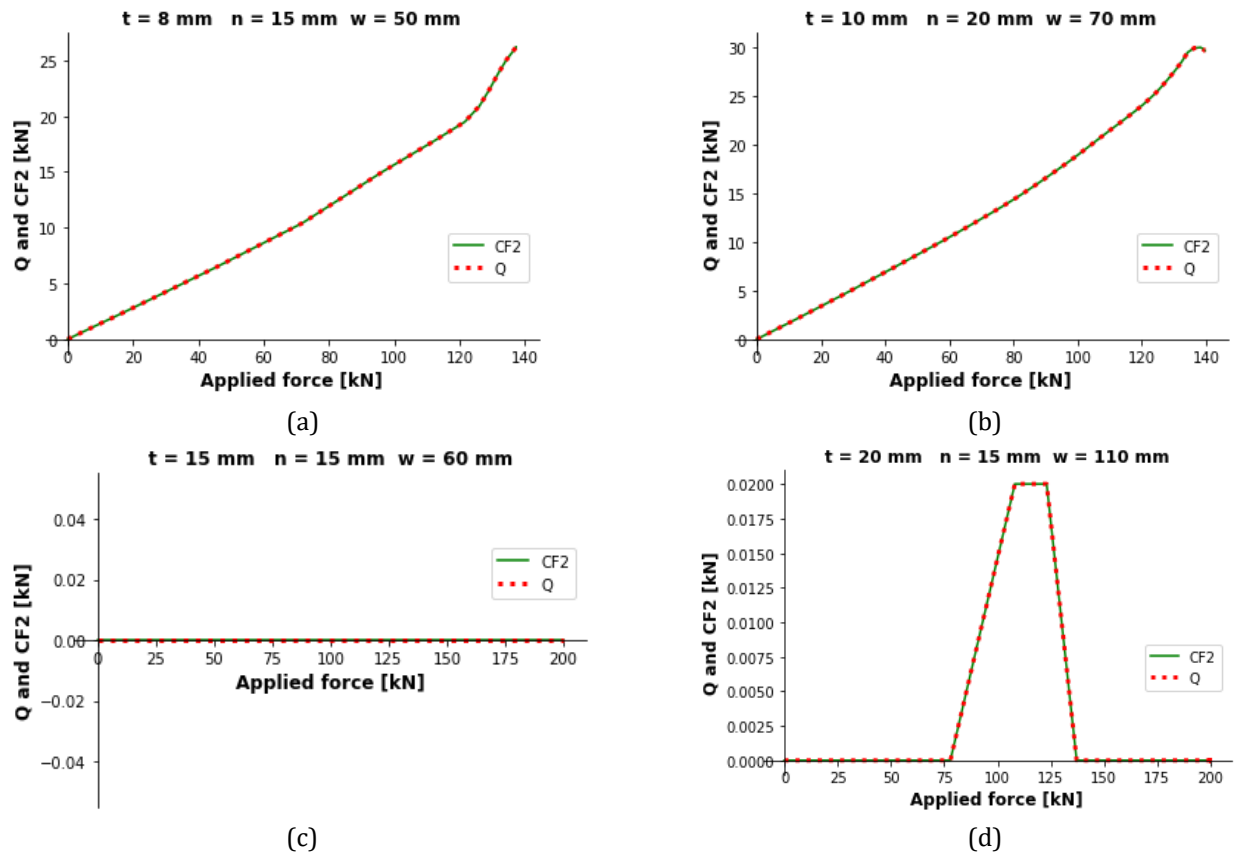


Fig. 22. Prying Forces and Force-resultant of the Contact Stresses

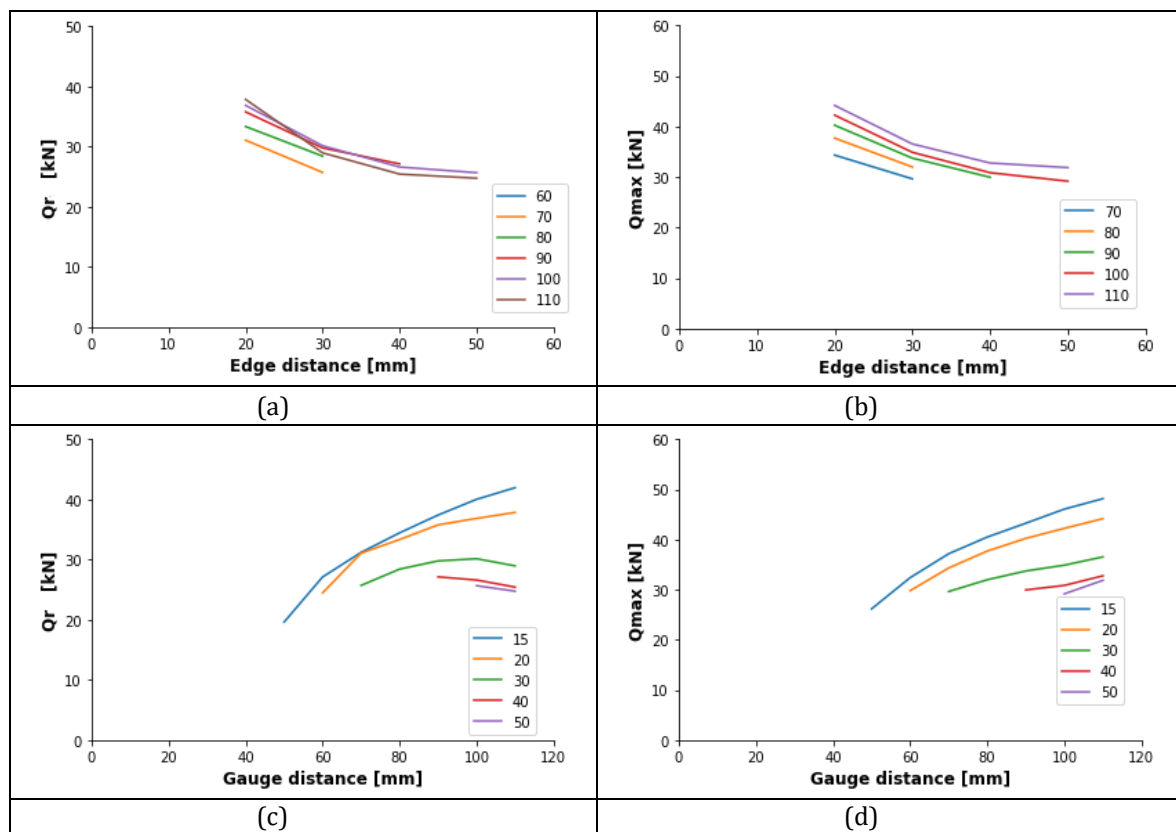
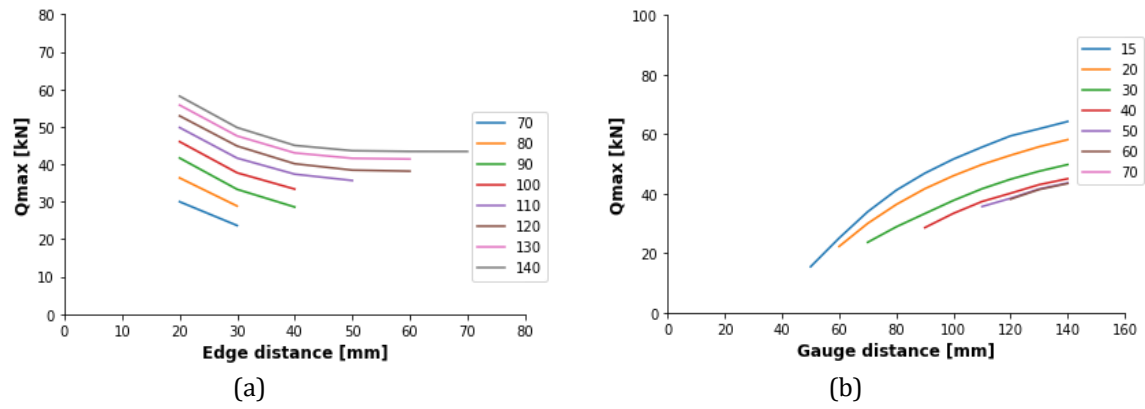
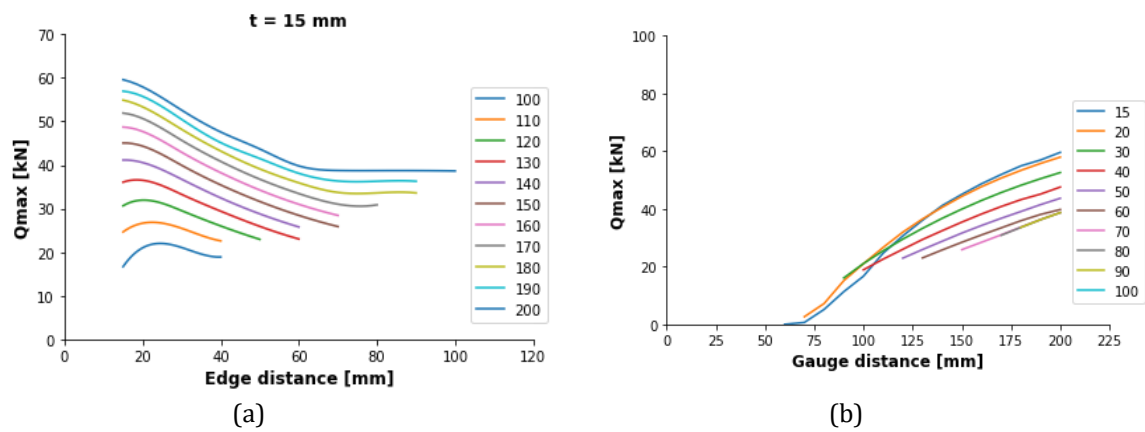
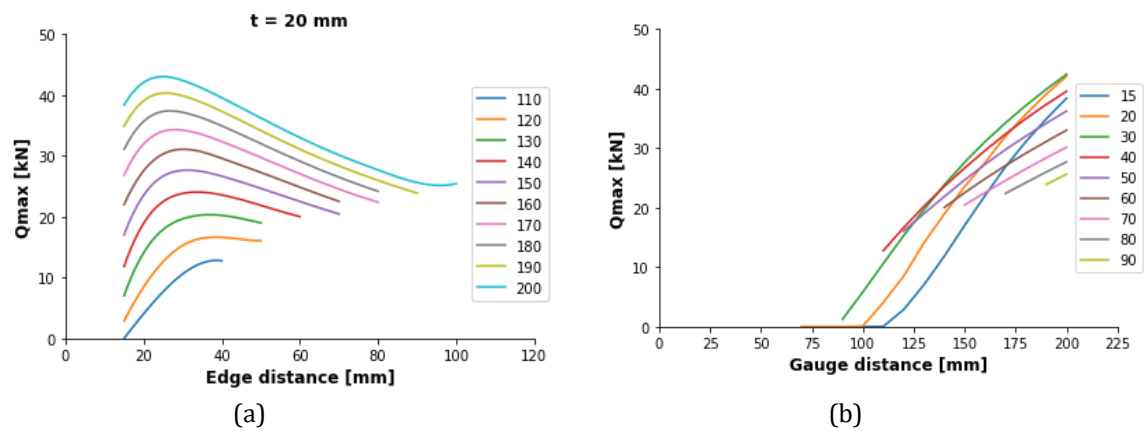


Fig. 23. Variation of Prying Force in function of the Edge Distance and the Gauge Distance for $t = 8 \text{ mm}$

Fig. 24. Variation of Prying Force in function of the Edge Distance and the Gauge Distance for $t = 10$ mmFig. 25. Variation of Prying Force in function of the Edge Distance and the Gauge Distance for $t = 15$ mmFig. 26. Variation of Prying Force in function of the Edge Distance and the Gauge Distance for $t = 20$ mm

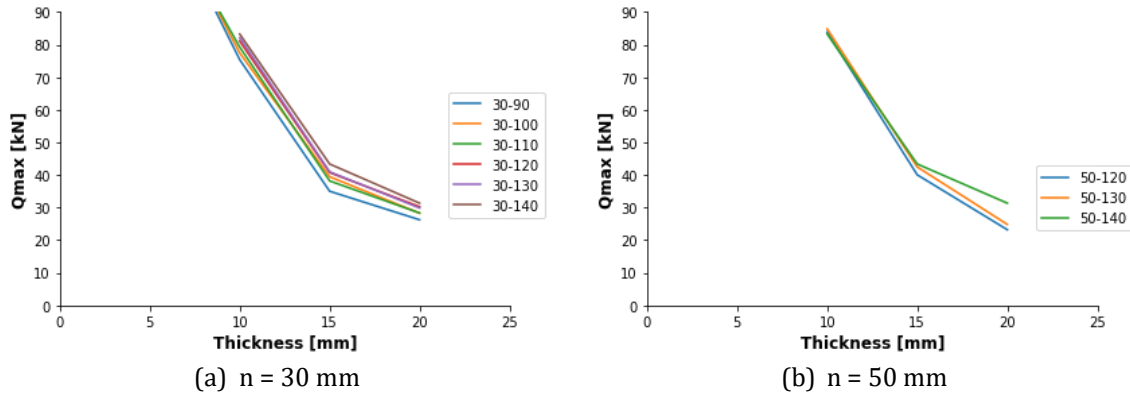


Fig. 27. Variation of the Q_{max} in function of the Flange Thickness for Different n - w Combinations

For each thickness, the maximum values of prying force were found in specimens with the smallest value of n/m (corresponding to a combination of the highest value of w and the smallest value of n). The dimension m , illustrated in Fig. 28, is the distance between the bolt axis and the plastic hinge arising near the web.

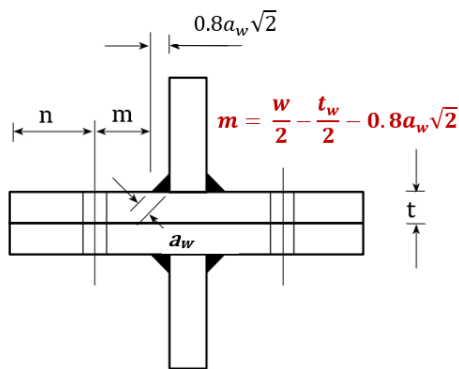


Fig. 28. Distance between the Bolt Axis and the Plastic Hinge Arising near the Web

With thicker flanges (15 mm and 20 mm), zero or negligible prying (less than 10% of the ultimate axial resistance of the bolt) was observed in some specimens. The specimens were all involved in a failure mode 3. In the case of zero prying throughout the loading, the deformation of the flanges was negligible compared to the elongation of the bolt. As the gauge distance increases, although small, the deformation of the flanges is enough to induce contact in the early stages of the loading. However, as the load increases, the bolt elongation exceeds the flange deformation, leading to a loss of contact between the connected members.

Considering that prying forces are equivalent to the resultant of the contact stresses, it was

deemed essential to examine the position of the resultant. Two directions were considered: X-direction and Z-direction. The center of the force due to contact pressure in the Z-direction is labeled XN3, and the center of the force due to contact pressure in the X-direction is labeled XN1.

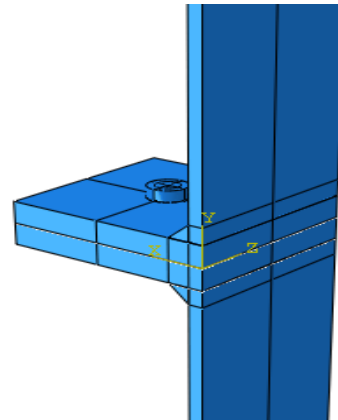


Fig. 29. Location of the Origin

Considering the variations of XN1 throughout the loading, three cases were observed:

- Case 1: no contact throughout the loading (See Fig. 30.a, Fig.30.b)
- Case 2: initial contact followed by a loss of contact (See Fig. 30.c, Fig.30.d)
- Case 3: the connected elements remained in contact throughout the loading. This was the case for most specimens. (See Fig. 30.e, Fig.30.f)

For all the specimens, throughout the loading, XN3 is located approximately at $50 \text{ mm} = b/2$ from the origin (See Fig. 31), indicating the symmetry of the contact stresses in the Z-direction.

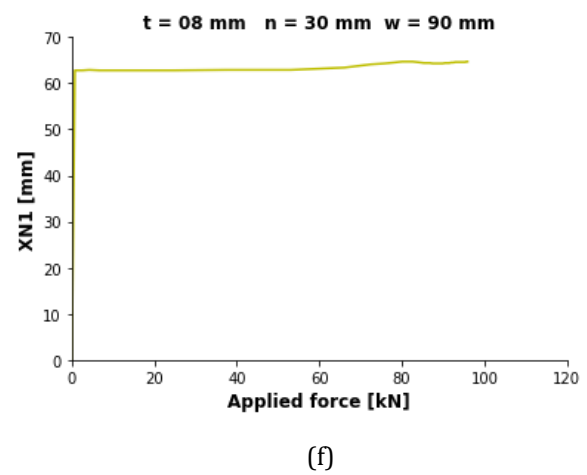
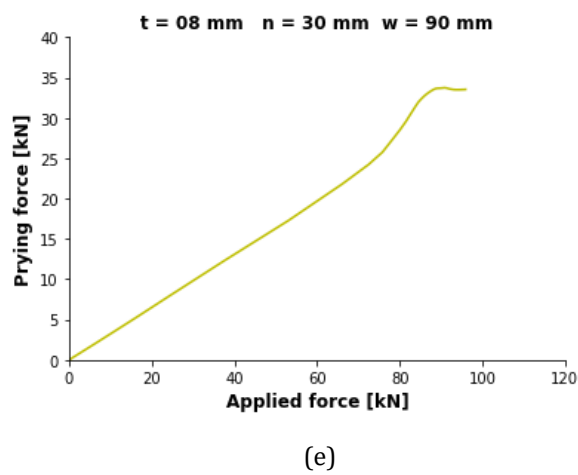
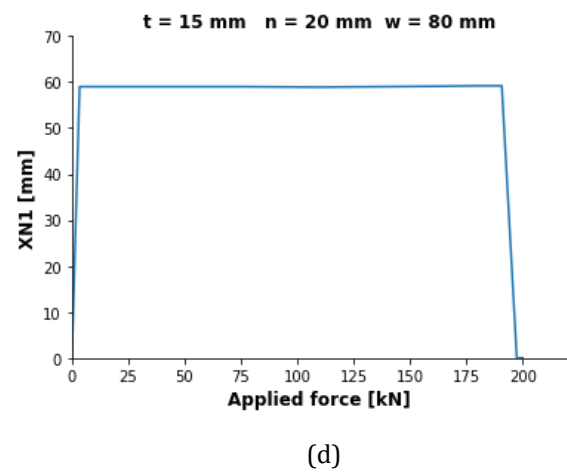
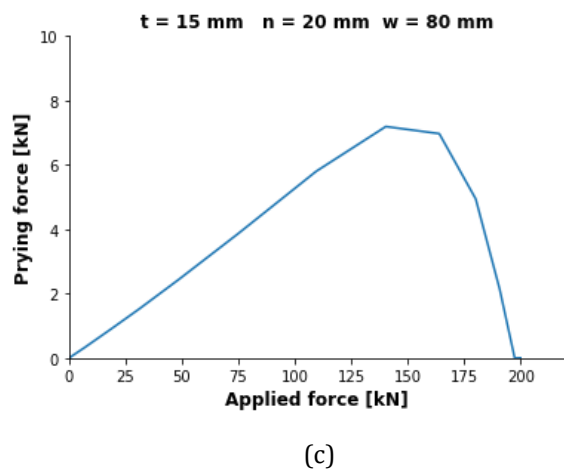
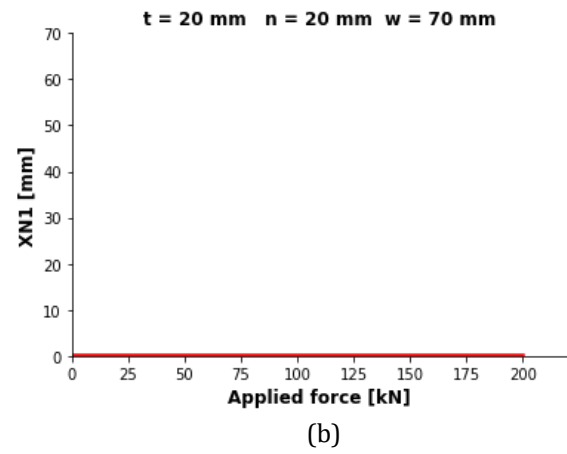
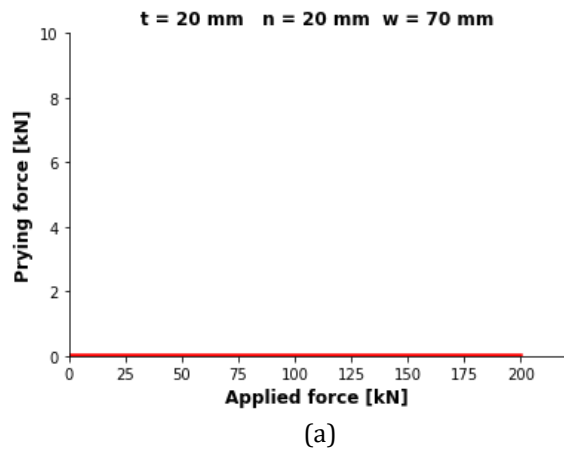


Fig. 30. Variation of the Prying Force and XN1 throughout the Loading for Different Cases

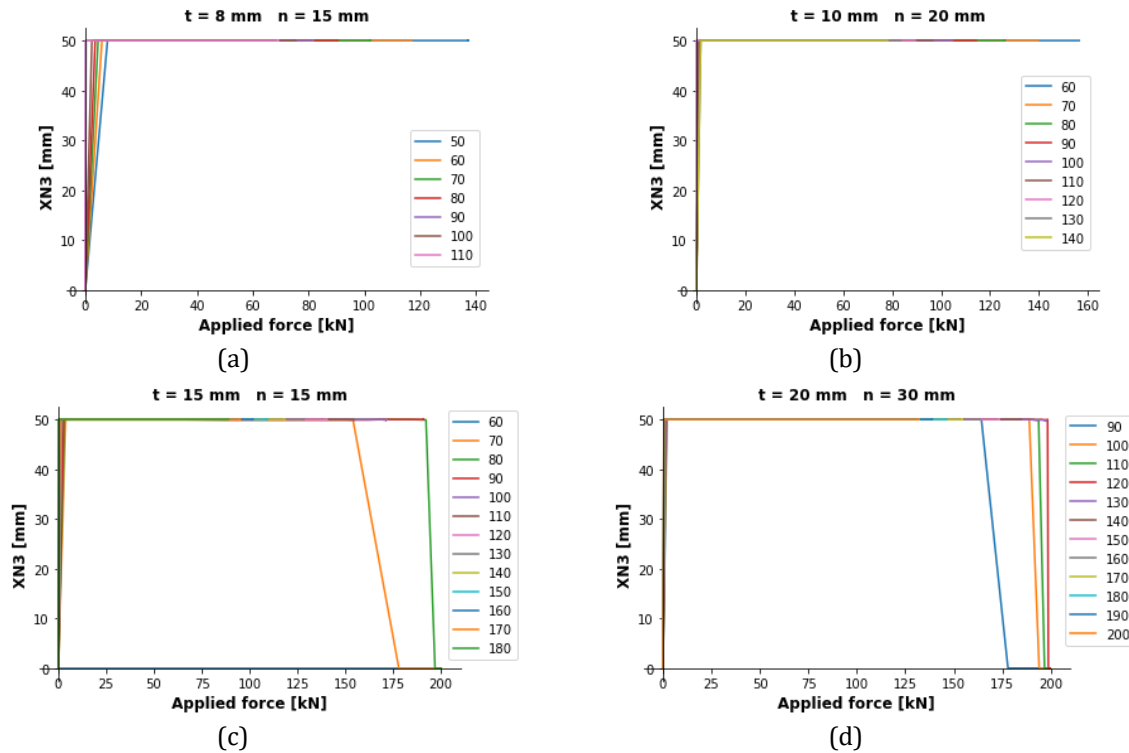


Fig. 31. Variations of $XN3$ throughout the Loading

The center of the forces due to contact pressure in the X-direction varied throughout the loading, indicating an evolution of the contact pressure. Two stages were considered and compared: attaining the T-stub plastic resistance and the ultimate stage. As depicted in Fig. 32, the values were similar or had little difference. It could be inferred that the position of the resultant contact stresses is not dependent on the loading in the case of non-preload bolts.

For the same edge distance, the position of the resultant in the X-direction, calculated according to the tip of the flange, did not exhibit much variation as the gauge distance increased (See Fig. 33). Nevertheless, the resultant moved farther from the tip as the edge distance increased; meaning that the position of the resultant depends on the edge distance.

3.3.2. Total Bolt Force

Conversely to the prying force, the total bolt force B increased as the gauge distance was increased. As mentioned in the previous sections, an increase in the gauge distance resulted in a decrease in the resistance of the T-stubs and an increase in the prying force. The decrease ratio of the resistance is greater than the increase ratio of Q per Eq. (3), leading to a decrease in the total bolt force.

Concerning the variations in function of the edge distance, a decreasing pattern was observed for specimens involving thinner flanges (8 mm and 10 mm). In contrast, the opposite was observed for $t = 15 \text{ mm}$ and $t = 20 \text{ mm}$. Furthermore, for a thinner flange, the variations of B_{max} are more distinct from one another than those for thicker flanges (Fig. 34). The highest values of the total bolt force corresponded to specimens combining the smallest values of both w and n . With thinner flanges, the total bolt force decreases as the edge distance increases. A similar variation is observed with the gauge distance. However, as illustrated in Fig. 35, in specimens with thicker flanges (15 mm and 20 mm), a linear relationship can be assumed between B_{max} and the gauge distance, as well as the edge distance. Moreover, the variations of B_{max} can be approximated by a single line, showing that the maximum total bolt force is not dependent on the edge and gauge distances when thicker flanges are used. Since the failure of the specimens involved the failure of the bolts, the maximum total bolt force, equivalent to the total bolt force at the ultimate stage, is more dependent on the bolt characteristics than the flange characteristics. In some specimens that failed in Mode 1, the maximum bolt force was as low as 77 kN, which is relatively small compared to the ultimate bolt resistance.

The variations of the maximum bolt force in function of the flange thickness are illustrated in Fig. 36.

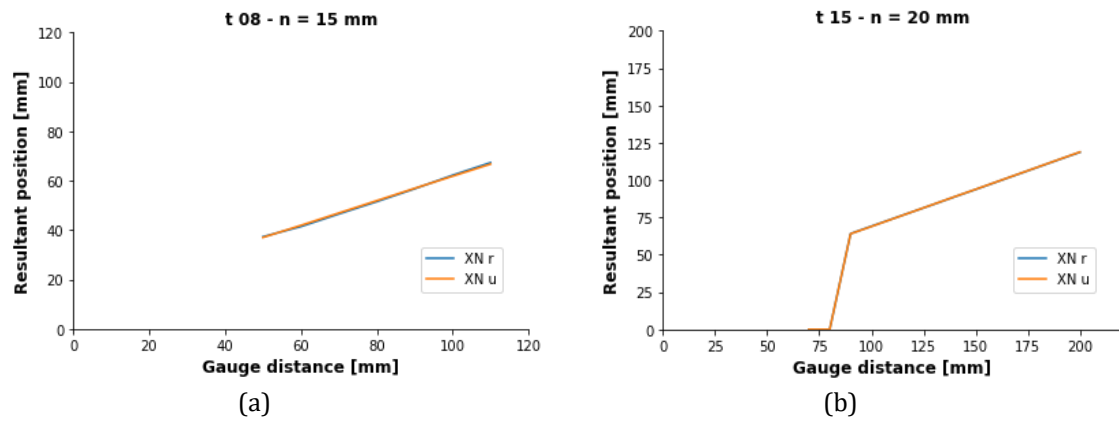


Fig. 32. XN1 at the Attainment of the Plastic Resistance and the Ultimate Stage

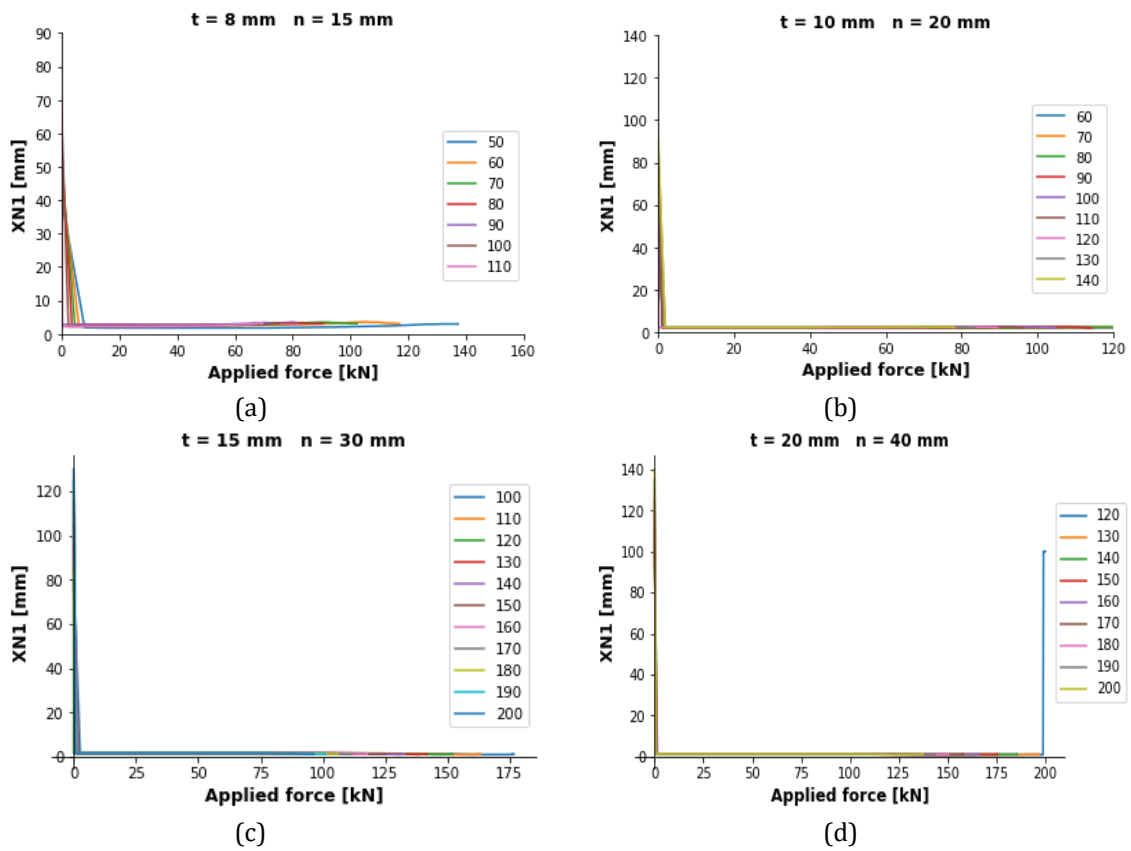


Fig. 33. Position of the Resultant of the Contact Stresses in the X-direction.

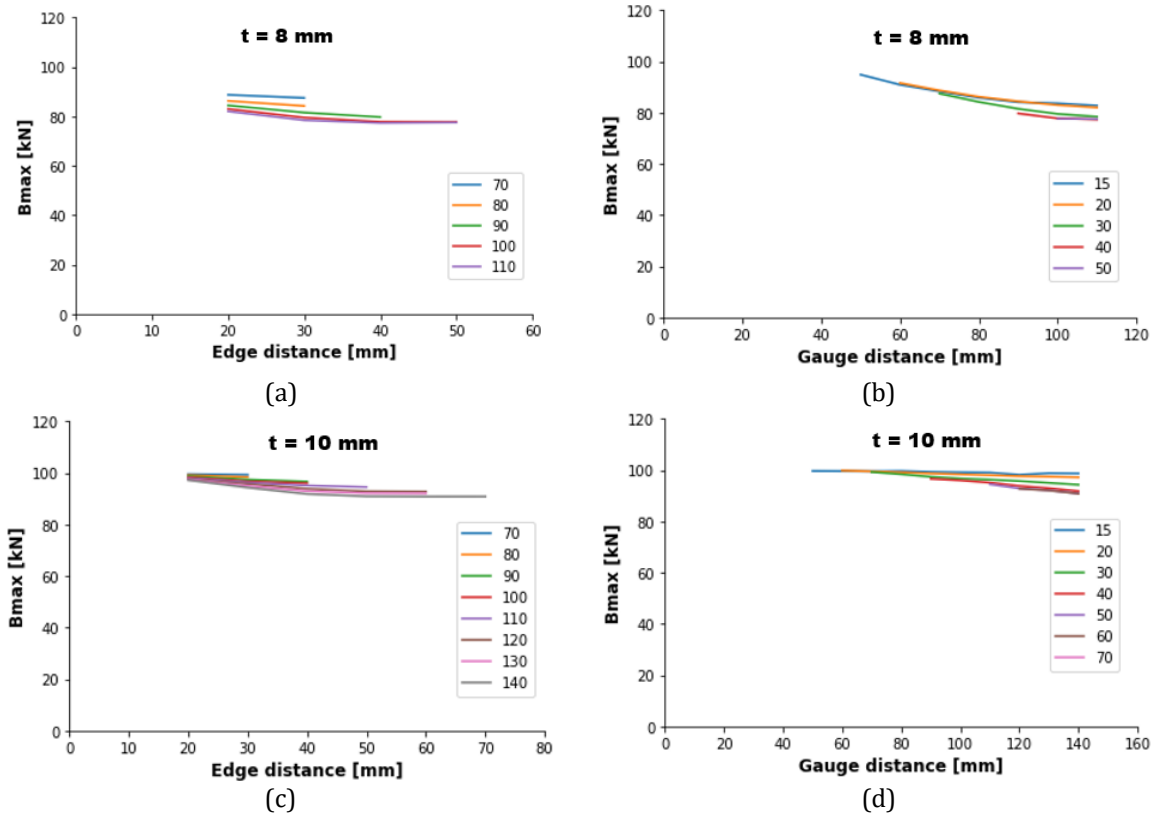


Fig. 34. Variation of the Total Bolt Force in function of n and w for $t = 8$ mm and $t = 10$ mm

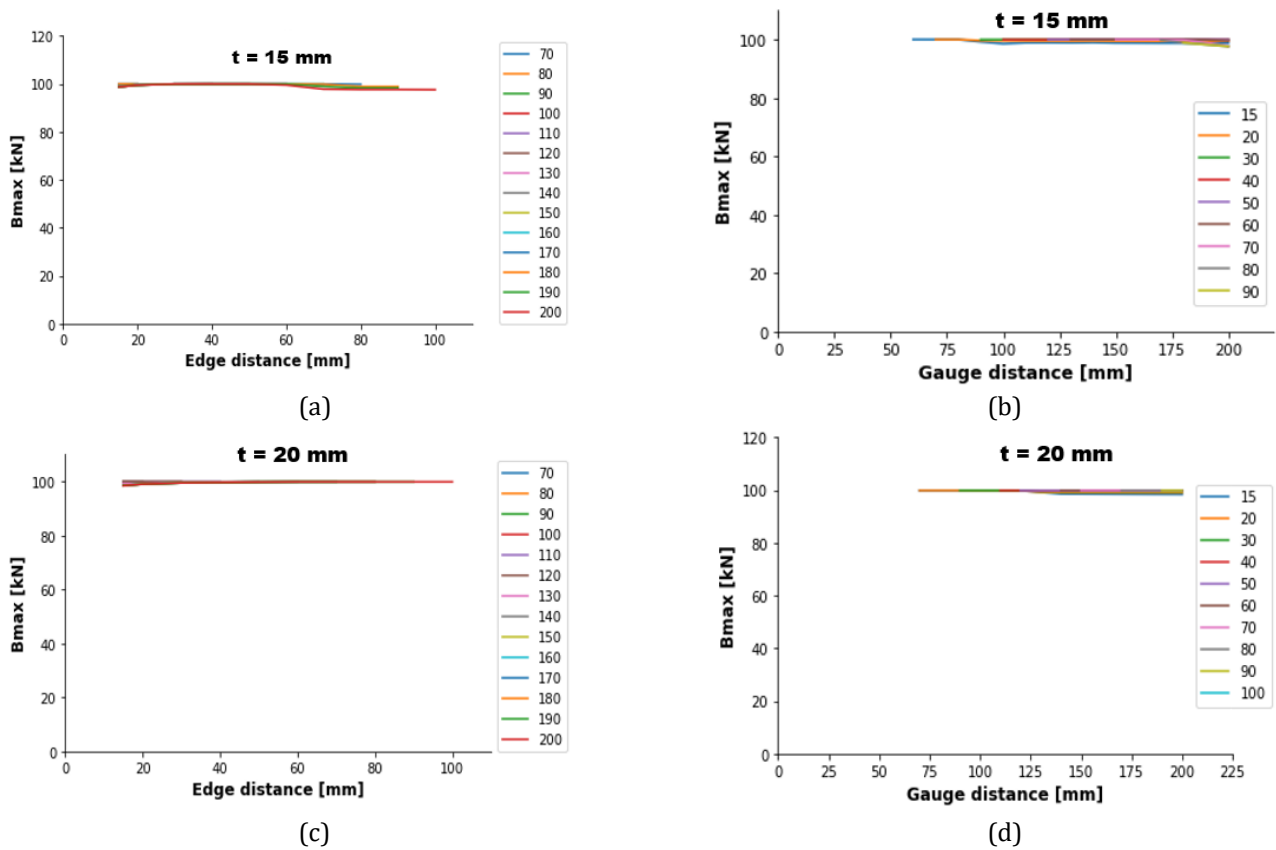


Fig. 35. Variation of the Total Bolt Force in function of n and w for $t = 15$ mm and $t = 20$ mm

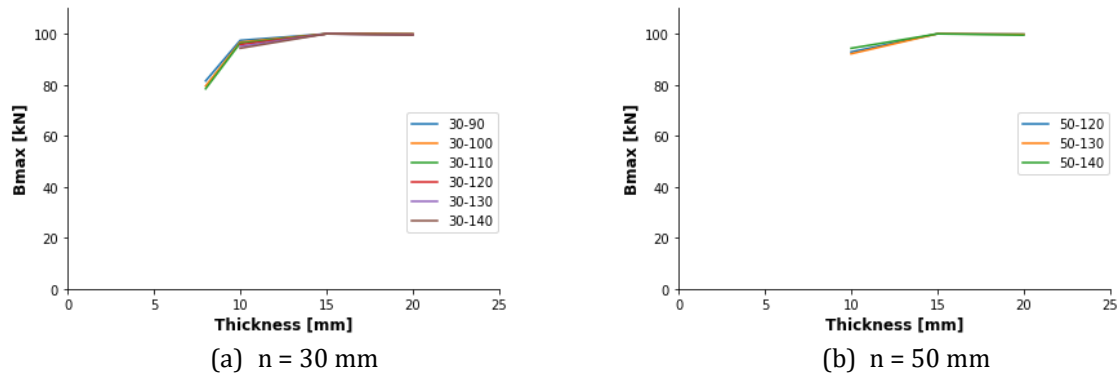


Fig. 36. Variation of B_{max} in function of the Flange Thickness for Different n - w Combinations

3.3.3. Bolt Moment

The moment in the bolts is induced by the deformation of the flanges, which subjects the bolts to flexural deformation. Even in specimens that exhibited zero prying force, the moment in the bolts was present throughout the loading. Unlike the prying force, which is related to contact stresses, the bolt moment is related to the rigidity of the flanges and the bolts. In other words, the moment in the bolts is strongly dependent on both the flanges' deformability and the bolts' deformability.

For all the specimens, the moment in the bolt exhibited the same variation throughout the loading: as the applied load increases, the bolt moment increases until a maximum value. Beyond that point, the bolt moment decreases as the applied load increases until the ultimate load (See Fig. 37). In T-stubs with thinner flanges (8 mm and 10 mm), despite being much lower than M_{max} , the moment at the ultimate stage was still positive (Fig. 37.a, Fig. 37.b). The positive sign of moment indicated that the flange continued to deform, subjecting the bolt to a bending (failure mode involving the yielding of the flange). However, only a few specimens presented ultimate positive moments for $t = 15$ mm and $t = 20$ mm. In most specimens, the ultimate moment was negative (See Fig. 37.c, Fig. 37.d). Considering that the flanges possess a relatively higher rigidity than the bolts, after the separation of the flanges, a further increase in the applied load would only result in a tension of the bolts; which would tend to cancel the bending that previously occurred in the bolt due to the flange deformation. It is worth mentioning that, with thicker flanges, the ultimate moment (positive or negative) was negligible enough to be considered equal to zero.

The variations of the bolt moment were similar to that of the prying force vis-à-vis the gauge distance. For all the specimens, the increase in the

gauge distance increased in bolt moments (See Fig. 38 and Fig. 39). Considering a certain edge distance, the rigidity of the flanges decreases, and the deformability increases as the gauge distance increases. The flanges' deformation then subjects the bolts to flexural action. However, the bolt moment variations in the edge distance function are different in specimens with thinner flanges (8 mm and 10 mm) and specimens with thicker flanges (15 mm and 20 mm). With thinner flanges, the moment in the bolt increases as the edge distance increases (See Fig. 38 and Fig. 39). It should also be noted that the influence of the edge distance is lower for high values. Similarly to the prying forces, an increase in the thickness resulted in lower bending moments in the bolts (See Fig. 40).

The ultimate flexural resistance of the bolt M_{ub} computed using equations (4) was 156 kN.mm. With 8 mm, 10 mm, 15 mm and 20 mm flange thicknesses, the maximum bolt moments attained were respectively 65%, 55%, 41%, and 37% of the M_{ub} (See Table 5). The moment in the bolts can reach proportions significant enough for the combined tensile and flexural action to yield considerable stresses in the bolt. On that account, the bolt moment has to be considered in the design.

$$M_{ub} = \frac{I}{\phi_b/2} \cdot f_{ub} \quad (4)$$

Where I is the second moment of inertia, ϕ_b the bolt diameter, and f_{ub} the ultimate stress of the bolt.

Table 5. Maximum Bolt Moment and their Ratios to Ultimate Bolt Flexural Resistance

Thickness	M_{max}	M_{max}/M_{ub}
8 mm	101.2 kN.mm	0.65
10 mm	86.5 kN.mm	0.55
15 mm	64.1 kN.mm	0.41
20 mm	58.5 kN.mm	0.38

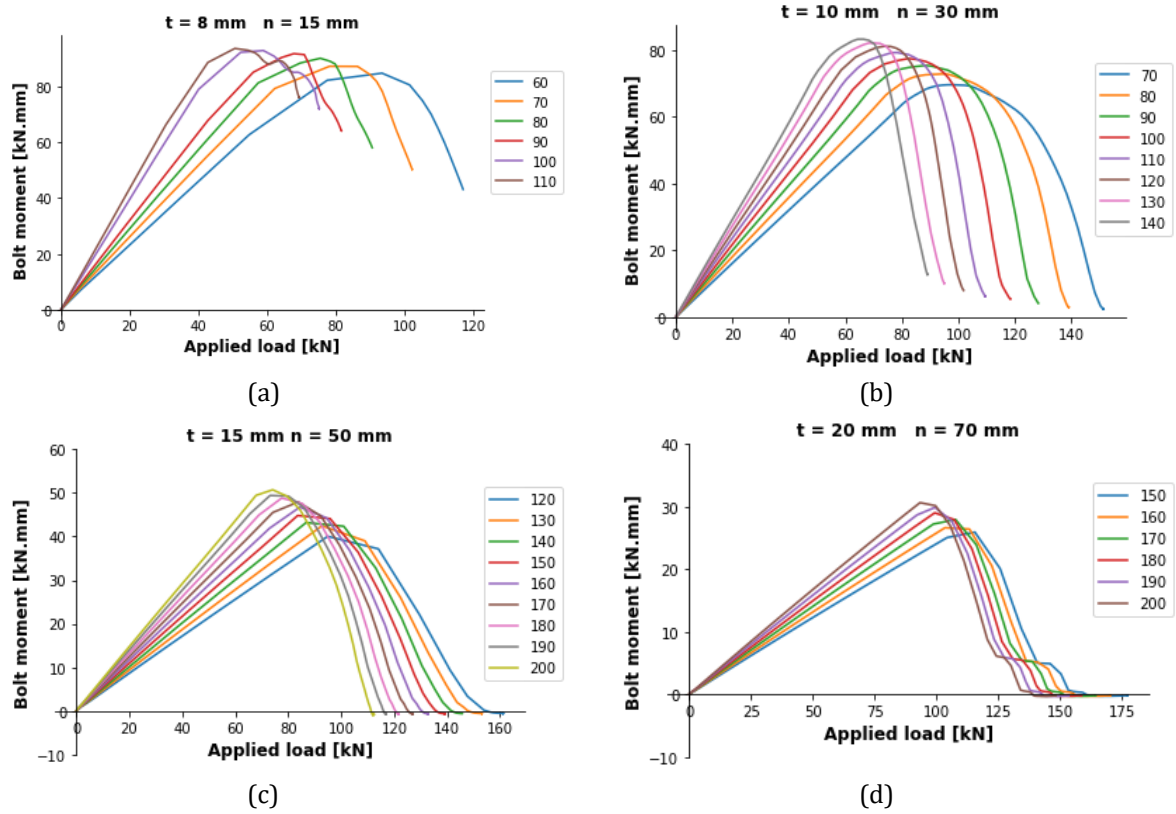


Fig. 37. Variations of the Bolt Moment throughout the Loading

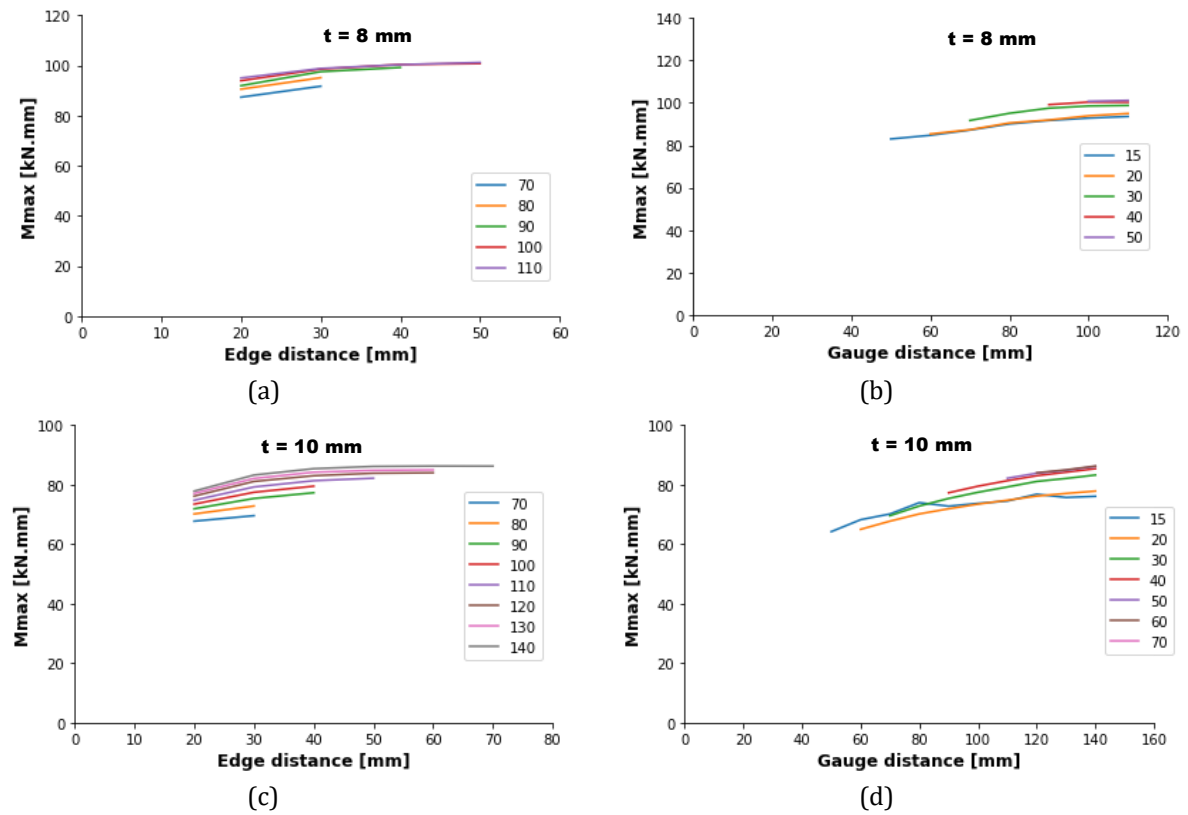


Fig. 38. Variations of the Maximum Bolt Moment in function of n and w for $t = 8 \text{ mm}$ and $t = 10 \text{ mm}$

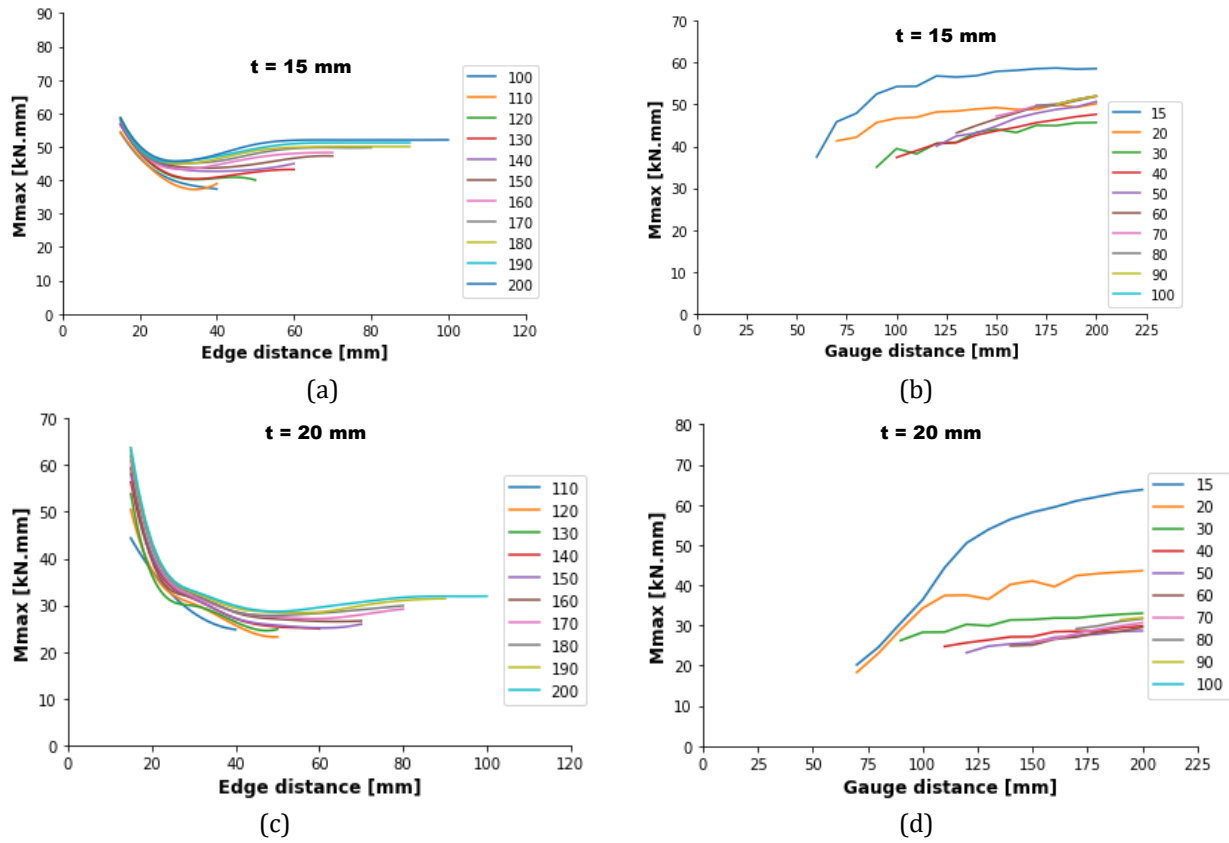


Fig. 39. Variations of the Maximum Bolt Moment in function of n and w for $t = 15$ mm and $t = 20$ mm

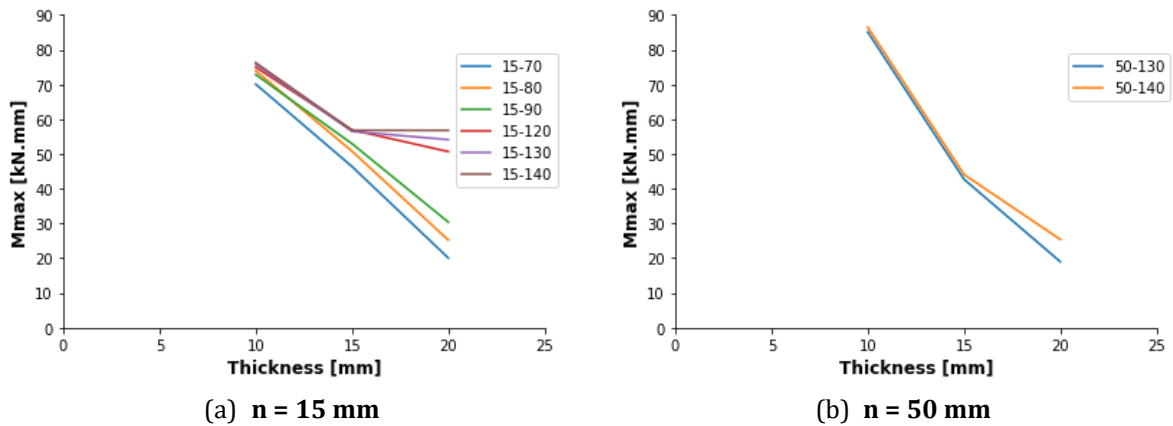


Fig. 40. Variation of the Maximum Bolt Moment in function of the Flange Thickness for Different n - w Combinations

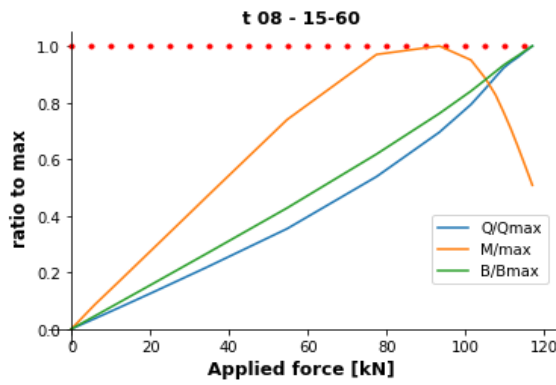
3.3.4. M-N Interactions Curves

By comparing the prying force Q , the total bolt force B and the total bolt moment M for each increment to their respective maximum values, it was observed that for all the specimens, the maximum moment M_{max} was always reached before Q_{max} and B_{max} were reached. For all the models, B_{max} corresponded to the total bolt force at the ultimate load. However, Q_{max} and M_{max} were different from the prying force and bolt moment values at ultimate stage. Concerning

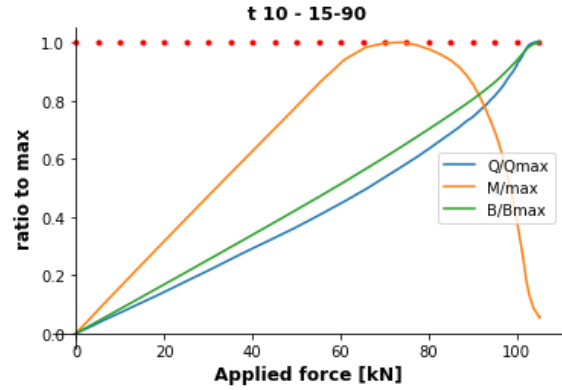
prying force, in some specimens the Q_{max} and the prying force at ultimate load coincided. The specimens failed in Mode 1 or Mode 2 close to 1. For specimens with a thinner flange, the maximum values of Q and B were reached almost at the same load. However, when thicker flanges were used, for short gauge distances, Q_{max} was attained for loads much lower than that of B_{max} . As the gauge distance was increased, the load of attainment of Q_{max} got closer to a load of attainment of B_{max} (see Fig. 41).

Considering that the bolts are subjected to the combined action of flexure and tension, it appeared important to analyze the M-N interaction curves of the T-stubs. As illustrated in Fig. 42, the maximum and ultimate bolt moment increases as the gauge distance increases. This is compatible with the fact that the deformability of the flange increases with the function of the

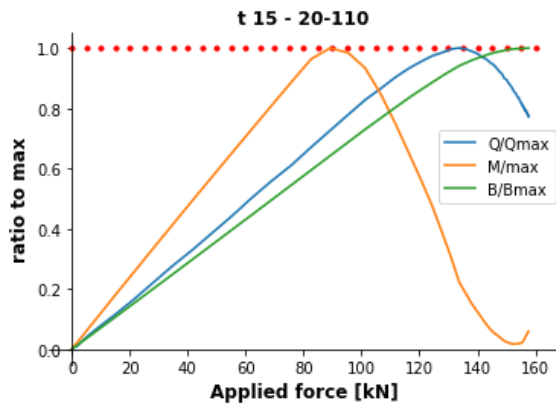
gauge distance. Conversely, the maximum total force in the bolts – equivalent to the ultimate total bolt force - decreases as the gauge distance increases. With thicker flanges, the maximum total bolt force is practically the same in all the specimens. This is because the failure of these specimens involves the failure of the bolts.



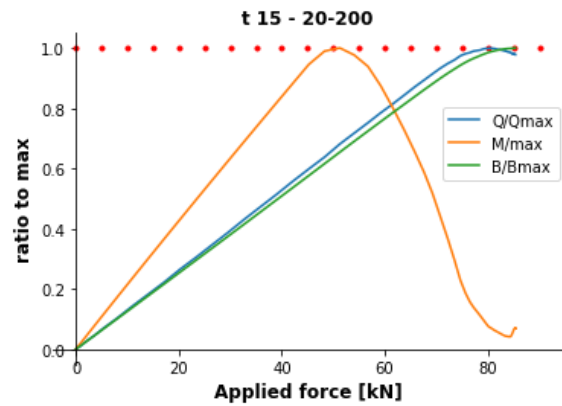
(a) $t = 8 \text{ mm} - n = 15 \text{ mm} - w = 60 \text{ mm}$



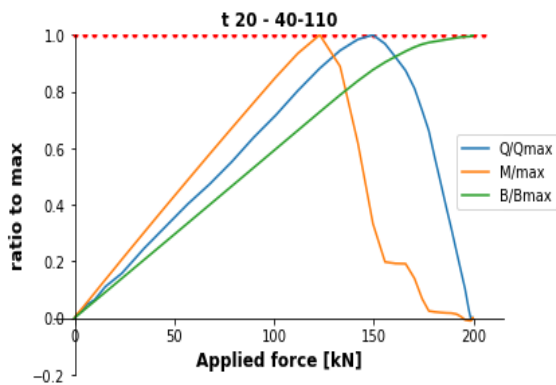
(b) $t = 10 \text{ mm} - n = 15 \text{ mm} - w = 90 \text{ mm}$



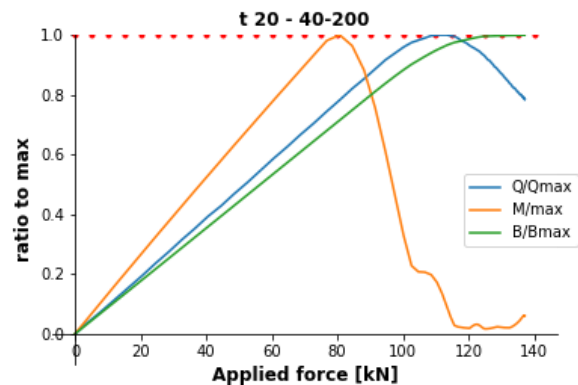
(c) $t = 15 \text{ mm} - n = 20 \text{ mm} - w = 110 \text{ mm}$



(d) $t = 15 \text{ mm} - n = 20 \text{ mm} - w = 200 \text{ mm}$



(e) $t = 20 \text{ mm} - n = 40 \text{ mm} - w = 110 \text{ mm}$



(f) $t = 20 \text{ mm} - n = 40 \text{ mm} - w = 200 \text{ mm}$

Fig. 41. Ratio of Q, M and B to their Respective Maxima

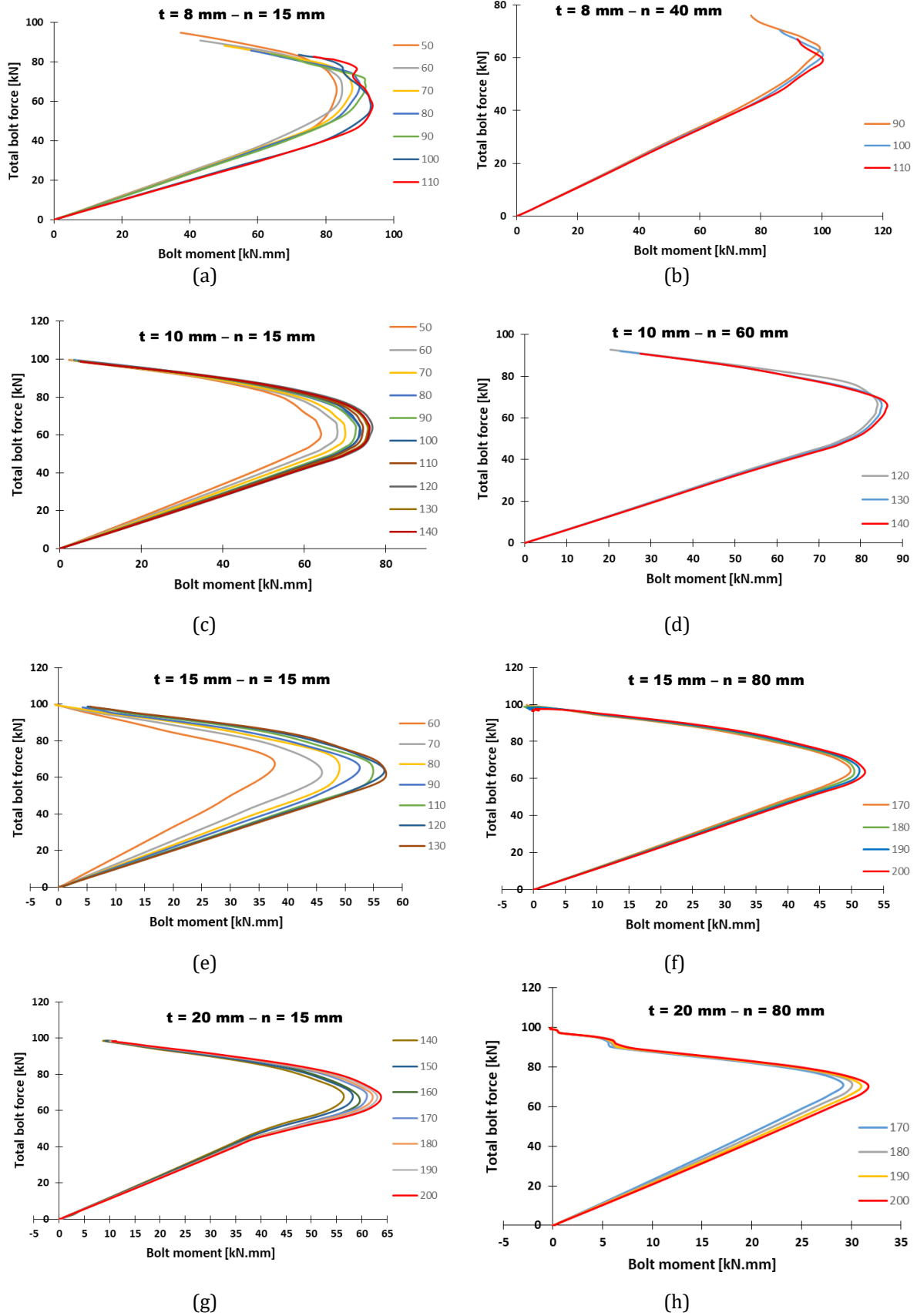


Fig. 42. Interaction Curves for $t = 8 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 15 \text{ mm}$ and 20 mm

4. Conclusion

The study carried out in this paper aimed to investigate prying effects in bolted T-stubs.

The focus was made on prying force Q , total bolt force B , bolt moment M , and their variations considering different values of flange thickness (t), edge distance (n) and gauge distance (w). The values of n and w were chosen to cover all the combinations allowed by EN 1993-1-8.

The main results of the work can be summarized as follows:

- The formulations presented in EN 1993-1-8 yield conservative estimations of the plastic resistance of T-stubs.
- In general, prying force and bolt moment exhibit the same variation pattern: an increase in gauge distance increases their values, and an increase in edge distance or thickness would decrease their values.
- Conversely, the total bolt force decreases as gauge distance increases and increases as edge distance or thickness increases.
- With non-preload bolts, the position of the resultant of the contact stresses is not dependent on the loading. Moreover, besides the flange and the bolt rigidities, the position depends heavily on the edge distance; whereas the gauge distance has negligible influence.
- The bolt moment can represent a substantial fraction (up to 65%) of the bolt flexural resistance, mainly in thin flanges where the deformation induces considerable bending of the bolts. Associated with the already significant tension of the bolts, it could cause a premature failure of the T-stub.
- A state of maximum prying force may not correspond to that of the maximum bolt force. Q_{max} and B_{max} are attained at almost the same load in thinner flanges. When thicker flanges are used, the point of maximum prying force and maximum bolt force are far apart for short gauge distances. However, as the gauge distance is increased, they tend to coincide.
- M_{max} is reached at earlier stages than Q_{max} and B_{max} . For all the specimens, B_{max} coincides with the total bolt force at ultimate load but this is not true for Q_{max} and M_{max} . Nevertheless, Q_{max} is equivalent to the prying force at ultimate load for specimens that exhibited a failure mode 1 or mode 2 close to 1. While the ultimate moment in the bolts was positive in all the specimens with thinner flanges, only a few specimens with thicker flanges exhibited a positive ultimate moment. Most specimens exhibited a negative moment at the ultimate

stage, highlighting the predominance of the bolt tension over the bolt moment.

Considering the bending moment that may develop in the bolts is critical to a safer design of bolted steel connections. Considering that Q_{max} does not always correspond to B_{max} , it implies that, for design purposes, the maximum total bolt force should be considered. A better understanding of prying requires further investigations involving more key parameters such as steel grade, bolt diameter, bolt grade, the effective width of the T-stub, and considering a more comprehensive value range of flange thickness, edge distance, and gauge distance. The outcome may permit the development of an analytical model, including bolt bending and an accurate assessment of prying action (bolt moment and total bolt force).

Author Contributions

Author 1: Development of numerical models and execution of analyses; Author 2: Interpretation of results and writing the manuscript; Author 3: Alignment of models with theoretical background and conducting the literature review.

Declaration of Interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Abidelah A., Bouchaïr A., Kerdal D. E., Influence of the flexural rigidity of the bolt on the behavior of the T-stub steel connection, Engineering Structures 81 (2014) 181–194, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.041>
- Aggerskov H. Analysis of bolted connections subjected to prying. Journal of the Structural Division ASCE; 103(ST11):2145-2163, 1977, <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004763>
- Atasoy M., Determination of Prying Load on Bolted Connections. Ph.D. dissertation, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (2012)
- Bai R., Chan S.L., Hao J.P., Improved design of extended end-plate connection allowing for prying effects, J. Constr. Steel Res. 113 (2015) 13–27, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.05.008>

- Bai R., Chan S.L., Hao J.P., Improved design of extended end-plate connection allowing for prying effects, *J. Constr. Steel Res.* 113 (2015) 13–27, <https://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.05.008>
- Baoa W., Jianga J., Yua Z., Zhou X., Mechanical behavior of high-strength bolts in T-stubs based on moment distribution, *Engineering Structures* 196 (2019) 109334, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.10.9334>
- Bezerra L.M., Bonilla J., Silva W.A., Matias W.T., Experimental and numerical studies of bolted T-stub steel connection with different flange thicknesses connected to a rigid base, *Engineering Structures* 218 (2020) 110770, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.11.0770>
- Bursi O.S., Jaspart J.P., Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections, *Computers and Structures* 69 (1998) 361–382, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00136-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00136-9)
- Bursi O.S., Jaspart J.P., Benchmarks for finite element modelling of bolted steel connections, *J. Constr. Steel Res.* 43(1), 1997, pp17–42, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(97\)00031-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(97)00031-X)
- Bursi O.S., Jaspart J.P., Calibration of a Finite Element Model for Isolated Bolted End-Plate Steel Connections, *J. Construct. Steel Res.* 44(3), 1997, pp. 225–262, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(97\)00056-4](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(97)00056-4)
- Chasten C.P., Lu L.W., Driscoll G.C., Prying and shear in end-plate connection design, *J Struct Eng* 118 (5) (1992) 1295–1311, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:5\(1295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:5(1295))
- Couchaux M., Hjiat M., Ryan I., Bureau A., Effect of contact on the elastic behaviour of tensile bolted connections, *J. Constr. Steel Res.* 133 (2017) 459–474, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.10.012>
- DIN EN 14399-4:2006-06, High-strength structural bolting assemblies for preloading – Part 4: System HV – Hexagon bolt and nut assemblies
- Douty R.T., McGuire W., High strength bolted connections with applications to plastic design, IABSE congress report, 1974, <https://doi.org/10.5169/seals-7868>
- El Kalash S.N., Hantouche E.G., Prying effect in unstiffened extended end-plate connection with circular bolts configuration, *J. Constr. Steel Res.* 160 (2019) 402–410, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.05.043>
- El Kalash S.N., Hantouche E.G., Secondary prying of column flange in Tee-connections: Experimental investigation and mechanical modeling, *J. Constr. Steel Res.* 145 (2018) 518–528, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.03.012>
- EN 1993-1-8: Eurocode 3, design of steel structures – Part 1–8: Designs of Joints, 2005
- Faralli A.C., Latour M., Tan P.J., Rizzano G., Wrobel P., Experimental investigation and modeling of T-stubs undergoing large displacements, *J. Constr. Steel Res.* 180 (2021) 106580, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106580>
- Gantes C., Lemonis M., Influence of equivalent bolt length in finite element modeling of T-stub steel connections, *Computers and Structures* 81 (2003) 595–604, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00004-X)
- Girão Coelho A.M., Bijlaard F., Gresnigt N., Simões da Silva L., Experimental assessment of the behaviour of bolted Tstub connections made up of welded plates, *J. Constr. Steel Res.* 60 (2004) 269–311, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.08.008>
- Girão Coelho A.M., Bijlaard F., Simões da Silva L., Finite-Element Modeling of the Nonlinear Behavior of Bolted T-Stub Connections, *J. Struct. Eng.* 2006.132:918–928, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:6\(918\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:6(918))
- Girão Coelho A.M., Characterization of the ductility of bolted end plate beam-to-column steel connections, Ph.D. dissertation, University of Coimbra, Coimbra, Portugal (2004)
- Hantouche E.G., Abboud N.H., Stiffness modeling of bolted thick built-up T-stub connections including secondary prying effect, *J. Constr. Steel Res.* 95 (2014) 279–289, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.12.012>
- Hantouche E.G., Kukreti A.R., Rassati G.A., Swanson J.A., Modified stiffness model for thick flange in built-up T-stub connections, *J.*

- Constr. Steel Res.81 (2013) 76–85,
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.11.009>
- Hantouche E.G., Kukreti A.R., Rassati G.A., Investigation of secondary prying in thick built-up T-stub connections using non-linear finite element modeling, Engineering Structures 36 (2012) 113–122,
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.12.012>
- Hantouche E.G., Kukreti A.R., Rassati G.A., Swanson J.A., Prying Models for Strength in Thick Flange Built-Up T-Stubs with Complete Joint Penetration and Fillet Welds, J. Struct. Eng. 141(2), 2015,
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.11.009>
- Herrera R.A., Desjouis G., Gomez G., Sarrazin M., Behavior of welded t-stubs subjected to tensile loads, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China
- Hu D., Papadopoulos J., Adams G.G., Prying action in an elastic T-stub tensile connection, J. Constr. Steel Res. 169 (2020) 106027
- Kombate T.J.C., Taşkın K., State-of-the-art review on the behaviour of T-stubs and prying action, J. Constr. Steel Res. 191 (2022) 107203,
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107203>
- Kulak G. L., Fisher J. W., Struik J. H. A., Guide to Design Criteria For Bolted and Riveted Joints, 2nd Ed. New York: American Institute of Steel Construction (2001)
- Mistakidis E. S., Baniotopoulos C. C., Bisbos C. D., Panagiotopoulos P. D., Steel T-Stub Connections Under Static Loading: an Effective 2-D Numerical Model, J. Construct. Steel Res. Vol. 44, Nos. 1-2, pp. 51-67, 1997,
[https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(97\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(97)00037-0)
- Nair R.S., Birkemoe P., Munse W., Behavior of Bolts in Tee-Connections Subject to Prying Action, Journal of the Structural Division, Vol. 353 (1969) pp. 161 – 175
- Piluso V., Faella C., Rizzano G., Ultimate Behavior of Bolted T-Stubs. I: Theoretical Model J. Struct. Eng. 127 (2001),
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:6\(686\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:6(686))
- Piluso V., Faella C., Rizzano G., Ultimate Behavior of Bolted T-Stubs. II: Model Validation J. Struct. Eng. 127 (2001),
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:6\(694\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:6(694))
- Qiang X., Shen Y., Jiang X., Bijlaard F.S.K., Theoretical study on initial stiffness of thin-walled steel T-stubs taking account of prying force, Thin-Walled Structures 155 (2020) 106944,
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106944>
- Raebel CH, DeSimone R.G., Meier A.M., Effects of Bolt Spacing on Prying Forces in WT Connections, AEI 2013 - Building Solutions for Architectural Engineering, 2013,
<https://doi.org/10.1061/9780784412909.073>
- Sherbourne A.N., Bahaari M.R., 3D Simulation of Bolted Connections to Unstiffened Columns - I. T-stub Connections, J. Construct. Steel Res. Vol. 40, No. 3, pp. 169-187, 199,
[https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(96\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(96)00048-X)
- Simon M. W, Hengehold J. B., Finite Element Analysis of Prying Action in Bolted Joints, SAE Transactions, Vol. 86, Section 3: 770404–770718 (1977), pp. 2103-2112,
<https://doi.org/10.4271/770545>
- Stamatopoulos G.N., Ermopoulos J. Ch., Influence of the T-stub Flexibility on Its Strength, International Journal of Steel Structures, March 2010, Vol 10, No 1, 73-79,
<https://doi.org/10.1007/bf03249513>
- Steel Construction Manual, 16th Edition, AISC, USA, 2023
- Swanson J.A., Kokan D., Leon, R., Advanced finite element modeling of bolted T-stub connection components. J. Constr. Steel Res. (2002) 58(5):1015–31,
[https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00098-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00098-0)
- Swanson J.A., Leon R.T., Bolted steel connections: tests on T-stub components, Journal of Structural Engineering ASCE 2000;126(1):50–6,
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:1\(50\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:1(50))
- Tartaglia R., D'Aniello M., Zimbru M., Experimental and numerical study on the T-Stub behaviour with preloaded bolts under large deformations, Structures 27 (2020) 2137–2155,
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.032>
- Thornton W.A., Prying action - A general treatment, Eng J 22 (2) (1985) 67–75

Wanzek T., Gebbeken N., Numerical aspects for the simulation of end plate connections, In: Cost C1 WG6 report: Numerical simulation of semi-rigid connections by the finite element method, Viridi K.S (Ed.), European Commission, Brussels, 1999, pp 13-31

Yang J.G., Kim H.K., Park J.H., Back MC, Analytical Models for the Initial Axial Tensile Stiffness and Ultimate Tensile Load of a T-Stub, Including the Effects of Prying Action, International Journal of Steel Structures June 2013, Vol 13, No 2, 341-352, <https://doi.org/10.1007/s13296-013-2012-7>

Yang J.G., Park J.H., Kim H.K., Back MC, A Prying Action Force, and Contact Force Estimation Model for a T-Stub Connection with High Strength Bolts, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2013, 12:2, 309-316, <https://doi.org/10.3130/jaabe.12.309>

Yuan H.X., Hu S., Du X.X., Yang L., Cheng X.Y., Theofanous M., Corrigendum to "Experimental behaviour of stainless steel bolted T-stub connections under monotonic loading" [J. Constr. Steel Res. 152(2019) 213–224], J. Constr. Steel Res. 172 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105860>

Yuan H.X., Hu S., Du X.X., Yang L., Cheng X.Y., Theofanous M., Experimental behaviour of stainless steel bolted T-stub connections under monotonic loading, J. Constr. Steel Res. 152 (2019) 213–224, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.021>

Zhao M.S., Lee C.K., Fung T.C., Chiew SP, Impact of welding on the strength of high-performance steel T-stub joints, J. Constr. Steel Res. 131 (2017) 110–121, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.12.023>

Zoetemeijer P., A design method for the tension side of the statically loaded, bolted beam to column connections, *Heron*, 1974, 20(1), 59