



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ

Mühendislik ve
Fen Bilimleri
Dergisi

KIRKLARELİ UNIVERSITY

Journal of
Engineering
and Science

KLUTES

ISSN: 2458-7494 / E-ISSN: 2458-7613

An International Peer Reviewed, Indexed and Open Acces Journal



ISSN : 2458-7494

E-ISSN: 2458-7613

KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

KIRKLARELİ UNIVERSITY
JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Cilt / Volume: 10

Sayı / Number: 2

Aralık / December 2024

Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

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

e-mail: fbedergi@klu.edu.tr



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Sahibi / Owner

Kırklareli Üniversitesi Rektörlüğü Adına / Owner on Behalf of Kırklareli Rectorship
Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR (Rektör)

Baş Editör / Editor in Chief

Kırklareli Üniversitesi / Kırklareli University
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü Adına / On Behalf of Institute of Natural Sciences Director
Doç. Dr. H. Hale KARAYER

Editörler / Editors

Prof. Dr. Erol TÜRKES
Doç. Dr. Burak ÖZŞAHİN
Doç. Dr. Nurdan KURNAZ YETİM
Dr. Öğr. Üyesi Erdinç KESKİN
Dr. Öğr. Üyesi Merve ERMİŞ

Teknik Editör / Technical Editor

Doç. Dr. Mümin Mehmet KOÇ

Mizanpaj Editörü / Layout Editor

Dr. Öğr. Üyesi Ufuk PAKSU

Alan Editörleri / Subject Editors

Doç. Dr. Berna AKGENÇ HANEDAR Fizik / Physics
Doç. Dr. Engin HÜNER Yenilenebilir Enerji sistemleri Mühendisliği / Renewable Energy Systems Engineering
Doç. Dr. Mustafa ARSLAN Kimya/Chemistry
Doç. Dr. Olcay EKŞİ Makine Mühendisliği/Mechanical Engineering
Doç. Dr. Orhan ARKOÇ Jeoloji Mühendisliği / Geological Engineering
Doç. Dr. Seda BALKAN Biyoloji / Biology
Doç. Dr. Sencer Süreyya KARABEYOĞLU Makine Mühendisliği/Mechanical Engineering
Doç. Dr. Naim ASLAN Malzeme Mühendisliği / Material Engineering
Doç. Dr. Soner YELER Mimarlık / Architecture
Doç. Dr. Hayrettin TOYLAN Mekatronik Mühendisliği / Mechatronics Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇAKANEL Elektrik ve Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronic Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Edip Serdar GÜNER Yazılım Mühendisliği / Software Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Nihan TIRMIKÇIOĞLU Matematik / Mathematics
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Utku YILMAZ İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Orhan Onur AŞKIN Gıda Mühendisliği / Food Engineering

Türkçe Dil Editörü / Turkish Language Editor

Doç. Dr. İlker TOSUN

İngilizce Dil Editörü / English Language Editor

Dr. Öğr. Üyesi Sevda PEKCOŞKUN GÜNER



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Yayın Kurulu / Editorial Board

- Bülent ŞENGÖRÜR, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Meryem ÇAMUR DEMİR, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Ahmet ÇAKANEL, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Ali ÇALIŞKAN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Ayşegül DERE, Fırat Üniversitesi, Türkiye
Berna AKGENÇ HANEDAR, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Bilal BALKAN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Burak ÖZŞAHİN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Burhan CEYLAN, Harran Üniversitesi, Türkiye
Cem KINCAL, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye
Cemile ÖZCAN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Deniz EROĞLU, Kadir Has Üniversitesi, Türkiye
Derya KAPUSUZ YAVUZ, Gaziantep Üniversitesi, Türkiye
Dilek NARTOP, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Duygu BARUT CELEPÇİ, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye
Edip Serdar GÜNER, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Elvan HASANOĞLU ÖZKAN, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Engin HÜNER, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Erdoğan KESKİN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Erol TÜRKEŞ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Fahrettin YAKUPHANOĞLU, Fırat Üniversitesi, Türkiye
Fatih ERSAN, Adnan Menderes Üniversitesi, Türkiye
Fatih SEMERCİOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Fürüzan ASLAN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Gürkan İRSEL, Trakya Üniversitesi, Türkiye
H. Hale KARAYER, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Hatice ŞANLIDERE ALOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Juan Ignacio Ahuir TORRES, Liverpool John Moores Üniversitesi, İngiltere
Mahmut KUŞ, Konya Teknik Üniversitesi, Türkiye
Mehmet YAĞMURCUKARDEŞ, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Türkiye
Mensur SÜMER, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Merve ERMİŞ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Michele GUIDA, Salerno Üniversitesi, İtalya
Mustafa ARSLAN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Mustafa ERKOVAN, INESC MN ve Lizbon Teknik Üniversitesi, Portekiz
Mustafa Utku YILMAZ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Mümin Mehmet KOÇ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Naim ASLAN, Munzur Üniversitesi, Türkiye
Natasja TODOROVIC, Novi Sad Üniversitesi, Sırbistan
Nihan TIRMIKÇIOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Nurdan KURNAZ YETİM, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Olca EKŞİ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Orhan ARKOÇ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Orhan Onur AŞKIN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Önder AYER, Trakya Üniversitesi, Türkiye
Ram K. GUPTA, Pittsburg Şehir Üniversitesi, ABD
Seda BALKAN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Selman MUTLU, İstanbul Üniversitesi, Türkiye
Sencer Süreyya KARABEYOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Serpil AKÖZCAN PEHLİVANOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Sena Esen BAYER KESKİN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Soner YELER, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Tahir ÇAĞIN, Texas A&M Üniversitesi, ABD
Tze Chuen YAP, Heriot-Watt Üniversitesi, Malezya
Tomasz Jachowicz, Lublin Teknoloji Üniversitesi, Polonya
Ufuk PAKSU, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Yasemin ALKIŞER BREGGER, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Yashar Azizian KALANDARAGH, Mohaghegh Ardabili Üniversitesi, İran

Kırklareli Üniversitesi / Kırklareli University
Fen Bilimleri Enstitüsü Sekreterliği Adına / On Behalf of Institute of Natural Sciences Secretary
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Editing Manager
Erhan AYAZ

İnternet Adresi / Web Address
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/klujes>

Yazışma Adresi / Correspondence Address
Kırklareli Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
Rektörlük Kültür Merkezi B Blok Merkez/ Kırklareli
e-mail: fbedergi@klu.edu.tr
Tel: 0 (288) 246 15 16
Fax: 0 (288) 246 16 02

Yayın Türü / Publication Type
Yaygın Süreli Yayın (elektronik) / International Periodical (electronic)
Yılda iki kez yayınlanır: Haziran, Aralık / Twice a year: June, December
Basım Tarihi / Publication Date: 31.12.2024



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Danışma Kurulu / Advisory Board

Abdurrahman GÜNER, İstanbul Esenyurt Üniversitesi, Türkiye
Adnan MİDİLLİ, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Bilal BALKAN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Burhan COŞKUN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Bülent AKBAŞ, Gebze Teknik Üniversitesi, Türkiye Bülent ŞENGÖRÜR, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Dilek NARTOP, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Doğan DEMİRHAN, Ege Üniversitesi, Türkiye
Elvan HASANOĞLU ÖZKAN, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Emel PELİT, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Emrah DOĞAN, Sakarya Üniversitesi, Türkiye Erhan Erhan BUDAK, Sabancı Üniversitesi, Türkiye
Erol TÜRKEŞ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Hatice ŞANLIDERE ALOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
İlker ORUÇ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
İsmail KILIÇ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Juan Ignacio Ahuir TORRES, Liverpool John Moores Üniversitesi, İngiltere
Kanat Burak BOZDOĞAN, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye
Kamil KAHVECİ, Trakya Üniversitesi, Türkiye
Macide CANTÜRK RODOP, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Mehmet H. OMURTAG, İstanbul Medipol Üniversitesi, Türkiye
Meryem ÇAMUR DEMİR, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Michele GUIDA, Salerno Üniversitesi, İtalya
Murat BOSTANCIOĞLU, Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye
Mustafa ERKOVAN, INESC MN ve Lizbon Teknik Üniversitesi, Portekiz
Mustafa Utku YILMAZ, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Nadide SEÇKİN, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Natasia TODOROVIC, Novi Sad Üniversitesi, Sırbistan
Nihal ERATLI, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye
Oğuzhan ERBAŞ, Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye
Ram K. GUPTA, Pittsburg Şehir Üniversitesi, ABD
Serap GÜNEŞ, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Serpil AKÖZCAN PEHLİVANOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye
Tomasz Jachowicz, Lublin Teknoloji Üniversitesi, Polonya
Tze Chuen YAP, Heriot-Watt Üniversitesi, Malezya
Yashar Azizian KALANDARAGH, Mohaghegh Ardabili Üniversitesi, İran
Yılmaz ÇAN, Trakya Üniversitesi, Türkiye



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

İçindekiler / Contents

Araştırma Makalesi / Research Article

Hatay İli Antakya Merkezde Yarı Kırsal Bölgede 6 ve 20 Şubat 2023 Depremlerinin Etkisi

The Effect of the 6 and 20 February 2023 Earthquakes in the Semi-Rural Region in Hatay, Antakya

Selen AKTAN, Fatih YONAR **99-116**

Review Article / Derleme Makalesi

Evaluation of Molasses in Civil Engineering Works: A Review

Melâsin İnşaat Mühendisliği İşlerinde Değerlendirilmesi: Bir İnceleme

Melih ŞAHİNÖZ **117-141**

Araştırma Makalesi / Research Article

**Kamusal Alanların Mekânsal Kalite Parametreleri Temelinde Görsel Peyzaj Değerinin Belirlenmesi:
İstanbul/ Maltepe Örneği**

Determination of Visual Landscape Value of Public Spaces Based on Spatial Quality Parameters:
Istanbul/ Maltepe Case

Meltem COŞANER TONYALI Tuğba KİPER **142-159**

Araştırma Makalesi / Research Article

Bir Uçağın Burun İniş Takımı Parçasının Yapısal Analizi ve Malzeme Seçimi

Structural Analysis and Material Selection of Nose Landing Gear Part of an Aircraft

Emre ŞAHİN, Cengiz ELDEM **160-172**

Research Article / Araştırma Makalesi

Sustainability and Industrial Design: A Study on AC EV Chargers' Material Selection

Sürdürülebilirlik ve Endüstriyel Tasarım: AC Elektrikli Araç Şarj Cihazları Malzeme Seçimi Üzerine Çalışma

Mustafa CANBULAT, Ahmet Fevzi SAVAŞ **173-190**

Araştırma Makalesi / Research Article

Hidrofilik Aşı Kopolimer Membranların Şişme Davranışının Kinetik İncelenmesi

Kinetic Investigation of Swelling Behavior of Hydrophilic Graft Copolymer Membranes

Fatma KURŞUN BAYSAK, Gülcan GEYİK **191-206**

Derleme Makalesi / Review Article

İlaç Taşıyıcı Sistemler ve Lipozomlar

Drug Delivery Systems and Liposomes

Yunus Bora SUBAŞI, Beyza ÇALIK, Pelinsu KARATAŞ, Rumeysa ADIYIL, Pelin SARAÇOĞLU, Murat IHLAMUR **207-218**

Research Article / Araştırma Makalesi

Classifiers and Image Processing to Identify Sign Language Phonemes

İşaret Dili Fonemlerini Belirlemek İçin Sınıflandırıcılar ve Görüntü İşleme

Ebru EFEOĞLU, Ayşe TUNA.....

219-232

Araştırma Makalesi / Research Article

Barlat89 Akma Kriterinin Detaylı İncelenmesi ve Model Katsayılarının Belirlenmesi Üzerine Farklı Yöntemlerin Geliştirilmesi

Detailed Examination of the Barlat89 Yield Criterion and Development of Various Methods for Determining Model Coefficients

Süleyman KILIÇ.....

233-245

Research Article / Araştırma Makalesi

Diode and Photodetector Characterization of Van der Waals Type InSe/CdS Heterojunction Device

Van der Waals tipi InSe/CdS Heteroeklem Cihazının Diyot ve Fotodedektör Karakterizasyonu

Fatih ÜNAL.....

246-255

Araştırma Makalesi / Research Article

Gömülü Sistem Destekli Yapay Sinir Ağları ile Baskı Devre Kartlarındaki Hataların Otomatik Tespiti

Automated Detection of Faults in Printed Circuit Boards Using Embedded System Supported Artificial Neural Network

şennur İBRAHİMOĞLU, Erdal BÜYÜKBIAKÇI.....

256-281

Research Article / Araştırma Makalesi

Effect of Different Fluid Types on Cycle Performance in Electricity Generation with Geothermal Energy

Jeotermal Enerji ile Elektrik Üretiminde Farklı Akışkan Türlerinin Çevrim Performansına Etkisi

Oğuzhan ERBAŞ **282-293**

Araştırma Makalesi / Research Article

İnce Daneli Zeminlerde Jet Grout ve Fore Kazık Yöntemleri ile Zemin İyileştirilmesi ve Yapılabilirliğinin Optimizasyonu

Soil Improvement and Optimization of Fability with Jet Grout and Bored Pile Methods in Fine-Grained Soils

Furkan Hüseyin ATAŞ, İbrahim Feda ARAL **294-315**

Araştırma Makalesi / Research Article

Nikel-Kobalt (NixCoy) Nano Kümelerinin Yapısal, Elektronik ve Manyetik Özelliklerinin Teorik İncelenmesi

Theoretical Investigation of Structural, Electronic and Magnetic Properties of Nickel-Cobalt (NixCoy) Nanoclusters

Murat KALKANLI, Fethi Mehmet AKİS, İsil İlğaz AYSAN, Fatih ERSAN **316-343**

Research Article / Araştırma Makalesi

Seasonal Effects of Abiotic Factors and Nutrient Sources on the Feeding Activity of the Harvester Ant Species *Messor semirufus* (André, 1883)

Abiyotik Faktörlerin ve Besin Kaynaklarının Hasatçı Karınca *Messor semirufus* (André, 1883)'un Beslenme Aktivitesi Üzerindeki Mevsimsel Etkileri

Sultan Ebru KAYA, Yılmaz ÇAMLITEPE **344-362**

Araştırma Makalesi / Research Article

Sabit Kanatlı İHA'da Kanat Geometrisinin Aerodinamikteki Etkileri

Aerodynamic Effects of Wing Geometry on Fixed Wing UAV

Melih ALTAY, Erol TÜRKEŞ **363-376**

Research Article / Araştırma Makalesi

A Digital Twin-Based Study of Material Behaviour in the Rolling Process

Haddelenme Sürecinde Malzeme Davranışının Dijital İkiz Temelli İncelenmesi

Kadir GÖK, Cemal ESEN **377-386**

Araştırma Makalesi / Research Article

Sürdürülebilir Binalar İçin Güneşlenme Süresinin 3B Modellenmesi ve Simülasyonu Üzerine Bir Araştırma

A Study on 3D Modeling and Simulation of Sunshine Duration for Sustainable Buildings

Ahmet USLU, Abtullah TUĞCU **387-401**

Hatay İli Antakya Merkezde Yarı Kırsal Bölgede 6 ve 20 Şubat 2023 Depremlerinin Etkisi

Selen AKTAN^{1*}, Fatih YONAR¹

¹*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye*

Geliş: 29.04.2024, Kabul: 07.06.2024, Yayınlanma: 03.10.2024

ÖZ

6 Şubat 2023 tarihinde Doğu Anadolu Fayı üzerinde meydana gelen merkez üssü Kahramanmaraş ve Gaziantep olan depremler, geniş bir alanı etkileyerek çok büyük bir yıkıma yol açmıştır. 20 Şubat 2023 tarihinde ise Hatay'da gerçekleşen deprem mevcut hasarı daha da arttırmıştır. Bu çalışmada Mart 2023 tarihinde Hatay ili Antakya merkeze bağlı yarı kırsal iki bölgesinde yapılan hasar tespit çalışmasının gözlemsel verileri incelenmiştir. Hasar tespiti yapılan yapılarda yaygın olarak donatı hasarları, beton kusurları ve yapıların düzensizlik durumlarından dolayı oluşan hasarlar gözlemlenmiştir. Özellikle etriye aralıklarının uygun olmadığı, sıklaştırma yapılmadığı, çiroz donatısının hiç kullanılmadığı, donatılarda ciddi oranda korozyon oluştuğu ve taşıyıcı sistemlerde bazı düzensizlik durumlarının bulunduğu görülmüştür. Bu yapıların birçoğunun mühendislik hizmeti almamış olduğu ve bundan dolayı çok temel kuralların dahi yapılarda uygulanmamış olduğu tespit edilmiştir. Ülkemizde 1975 yılından itibaren günümüze kadar yürürlüğe girmiş olan deprem yönetmeliklerindeki bu parametreler incelenerek yapılarda gözlemlenen durumlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, yürürlüğe girmiş son 4 deprem yönetmeliğindeki incelenen parametrelerin sınır değerlerinin oldukça yeterli olduğu ancak bu kuralların uygulanmamış olduğu ve bu yapılarda hasar oluştuğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deprem; Hasar tespit; Hatay; Deprem yönetmelikleri

The Effect of the 6 and 20 February 2023 Earthquakes in the Semi-Rural Region in Hatay, Antakya

ABSTRACT

The earthquakes occurred on the Eastern Anatolian Fault on February 6, 2023, with the epicenter in Kahramanmaraş and Gaziantep, affected a wide area and caused huge destruction. The earthquake that occurred in Hatay on February 20, 2023 further increased the existing damage. In this study, the observational data of the damage assessment carried out in two semi-rural regions of Antakya, Hatay in March 2023 were examined. Reinforcement damages, concrete defects and damage caused by irregularities of the structures were commonly observed in the structures. In particular, it was observed that the lateral reinforcement was inappropriate, serious corrosion occurred in the reinforcement, and there were some irregularities in the load-bearing systems. It has been determined that many of these structures have not received engineering services and therefore even very basic rules have not been applied in the structures. These parameters in the seismic codes that have been in force in our country since 1975 have been examined and evaluated by comparing with the situations observed in the buildings. As a result, it was seen that the

limit values of the examined parameters in the last 4 seismic codes were quite sufficient, but these rules were not implemented and damage occurred in these structures.

Keywords: Earthquake; Damage assessment; Hatay; Seismic codes

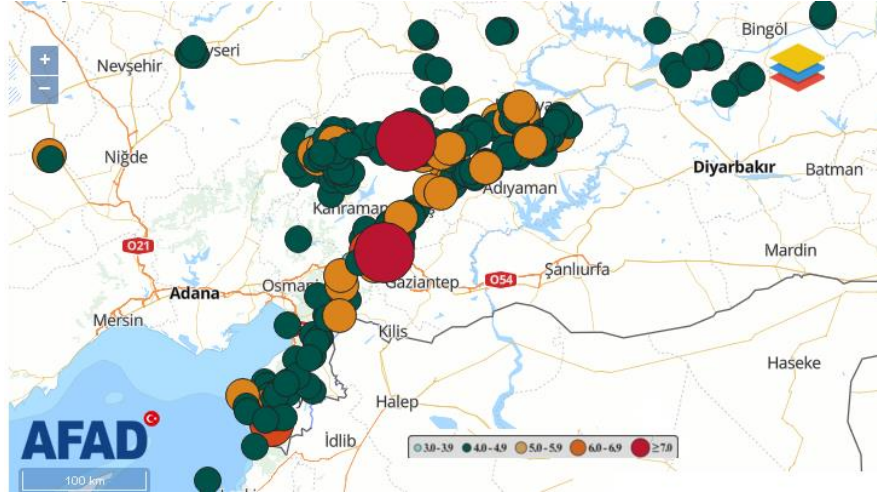
1. GİRİŞ

6 Şubat 2023 tarihinde saat 04.17’de merkez üssü Kahramanmaraş-Pazarcık olan $M_w=7.7$ büyüklüğünde, saat 04.28’de merkez üssü Gaziantep-Nurdağı olan $M_w=6.6$ büyüklüğünde ve aynı gün saat 13.24’te merkez üssü Kahramanmaraş-Elbistan olan $M_w=7.6$ büyüklüğünde yıkıcı depremler meydana gelmiştir. Bu depremlerden 2 hafta sonra 20 Şubat 2023 tarihinde saat 20.07’de merkez üssü Hatay-Samandağ olan $M_w=6.4$ büyüklüğünde bir deprem daha yaşanmıştır. Bu depremler Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye, Şanlıurfa illerini kapsayan geniş bir bölgede çok büyük can ve mal kaybına neden olmuştur.

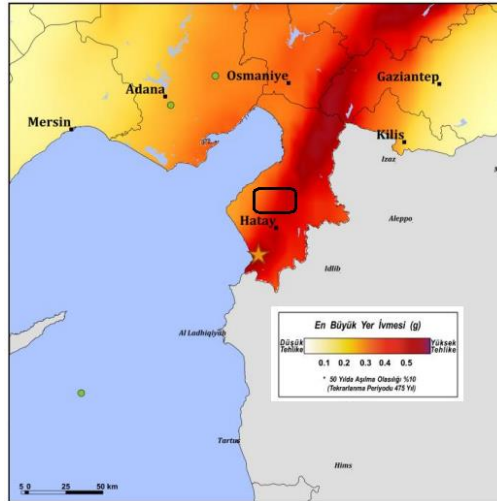
Meydana gelen depremler sonucu inceleme yapmak ve hasar tespit çalışmaları gerçekleştirmek üzere bölgede çok sayıda İnşaat, Jeofizik, Jeoloji Mühendisi, İnşaat Teknikeri ve Mimar bulunmuştur. Bu kapsamda özellikle İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ, 2023), Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ, 2023), Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ, 2023), Bursa Teknik Üniversitesi (BTÜ, 2023), Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE, 2023), Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD, 2023) ve İnşaat Mühendisleri Odası (İMO, 2023) tarafından hazırlanan raporlar; kuvvetli yer hareketlerini incelemeleri ve yaşanan depremleri bütün yönleriyle detaylıca analiz etmeleri bakımından çok önemli kaynaklar olmuştur. Bu raporların yanı sıra bölgede gerçekleştirilen hasar tespit çalışmalarıyla ilgili çeşitli çalışmalar da mevcuttur. Mertol (2023), yıkılan yapıların yapıldıkları dönemde yürürlükte olan deprem yönetmeliklerinin şartlarının yerine getirilmediğini belirtirken, betonarme binalarda yıkılmaya neden olan sorunları hiyerarşik bir üçgen şeklinde aktarmıştır. Vapur vd. (2023), Antakya ve Samandağ ilçelerinde yapılan gözlemler sonucu deprem yönetmeliklerine uygun yapılan yapıların yıkılmadığını ve diğer binalara oranla daha az hasar aldıklarını belirtmişlerdir. Şenol (2023), Antakya ve İskenderun’da yaptığı incelemelerde yapısal düzensizlikler, uygulama yöntemleri ve kullanılan malzeme özellikleri açısından oluşan hasarları değerlendirmiştir. İkinci (2024), Malatya’da gerçekleştirdiği saha çalışması sonucu gözlemlediği en temel sorunları, taşıma gücü düşük zeminlerdeki inşa faaliyetleri, işçilik ve tasarım hataları ve çok düşük beton kalitesi olarak sıralamıştır. Üstün vd. (2024), Malatya’da donatısız yığma yapılar üzerine yaptıkları çalışmayla mimarların hasar tespit sürecindeki kritik rolüne odaklanmışlardır. Güleç (2023), Kahramanmaraş’taki yığma yapıların hasar durumlarını inceleyerek kültürel değerlerinden dolayı yığma yapıların hasar tespitleri ve onarımlarının büyük önem taşıdığını belirtmiştir. Kılıç (2023) tarafından yapılan çalışmada ise, depremin etkilediği 10 ilde önceden hazırlanan il risk azaltma planlarındaki mevcut yapı stokunun durumu ile afetten sonraki yapısal hasarın boyutu karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma 6 ve 20 Şubat depremleri sonrasında Çanakkale Valiliği tarafından 9 Mart 2023 tarihinde yapılan görevlendirme ile Hatay ilindeki hasar tespit çalışmaları sırasında yapılan gözlemleri içermektedir. Bu makalede, ilk depremden yaklaşık 1 ay sonra bölgede 10 gün boyunca yapılan incelemeler sonucunda tespit

edilen sorunlar ele alınmıştır. Çalışma, genel olarak 1 ila 3 katlı betonarme yapılar ve tek katlı kargir yapıların bulunduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Şekil 1’de 6 Şubat 2023’teki ilk ana şoktan hasar tespitlerin yapılmaya başlandığı 9 Mart 2023 tarihine kadar gerçekleşen depremler görülmektedir.



Şekil 1: 6 Şubat – 9 Mart 2023 deprem hareketleri (AFAD, 2024).

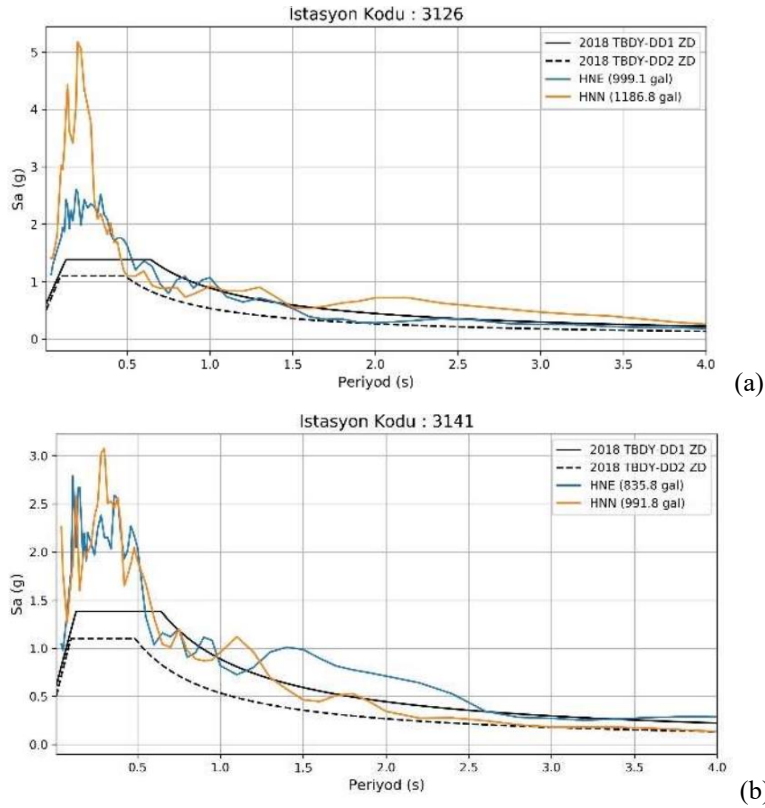


Şekil 2: Bölgenin deprem tehlikesi (AFAD, 2023).

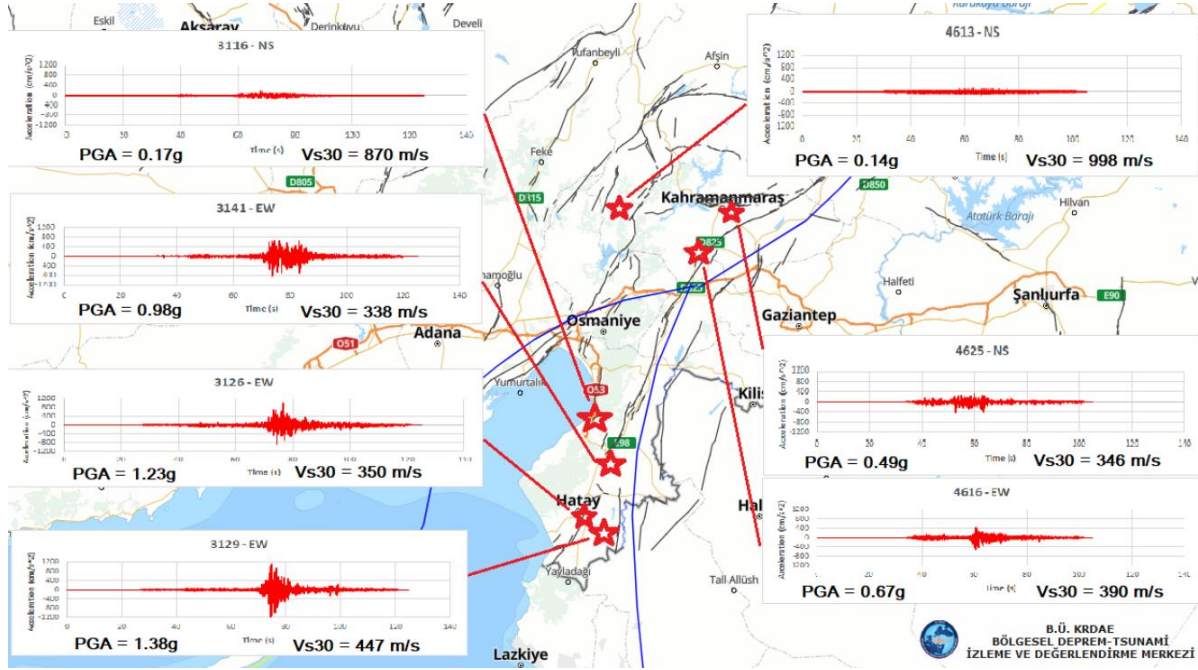
Hatay ili bu depremlerde en çok hasar alan bölgelerin başında gelmektedir. Hatay ili Antakya - Samandağ grabeni içinde yer alır. Graben, tektonik açılma hareketi sonucunda çevresine nazaran aşağı doğru çöken yerkabuğu parçası olarak tanımlanmıştır (İBB, 2024). 10 - 20 km genişliğindeki bu graben Asi Nehri'nin Amik Ovası ile Akdeniz arasındaki vadisini oluşturur. Şehirdeki yerleşimlerin büyük bir bölümü graben tabanındaki dolgu alanları üzerinde yer almaktadır (Engin, 2010). Yapılan bir çalışmaya göre Hatay ve

çevresinde zemin büyütme değerleri 4 ile 5 arasında değişmektedir (Perk ve Özer, 2019). Hatay ili, AFAD Türkiye Deprem Tehlikesi Haritasına göre yaklaşık 0.4g-0.5g yer ivmesi değerine sahiptir (Şekil 2). Hasar tespit çalışması yapılan bölge Şekil 2’de çerçeve içinde gösterilmektedir.

İnceleme yapılan binaların yoğunlaştığı Alazı ve Paşaköy mahallelerine en yakın deprem istasyonları 3126 ve 3141 numaralı istasyonlardır. Antakya Hatay’da yer alan 3126 ve 3141 numaralı deprem istasyonlarında 6 Şubat 2023 Pazarcık depremine ait ölçülen periyota karşılık gelen spektral ivme değerleri Şekil 3’te verilmiştir. Depremin merkez üssünden 125 km uzaklıkta yer alan 3141 numaralı istasyonda zemin sınıfı ZD ($V_{S30}=338$ m/s) ve 144 km uzaklıkta yer alan 3126 numaralı istasyonda zemin sınıfı ZD ($V_{S30}=350$ m/s) olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 3’te ZD zemin sınıfları için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)’de tanımlanan tasarım spektrumları tekrarlanma periyotları 2475 yıl (DD-1) ve 475 yıl (DD-2) olan deprem yer hareketi düzeyleri için sırasıyla düz çizgi ve kesikli çizgi şeklinde verilmiştir. Sarı ve mavi eğriler ise istasyonlarda kaydedilen ivme kaydına ait hesaplanan davranış spektrumunun kuzey ve doğu bileşenlerini göstermektedir (GTÜ, 2023). Depremin davranış spektrumları TBDY2018’de verilen tekrarlanma periyodu 475 yıl olan deprem yer hareket düzeyi için verilen elastik tasarım spektrumunu aşmaktadır. En yüksek yer ivme değerleri ise sırasıyla 0.98g ve 1.23g olarak ölçülmüştür (Şekil 4).



Şekil 3: Pazarcık depremi davranış spektrumları (a) 3126 (b) 3141 numaralı istasyonlar (GTÜ, 2023).



Şekil 4: Hatay ili ivme-zaman grafikleri (KRDAE, 2023).

Çalışmada, 6 ve 20 Şubat 2023 depremlerinden sonra Hatay merkeze bağlı yarı kırsal mahallelerdeki yapılarda yapılan gözlemsel inceleme sonucu taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlardaki hasar durumları açıklanmıştır. Aynı zamanda bölgenin genel özellikleri ve o bölgede yaygın olarak yapılan uygulamaların yapılarda ne şekilde hasarlar oluşturdukları da ele alınmıştır. Yaygın olarak hasar oluşturan durumlar ile ülkemizde 1975 yılından itibaren günümüze kadar yürürlüğe girmiş olan deprem yönetmeliklerindeki bu parametreler incelenerek değerlendirilmiştir.

2. YAPILARIN GENEL DURUMU

Bölgede incelenen binaların büyük çoğunluğu mühendislik hizmeti almamıştır. Bölgedeki yapıların özellikleri; genelde usta ve kalfaların inşa ettiği taşıyıcı elemanları betonarme, duvarları briket 1-3 katlı ya da tek katlı kargir inşaatlardır. Çalışılan iki mahalle son dönemde merkez sınırları içine alındığından ve tanımlanan mevcut binaların özellikleri nedeniyle yarı kırsal olarak tanımlanmıştır.

Mühendislik ve denetim hizmeti almayan çoğu binada temelin, kolonun, kirişin ve döşemenin ayrı döküldüğü alınan bilgiler dâhilindedir. Bir başka durum ise katların birbirinden çok ayrı zamanlarda inşa edilmesidir. Bu farklılık 10 yıla varan sürelerle ifade edilmiştir. Bu durumun nedeni olarak ekonomik durum gösterilse de evlenen çocuklar için yapıya kat çıkma olarak tanımlanan durumun o bölgelerde hala sürdüğü anlaşılmıştır. Yapının inşa sürecinin bu kadar uzun olması, deprem yönetmeliğindeki değişikliklerden

haberler olan ustaların her katta yeni çıkan deprem yönetmeliğini uygulamaya çalışmaları kimi zaman ikinci ve üçüncü katlarda beklenmedik hasarlara neden olmuştur. Bunlara ek olarak, bina olması gerektiği gibi kısa bir sürede inşa edilmiş olsa da binaya sonradan yapılan müdahalelerin çok fazla olduğu durumlar da mevcuttur. Duvar kaldırma, oda büyütme, çeşitli eklentiler ve değişiklikler yapının taşıyıcı sistemini bozan durumlar olmuş ve müdahale yapılan kısımlarda hasar oluşumuna neden olmuştur.

Bölgede, yapılar tek katlı olsa dahi oturma alanlarının çok büyük olduğu dikkat çekmiştir. Bunun deprem davranışını etkilediği çok net gözlemlenmiştir. İncelenen küçük oturma alanına sahip (50-60 m²) yığma yapılarda dahi hasarın minimum seviyede kaldığı görülmüştür.

3. HASAR TESPİT ÇALIŞMALARI

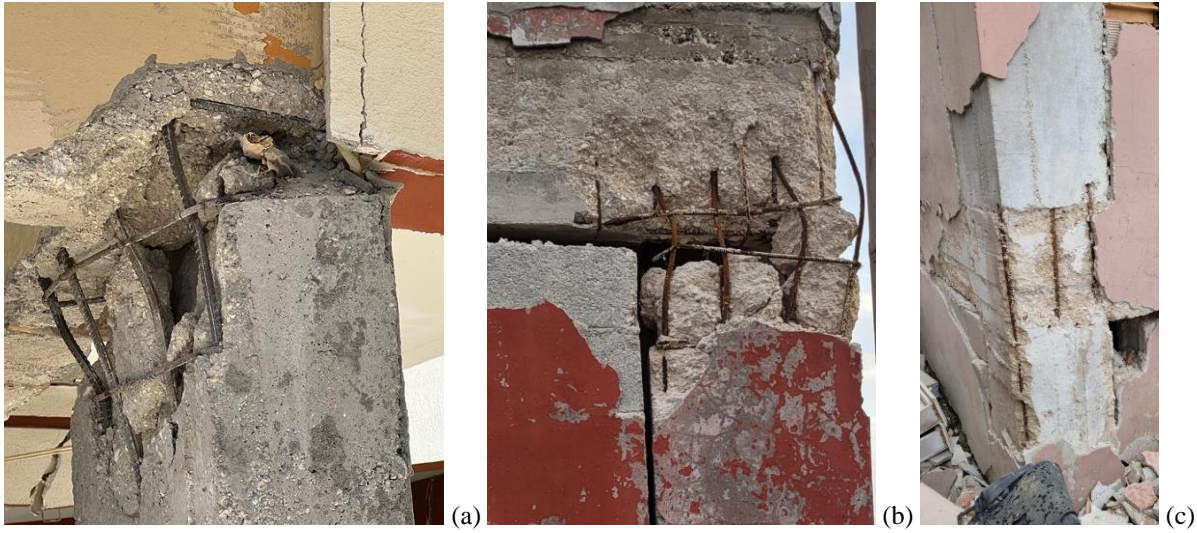
Hasar tespit çalışmaları, T.C. Çanakkale Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğünden yapılan görevlendirme kapsamında Hatay merkeze bağlı Alazı ve Paşaköy mahallelerinde 2023 Mart ayı içerisinde yapılmıştır. 6 Şubat depremlerinin yol açtığı hasarların tespit çalışmaları başladıktan sonra meydana gelen 20 Şubat 2023 tarihli $M_w=6.4$ Samandağ depremi sonrasında, Hatay için o tarihe kadar yapılmış olan değerlendirmelerdeki hasar durumlarında değişiklikler olduğu için hasar tespitlerinin yeniden yapılmasına Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından karar verilmiştir. Bu kapsamda, ilk yapılan tespitlere göre yıkık ya da ağır hasarlı kararı verilen binalara yapıların kullanım durumunu değiştirmeyeceği için tekrar bakılmamıştır. İlk yapılan tespitlerde hasarsız, az hasarlı ya da orta hasarlı olarak değerlendirilen binalar tarafımızca incelenerek, 20 Şubat depreminin oluşturduğu hasarlar değerlendirilmiştir. Bununla birlikte o tarihe kadar henüz hiç değerlendirme yapılmamış binalara da girilerek hasar tespiti yapılmıştır.

3.1. Taşıyıcı yapı elemanı hasarları

Bölgede, kolon ve kirişlerdeki donatılarla ilgili gözlemlenen en yaygın uygulamalar etriye sıklaştırmalarının yapılmaması, çiroz donatısı kullanılmaması, nervürlü donatı yerine düz donatı kullanılması ve donatı ucundaki kancaların yetersiz yapılmasıdır. Bunların yanı sıra, pas payının yetersiz bırakılmış olmasıyla dış etkilere maruz kalarak ciddi derecede korozyona uğramış donatılar tespit edilmiştir.

Nervürlü yerine düz donatı kullanılması durumunda beton ile donatı arasındaki aderansın sağlanmadığı ve deprem esnasında donatının betondan kolayca sıyrılabileceği bilinmektedir. Kesme kuvvetlerini karşılayan etriye ve çiroz donatılarının konmaması veya yetersiz konması durumlarında, deprem sırasında kesme çatlağının büyümesi çok daha hızlanmakta, betonun kabuk atmasıyla boyuna donatıların burkulması ve enine donatıların kopması sonucu kolon ağır hasarlı duruma gelmektedir. Şekil 5a ve b’de çiroz bulunmayan

ve etriye sıklaştırmasının yapılmadığı kolon örnekleri görülmektedir. Şekil 5c’de ise belli bir bölgede hiç etriye bulunmayan bir kolon tespit edilmiştir. Donatıların korozyon durumu hem kesit kaybına uğrayıp taşıma kapasitesini kaybetmesi açısından hem de beton ile aderansını kaybetmesi açısından son derece tehlikelidir. Bölgedeki hasar gören yapılarda çok sayıda korozyon oluşmuş donatı görülmüştür (Şekil 6). TS500’e (2000) göre hava koşullarına açık kolon ve kirişlerde en az 25 mm net beton örtüsü bulunması gerektiği belirtilmektedir. Özellikle Şekil 6d’de donatılardaki korozyonu önlemesi amacıyla bırakılması gereken pas payının neredeyse hiç bulunmadığı görülmektedir.



Şekil 5: Kolon hasarları.

Mühendislik hizmeti görmemiş olan binalarda donatıların genel yerleşimleri doğru olsa dahi donatının betona kenetlenmesini sağlayan kanca ve gönye uygulamalarının neredeyse hiç uygun yapılmadığı gözlemlenmiştir. Boyuna donatıyı saran etriyelerin ucuna yapılan kancanın deprem sırasında çekirdek betonu sargılamaya devam etmesi beklenmektedir. Kancanın 90° yapılması durumunda dıştaki kabuk beton döküldükten sonra etriye uçları kolaylıkla açılmakta ve etriyenin betonu sargılama etkisi sonlanmaktadır. Kancanın 135° yapılması ancak kanca boyunun yeterli bırakılmaması durumunda ise artan yükler etkisinde benzer davranış oluşmaktadır. Gönye uygulaması ise, kirişteki boyuna donatıların kolon içinde bükülerek ankrajının sağlanmasını amaçlamaktadır. Bu uygulamanın yapılmaması durumunda birleşim bölgesinde ankraj sağlanamamakta ve donatıların sıyrılarak ayrılması daha kolay gerçekleşmektedir. Şekil 7a’da kanca boyunun yetersiz olduğu, Şekil 7b’de ise konsol kirişteki çekme donatılarında 90° kıvrılmayarak düz kesildiği görülmektedir. Şekil 7c’de ise yıkılmış bir binadaki düz donatılar görülmektedir.



Şekil 6: Korozyon hasarları.



Şekil 7: Hatalı donatı uygulamaları.

Çizelge 1: Deprem yönetmelikleri donatı koşulları.

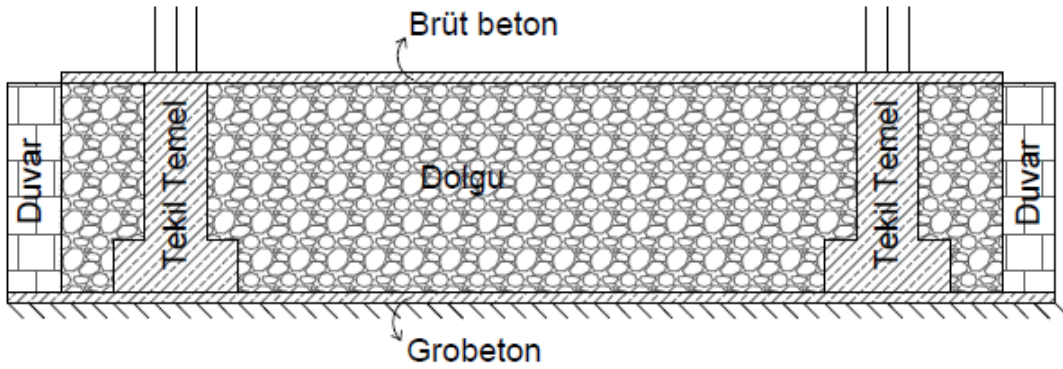
DONATI KOŞULLARI	TBDY2018	DBYBHY2007	ABYYHY1998	ABYYHY1975
Kirişte sıklaştırma mesafesi (s_k)	$\leq h_k/4$ $\leq 8\phi$ ≤ 150 mm	$\leq h_k/4$ $\leq 8\phi$ ≤ 150 mm	$\leq h_k/4$ $\leq 8\phi$ ≤ 150 mm	$\leq d/4$
Kolonda sıklaştırma Mesafesi (s_c)	≥ 50 mm ≤ 150 mm $\leq b_{min}/3$ $\leq 6\phi_1$	≥ 50 mm ≤ 100 mm $\leq b_{min}/3$	≥ 50 mm ≤ 100 mm $\leq b_{min}/3$	≥ 50 mm ≤ 100 mm
Kolon sarılma bölgesi	$\geq 1,5 b_{max}$ $\geq l_n/6$ ≥ 500 mm	$\geq b_{max}$ $\geq l_n/6$ ≥ 500 mm	$\geq b_{max}$ $\geq l_n/6$ ≥ 500 mm	$\geq L_s/6$ ≥ 450 mm
Kolon orta bölge etriye mesafesi (s_o)	≤ 200 mm $\leq b_{min}/2$	≤ 200 mm $\leq b_{min}/2$	≤ 200 mm $\leq b_{min}/2$	≤ 200 mm $\leq b_{max}/2$ $\leq 12\phi$
Etriye kolları ve/veya çirozların arasındaki mesafe	$\max a_i=25 \phi$	$\max a_i=20 \phi$	$\max a_i=25 \phi$	a = mesnetlenmemiş en büyük etriye kenar boyu olarak tanımlanmış ancak sınır değeri belirtilmemiştir.
Kanca özellikleri	$\text{çap} \geq 5\phi_{etr}$ $\text{boyu} \geq 6\phi$ $\text{boyu} \geq 80$ mm	$\text{çap} \geq 5\phi_{etr}$ $\text{boyu} \geq 6\phi$ $\text{boyu} \geq 80$ mm	$\text{çap} \geq 5\phi_{etr}$ $\text{boyu} \geq 6\phi$ $\text{boyu} \geq 80$ mm	$\text{boyu} \geq 10d$

Ülkemizde şu an yürürlükte olan TBDY2018 öncesinde sırasıyla Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007), Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY, 1998) ve Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY, 1975) deprem yönetmelikleri yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmeliklerde kolon ve kirişler için uygulanması gereken etriye, çiroz ve kanca detayları Çizelge 1’de verilmiştir. Kirişlerde sarılma bölgesi boyunca olması gereken sıklaştırma mesafesi, ϕ en küçük boyuna donatı çapı olmak üzere 1998 yönetmeliğinden beri aynı sınır değerlerdedir. 1975’te ise maksimum faydalı yüksekliğin dörtte biri olacak şekilde belirtilmiştir. Kolonlarda sarılma bölgesi boyunca olması gereken sıklaştırma mesafesi, b_{min} kolonun kısa kenarı ve ϕ_1 boyuna donatı çapı olmak üzere Çizelge 1’de verilmiştir. Değerler bir miktar farklılaşsa da 1975 yönetmeliğinden beri bu değerlerin en fazla 100-150 mm arasında olması gerektiği görülmektedir. Kolon sarılma bölgesinin uzunluğu ise, l_n ve L_s kolon serbest yüksekliğini ifade etmek üzere 1975 yönetmeliğinden beri var olan bir parametredir. Kolonun orta bölgesi için etriye mesafesi 2018 yönetmeliği için kolon b_{min} değeri 300 mm olduğu için 150 mm-200 mm arasında değişmektedir. 2007 ve 1998 yönetmeliklerinde b_{min} değeri 250 mm olduğu için 125 mm-200 mm arasında bir değer almaktadır. 1975 yönetmeliğine göre ise 200 mm’den, kolonun uzun kenarının yarısından ya da 12ϕ ’den fazla olamaz şeklinde tanımlanmıştır. Etriye kolları ve/veya çirozların arasındaki mesafe ϕ =enine donatı çapı olmak üzere 1998 yönetmeliğinden beri 20ϕ - 25ϕ arasında değişmektedir. Etriye ve çirozun kanca boyu ise 1998 yönetmeliğinden itibaren en az 6ϕ ya da 80

mm olacak şekilde tanımlanmıştır. 1975 yönetmeliğinde ise, d enine donatı çapını ifade etmek üzere en az 10d olarak belirtilmiştir.

Bu değerlendirmelerle birlikte ülkemizde neredeyse son 50 yıldır yürürlüğe giren son 4 yönetmelikte donatı koşullarının oldukça net belirtildiği ve sınır değerlerin oldukça yeterli olduğu görülmektedir.

Kırsal bölgedeki binalarda genellikle tekil temel uygulamaları mevcut olup, tabanda döşeme olmadığı gözlemlenmiştir. Temel yapılırken ilk olarak binanın brüt alanından daha büyük derin olmayan bir bahçe hazırlandığı, sonrasında bunun etrafını duvarla çevirip arkasından bahçe tabanına grobeton döküldüğü, ardından temel kalıplarının çakılıp donatılarının bağlanıp betonunun döküldüğü belirtilmiştir. Son olarak tekil temelin filizleri yüzeyde kalacak şekilde temelin içinde bulunduğu bahçenin toprakla doldurulduğu ve filizlerin bağlanacağı kolonların bu işlemde çok sonra da imal edilebildiği belirtilmiştir (Şekil 8). Bu şekilde temelleri yapılmış binalara girdiğimizde tekil temellerin deplasman yaptığı ve yapıdan ayrıldığı gözlemlenmiştir. Tek katlı yapılarda ya da çok katlı yapıların giriş katlarında döşemenin bulunmadığı bunun yerine 5 cm civarında brüt beton döküldüğü yapılarda ise bu döşemenin kırılarak zemine gömüldüğü, özellikle odaların orta bölgelerinde görülmüştür.



Şekil 8: Tekil temel uygulaması.

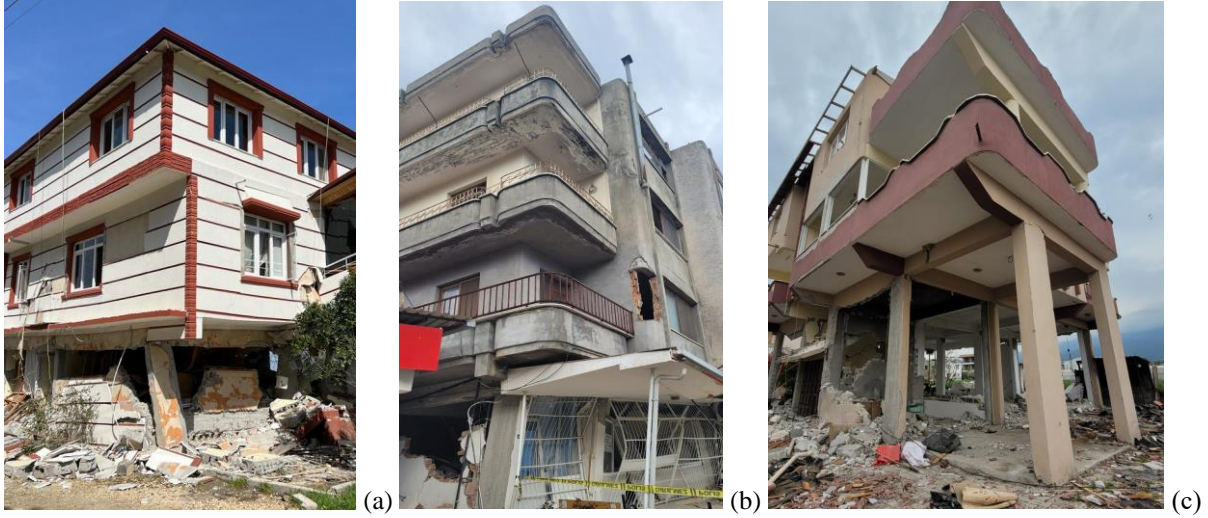
ABYYHY1975'ten itibaren deprem yönetmeliklerimizde tanımlanmış olan kısa kolon düzensizliğinin oluşturduğu hasar durumuyla da karşılaşmıştır (Şekil 9). Kısa kolon durumu oluşturacak bant pencere vb. bulunması durumunda söz konusu kolon için kesme hesabının yönetmelikteki formüllerle yapılması, kolonun kat yüksekliği boyunca sık etriye ile sarılması, kolon ile duvar arasına ezilebilir bir malzeme konulması gibi önlemler bulunmaktadır. Ancak bunlar yapılmadığı takdirde kısa kolona çok daha büyük kesme kuvvetinin gelmesiyle kolonun hasar alması kaçınılmaz olmaktadır.



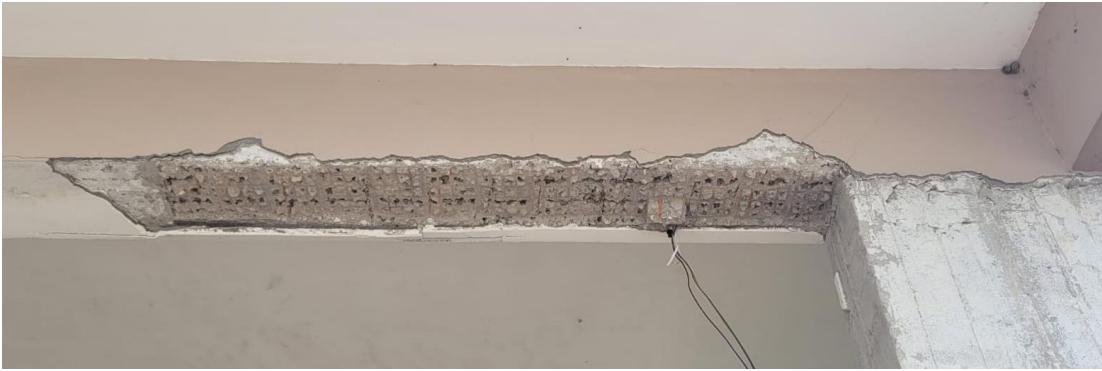
Şekil 9: Kısa kolon hasarı.

ABYYHY1998'den itibaren deprem yönetmeliklerimizde bulunan yumuşak kat durumu depremlerde yapının yıkılmasına yol açan veya ağır hasar oluşturarak yapıyı kullanılamaz hale getiren düzensizliklerin başında gelmektedir. Yumuşak kat düzensizliği, giriş katlarının dükkan, mağaza vb. olarak kullanılması durumunda dolgu duvarların bulunmayışı veya üst katlara göre daha az bulunmasıyla ve ayrıca bu katın yüksekliğinin diğer katlardan daha fazla olmasıyla katlar arasında oluşan rijitlik farkı nedeniyle meydana gelmektedir. Şekil 10a ve b'de görüldüğü gibi, giriş kat ve üst katlar arasındaki rijitlik farkı zemin kat kolonlarında çok ciddi ötelenmelere sebep olarak yapıları kullanılamaz hale getirmiştir. Şekil 10c'de ise zemin kat yüksekliğinin diğer katlara göre fazla olması kolon uçlarında hasar oluşturarak yapıyı ağır hasarlı hale getirmiştir.

Betonarme elemanlarda beton dökülürken yeterli yerleştirme/vibrasyon yapılmadığı için oluşan segregasyon örneği Şekil 11'de görülmektedir. Segregasyon, betonun içindeki malzemelerin yoğunlukları ve boyutları doğrultusunda ayrışmasına neden olduğu için tehlikeli bir durumdur. Ayrıca betonarme elemanların kesilerek içinden tesisat veya boru geçirilmesi gibi durumlarla da karşılaşmıştır (Şekil 11). Yapısal elemanlarda oluşturulan bu boşluklar o bölgeyi zayıflatarak dayanım ve rijitlik azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 10: Yumuşak kat hasarı.



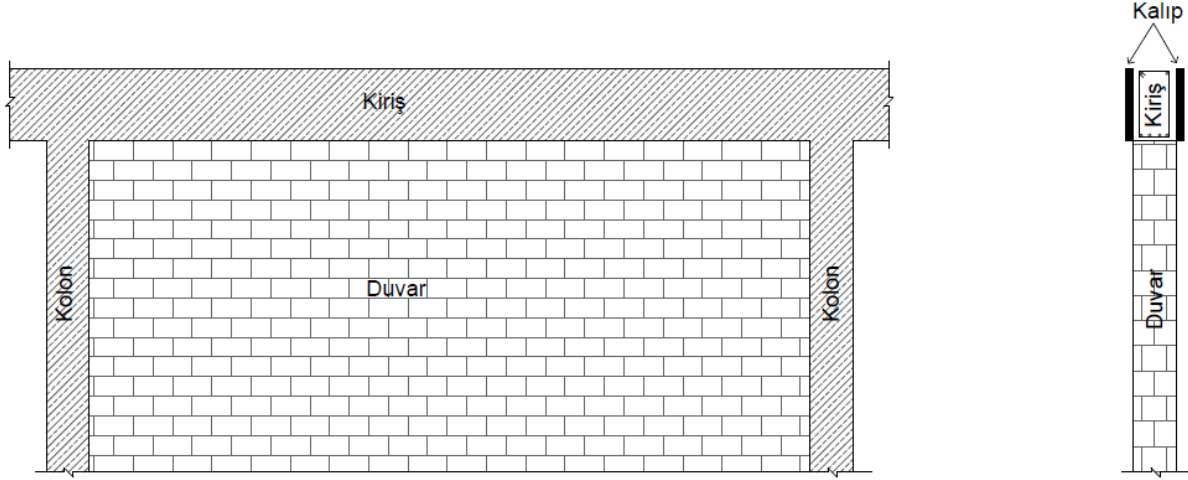
Şekil 11: Segregasyon oluşmuş kiriş.

3.2. Taşıyıcı olmayan yapı elemanı hasarları

Bölgedeki yapılarda evlerin daha serin olması için duvar malzemesi olarak büyük oranda briket kullanılmıştır. Yerel halktan alınan bilgiler ışığında, bazı can kayıplarının bina duvarları nedeniyle olduğu öğrenilmiştir. Özellikle binanın dışına çıkılıp güvenli olduğu düşünülen durumda duvarların düzlem dışı hareketi sonucu ağır briket duvarlar dışarı doğru hareket etmiş ve can kayıpları oluşturmuştur. Bazı binalarda kullanıldığı görülen sıva filelerinin zorunlu hale gelmesi ile duvarları bir arada tutarak can kaybının önlenmesinin sağlanabileceği düşünülmektedir.

Kolon ve kirişin ayrı zamanlarda döküldüğü uygulamalarda, kolonlar döküldükten sonra duvarların örüldüğü, örülen duvarın üst yüzeyinin ise kiriş kalıbının alt yüzeyi olarak kullanıldığı belirtilmiştir (Şekil

12). Bu durumdan dolayı deprem sırasında duvar kiriş altında daha fazla sıkışmakta ve duvarın hasar görmesi daha kolay gerçekleşmektedir.



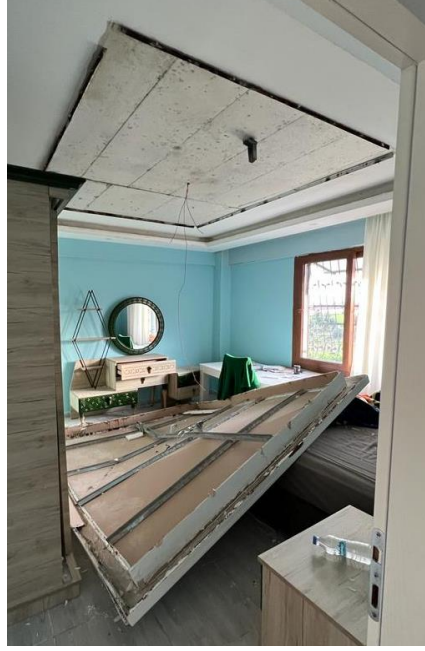
Şekil 12: Duvar örme tekniği.

Kimi binaların çatı katında (yüksek çatı ya da çatı uygulaması yok), parapet gibi (yaklaşık 1m yüksekliğinde) duvar kullanıldığı ve bu duvarların da yaralanma ve can kayıplarına neden olduğu belirtilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13: Duvar hasarı.

Bölgede tavan süslemesinin oldukça fazla olduğu ve deprem sırasında düşen kartonpiyerlerin kaçışa engel olduğu ve yaralanmalara sebep olduğu öğrenilmiştir. Yine asma tavan bağlantısının uygun yapılmaması ile asma tavanın tamamen çökerek ciddi hayati tehlike oluşturduğu gözlenmiştir (Şekil 14).



Şekil 14: Asma tavan hasarı.



Şekil 15: Kalın sıva uygulaması.

Bölgede genel bir uygulama olarak sıvanın kalın kullanılması yaygındır. Yaklaşık 4-5 cm'e varan sıva uygulamasına sıklıkla rastlanmıştır (Şekil 15). Hasar tespiti yapılırken bazı taşıyıcı elemanlardaki çatlakların sıva kaldırıldığında betonarme elemanda bulunmadığı gözlemlenmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışma 6 ve 20 Şubat 2023 tarihlerinde meydana gelen depremler sonrasında Hatay ili Antakya merkeze bağlı yarı kırsal iki mahallede yapılmış olan hasar tespit çalışmaları sırasında yapılan gözlemler neticesinde hazırlanmıştır. Yapının tasarım ve uygulama sırasında yapılan hataların, deprem performansı üzerinde olumsuz etkiye sahip olacağı bilinmektedir. Yaygın olarak gözlemlenen ve hasar oluşturan durumlar; etriye yerleşimlerinin uygun olmaması, çirozların hiç kullanılmaması, kanca boylarının yetersiz yapılması, donatılarda korozyon oluşması, yapılarda kısa kolon ve yumuşak kat düzensizliklerinin bulunması ve betonun iyi yerleştirilmemesi olarak sıralanabilir. Gözlemlenen bu parametrelerin ülkemizde yürürlüğe girmiş olan deprem yönetmeliklerindeki karşılıkları incelenmiş ve sınır değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yürürlüğe girmiş son 4 deprem yönetmeliğindeki incelenen parametrelerin sınır değerlerinin oldukça yeterli olduğu ancak bunların uygulanmamış olduğu görülmüştür.

Bölgede incelenen binaların büyük çoğunluğu mühendislik hizmeti almamıştır. Yapıların inşa aşamasında bölgeye özgü yapılan uygulamalar ve bu uygulamaların yapılarda nasıl hasarlar oluşturdukları da açıklanmıştır. Mühendislik hizmeti alınmamış kimi binalarda ise binayı yapan ustaların bilinçli olma durumlarına bağlı olarak taşıyıcı eleman boyutlarının yeterli olduğu, donatıların uygun ve iyi bir şekilde yapıldığı belirtilmiş ve bu yapıların depremleri az hasarlı ya da hasarsız olarak atlattığı gözlemlenmiştir.

Yapısal hasarın sınırlı düzeyde kalarak can kaybı oluşturmaması için tüm yapıların mühendislik ilkelerine ve ilgili yönetmeliklere uyularak yapılması ve yapının her aşamasında yeterli ve uygun denetimin gerçekleştirilmesi gerektiği açıktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu saha çalışması T.C. Çanakkale Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğünden 09.03.2023 tarihinde yapılan görevlendirme ile gerçekleştirilmiştir.

YAZARLARIN KATKILARI

S.A.: Araştırma, yöntem, orijinal taslak hazırlama, yazı yazma, kaynaklar, gözden geçirme ve düzenleme

F.Y.: Araştırma, yöntem, orijinal taslak hazırlama, doğrulama, gözden geçirme ve düzenleme

KAYNAKLAR

ABYYHY1975 (1975). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, T.C. İmar ve İskan Bakanlığı. Ankara.

ABYYHY1998 (1998). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. Ankara.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2023). *06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan Kahramanmaraş (M_w : 7.7 – M_w : 7.6) Depremleri Raporu*. Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü Deprem Dairesi Başkanlığı. Erişim adresi: https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmara%C5%9F%20Depremi%20%20Raporu_02.06.2023.pdf

Afet ve Acil Durum Başkanlığı (AFAD). (2023). *20 Şubat 2023 Yayladağı (Hatay) M_w 6.4 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu*. Deprem Dairesi Başkanlığı. Erişim adresi: [https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Yaylada%C4%9F%C4%B1%20\(Hatay\)%20Depremi%20MW%206.4%20%C3%96n%20Değerlendirme%20Raporu.pdf](https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Yaylada%C4%9F%C4%B1%20(Hatay)%20Depremi%20MW%206.4%20%C3%96n%20Değerlendirme%20Raporu.pdf)

Afet ve Acil Durum Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi. (2024). Erişim adresi: <https://tadas.afad.gov.tr>

Bursa Teknik Üniversitesi (BTÜ). (2023). *6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Pazarcık [$M_w=7.7$] ve Elbistan [$M_w=7.6$] İnceleme ve Değerlendirme Raporu*. Deprem Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Merkezi. Erişim adresi: <https://deprem.btu.edu.tr/tr/sayfa/detay/5482/6-subat-2023-kahramanmaras-depremleri-i%CC%87nceleme-ve-değerlendirme-raporu>

DBYBHY2007 (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. Ankara. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/03/20070306-3.htm>

Ekinci, E. (2024). 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş depremleri sonrasında betonarme yapıların incelenmesi: Malatya ili saha çalışması. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(2), 298-306. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1414243>

Engin, Ö. B. (2010). *Hatay Bölgesi için Deprem Tehlike Analizleri* (Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü / Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=tToJmGwRMyrL4-c39nkPrw&no=koILUKCLnEntoi8dLLpTLA>

Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ). (2023). *6 Şubat 2023 Maraş Depremleri (Pazarcık M_w 7.7 ve Elbistan M_w 7.6) Sonrasında Kuvvetli Yer Hareketi, Geoteknik, Üst Yapı ve Altyapılara İlişkin Saha Gözlemleri Ön İnceleme Raporu*. Marmara Afetlerle Baş Edebilir Yapılar İçin Uygulama ve Araştırma Merkezi. Erişim adresi: https://www.gtu.edu.tr/fileman/Files/UserFiles/insaast_muhendisligi_bolumu/GTU_Maras%20Depremleri%20Deg%CC%86erlendirme%20Raporu_Final_07.03.2023.pdf

Güleç, A. (2023). Investigation of the effects of Kahramanmaraş earthquakes on masonry structures. *Gazi Journal of Engineering Sciences*. 9. 634-650. <https://doi.org/10.30855/gmbd.0705094>

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB). Deprem Sözlüğü. Deprem ve Zemin İnceleme Şube Müdürlüğü. (2024). Erişim adresi: <https://depremezmin.ibb.istanbul/deprem-sozlugu/>

İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ). (2023). *6 Şubat 2023 04.17 M_w 7.8 Kahramanmaraş (Pazarcık, Türkoğlu), Hatay (Kırıkhan) ve 13.24 M_w 7.7 Kahramanmaraş (Elbistan/Nurhan-Çardak) Depremleri Nihai Rapor*. Erişim adresi: https://haberler.itu.edu.tr/docs/default-source/default-document-library/2023_itu_subat_2023_deprem_son_raporu%20.pdf?sfvrsn=1583fe76_2

- Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE). (2023). *6 Şubat 2023 M_w 7.7 Gaziantep, 6 Şubat 2023 M_w 7.6 Kahramanmaraş, 20 Şubat 2023 M_w 6.4 Hatay Depremleri Ön Değerlendirme Raporu*. Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/new/tr/duyuru/06-%C5%9Fubat-2023-gaziantep-kahramanmara%C5%9F-ve-20-%C5%9Fubat-2023-hatay-depremleri-%C3%B6n-de%C4%9Ferlendirme>
- Kılıç, M. (2023). Kahramanmaraş depremlerinin etkilediği 10 ilin il risk azaltma planlarındaki yapı stoğu durumlarının incelenmesi ve deprem sonrası durum ile karşılaştırılması. *Acil Yardım ve Afet Bilimi Dergisi*, 3(2), 49-56.
- Mertol, H. (2023). 6 Şubat 2023 depremlerinde gözlenen betonarme binalardaki sorunların hiyerarşik bir üçgen ile açıklanması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(4), 2717-2729. <https://doi.org/10.21597/jist.1263348>
- Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ). (2023). *6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık M_w =7.7 ve Elbistan M_w =7.6 Depremleri Ön Değerlendirme Raporu*. Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi. Erişim adresi: https://eerc.metu.edu.tr/system/files/documents/DMAM_2023_Kahramanmaraş-Pazarcık_ve_Elbistan_Depremleri_Raporu_TR_final.pdf
- Perk, S., Özer, Ç. (2019). Investigation of soil properties based on accelerometer stations using earthquake recording: the case study of Hatay, Turkey. *Turkish Journal of Earthquake Research*, 1(2), 167-179. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tdad/issue/50697/652332>
- Şenol, A. F. (2023). Kahramanmaraş Depremleri (6 Şubat 2023) sonrası Hatay ilindeki yapıların hasar durumlarının değerlendirilmesi. 2nd International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences (ICENSOS), 4-6 April 2023, Konya, Türkiye.
- TBDY2018 (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>
- TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası (İMO). (2023). *6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonucu Oluşan Yapısal Hasarlara İlişkin Gözlem ve Değerlendirme Raporu*. Erişim adresi: <https://www.tmmob.org.tr/sites/default/files/imodeprem-rapor.pdf>
- TS 500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarımı ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. Erişim adresi: <https://www.tse.org.tr/>
- Üstün, M. O., Soyuluk, A., Özkan Üstün, G. (2024). Malatya İli Çayırköy Mahallesi'ndeki donatısız yığma yapıların hasar tespit çalışmaları örneği üzerinden mimarın rolünün değerlendirilmesi. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 9(Special Issue), 106-125. <https://doi.org/10.30785/mbud.1332478>
- Vapur, İ., Kara, İ. F., Akın, E. (2023). 2023 Kahramanmaraş ve Hatay depremlerinin Antakya ve Samandağ ilçelerindeki yapısal etkileri ve çözüm önerileri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1260-1270. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1293147>

Evaluation of Molasses in Civil Engineering Works: A Review

Melih ŞAHİNÖZ^{1*} 

¹Department of Civil Engineering, Institute of Science, Gazi University, Ankara, Türkiye

Received: 07.05.2024, Accepted: 01.07.2024, Published: 03.10.2024

ABSTRACT

In this review study, the potential for the use of molasses in civil engineering work was investigated in detail. Molasses material is used in a wide range of industries, such as pharmaceuticals, chemicals, paper, and fertilizers. The increasing population and growing construction sector gradually increase the demand for raw materials. In addition, molasses produced during the sugar production process increases environmental pollution and operating costs. The aim of this study is to explain that molasses material can be used as an alternative raw material source in the construction industry. In this study, literature studies on molasses-containing asphalt, construction materials, ground works, and cementitious materials were reviewed. As a result of the study, it was found that molasses was generally used as a replacement material in place of synthetic and petroleum-based materials. Accordingly, molasses material can be a valuable source of raw materials for the construction sector of countries that are foreign-dependent, especially in terms of crude oil and chemical materials. In addition, molasses has been found to reduce construction costs and improve material properties. This situation provides a significant competitive advantage to the construction sector. Additionally, sustainable environmental protection can be achieved by using molasses in the production of eco-friendly construction materials. Molasses is suggested to be used in civil engineering works in terms of cost and material performance.

Keywords: Molasses, Construction Materials, Ground Work, Asphalt, Cementitious Materials

Melasın İnşaat Mühendisliği İşlerinde Değerlendirilmesi: Bir İnceleme

ÖZ

Bu inceleme çalışmasında, melasın inşaat mühendisliği işlerinde kullanım potansiyeli detaylı olarak araştırılmıştır. Melas malzemesi; ilaç, kimya, kâğıt ve gübre gibi çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Artan nüfus ve büyüyen inşaat sektörü hammadde ihtiyacını giderek arttırmaktadır. Ayrıca şeker üretimi sürecinde ortaya çıkan melas, çevre kirliliğini ve işletme maliyetlerini de arttırmaktadır. Bu çalışmanın amacı, melas malzemesinin inşaat sektöründe alternatif bir hammadde kaynağı olarak kullanılabilceğini açıklamaktır. Bu çalışmada, melas içeren asfalt, yapı malzemeleri, zemin çalışmaları ve çimentolu malzemeler ile ilgili literatür çalışmaları incelenmiştir. Çalışma sonucunda, genellikle melasın sentetik ve petrol esaslı malzemelerin yerine ikame malzemesi olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Buna göre, melas malzemesi özellikle petrol ve kimyasal malzeme açısından dışa bağımlı ülkelerin inşaat sektörü için değerli bir hammadde kaynağı olabilir. Öte yandan, melasın inşaat maliyetini azalttığı ve malzeme özelliklerini arttırdığı belirlenmiştir. Bu durum, inşaat sektörüne, rekabet açısından oldukça önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, çevre dostu yapı malzemesi üretiminde melasın kullanılması sayesinde sürdürülebilir bir çevre korunumu sağlanabilir. Melasın, inşaat mühendisliği işlerinde maliyet ve malzeme performansı açısından kullanılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Melas, Yapı Malzemeleri, Zemin Çalışması, Asfalt, Çimentolu Malzemeler

1. INTRODUCTION

Molasses is a fluid and dark-brown colored industrial by-product consisted during the evaporation of concentrated sugar cane or sugar beet juice during the raw sugar manufacturing process (Mordenti et al., 2021; Eliodório et al., 2023). Generally, ~40 kg of molasses is obtained from 1 ton of processed sugar beet and ~45 kg from 1 ton of sugar cane (Nguyen & Gheewala, 2008; Isler-Kaya & Karaosmanoglu, 2022). The main chemical components of both cane molasses and beet molasses are ~30~35% sucrose, ~10~25% fructose and glucose, ~2~3% non-sugar components (minerals and moisture), and ~45~55% fermentable sugar (Jamir et al., 2021). Sugar purification process, plant type, and boiling temperature are the basic factors affecting molasses components and characteristics (Zhang et al., 2021). Molasses is used in various sectors because it is cheap and has a high sugar concentration (Kabeyi & Olanrewaju, 2022). Generally, molasses is used as an additive in the production of ethanol, citric acid, alcohol, baker's yeast, pharmaceuticals, sweeteners, animal feed, fertilizers, paper, biogas, bioplastics, and cement additives (Jamir et al., 2021; Mustafa et al., 2023; Acharya & Gyawali, 2024). Industrial use of molasses is increasing due to its low-cost and easy storage (Geremew Kassa et al., 2024). Figure 1 shows the total amount of molasses production worldwide between 2019 and 2025.

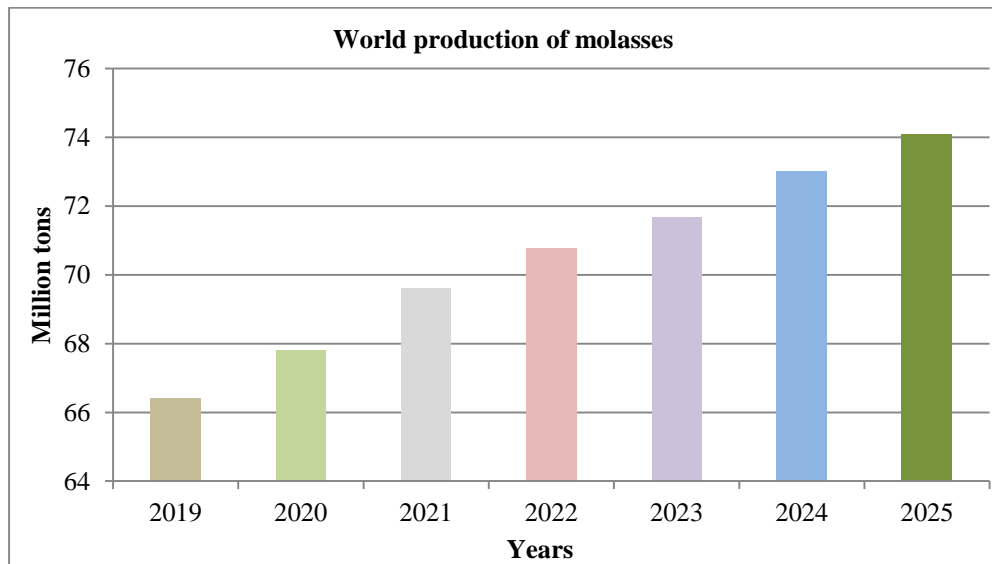


Figure 1: The total annual molasses production amount worldwide (OECD Report, 2024).

Upon reviewing Figure 1, it is seen that the annual production amount of molasses is gradually increasing. In 2023, ~71.7 million tons of molasses were produced worldwide. In addition, it is predicted that ~74.1 million tons of molasses will be produced worldwide in 2025. On the other hand, ~2% of the sugar produced globally is produced in Türkiye. In Türkiye, depending on the climatic conditions, sugar beet is mostly grown in Konya, Eskişehir and Yozgat provinces (TEPGE Report, 2023). Figure 2 shows the

molasses silo and molasses material of the Eskişehir Sugar Factory. Figure 3 shows the total annual molasses production amount in Türkiye.

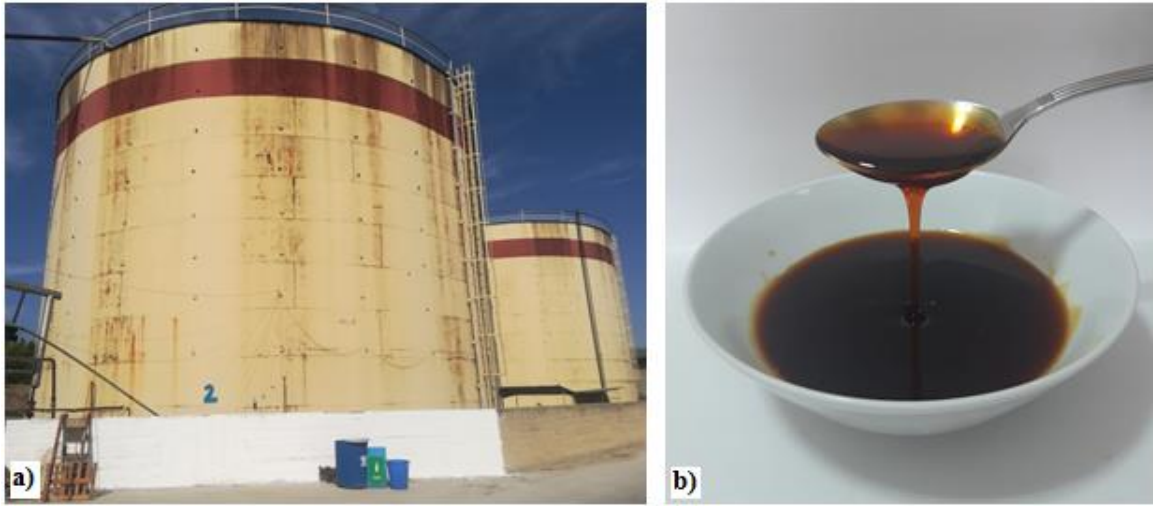


Figure 2: a) Sugar factory molasses silo, b) Molasses material.

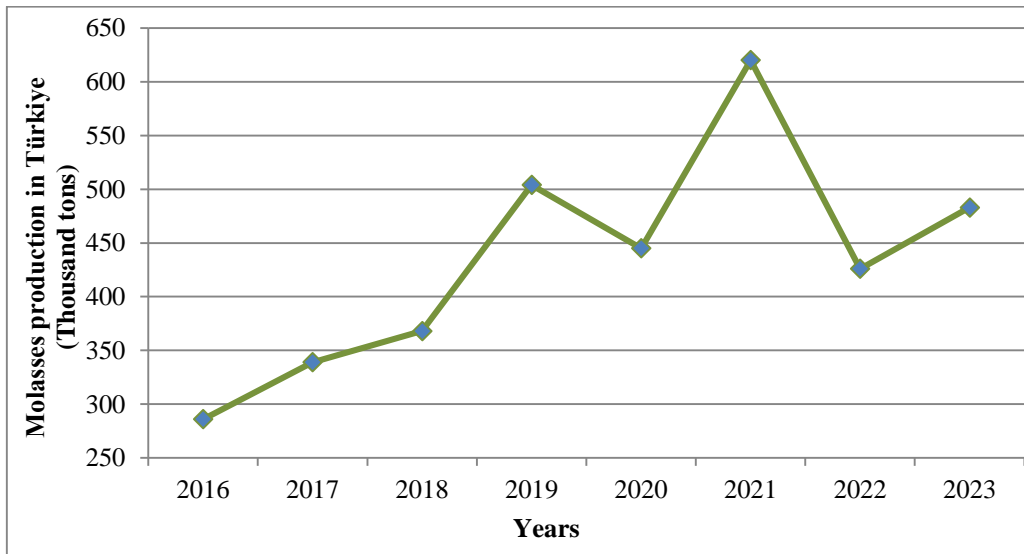


Figure 3: Türkiye's annual sugar beet molasses production amount (Thousand tons) (TEPGE Report, 2023).

According to Figure 3, the annually molasses production amount varies in Türkiye. However, it is understood that the amount of molasses production has generally increased. Although the amount of molasses is increasing both globally and in Türkiye, molasses also has some disadvantages. These are the risks of contamination of underground water, high storage operating costs, and high disposal costs (Wynne & Meyer, 2002; Klaver et al., 2023). In order to reduce the effects of these disadvantages of

molasses, its use on a global or local scale is very important in terms of environmental conservation and economic factors (Parascanu et al., 2021; Stephen et al., 2024).

The aim of this paper is to use molasses in the construction industry and to establish a relationship between the construction industry and different industries, such as the sugar industry. In this respect, our study has an original subject. There is a gap in the literature regarding the use of molasses in the construction sector. In the light of the studies investigated in this study, researchers can use molasses material in the production of bituminous materials and asphalt pavements, construction materials, ground works, and cementitious materials. In addition, disposing of molasses in the construction sector will be very beneficial for the Türkiye's economy and the protection of the natural environment.

2. METHODOLOGY

Agricultural wastes (Agro-wastes) and by-products are used as alternative raw material sources in various sectors. One of these alternative raw material sources is molasses. In the introduction section, information is given about the definition of molasses, chemical components, its use in different sectors, and the annual production amount in the world and in Türkiye. For this literature review, various theoretical and experimental papers related to molasses and construction have been reviewed. The evaluation of molasses in the construction sector is explained in four main sections. In this study, firstly, papers on the use of molasses in bituminous materials and asphalt works were reviewed. Accordingly, the use of molasses for highway works in the construction industry has been evaluated. Secondly, the use of molasses in the production of various construction materials has been investigated. In the construction sector, molasses material can be considered to be used in the production of composite construction materials, especially for interior and exterior areas. Thirdly, different papers have been investigated regarding the use of molasses in ground-work to strengthen the ground by civil engineers. It has been explained that ground problems and construction costs can be reduced thanks to molasses. Fourthly, the use of molasses material in cementitious materials is examined. The effect of molasses on the characteristics and production costs of cementitious paste, mortar, and concrete is explained.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Asphalt

Asphalt concrete is produced by appropriately combining aggregate grains with hot-bitumen binder material. Bitumen binder can be defined as a viscous Newtonian fluid obtained from the distillation process of crude oil. Bitumen material is mainly used in asphalt production (Caputo et al., 2020). The properties of the binder in asphalt mixtures directly affect the physical and mechanical properties of asphalt, such as creep, stability, void structure, and tensile strength (Gambalunga et al., 2023). Civil

engineers and scientists are constantly improving the performance of asphalt concrete and asphalt pavements. Generally, the binder material is modified in asphalt mixtures (Abtahi et al., 2010). Additionally, scientists have been working to modify asphalt concrete due to the instability of crude oil production and oil prices. Figure 4 shows the global production amount and price of crude oil between 2017 and 2023.

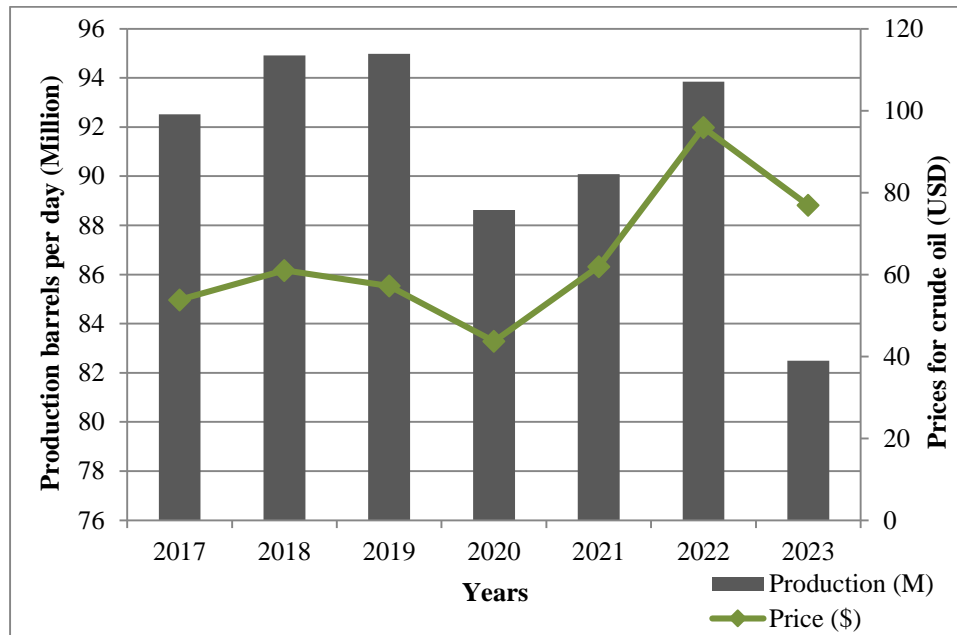


Figure 4: Globally, the amount of crude oil produced and the price of crude oil (between 2017 and 2023) (Businessinsider, 2024).

When Figure 4 is examined, the amount of crude oil production and the price of crude oil in the energy market vary considerably from year to year. Scientists are developing different methods to mitigate the impact of oil on asphalt production. One of these methods is to replace the traditional bitumen binder with molasses in asphalt mixtures. In this section, different experimental literature studies using molasses in asphalt production are investigated.

Prakash et al. investigated the characteristic properties of bitumen mixtures by adding up to 15% cane molasses to the bitumen mixtures. The highest Marshall Stability value was determined in bitumen mixtures containing 13% molasses. In addition, it has been stated that molasses reduces moisture absorption and oxidation by reducing the void rate of mixtures (Prakash et al., 2014).

Gürü et al. experimentally determined the effects of beet molasses and boron oxide on bitumen properties. In the study, it was found that when 5% molasses was added to bitumen mixtures, the viscosity and softening point of the bitumen mixture decreased. On the other hand, they observed that molasses increased the ductility and penetration of bitumen materials. Additionally, it has been explained that

rutting resistance improves when bitumen mixtures are modified with molasses and boron oxide (Gürü et al., 2017).

Mose and Ponnurangam investigated the effect of cane molasses on bitumen performance. Asphalt mixtures were prepared by adding different amounts of molasses instead of bitumen. As a result, as the amount of molasses in the mixtures increased, the specific gravity, tensile strength, and ductility of the mixtures decreased. In addition, it was determined that the softening point values decreased in parallel with the increase in molasses content in all mixtures. The highest performance was obtained from mixtures containing 20% molasses. Additionally, a cost reduction of approximately 17% was calculated for 20% molasses-based bitumen mixtures (Mose & Ponnurangam, 2018).

Rangan et al. examined the use of cane molasses in asphalt concrete produced with coarse or fine aggregate. In the study, bitumen material was replaced with 4%, 8%, and 12% molasses in asphalt concrete prepared with 60/70 penetration. As a result, the highest Marshall value was obtained for the asphalt prepared based on 4% molasses in accordance with the relevant standards. It has been determined that the strength of asphalt concrete prepared with coarse aggregate is lower (Rangan et al., 2019).

Harerua and Ghebrab examined the rheological properties of hot asphalt mixtures modified with molasses. In the study, 5%, 10%, 15%, and 20% molasses were replaced instead of bitumen. As a result, it has been stated that water content of molasses negatively affects the rheological properties of bitumen mixtures. Additionally, it was determined that as the molasses ratio increased in bitumen mixtures, the carbonyl index decreased and the shear modulus value increased (Harerua & Ghebrab, 2020).

Le investigated the use of cane molasses as an alternative binder material in asphalt concrete mixtures. In the study, cane molasses was replaced in the bitumen mixture at a rate of 5%~25% of the asphalt weight. As a result, the most suitable molasses rate in the mixtures was determined as 10%. The highest tensile strength and rutting resistance were obtained in asphalt concrete prepared at this ratio. Additionally, it was emphasized that molasses could be a suitable alternative raw material source to reduce the cost of asphalt production (Le, 2021).

Saboo et al. investigated the addition of cane molasses at various rates (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% by weight) as a replacement material to asphalt-based bitumen binder material. Due to the oil crisis and increasing environmental pollution problems, they suggested the use of waste materials in traditional bitumen mixtures. In the study, it was determined that 25% molasses was the most suitable ratio. According to the plain sample, it was stated that the moisture damage, permanent deformation, and fatigue resistance of the 25% cane molasses-based bitumen mixture comply with the relevant standards. They also calculated that the binder cost was reduced by 21% (Saboo et al., 2023).

Arslan et al. examined the use of beet molasses and fly ash (FA) in modifying bituminous mixtures. It has been stated that molasses components can improve the characteristic properties of bituminous mixtures due to their high sugar content. In the study, in bituminous mixtures modified with 3% molasses, the stability of the mixture increased by ~11%, peeling resistance by ~85%, and rutting resistance by ~42%. In addition, the produced molasses-fly ash-based bituminous mixture has been recommended to be used in regions with heavy rainfall (Arslan et al., 2024).

Mehta and Saboo examined the physical and rheological properties of molasses-based bio-asphalt. Bio-asphalt mixtures were prepared by modifying the molasses ratios to 10%, 20%, and 30%. As a result, the penetration of the mixtures decreased as the molasses content increased. It has also been stated that molasses content has no effect on the workability of asphalt concrete. On the other hand, it has been determined that all molasses-based asphalt mixtures have suitable thermal storage stability for transportation, storage, and laying. In addition, in the cost analysis, it was calculated that a 30% molasses additive reduces the cost of asphalt by approximately 20~30% (Mehta & Saboo, 2024).

Based on the various literature studies reviewed, it has been concluded that molasses can be an alternative raw material source in asphalt production. In addition, it appears that the molasses-based asphalt material produced complies with the relevant standards. On the other hand, it was stated that the properties of the bituminous mixture improved thanks to the sugar content of molasses. It has been reported that the stability, peeling resistance, rutting resistance, ductility, penetration, tensile strength, and shear modulus of asphalt increase when bitumen is replaced by molasses in the asphalt mixture. On the other hand, molasses decreased the void ratio, moisture absorption, oxidation, carbonyl index, penetration, specific gravity, and softening point values in asphalt mixtures. Scientists and civil engineers have also found that environmental pollution and asphalt costs are reduced by using molasses in asphalt production.

3.2. Construction materials

Agro-wastes are widely used in the production of construction materials. Researchers are investigating the use of agro-waste in construction materials to improve the properties of materials or reduce the cost of production. In this section, the effect of molasses on the properties of construction materials was investigated through various experimental studies.

Benk and Coban studied the usability of pumice and molasses in the production of lightweight thermal insulation bricks. In the study, brick materials were produced with 82.5% and 95% doses of pumice and 12.5% molasses at temperatures between 200 °C and 850 °C. As a result, it was determined that the density and tensile strength values of molasses based brick samples produced with high heat treatment at

850 °C increased. In this case, it has been stated that molasses could potentially be an alternative binder material to cement or plaster in brick production (Benk & Coban, 2012).

Cuervo studied the effects of gypsum and beet molasses on the compressive strength of adobe bricks. In the study, bricks were produced with a combination of molasses and gypsum at the ratios of 2.5%, 5%, 10% and 15%. As a result, it has been reported that the compressive strength values of adobe bricks produced with 2.5% molasses and 2.5% gypsum increased by ~9% compared to the control brick. Furthermore, it has been determined that if high amounts of molasses are used in brick production, the compressive strength of the bricks decreases significantly. Additionally, it has been stated that agro-wastes such as molasses can be used to improve the mechanical properties of construction materials (Cuervo, 2020).

Chantit et al. examined the usability of bagasse, bagasse ash and molasses in earth block production. In the study, earth blocks were produced by adding 4%, 8%, and 12% molasses and different amounts of bagasse and bagasse ash (15% and 25%) to the samples. According to experimental results, the highest compressive strength (~4.60 MPa) was obtained in 12% molasses-based 14, 21, and 28-day earth blocks. In addition, it has been stated that the thermal properties of blocks improve as the molasses and bagasse content in the block increases. Additionally, it has been explained that cheaper and more eco-friendly construction materials can be produced if the sugar industry and the construction industry merge (Chantit et al., 2022).

Syahfitri et al. investigated the physical and mechanical properties of lightweight composite tiles produced with sorghum bagasse and molasses. Composite tile samples were produced with 5%, 10%, 15% and 20% molasses content. As the molasses content increased in the tile samples, the water absorption and thickness swelling values of the samples decreased, while the internal bonding and screw holding capacity values increased. The density of all samples was determined to be below 0.8 g/cm³. In addition, 20% molasses composite tiles were determined to be the most suitable samples in terms of relevant standards (Syahfitri et al., 2024).

Dabakuyo et al. studied the mechanical properties of metakaolin and cane molasses-based geopolymer soil blocks. In the study, soil blocks were produced with 5% metakaolin and different amounts of molasses (2~8%). As a result, they determined that the most suitable molasses ratio was 4%. As the molasses ratio increased in soil block mixtures, the compressive strength of the blocks increased. The compressive strength of 4% molasses-based soil blocks was determined to be ~4.20 MPa. In addition, it has been explained that since molasses reduces the porous structure of soil blocks, the water absorption ratio also decreases. The produced soil blocks are suggested for use in wall applications (Dabakuyo et al., 2022).

Şahinöz et al. investigated the usability of beet molasses as a binder material in the production of polymer composite panels. In the study, panel samples were prepared by adding molasses up to 35% by weight instead of synthetic adhesives. As a result, the flexural strength of 35% molasses-based composite panels was determined to be 16 MPa. It was therefore declared that the composite panels produced comply with the load-bearing wood board standards. The molasses-based panels produced can be considered to be used as construction materials such as fences, wall coverings, concrete moulds, and office dividers (Şahinöz et al., 2022).

Sutiawan et al. examined the use of non-toxic citric acid, maleic acid and molasses instead of synthetic binder materials in wood panel production. They stated that panel construction products such as plywood have negative effects on humans and the environment because synthetic binders contain formaldehyde gas. In the study, plywood panels could be produced with these three types of binders. However, since acid-based binders contain higher cross-links than molasses, the highest physical and mechanical performance was achieved in acid-based panels (Sutiawan et al., 2023).

Cai et al. investigated the production of composite wood panels with a binder mixture prepared only with molasses and curing agent. In the study, shear strength of 1.20 MPa was obtained from panel samples. In addition, it has been stated that molasses-based panel materials can be produced more easily with the hot-pressing method. The panels produced are suggested for use in humid environments (Cai et al., 2023).

Şahinöz et al. examined the physical and mechanical properties of eco-friendly composite construction panels produced from plant waste and beet molasses. It has been stated that the panels are both safe for human health and low-cost because they are made from waste materials. In the study, it is expressed that molasses has a good binding performance by creating cross-linking due to its sugar content. In addition, they suggested that the produced construction panels be used indoors and outdoors for general use (Şahinöz et al., 2023).

Djongga et al. researched the production of a new composite rice husk and molasses binder-based insulation panel. In the study, different amounts of cane molasses (12~30%) were used instead of thermoset synthetic resin in the production of composite insulation panels. In the results obtained, it was determined that as the molasses content of composite panels increased, the volumetric mass, thermal conductivity, flexural and compressive strength values of the panels increased, and the density and water absorption ratios decreased. Additionally, it has been stated that it is possible to produce panels in accordance with standards by substituting cane molasses instead of synthetic resin (Djongga et al., 2024).

According to the literature reviewed, molasses is generally used in the production of bricks, tiles, soil blocks, and composite panels. It has been determined that molasses added to construction materials at the most suitable ratio increases the density, thermal properties, internal bonding, flexural and compressive

strength values of the materials. In addition, it has also been determined that molasses reduces the water absorption rate, pore amount, and thickness swelling values of construction materials. Especially in composite panel production, cheap and eco-friendly materials are produced by using molasses instead of toxic synthetic binders. In addition, thanks to molasses, some construction materials can be produced at lower temperatures for indoor and outdoor environments. This is very important in terms of reducing the production costs of the material in the construction sector. Additionally, the protection of the natural environment can be achieved by disposing of waste materials in the production of construction materials.

3.3. Ground work

Weak soil strength of the ground of the engineering structure is a very important problem for geotechnical or civil engineers. Mechanical methods or chemical stability methods (additives such as cement, lime, and mortar) are applied to increase soil stability (Archibong et al., 2020). Recently, organic-based materials have been commonly used to increase soil stability (Raheem et al., 2020; Shivhare & Mohanan, 2023). In this section, the effect of molasses on soil stability was investigated.

Ndegwa examined the effect of cane molasses on the stability of expansive clay soil. In the study, molasses was added to clay soil at ratios ranging from 4% to 14% by weight. As a result, the highest California bearing ratio (CBR) value was obtained from 8% molasses-based samples. It has been stated that molasses increases the load bearing capacity of expansive clay soil and reduces the swelling ratio. However, segregation of clay grains was observed when high amounts of molasses were used in clay soil. Accordingly, they suggested using molasses combined with lime for soil stability (Ndegwa, 2011).

Taye and Araya investigated the use of cane molasses and Portland cement combinations to improve the stability of clay soil. In the study, 4%, 8%, and 12% molasses and the same ratios of cement were added to the clay soil. As a result of the study, it was determined that swelling and plastic index values decreased in soil samples containing only molasses. Compared to the control sample, the CBR value of 4% molasses and cement-based soils increased from 1% to 64%, while the swelling value decreased by ~10% and the plastic index decreased by ~30% (Taye & Araya, 2015).

Mamuye et al. studied the improvement of the properties of low-quality gravel used in the foundation sub-base layer with the combination of molasses and lime. In the study, molasses was added to gravel-based samples at different ratios (2~10%). As a result, it was determined that as the molasses percentage increased in gravel-based mixtures, the CBR value increased from 28% to 37%, and the swelling ratio increased by ~2%. However, they found that samples prepared only with molasses did not comply with the relevant standards. On the other hand, it was detected that gravel samples blended with 50% molasses

and 50% lime met the limit values of the relevant standards. The 3-day CBR value of molasses-lime based samples was determined to be 81% (Mamuye et al., 2018).

Vinodhkumar et al. studied the effect of molasses on the properties of expansive clay soil called black cotton soil. In the study, molasses was added to the soil at the ratios of 5%, 7.5%, 10%, 12.5% and 15%. The samples were kept under fixed curing conditions for 0, 7, and 14 days. As a result, the highest unconfined compressive strength was obtained in 14-day-old samples based on 12.5% molasses. On the other hand, it was stated that the liquid limit value decreased from 40% to 32%. They also suggested using molasses material for soil modification (Vinodhkumar et al., 2018).

Nabeel et al. examined the effect of ground granulated blast furnace slag (GGBS) and cane molasses on clay soil stability. The experimental studies were continued with the combination of clay soil, GGBS, and molasses in the ratio of 0~15%. In the study, 8% molasses was determined as the most suitable ratio. It has been stated that in clayey soil, the Atterberg limit, specific gravity, and plastic index values decrease with increasing molasses content up to 8%. On the other hand, the highest triaxial test result value in 8% molasses-based soils was determined to be 380 kPa, and the CBR value was ~15%. Additionally, it has been stated that environmental protection can be achieved by using waste in soil stabilization applications (Nabeel et al., 2019).

Bhardwaj and Sharma attempted to construct the subgrade design of flexible pavement with molasses, lime and foundry sand. Clay soil was blended with 5%, 10%, 15% and 20% molasses and different amounts of lime and foundry sand. According to the test results, it was determined that the differential free swell and consistency limit values of the clayey soil decreased and the CBR value increased with the optimum ratios of 10% molasses, 20% foundry sand and 9% lime. They determined that the designed subgrade met the required standards and the total construction cost is reduced by ~36% with the optimum mixture (Bhardwaj & Sharma, 2022).

Karimi et al. examined the effect of sugar cane molasses on the shear strength of plastic loamy soils. In the study, different amounts of molasses (2~12%) were mixed into soils containing 10%, 15% and 20% clay. As a result, it was observed that molasses addition in all mixtures improved the engineering properties of the soil, and the clay grains absorbed the molasses significantly. According to shear test data, the highest shear strength was obtained from samples containing 10% molasses. In addition, it has been analyzed that as the ratio of molasses in the soil mixture increases, the cohesion coefficient and internal friction angle curves increase (Karimi et al., 2022).

Jiménez et al. investigated the production of composite soil with cane molasses, waste rubber fiber and kaolin clay. In the study, soil samples were prepared with clay soil containing different amounts of molasses (0~12%), 0.1% fiber and 35% water. As a result, a more ductile fracture behaviour was observed

in the soil samples as the percentage of molasses in the soil increased. The highest unconfined compressive strength (~2.1 MPa) was obtained in samples produced with 2% molasses. In addition, according to SEM analysis, it was observed that molasses and fiber formed a good link in 2% molasses-based samples. On the other hand, they explained that a very high ratio of bacteria occurred in the composite soil due to the molasses material (Jiménez et al., 2022).

Sadique and Sivanarayana studied the reinforcement of the expansive clay soil-based coating subgrade layer with molasses and jute fiber. Different amounts of jute fiber and molasses, ranging from 5% to 15% were added to the soil. As a result, the most suitable mixture ratio in the samples was determined as 12% molasses and 1.5% jute fiber. At this ratio, the plastic limit decreased by ~21% and the moisture content decreased by ~30% compared to the control sample. On the other hand, it was stated that the CBR value increased by 62%, and in addition, the cost of road construction could be reduced thanks to industrial wastes such as molasses (Sadique & Sivanarayana, 2023).

Ouedraogo et al. examined the use of the combination of laterite plastic clay and sugarcane molasses in the road sub-base layer. In the study, experimental studies were continued by mixing laterite clay with 0%, 2%, 4% and 6% molasses by weight. As a result, it was determined that CBR values increased as the molasses ratio increased in the samples after 24 hours, and the compressive strength values of the 21-day samples increased in parallel with the increase in molasses. It has been explained that a 2% molasses ratio can be used in the road sub-base layer as the most optimum value. In addition, they suggested the use of a molasses-based laterite clay road sub-base layer in areas not exposed to precipitation (Ouedraogo et al., 2023).

According to the experimental studies reviewed, molasses material is generally used to increase soil stability. The bearing capacity, compressive strength, cohesion and shear strength values of soil containing a certain amount of molasses increase. On the other hand, molasses reduces the swelling ratio, consistency limits, specific gravity and moisture content of the soil. Additionally, construction costs can be reduced by using molasses in ground works. However, in some studies, it is suggested to use molasses combined with materials such as lime, cement, and GGBS to increase the strength of the soil. There are not many studies on the effect of molasses on increasing soil stability. It is estimated that the use of molasses to improve soil stability in the construction sector will increase in the future.

3.4. Cementitious materials

In the construction sector, chemical additives are widely used for the production of cementitious materials and ready-mixed concrete. Thanks to chemical additives, desired physical and mechanical properties can be obtained in cementitious or concrete materials (Pekmezci & Atahan, 2014; Tulga & Kılınc, 2018).

Figure 5 shows the annual production amounts of concrete chemical additives in Türkiye between 2015 and 2021.

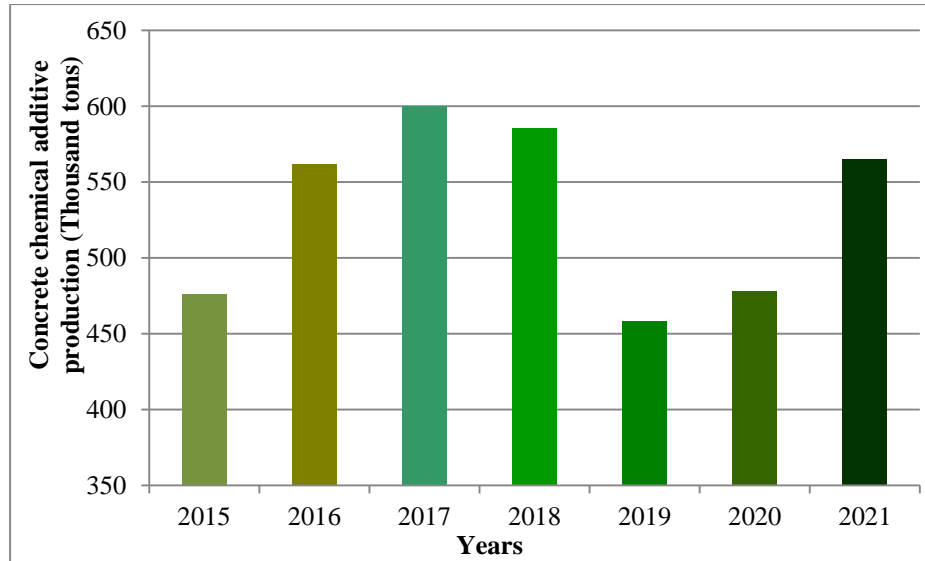


Figure 5: Türkiye concrete chemical additive production (Thousand tons) (2015~2021) (THBB Report, 2022).

When Figure 5 is examined, 565 thousand tons of concrete chemical additives were produced in Türkiye in 2021. Approximately 80% of the concrete chemical additives produced are water-reducing chemical additives. In Türkiye, the annual concrete chemical additive production amount varies. Additionally, Türkiye is Europe's largest concrete additive producer (THBB Report, 2022).

The production of chemical additives is both harmful to the environment and increases the cost of material production. In this study, it is suggested to use molasses in the production of cementitious materials instead of chemical additives. In this section, the effect of molasses on the properties of cementitious materials was investigated.

Acharya and Gyawali compared the effects of molasses and superplasticizer additives on the physical and mechanical properties of cement mortar. In the study, molasses and superplasticizer additives were added to the mortar mixtures at different ratios (0~1.2% by cement weight). As a result, the most suitable molasses ratio in the mortar was determined to be 87% less than in the superplasticizer. In addition, higher viscosity, compressive strength, and splitting tensile strength were detected in molasses-based mortars. Furthermore, it has been analyzed that molasses can reduce the use of cement in mortars, and thus cheaper and more eco-friendly concrete can be produced (Acharya & Gyawali, 2024).

Ali et al. examined the effect of cane molasses on the properties of recycled aggregate concrete (RAC) prepared at a w/c ratio of 0.45, 0.50, and 0.55. It has been explained that in concrete production, recycled

aggregate has a higher water absorption capacity than natural aggregate, and therefore, the strength of concrete with recycled aggregate is generally lower. In addition, it has been stated that molasses can be used to reduce the water needs of concrete containing recycled aggregate. As a result, maximum compressive strength was obtained from concretes produced at 0.50 w/c and 0.25~0.50% molasses ratio.

It has also been analyzed that molasses improves the workability and fresh density properties of concrete and that the cost of concrete can be reduced by using molasses as a plasticizer additive in concrete (Ali et al., 2020).

Rashid et al. investigated the effect of molasses ratio on fresh properties of cement paste. In the study, concrete samples were prepared with recycled aggregate and 0.25~0.75% molasses by weight. As a result, the most suitable molasses ratio for cement pastes was determined as 0.25. It has been determined that up to this rate, the water need of the paste decreases and the setting times are increased, and also, the compressive strength of 365-day samples of 0.25 molasses-based concrete increases by ~15%. Furthermore, it is mentioned that using molasses and recycled aggregate combined can be a very important solution for a sustainable environment (Rashid et al., 2019).

Weifeng et al. researched the effect of cane molasses on the physical and hydration reaction properties of conventional Portland cement. In the study, molasses was added to cement paste and mortar samples at different ratios (0~0.05% and 1%). As a result, they determined that the setting time and fluidity of low-molasses-based samples increased. Additionally, it was determined that the formation of ettringite was rapid and the hydration of C₃S was delayed in samples containing high ratios of molasses (Weifeng et al., 2014).

Akar and Canbaz examined the effect of beet molasses on the properties of concrete in fresh and hardened states. In the study, concrete mixtures were prepared with 0.5% and 1% molasses and formaldehyde molasses additives. As a result, it was determined that the molasses additive increased the setting time of concrete samples and also increased the 28-day compressive strength of concrete by 20%. On the other hand, it was detected that the compressive strength of molasses-based concrete decreased by approximately 30% in sulphate and acidic environments. Additionally, they calculated that the cost of concrete could be reduced by ~3% by using molasses as a plasticizer in concrete (Akar & Canbaz, 2016).

Huang et al. investigated the usability of molasses as a plasticizer and retarder for calcium sulfoaluminate cement. In the study, molasses was added to cement pastes and mortars at the ratios of 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% and 1% by weight of the cement. As a result, it was determined that the initial 2-hour and 28-day unconfined compressive strengths of molasses-based samples were close to each other, and also, molasses increased the initial and final setting times of cementitious mortars. In addition, it has been observed that molasses delays the hydration reaction of mortars and increases the amount of porosity. Furthermore, they

emphasized that molasses is a sustainable and suitable retarder/plasticizer additive for calcium sulfoaluminate cement (Huang et al., 2020).

Mohammed and Kadhim studied the usability of pumice stone and molasses in the production of lightweight concrete. In the study, molasses at the ratio of 0.2% of the cement weight and pumice stone at different ratios were added to the concrete samples. As a result, high-strength lightweight concrete was produced in accordance with the standards with 100% pumice stone and molasses. Thanks to molasses, the amount of mixing water and the production cost of concrete were reduced. Additionally, it is stated that molasses material improves the interface matrix between the aggregate and the cement (Mohammed & Kadhim, 2023).

Abalaka examined the effects of molasses and starch on the physical and mechanical properties of C35 concrete. In the study, concrete mixtures were prepared by adding both starch and molasses in different proportions (0~1%). As a result, it was determined that the compaction factor, workability, and initial setting time values of molasses-based concrete samples were lower than those of starch samples. In addition, although the early compressive strength was higher in molasses-based samples, it was stated that the compressive strength of starch-based samples was higher in 28 days samples. Furthermore, it is explained that the sugar content of molasses is very effective in improving the properties of concrete (Abalaka, 2011).

Jumadurdiyev et al. investigated the use of molasses as a water-reducing and retarder additive in concrete production. In the study, concrete samples were produced with three types of beet molasses (containing different ratios of sugar) and lignosulfonate additives. As a result, the setting time and workability of molasses-based samples were determined to be higher. It has been stated that the sugar content of molasses has little effect on setting time and workability. On the other hand, the compressive strength of molasses-based samples was determined to be higher at later ages. In addition, it has been determined that the shrinkage, carbonation, freeze-thaw, and expansion values of both molasses and lignosulfonate-based concretes are close to each other (Jumadurdiyev et al., 2004).

Kavas et al. investigated the effect of beet molasses on the setting time and compressive strength of borogypsum and FA based cementitious mortars. In the study, mortar samples were prepared with 2~10% borogypsum, FA and 0~0.1% molasses. As a result, it was determined that both molasses and borogypsum mortars increased the initial setting times, and the compressive strength values of 6% borogypsum and 0.1% molasses-based mortars after 7 days were higher than those of only borogypsum-based samples. In this case, it is suggested to use borogypsum and molasses combined in the production of cement mortar (Kavas et al., 2005).

Gao et al. examined the effect of beet molasses on the performance of blended cement containing high volumes of minerals. In the study, the blended cementitious mixture was prepared with 0.01~0.05% molasses and 41% mineral additive (FA+GGBS). As a result, according to SEM analysis, they observed that as the molasses ratio in the paste increased, the pore structure decreased and the microstructure improved. In addition, higher compressive strength was obtained in the 0.03% molasses-based paste compared to the control sample. Furthermore, it was mentioned that the negative effects of the sugar industry on the environment can be reduced by using molasses in the cement sector (Gao et al., 2011).

Zhang et al. investigated the usability of waste glycerin, lignin and molasses in the cement grinding process. In the study, glycerin, lignin and molasses were separately added to the blended cement at the ratios of 0~0.04% by weight of the cement. As a result, it was found that these three materials increased the mechanical properties, specific surface area, and density of the cement compared to the control sample. The highest mechanical strength was obtained in molasses-based paste. On the other hand, they determined that the 28 days compressive strength of 0.02% molasses-based paste was 10 MPa higher than the control sample. On the other hand, they determined that the 28 days compressive strength of 0.02% molasses-based paste was 10 MPa higher than that of the control sample and also explained that molasses improved the quality of cement (Zhang et al., 2016).

Li et al. examined the usability of cane molasses as an aid material in clinker production. In the study, molasses was added to the mixture containing ~97% clinker at the ratios of 0.01%, 0.02%, 0.04%, 0.08% and 0.1% (by clinker weight). As a result, according to the experimental data obtained, 0.04% was determined as the most suitable molasses ratio. It was determined that the setting time, compressive strength, density and workability of the samples increased up to 0.04% molasses ratio. On the other hand, it was stated that molasses is very effective in the clinker grinding process, provides energy savings, and reduces production costs in cement production (Li et al., 2015).

Al-Mamoori et al. studied the prevention of cold joint formation in the production of concrete elements with molasses material. It has been explained that the workability of concrete decreases due to evaporation in hot regions and that the long vibration process in concrete causes segregation. In the study, molasses was added to the concrete mixture at the ratios of 0%, 0.05%, 0.1%, 0.2% and 0.3% by weight of cement. As a result, they found that 0.2% molasses increased the compressive strength of concrete samples by ~11% and delayed the hydration reaction, increasing the setting time by 277 minutes. In this case, it is assessed that molasses can reduce the formation of cold joints in concrete, especially in hot regions (Al-Mamoori et al., 2018).

Mashtakov et al. investigated the production of a new plasticizer material based on beet molasses. In the study, molasses and alkali based fluid samples were prepared. The mechanical properties of concrete

samples produced with this molasses alkali based mixture and two different commercial chemical plasticizers were compared. As a result, the highest compressive strength was obtained in concretes prepared with molasses-based plasticizer. It has been reported that the sugar content and pH value of molasses have an impact on the properties of concrete and that molasses can have a high potential to produce high-performance plasticizer (Mashtakov et al., 2018).

Jaramillo et al. demonstrated the effects of molasses dosage on the characteristic properties of concrete. In the study, molasses and a commercial plasticizer chemical material were added to the concrete samples separately at the ratios of 0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1.0% by volume. As a result, the 0.4% molasses ratio was determined to be the most suitable ratio compared to both control and plasticizer chemical-based samples. It was reported that at this ratio, the setting time, 28 days compressive strength, and workability of the samples increased. Additionally, according to SEM analysis, it was observed that microcrack formation was less in molasses-based samples. Moreover, they assessed that molasses could be a suitable alternative chemical material instead of retarder and plasticizer chemical materials (Jaramillo et al., 2022).

Pathan and Singh researched the combined use of cane molasses and treated waste water in concrete production. In the study, 0.40%, 0.60% and 0.80% molasses by weight of cement was added to the cementitious samples. As a result, 0.40 molasses ratio was determined as the most suitable ratio. It was detected that as the molasses content increased in the mixture, the setting time, workability, and splitting tensile strength values increased, and the amount of mixing water significantly decreased. In addition, it was explained that the use of molasses combined with treated waste water in concrete production is suitable and considerably reduces the concrete production cost (Pathan & Singh, 2017).

It has been found in the literature that molasses material increases the setting time, workability, fresh density, splitting tensile and compressive strength values, and reduces the water ratio, pore volume, and microcrack ratio in cementitious samples. According to the literature reviewed, molasses is used compatible with normal plasticizer, superplasticizer, and water-reducing additives. The sugar content of molasses positively affects the performance properties of plasticizers and water-reducing concrete admixtures. Thus, thanks to molasses, higher-quality cementitious materials can be produced with a low w/c ratio. In the construction industry, the production cost of cementitious material can be reduced by adding molasses as a replacement material to normal plasticizer, superplasticizer, and water-reducing chemical additives. In addition, compared to commercial chemical additives, molasses has a more positive effect on the properties of cementitious materials. Moreover, by using molasses as an aid grinding material in the production of cement clinker, energy savings can be achieved and environmental pollution resulting from cement production can be reduced. Additionally, it is suggested to use molasses material in the

production of RAC and lightweight concrete. On the other hand, usability molasses combined with mineral-based materials such as pumice, FA, GGBS, and borogypsum is an important advantage. In the construction sector, the use of molasses in the production of cementitious materials can provide both an environmentally friendly building material and a sustainable environment. In this case, a strong commercial relationship can be established between the construction sector and the sugar sector.

In summary, the findings obtained from the literature studies investigated are given in Table 1. According to Table 1, the most suitable molasses ratio varies in different literature studies. Firstly, the most suitable molasses ratio in construction materials and construction works should be determined.

Table 1: Briefly, literature findings on the effect of molasses on construction materials and construction works.

Reference	Year	Determined most suitable molasses ratio	Remarks
Prakash et al.	2014	13%	The Marshall stability value of bitumen mixtures increased.
Gürü et al.	2017	5%	Molasses and boron oxide improved the rutting resistance of bituminous material.
Mose et al.	2018	20%	The cost of bituminous mixtures decreased by ~17%.
Rangan et al.	2019	4%	The Marshall value of asphalt concrete increased.
Harerua et al.	2020	5%	Hot-mix asphalt improved the rheological properties.
Le	2021	10%	Molasses improved the tensile strength of asphalt concrete.
Saboo et al.	2023	25%	The binder cost of the bitumen mixture decreased by ~21%.
Arslan et al.	2024	3%	The stability of bitumen mixtures increased.
Mehta et al.	2024	30%	Total asphalt costs decreased by ~20~30%.
Benk et al.	2012	12.5%	It was used as a binding material in brick production.
Cuervo	2020	2.5%	The compressive strength of adobe brick increased by 9%.
Chantit et al.	2022	12.5%	Earth block's thermal properties improved.
Syahfitri et al.	2024	20%	Lightweight composite roof tile was produced.
Dabakuyo et al.	2022	4%	The mechanical properties of the soil block improved.
Şahinöz et al.	2022	35%	It was used as a binder material in the production of composite panels.
Sutiawan et al.	2023	59% (concentrate ratio)	It was used in the production of eco-friendly wood panels.

Table 1: Continued.

Reference	Year	Determined most suitable molasses ratio	Remarks
Cai et al.	2023	2/1 (molasses/binder)	Composite panel production cost decreased.
Şahinöz et al.	2023	35%	Composite panel production cost decreased.
Djonga et al.	2024	12-30%	It was used instead of synthetic binders in the production of insulation panels.
Ndegwa	2011	8%	The CBR value of clay soil increased.
Taye et al.	2015	4%	The combination of molasses and cement reduced the swelling of clay soil by 10%.
Mamuye et al.	2018	50%	The combination of molasses and lime increased the base layer CBR value by 81%.
Vinodhkumar et al.	2018	12.5%	The liquid limit value of the expansive clay soil decreased.
Nabeel et al.	2019	8%	The highest triaxial test result value was obtained in clay soil.
Bhardwaj et al.	2022	10%	The mixture of molasses, lime and foundry sand reduced the construction cost by 36%.
Karimi et al.	2022	10%	The soil shear strength value increased.
Jiménez et al.	2022	2%	Molasses and rubber fiber increased the unconfined compressive strength value of clay soil.
Sadique et al.	2023	12%	Molasses and jute fiber reduced the plastic limit value of clay soil by 21%.
Ouedraogo et al.	2023	2%	The CBR value of laterite clay soil increased.
Ali et al.	2020	0.25-0.50%	RAC's water ratio has decreased.
Rashid et al.	2019	%0.25	The compressive strength of concrete increased by 15%.
Weifeng et al.	2014	1%	It delayed the hydration reaction of cement paste.
Akar et al.	2016	0.50-1%	Concrete cost decreased by ~3%.
Acharya et al.	2024	0.40%	It was used as a superplasticizer additive in the mortar mixture.
Huang et al.	2020	Unspecified	It was used as a retarder/plasticizer additive in cement mortars.
Mohammed et al.	2023	0.2%	The combination of molasses and pumice was used to produce high-strength lightweight concrete.
Abalaka	2011	0.05%	The physical and mechanical properties of concrete improved.
Jumadurdiyev et al.	2004	0.2%	The setting time and workability of concrete increased.
Kavas et al.	2005	0.1%	The combination of molasses and borogypsum increased the compressive strength of concrete.

Table 1: Continued.

Reference	Year	Determined most suitable molasses ratio	Remarks
Gao et al.	2011	0.03%	The combination of molasses and FA increased the compressive strength of cement mortar.
Zhang et al.	2016	0.02%	It was used as a grinding aid material in cement production.
Li et al.	2015	0.04%	It was used as a grinding aid material in cement clinker production.
Al-Mamoori et al.	2018	0.2%	The setting time of concrete increased.
Mashtakov et al.	2018	Unspecified	It was used as a high performance plasticizer for concrete.
Jaramillo et al.	2022	0.4%	It reduced the formation of microcracks in concrete.
Pathan et al.	2017	0.4%	It reduced the mixing water of concrete.

4. CONCLUSION

According to the literature studies reviewed, the evaluation of molasses in civil engineering works;

- Due to unstable oil production and prices, molasses is an excellent alternative raw material source to reduce the cost of asphalt production.
- Molasses improves the mechanical properties of asphalt material, such as stability, peeling resistance, rutting resistance, ductility, penetration, and tensile strength.
- When modifying asphalt, it is more suitable to use molasses combined with mineral-based binder materials such as fly ash and boron oxide.
- Molasses can be used as a binder in place of toxic synthetic binders used in the production of construction materials.
- Molasses improves the mechanical properties of construction materials (such as bricks, tiles, and composite panels), such as thermal properties, internal bonding strength, flexural and compressive strength.
- Thanks to the sugar content of molasses, the production of construction materials becomes easier.
- Molasses can be used to increase soil stability and road base load-bearing capacity.
- Molasses increases the bearing capacity, compressive strength, cohesion and shear strength of the soil and reduces the swelling ratio, consistency limits, specific gravity and moisture content.
- Molasses reduces the cost of road construction.
- Molasses should be used as a plasticizer, water reducer and retarder additive in cementitious materials.
- Compared to commercial chemical additives, molasses has a more positive effect on the properties of cementitious materials.

- It is more suitable to use molasses in RAC in combination with various mineral additives.
- It can be used as an aid grinding material in cement clinker production. Thus, energy savings can be achieved in cement production.

As a result, it is proposed that molasses be used in civil engineering, both to improve the properties of construction materials and to reduce costs. Molasses can contribute to the economy by being recycled in the construction sector. Thus, an economic relationship can also be established between different sectors, such as construction and the sugar sector. Molasses is a suitable raw material source for the production of cheap and eco-friendly construction materials for the construction sector and for reducing construction costs. By disposing of molasses in civil engineering works, CO₂ emissions can be reduced, and natural resources and the environment can be protected.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

REFERENCES

- Abalaka, A. E. (2011). Comparative effects of cassava starch and simple sugar in cement mortar and concrete. *ATBU Journal of Environmental Technology*, 4(1), 13-22.
- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., & Hejazi, S. M. (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review. *Construction and Building Materials*, 24(6), 871-877. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009.
- Acharya, D. P., Gyawali, T. R. (2024). Investigation of the performance of natural molasses on physical and mechanical properties of cement mortar. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1), 102355. doi.org/10.1016/j.asej.2023.102355.
- Akar, C., Canbaz, M. (2016). Effect of molasses as an admixture on concrete durability. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2374-2380. doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.081.
- Ali, B., Qureshi, L. A., Baig, H. S., Malik, S., Din, M., Aslam, H. M. U. (2020). Effect of molasses and water–cement ratio on properties of recycled aggregate concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 3455-3467. doi.org/10.1007/s13369-019-04117-w.
- Al-Mamoori, F. H. N., Al-Mamoori, A. H. N. (2018). Reduce the influence of horizontal and vertical cold joints on the behavior of high strength concrete beam casting in hot weather by using sugar molasses. *Int J Eng Technol*, 7(4.19), 794-800.
- Archibong, G. A., Sunday, E. U., Akudike, J. C., Okeke, O. C., Amadi, C. (2020). A review of the principles and methods of soil stabilization. *International Journal of Advanced Academic Research| Sciences*, 6(3), 2488-9849.
- Arslan, D., Guru, M., Çubuk, M. K., Öztürk, Ş. (2024). Investigation of the effects of molasses-based fly ash compound on bitumen and bituminous mixture properties by laboratory tests. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. doi: 10.17341/gazimmfd.1124843.
- Benk, A., Coban, A. (2012). Possibility of producing lightweight, heat insulating bricks from pumice and H₃PO₄- or NH₄NO₃-hardened molasses binder. *Ceramics International*, 38(3), 2283-2293. doi:10.1016/j.ceramint.2011.10.080.

- Bhardwaj, A., Sharma, R. K. (2022). Designing thickness of subgrade for flexible pavements incorporating waste foundry sand, molasses, and lime. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1), 132. doi.org/10.1007/s41062-021-00723-6.
- Businessinsider. Markets insider. <https://markets.businessinsider.com/commodities/oil-price?type=wti>. [Online: 05.05.2024].
- Cai, W., & Zhao, Z. (2023). Exploiting sugarcane waste molasses and dephenolized cottonseed protein as the promising component for eco-friendly wood-based panel adhesive formulation. *Wood Material Science & Engineering*, 1-10. doi.org/10.1080/17480272.2023.2289032.
- Caputo, P., Porto, M., Angelico, R., Loise, V., Calandra, P., Rossi, C. O. (2020). Bitumen and asphalt concrete modified by nanometer-sized particles: Basic concepts, the state of the art and future perspectives of the nanoscale approach. *Advances in Colloid and Interface Science*, 285, 102283. doi.org/10.1016/j.cis.2020.102283.
- Chantit, F., El Abbassi, F. E., Kchikach, A. (2022). Investigation on the reuse of the sugar co-products (Bagasse, Molasses, and Ash) as industrial wastes in the production of compressed earth blocks. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1530-1534. doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.295.
- Dabakuyo, I., Mutuku, R. N., Onchiri, R. O. (2022). Mechanical properties of compressed earth block stabilized with sugarcane molasses and metakaolin-based geopolymer. *Civil Engineering Journal*, 8(4), 780-795. doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-04-012.
- Djonga, P. N. D., Deramne, R. S., Assoulaye, G., Tom, A., Zaida, T. J. (2024). Composite panels from the combination of rice husk and wood chips with a natural resin based on tannins reinforced with sugar cane molasses intended for building insulation: physico-mechanical and thermal properties. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 12(02), 19-30. doi.org/10.4236/msce.2024.122002.
- Eliodório, K. P., Cunha, G. C. D. G. E., Lino, F. S. D. O., Sommer, M. O. A., Gombert, A. K., Giudici, R., Basso, T. O. (2023). Physiology of *Saccharomyces cerevisiae* during growth on industrial sugar cane molasses can be reproduced in a tailor-made defined synthetic medium. *Scientific Reports*, 13(1), 10567. doi.org/10.1038/s41598-023-37618-8.
- Gambalunga, B., Nicolini, J. L., Inocente, J. M., Pich, C. T., Angioletto, E., Pereira, F. R., ... Arcaro, S. (2023). Valorization of waste foundry sand aggregates in hot-mix asphalt. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 277-288. doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.025.
- Gao, X., Yang, Y., Deng, H. (2011). Utilization of beet molasses as a grinding aid in blended cements. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3782-3789. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.041.
- Geremew Kassa, M., Asemu, A. M., Belachew, M. T., Satheesh, N., Abera, B. D., Alemu Teferi, D. (2024). Review on the application, health usage, and negative effects of molasses. *CyTA-Journal of Food*, 22(1), 2321984. doi.org/10.1080/19476337.2024.2321984.
- Gürü, M., Çubuk, M. K., Arslan, D., Aminbakhsh, S. (2017). Effects of sugar beet molasses and molasses-based boron oxide compound on bitumen properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(4), 04016252. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001790.
- Hareru, W., Ghebrab, T. (2020). Rheological properties and application of molasses modified bitumen in hot mix asphalt (HMA). *Applied Sciences*, 10(6), 1931. doi:10.3390/app10061931.
- Huang, G., Pudasainee, D., Gupta, R., Liu, W. V. (2020). Utilization and performance evaluation of molasses as a retarder and plasticizer for calcium sulfoaluminate cement-based mortar. *Construction and Building Materials*, 243, 118201. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118201.
- Hussain Sadique, C. S. (2023). A systematic study to strengthen the sub grade of the pavement by stabilisation of expansive soil with molasses and jute fibre. *Mathematical Statistician and Engineering Applications*, 72(1), 668-682.
- Isler-Kaya, A., Karaosmanoglu, F. (2022). Life cycle assessment of safflower and sugar beet molasses-based biofuels. *Renewable Energy*, 201, 1127-1138. doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.041.

- Jamir, L., Kumar, V., Kaur, J., Kumar, S., Singh, H. (2021). Composition, valorization and therapeutical potential of molasses: a critical review. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 131-142. doi.org/10.1080/21622515.2021.1892203.
- Jaramillo, H. Y., Camperos, J. A. G., Suárez, A. (2022). Physical-mechanical properties of concrete mixtures incorporating sugar cane molasses. *Webology* (ISSN: 1735-188X), 19(6).
- Jiménez, J. E., Fontes Vieira, C. M., Colorado, H. A. (2022). Composite soil made of rubber fibers from waste tires, blended sugar cane molasses, and kaolin clay. *Sustainability*, 14(4), 2239. doi.org/10.3390/su14042239.
- Jumadurdiyev, A., Ozkul, M. H., Saglam, A. R., Parlak, N. (2005). The utilization of beet molasses as a retarding and water-reducing admixture for concrete. *Cement and concrete research*, 35(5), 874-882. doi:10.1016/j.cemconres.2004.04.036.
- Kabeyi, M. J. B., Olanrewaju, O. A. (2022, March). Sugarcane molasses to energy conversion for sustainable production and energy transition. In 12th annual Istanbul international conference on industrial engineering and operations management, Istanbul, Turkey (Vol. 405).
- Karimi, S., Lashkar-Ara, B., Najafi, L. (2022). Influence of sugarcane molasses addition on the shear strength properties of slightly plastic loamy soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 903. doi.org/10.1007/s12517-021-09395-z.
- Kavas, T., Olgun, A., Erdogan, Y. (2005). Setting and hardening of borogypsum–Portland cement clinker–fly ash blends. Studies on effects of molasses on properties of mortar containing borogypsum. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 711-718. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.019.
- Klaver, M., Petersen, A. M., Görgens, J. F. (2023). Economic comparison of decentralized versus centralized processing of sugarcane to fructooligosaccharides and ethanol. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(6), 1566-1578. doi: 10.1002/bbb.2525.
- Le, V. P. (2021). Performance of asphalt binder containing sugarcane waste molasses in hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 15. doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00595.
- Li, H., Jiang, Z., Yang, X., Yu, L., Zhang, G., Wu, J., Liu, X. (2015). Sustainable resource opportunity for cane molasses: use of cane molasses as a grinding aid in the production of Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 93, 56-64. doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.027.
- Mashtakov, A. F., Chernykh, V. F., Poskonin, V. V. (2018, December). A new plasticizer of comprehensive action on the basis of sugar industry waste. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 463 (3), 032043. IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/463/3/032043.
- Mehta, D., Saboo, N. (2024). Use of sugarcane molasses for preparation of bio-asphalt: Effect of source. *Construction and Building Materials*, 421, 135691. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135691.
- M'Ndegwa, J. K. (2011). The effect of cane molasses on strength of expansive clay soil. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 2(6), 1034-1041.
- Mohammed, T. A., Kadhim, H. M. (2023). Sustainable high-strength lightweight concrete with pumice stone and sugar molasses. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32(1), 20220231. doi.org/10.1515/jmbm-2022-0231.
- Mordenti, A. L., Giaretta, E., Campidonico, L., Parazza, P., Formigoni, A. (2021). A review regarding the use of molasses in animal nutrition. *Animals*, 11(1), 115. doi.org/10.3390/ani11010115.
- Mose, G. Y., Ponnurangam, P. (2019). Investigating the effect of cane molasses on the performance of base bitumen. *Int. J. Res. Innov. Appl. Sci*, 54-58.
- Mustafa, G., Arshad, M., Bano, I., Abbas, M. (2023). Biotechnological applications of sugarcane bagasse and sugar beet molasses. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(2), 1489-1501. doi.org/10.1007/s13399-020-01141-x.

- Nabeel, M., Abbas, T., Ahmed, F., Abid, M. M., Raza, H., Khan, N., Hussain, T. (2019). Ground-granulated-blast-furnace-slag and sugar cane molasses influence on stabilization of claysoil. *Pakistan Journal of Science*, 71(4), 273.
- Nguyen, T. L. T., Gheewala, S. H. (2008). Life cycle assessment of fuel ethanol from cane molasses in Thailand. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, 301-311. doi: 10.1007/s11367-008-0011-2.
- OECD Report. Sugar-OECD-FAO Agricultural. <https://stats.oecd.org/index.aspx?queryid=84958>. [Online:23.04.2024].
- Parascanu, M. M., Sanchez, N., Sandoval-Salas, F., Carreto, C. M., Soreanu, G., Sanchez-Silva, L. (2021). Environmental and economic analysis of bioethanol production from sugarcane molasses and agave juice. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 64374-64393. doi.org/10.1007/s11356-021-15471-4.
- Pathan, S. B., Singh, V. V. (2017). Using molasses in concrete as a time retarding admixture. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(11), 509-513.
- Pekmezci, B. Y., Atahan, H. N. (2014). Kimyasal ve nano katkıları: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, Mayıs-Haziran, 69-82.
- Prakash, K. S., Phanindra, M., Surya, S. R., Naresh, J. (2014). Percentage replacement of bitumen with sugarcane waste molasses. *Int. J. Civ. Eng. Technol*, 5, 188-197.
- Raheem, B. S., Oladiran, G. F., Oke, D. A., Musa, S. A. (2020). Evaluation of strength properties of subgrade materials stabilized with bio-enzyme. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 5(5), 607-610.
- Rangan, P. R. (2019). The Effect of using sugar cane drops as substitute some asphalt for Ac-Bc and Ac-Wc concrete asphalt layer. *Journal of Advanced Research in Dynamical & Control Systems*, 11(7), 699-706.
- Rashid, K., Tariq, S., Shaikat, W. (2019). Attribution of molasses dosage on fresh and hardened performance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 197, 497-505. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.249.
- Rodriguez Cuervo, L. S. (2020). Adobe bricks with sugarcane molasses and gypsum to enhance compressive strength in the city Cogua, Colombia. *Revista de la construcción*, 19(3), 358-365. doi: 10.7764/RDLC.19.3.358.
- Saboo, N., Sukhija, M., Mehta, D., Haswanth, K., Srivastava, A., Patil, A. (2023). Use of raw sugarcane molasses as a partial replacement of asphalt binder: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 369, 130541. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130541.
- Şahinöz, M., Aruntaş, H. Y., Gürü, M. (2022). Processing of polymer wood composite material from pine cone and the binder of phenol formaldehyde/PVAc/molasses and improvement of its properties. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01013. doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01013.
- Şahinöz, M., Aruntaş, H., Gürü, M. (2023). Production of composite particleboard from waste plum pits (*prunus domestica*) and improvement of its characteristics. *Cellulose Chemistry and Technology*, 57(5-6). doi: 10.35812/cellulosechemtechnol.2023.57.53.
- Shivhare, S., Mohanan, H. (2023). A review on subgrade soil stabilization using bio enzymes. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(3), 148. doi.org/10.1007/s12517-023-11257-9.
- Soré, S. O., Sanou, S., Aubert, J. E., Millogo, Y. (2023). Improvement of geotechnical and mechanical properties of laterite from Burkina Faso using sugar cane molasses for use as road structural layers. *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*, 52.
- Stephen, G. S., Shitindi, M. J., Bura, M. D., Kahangwa, C. A., Nassary, E. K. (2024). Harnessing the potential of sugarcane-based liquid byproducts-molasses and spentwash (vinasse) for enhanced soil health and environmental quality. A systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1358076. doi: 10.3389/fagro.2024.1358076.
- Sutiawan, J., Syahfitri, A., Purnomo, D., Sudarmanto, Narto, Akbar, F., ... Hakim, L. (2023). Characterization and application of non-formaldehyde binder based citric acid, maleic acid, and molasses adhesive for plywood composite. *Polymers*, 15(19), 3897. doi.org/10.3390/polym15193897.

- Syahfitri, Alifah, et al. "Conversion of agro-industrial wastes of sorghum bagasse and molasses into lightweight roof tile composite." *Biomass Conversion and Biorefinery* 14.1 (2024): 1001-1015. doi.org/10.1007/s13399-022-02435-y.
- Taye, B., Araya, A. A. (2015, May). Stabilization of expansive clay soil with sugar cane molasses and cement. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation in Africa (ICTA2015)*, Palapye, Botswana (pp. 25-27).
- TEPGE Report. Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü. Ürün raporu şeker pancarı ve şeker 2023.
- THBB Report. Türkiye Hazır Beton Birliği, Hazır beton sektör raporu 2022.
- Tulga, İ., Kılınc, K. (2018). Uçucu kül kullanımının farklı dayanım sınıflarındaki betonların mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 212-236.
- Vinodhkumar, S., Kulanthaivel, P., Kabilan, A., Lokeshkanna, K. M. (2018). Study of black cotton soil characteristics with molasses. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 7(S1), 73-77.
- Weifeng, L. I., Suhua, M. A., Shengbiao, Z., Xiaodong, S. (2014). Physical and chemical studies on cement containing sugarcane molasses. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 118, 83-91. Doi: 10.1007/s10973-014-3947-4.
- Wynne, A. T., Meyer, J. H. (2002). An economic assessment of using molasses and condensed molasses solids as a fertilizer in the South African sugar industry. In *Proceedings South African Sugar Technologists Association* 200(76), 71-78.
- Yibas Mamuye, E. T. Q., Geremew, A. (2018). Combined effects of molasses-lime treatment on poor quality natural gravel materials used for sub-base and base course construction. *GSI*, 6(7), 621-633.
- Zhang, S., Wang, J., Jiang, H. (2021). Microbial production of value-added bioproducts and enzymes from molasses, a by-product of sugar industry. *Food chemistry*, 346, 128860. doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128860.
- Zhang, Y., Fei, A., Li, D. (2016). Utilization of waste glycerin, industry lignin and cane molasses as grinding aids in blended cement. *Construction and Building Materials*, 123, 785-791. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.034.

Kamusal Alanların Mekânsal Kalite Parametreleri Temelinde Görsel Peyzaj Değerinin Belirlenmesi: İstanbul/ Maltepe Örneği

Meltem COŞANER TONYALI¹ , Tuğba KİPER^{2*} 

¹*İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul, Türkiye*

²*Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Güzel Sanatlar, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye*

Geliş: 24.05.2024, Kabul: 25.06.2024, Yayınlanma: 03.10.2024

ÖZ

Kamusal alanlar; estetik, rekreasyon, miras değerleri ile kentsel kimlik ve kalitenin temel bileşenidirler. Kamusal alanlara yönelik kimlik ve kalitenin değerlendirilmesinde de görsel algıya dayalı mekansal tercihler belirleyici olmaktadır. Bu kapsamda çalışmada “Kamusal alanlarda görsel kimlik ve mekansal kalite ilişkili olup, görsel algıya dayalı olarak memnuniyet düzeyinin analiz edilmesi mekansal kalitenin belirlenmesinde etkilidir” hipotezi çerçevesinde İstanbul/Maltepe İlçesi özelinde kamusal alanların geçmiş ve günümüz görüntülerine dayalı olarak görsel peyzaj kalitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; “Kamusal alanlarda mekansal kaliteye dayalı parametreler ile görsel peyzaj nasıl ilişkilendirilebilir?” ve “Kamusal alanlarda mekansal kalite unsurlarının tanımlanmasına dayalı olarak görsel kalite nasıl değerlendirilebilir?” sorularına yanıt aranmıştır. Çalışma, mekansal kalite parametrelerine dayalı olarak geliştirilen görsel kalite değerlendirmesi ana yöntemi kurgusu çerçevesinde Likert Ölçeği kullanılarak bir fotoğraf anketi yaklaşımı esasına dayandırılmıştır. Bu çerçevede İstanbul/Maltepe İlçesi özelinde kamusal alanların geçmiş ve günümüz görüntülerine dayalı olarak uzman grubu tarafından görsel açıdan düşük-orta-yüksek nitelikli peyzajlar belirlenmiş, mekansal kalite parametreleri ile görsel algıya dayalı tercihler arasındaki ilişkiler saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kamusal alan; Mekânsal kalite; Görsel peyzaj; İstanbul/Maltepe

Determination of Visual Landscape Value of Public Spaces Based on Spatial Quality Parameters: Istanbul/ Maltepe Case

ABSTRACT

Public spaces, with their aesthetic, recreational and heritage values, are fundamental components of urban identity and quality. Spatial preferences based on visual perception are also decisive in the evaluation of the identity and quality of public spaces. In this context, within the framework of the hypothesis “Visual identity and spatial quality are related in public spaces, and analyzing the level of satisfaction based on visual perception is effective in determining spatial quality”, the study aims to determine the visual landscape quality of public spaces in Istanbul/Maltepe district based on past and present images. For this purpose; “How can spatial quality-based parameters and visual landscape be related in public spaces?” and “How can visual quality be evaluated based on the definition of spatial quality elements in public spaces?”. The study is based on a photo survey approach using a Likert scale within the framework of the main method of visual quality assessment developed on the basis of spatial quality parameters. In this framework, low-medium-high quality landscapes were identified by the expert group based on past and present images of public spaces in Istanbul/Maltepe district, and the relationships between spatial quality parameters and preferences based on visual perception were determined.

Keywords: Public space; Spatial quality; Visual landscape; Istanbul/Maltepe

1. GİRİŞ

Kamusal alanlar; Ringas vd, (2011) tarafından; tarihsel süreçte toplumsal belleğin fiziksel olarak üretildiği alanlar olarak tanımlanmaktadır (Ringas vd., 2011). Kamusal alanlar; sokak, cadde gibi çizgisel alanlar ile meydan, park alanları gibi geometrik biçimli boşluklar da dahil olmak üzere bireylerin günlük ve sosyal yaşamlarında erişebilecekleri açık alanlardır. Bu alanlar, kentsel peyzajın bir parçası olup; estetik, rekreasyon, miras değerleri ile kentsel kimlik ve kalitenin temel bileşenidirler (Nadal, 2000; Kürkçüoğlu ve Ocağcı, 2015; Guan, 2023). Kamusal alanlara yönelik kimlik ve kalitenin değerlendirilmesinde görsel algıya dayalı mekansal tercihler belirleyici olmaktadır. Bununla birlikte, modern Dünyada yaşam koşullarındaki iyileşmelerle birlikte bireylerin kamusal alan kalitesine ilişkin beklentileri de değişim göstermiştir. Mekânsal kalite değerlendirmeleri, anket ile güzellik değerlendirmesi gibi yöntemlerle ölçülerek, öznel duygulara dayandırılmıştır (Zhou vd., 2021; Hu vd., 2023). Lynch (1984)'in bir kentin deneyim ve algı yoluyla anlamaya yönelik unsurlarını (yollar, kenarlar, bölgeler, düğümler ve işaretler) ortaya koyduğundan beri de, birçok çalışmada kullanıcıların kente ilişkin görsel faktörlere yönelik öznel algıları arasındaki ilişki konu alınmıştır (Lynch,1984; Ivanov, 2017; Ai vd., 2024).

Subiza-Pérez vd. (2019) ile Ebenberger ve Arnberger (2019) da; kentsel peyzaj çalışmalarında, görsel algı ve görsel tercihin daha fazla ilgi çektiğini belirtmişlerdir. Peyzajın algılanan çevreyi temsil etmesinden kaynaklı peyzaj kalite değerlendirmelerinin genellikle görsel algıya dayalı olduğunu vurgulamışlardır (European Council, 2000; Gavrilidis vd., 2016). Algılamada görsel algıya vurgu yaparak, insanın görme duyusunun baskın olduğundan ve gözlerin çevresel uyaranları algılayan sensörler olduğunu belirtmiştir (Misthos vd., 2023). Görsel algı, manzaraların (tercih) deneyimlenmesi ve takdir edilmesinin temeli olup, mekansal özelliklerin tanımlanmasında ve değerlendirilmesinde önemli bir araç olarak tanımlanmıştır (Nijhuis ve Reitsma 2011). Vlad (2009); peyzaj güzelliğinin değerinin insanların görsel algısına bağlı olduğunu belirtmiştir. Perovic ve Folic (2012) de; kaliteli kentsel alanların geliştirilmesi için çok boyutlu algısal analizlerin geliştirilmesinin önemini vurgulamıştır. Qi vd. (2023) de çalışmalarında; görsel faktörlerin, çevresel memnuniyet ve kentsel peyzaj kalitesini etkileyen en kritik faktörler olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte Perovic ve Folic (2012) ile Dai (2021)'in çalışmalarında; kentsel çevrenin önemli bir yansıması olarak görsel alanın, bireylerin kentsel peyzaja ilişkin görsel algısını belirttiği ve görsel algının, insanlar ve kent arasında etkileşim yarattığı vurgulanmıştır. Görsel peyzaj araştırmalarının, peyzaj mekanının mekansal-görsel yönlerine ilişkin bilginin geliştirilmesinde önemli bir araç olduğunu vurgulamıştır (Nijhuis vd., 2011). Aşur (2022) da çalışmasında; kullanıcıların görsel peyzaj tercihlerinin belirlenmesinin, kentsel alanlarda mekan kalitesinin ölçülmesindeki önemli göstergelerden biri olduğunu belirtmiştir. Sharma (2020) de; kamusal alanların görsel kimliği ile mekansal kalitesinin ilişkili olduğunu vurgulamıştır. Bununla birlikte bir çok çalışma da, görsel peyzaj temelli çalışmaların, mekansal tercihlerin temelini oluşturduğunu vurgulanmıştır (Nijhuis vd., 2011; Zhou vd., 2021; Aşur, 2022; Hu vd., 2023). Öyle

ki; insanlar hoş olarak algıladıkları ortamlarda iyi yaşarlar ve insan refahı kentsel mekanın fiziksel özelliklerinden etkilenir. Dolayısıyla da, görsel faktörler ile çevresel memnuniyet ve kentsel peyzaj kalitesi arasında ilişki bulunmaktadır (Nasar, 1990; Jana ve De, 2015; Gavrilidis vd., 2016; Wartmann vd., 2021). UNESCO Tarihi Kentsel Peyzaj Tavsiye Kararında da peyzajın görsel karakterini koruma ve geliştirme amacını içeren stratejiler ve planlama politikaları kapsamında, manzara-algısal bakış açısı yaklaşımı hedeflenmiştir (UNESCO, 2011; Cassatella, 2011). Birçok ülke de; peyzajın görsel algısına yönelik göstergeler geliştirmiştir (Tudor ve England, 2014; Fairclough vd., 2018).

Jin vd. (2023), çalışmalarında; görsel algı temelli çalışmaların, farklı kentsel tasarım stratejilerinin geliştirilmesinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Vukomanovic vd. (2018) de; insanların çevre ile kurdukları görsel bağlantıların, peyzaj planlama ve yönetiminde önemli olduğunu vurgularken Swietek ve Zumwal (2023) de; görsel peyzaj kalitesinin, kentsel gelişim ve mekansal planlama için rehber niteliği taşıdığını ortaya koymuştur. Carmona vd. (2010) ise; ayırt edici fiziksel ve/veya görsel özelliklerin tanınmasının, yer kimliğinin daha ileri düzeyde değerlendirilmesinde araç olduğunu belirtmiştir. Zulestari vd. (2018) de görsel kaliteyi, kent estetiği, karakteri ve kimliği ile ilişkilendirmiştir. Bununla birlikte bir çok çalışmada; görsel peyzaj kalitesi ile memnuniyet düzeyi ve yaşam kalitesi ilişkilendirilmiştir (Falihin ve Hanita 2016; Kerebel vd., 2019). Öyle ki Stamps (2004) de; görsel peyzaj kalitesinin, bireylerin kentsel çevreye yönelik beğenilerini önemli ölçüde etkilediğini belirtmiştir. Mohamed vd. (2012) de; görsel kalitenin, olumlu ya da olumsuz tercihlerle ilişkili olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda, toplumun görsel çevreye ilişkin izlenimi; mekanın anlamını güçlendirerek aidiyet hissinin oluşumunda önemli bir etki oluşturmaktadır (Sottini vd., 2018). Diğer taraftan Yun ve Malek (2024) görsel kimliğin, bir şehrin farkındalığını ve etkisini artırdığını belirtmiş olup, Johansson vd. (2015) ile Tang ve Long (2018) de kentsel imaj ile algılanabilirliği ilişkilendirmişlerdir.

Ülkemiz özelinde hazırlanan “Kentsel Tasarım Rehberleri”nde de; algısal ve görsel boyutun, tasarım sürecini oluşturan boyutlar arasında yer aldığı vurgulanmıştır (Kentsel Tasarım Rehberi, 2016). Ulusal kalkınma plan yaklaşımında da; yaşam kalitesi-mekân ilişkisi çerçevesinde kentsel dönüşüm hedefleri içerisinde estetik boyut dikkate alınmıştır (Onuncu Kalkınma Planı, 2013). Foster (2003) de sürdürülebilir tasarımda estetik duyarlılığa atıf yapmıştır.

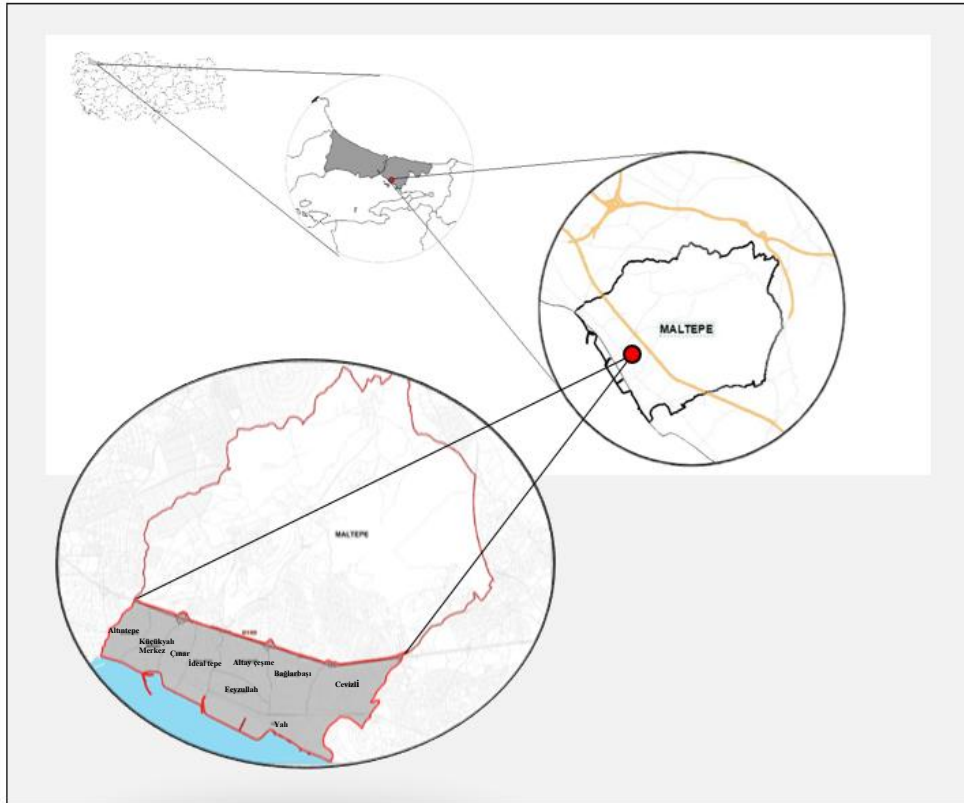
Bu doğrultuda çalışmada kamusal alanlara yönelik kimlik ve kalitenin değerlendirilmesinde de görsel algıya dayalı mekansal tercihler belirleyici olmaktadır. Bu kapsamda çalışmada “Kamusal alanlarda görsel kimlik ve mekansal kalite ilişkili olup, görsel algıya dayalı olarak memnuniyet düzeyinin analiz edilmesi mekansal kalitenin belirlenmesinde etkilidir” hipotezi çerçevesinde İstanbul/Maltepe İlçesi özelinde kamusal alanların geçmiş ve günümüz görüntülerine dayalı olarak görsel peyzaj kalitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; “Kamusal alanlarda mekansal kaliteye dayalı parametreler ile görsel peyzaj nasıl

ilişkilendirilebilir?” ve “Kamusal alanlarda mekansal kalite unsurlarının tanımlanmasına dayalı olarak görsel kalite nasıl değerlendirilebilir?” sorularına yanıt aranmıştır. İlgili sorular çerçevesinde geliştirilen mekânsal kalite parametreleri temelinde, Maltepe İlçesi kamusal alanlarına ilişkin geçmiş ve benzer açılardan günümüz fotoğraflarının görsel peyzaj kalite değerinin belirlenmesine yönelik olarak, uzman grupların görsel algı ve tercihleri ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışma alanı İstanbul İli, Maltepe İlçesi kıyı bandında yer alan D 100 karayolunun sınır oluşturduğu Altın-tepe, Bağlarbaşı, Küçük-yalı, Yalı, Feyzullah mahallerinde yer alan kamusal alanları (sokak, cadde, meydan) oluşturmaktadır. Maltepe İlçesi, Kocaeli Yarımadası'nın güney batısında, İstanbul İli'nin Marmara Denizi kıyısında yer almakta olup, Kadıköy, Ataşehir, Sancaktepe ve Kartal ilçelerine sınırı bulunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1: Çalışma alanı konumu

Çalışma alanı, genel olarak yükselti farklılıklarının görülmediği, düze yakın bir eğimin hakim olduğu bir görünüme sahiptir (Uzun, 2021). Alan, seçiminde; D-100 karayolunun yapay eşik oluşturması, deniz ve kıyısının doğal eşik oluşturması, toplumsal-mekansal-tarihsel-kültürel yapısının çeşitlilik göstermesi ve nüfus yoğunluğu durumu etken olmuştur.

Çalışma kapsamında; geçmiş ve günümüz görsellerini içeren fotoğraflar, görsel peyzaj analizi değerlendirme parametreleri ve alt ölçütlerinden oluşan anket formları ile verilerin analiz edilmesi ve görselleştirilmesinde kullanılan Excel, SPSS istatistik programları ile ArcGIS ve Photoshop programları da ikincil materyaller olarak kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

Görsel kalite değerlendirmeye dayalı olarak geliştirilen çalışma ana yöntem süreci; mekânsal kalite göstergelerine dayalı olarak geçmiş ve günümüz görselleri ile uzman grubunun mekânsal tercihlerine yönelik algısını belirlemeye yardımcı olan görsel anket tekniği çerçevesinde oluşturulmuştur. Geliştirilen yöntem süreci; geçmiş ve günümüz görsellerini içeren fotoğrafların çekimi ve seçilmesi, mekânsal kalite odaklı parametrelerin belirlenmesi, uzman grubun belirlenmesi, görsel anket tekniğinin uygulanması, verilerin istatistiki açıdan analiz edilmesi ile sonuç ve önerilerin geliştirilmesi olmak üzere altı temel aşamada yürütülmüştür.

Mekansal algıya ilişkin birçok çalışmanın ana materyalini fotoğraflar oluşturduğu için (De Lucio vd., 1996; Dodman, 2004; Alani, 2009), ilk aşamada; alanın geçmiş ve günümüz görsellerini içeren fotoğrafların çekimi ve seçilmesi gerçekleştirilmiştir (De Lucio vd., 1996; Alan, 2009). Özellikle geçmiş ve günümüz fotoğraflarının bir arada kullanılması; uzmanların çalışma alanının süreç içindeki değişimini de gözlemleri ve fikir edinmelerini sağlamak için tercih edilmiştir. Geçmiş görsellerin seçiminde çalışma alanının tarihi süreç içerisindeki değişim dönemlerine ilişkin Maltepe İlçe Belediyesi arşivlerinden ve yayınlarından, çeşitli internet kaynaklarından elde edilen fotoğraflar etkili olmuştur. Günümüz görsellerinin seçiminde ise 2022 yılı bahar döneminde geçmiş görsellerin buldukları yerlerden çekilen fotoğraflar etkili olmuştur. Bunun paralelinde, görsel anket tekniğinde kullanılmak üzere 15 adet eski ve yeni fotoğraf seçilmiştir (Çizelge 1). Fotoğrafların seçiminde; geçmiş ve günümüz fotolarının aynı veya yakın lokasyonda olması, kullanım farklılıkları, geniş bakış açısı ve görüntü kalitesi gibi faktörler etken olmuştur.

Temel göstergelerin seçimi görsel kalite değerlendirmesinin temel belirleyicisidir (Lange ve Legwaila, 2012). Bu doğrultuda ikinci aşamada; mekânsal kalite odaklı parametreler belirlenmiştir. İlgili parametreler, PPS (Project for Public Spaces) ve Gehl'in geliştirdiği mekânsal kalite göstergeleri temelinde yeniden ele alınarak ulusal ve uluslararası ölçekli çalışmalardan yararlanılarak, dört ana başlık (sosyallik,

kullanım, bağlantı, konfor) ve sekiz alt ölçüt çerçevesinde geliştirilmiştir (Gehl, 1989; Project for Public Spaces, 2000) (Çizelge 2).

Çizelge 1: Görsel peyzaj değerlendirilmesinde kullanılan fotoğraflar.

	
G. 1: Altıntepe Mahallesi, Bostancı başı köprüsü 1900 yılı (Maltepe Belediyesi, 2022) ve günümüz	G. 2: Bağlarbaşı Mahallesi, Maltepe Tren İstasyonu 1900 yılı (Maltepe Belediyesi, 2022) ve günümüz
	
G. 3: Küçükyalı Mahallesi, Çamlık Gazinosu 1936 yılı görünüm (Url 3, 2022)	G. 4: Feyzullah Mahallesi, Mimar Sinan Caddesi 1940 yılı (Maltepe Belediyesi, 2022) ve günümüz
	
G.5: Feyzullah Mahallesi, Bağdat Caddesi 1940 yılı (Ünker,2013) ve günümüz	G.6: Küçükyalı Mahallesi, kayalıklar 1940 yılı (Url 1,2022) ve günümüz
	
G.7: Yalı Mahallesi, Süreyya Plajı 1955 yılı (Maltepe Belediyesi, 2022) ve günümüz	G.8: Bakireler Tapınağı 1955 yılı (Url 2,2022) ve günümüz
	
G.9: İdealtepe Mahallesi, Yerleşim alanı 1964 yılı (Url 4, 2022) ve günümüz	G.10: Yalı Mahallesi, Maltepe sahili 1970 yılı (Ünker,2013) ve günümüz

Çizelge 1: Devamı

	
G.11: Yalı Mahallesi, Feyzullah Efendi Çeşmesi 1970 yılı (Maltepe Belediyesi, 2022) ve günümüz	G.12: Bağlarbaşı Mahallesi, Atatürk Caddesi 1975 yılı (Maltepe Belediyesi, 2022) ve günümüz
	
G.13: Çalışma alan sınırı E-5 yolu 1980 yılı (Url 5, 2022) ve günümüz	G.14: Feyzullah Mahallesi, Merkez camii çevresi 1980 yılı (Url 6, 2022) ve günümüz
	
G.15: Yalı Mahallesi, Turgut Özal Bulvarı 1990 yılı (Ünker, 2013) ve günümüz	

Çizelge 2: Görsel peyzaj analizi değerlendirme parametreleri ve alt ölçütleri

Parametreler	Alt Parametreler	Açıklama	Kaynak
Konfor	Fiziksel Konfor	Kentsel donatılarda insan ölçüsüne uygunluk durumu	(Carmona, 2010; Project for Public Spaces, 2000; Gehl, 1989; Carr, 1992; Mehta, 2014; Cengiz Taşlı vd., 2023)
	Manzara Güzelliği	Estetik açıdan çekici (Renk, malzeme, doku, form ölçü açısından hoşnut olma) olma durumu	
Kullanım	Uyum	Alanın bulunduğu çevresiyle, yapısal öğelerin birbiriyle uyumlu bir birliktelik göstermesi ve mevcut öğeleriyle birlikte kimlik kazanması	(Clifton vd., 2018; İnceoğlu ve Aytuğ, 2009; Ewing ve Clemente, 2012; Kırkık Aydemir vd., 2022)
	Düzen	Alanın görsel açıdan düzenli unsurlara sahip olması	
Sosyallik	Çeşitlilik	Kullanım çeşitliliği	(Ewing ve Clemente, 2012; Moulert vd., 2013; Clifton vd., 2018; Anonim, 2018; Cengiz Taşlı vd., 2023)
	Etkileşim	Kamusal alanlar ile özel alanların ilişkili olması	
Bağlantı	Algılanabilirlik	Ayırt edici öğelerin ve alanda bulunan odak öğelerin varlığı	(Moulert vd., 2013; Tak, 2018; Kırkık Aydemir vd., 2022; Ardıçoğlu, 2024)
	Kütle/Boşluk Oranı	Yapılı ve boş alanların oransal açıdan uyumlu bir bütünlük göstermesi	

Uzman grubunun belirlenmesi aşamasında; İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Maltepe İlçe Belediyesi'nde görev yapan alanı yakından tanıyan planlama ve tasarım disiplinlerinden ilgili kişilerin oluşturduğu 21 kişi seçilmiştir. Uzman grubuna ilişkin profil Çizelge 3. de verilmiştir.

Görsel anket tekniğinin uygulanması aşamasının temelini; uzman grubunun belirlenen fotoğraflar (Çizelge 1) ile mekânsal kalite parametreleri (Çizelge 2) özelinde görsel tercihleri sorgulanmıştır. Öyle ki görsel tercih; insanın çevresiyle gözlenen etkileşiminin psikolojik bir değerlendirmesi ve önceliklendirilmesidir (Stamps, 2004; Fathi ve Masnavi, 2014). Farklı meslek gruplarından oluşan 21 adet uzman grubu tarafından, geçmiş ve günümüz görüntülerinden oluşan 15'er fotoğraf 4 ana parametre ile 8 alt ölçütten oluşan mekânsal kalite bileşenleri doğrultusunda 5'li Likert ölçeğinde 1 ile 5 (en düşük 1, en yüksek 5 olacak şekilde) aralığında çevrimiçi ortamda değerlendirilmiştir.

Çizelge 3: Uzman grubu profili

Ana ve Alt Değişken	Sayı	Ana ve Alt Değişken	Sayı	Ana ve Alt Değişken	Sayı			
Cinsiyet	Kadın	16	Yaş	30 – 35	12	Uzmanlık alanı	Peyzaj Mimarı	14
	Erkek	5		36 – 40	5		Mimar	3
Yaş			41 – 50	2	İç Mimar		2	
			51 ve +	2	Şehir Bölge Planlama		2	

Verileri analiz etmek için Excel ve SPSS istatistik yazılımı kullanılmış olup, uzman gruplarının uygunluk değerinin belirlenmesinde aritmetik ortalama değerleri temel alınmıştır. Aritmetik ortalamalar her bir fotoğrafta kullanılan parametre ve alt parametre için ayrı ayrı hesaplanarak uzman grubunun sayısal ifadeler üzerinde uygunluk değerleri analiz edilmiştir.

Sonuç ve önerilerin geliştirilmesi aşamasında; ankette yer alan her görüntüye ilişkin parametreler çerçevesinde verilen sayısal verilerin toplamı 840 puan üzerinden yüksek (560-840), orta (280-559), düşük (1-279) olacak şekilde kademelendirilerek görsel peyzaj analizi gerçekleştirilmiş ve ArcGIS ve Photoshop programları kullanılarak çizelge ve harita şeklinde sunulmuştur.

3. BULGULAR

3.1. Uzman Grubuna Uygulanan Görsel Anket Tekniğine İlişkin Bulgular

Uzman grubu, alan özelinde belirlenen 15 adet geçmiş ve günümüz görsellerini 8 alt parametre temelinde 5'li Likert ölçeği çerçevesinde puanlandırmıştır. Elde edilen veriler 15 adet görüntü için her parametreye ilişkin olarak aritmetik ortalama, standart hata ve standart sapma değerlerine yönelik tanımlayıcı istatistiki analizler çerçevesinde analiz edilmiştir. İlgili görsellerde en yüksek puan alan parametreler koyu siyah, en düşük alan parametreler kırmızı ile gösterilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4 değerlendirildiğinde; en yüksek puanı (4, 20) 13 nolu görselin oluşturduğu konfora yönelik manzara güzelliği alt ölçütü parametresi almıştır. En düşük puanı ise 3 nolu görsel ile uyum (1,43) ve 3 ve 7 nolu görsel ile manzara güzelliği (1,43) alt ölçütleri almıştır.

Çizelge 4: Uzman grubuna ilişkin parametrelerin tanımlayıcı analizi

	Parametreler	Alt Parametreler	Min	Maks	Aritmetik Ort.	Std. Hata	Std. Sapma
Görüntü 1	Konfor	Fiziksel Konfor	1	3	2,33	0,126	0,577
		Manzara Güzelliği	1	4	1,95	0,189	0,865
	Kullanım	Uyum	1	4	1,76	0,181	0,831
		Düzen	1	4	1,95	0,201	0,921
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	4	2,43	0,177	0,811
		Etkileşim	1	5	2,1	0,238	1,091
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	5	2,38	0,32	1,465	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	5	2,33	0,333	1,528	
Görüntü 2	Konfor	Fiziksel Konfor	1	5	2,86	0,287	1,315
		Manzara Güzelliği	1	5	2,33	0,279	1,278
	Kullanım	Uyum	1	5	2,38	0,271	1,244
		Düzen	1	5	2,76	0,257	1,179
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	5	2,71	0,23	1,056
		Etkileşim	1	5	3,1	0,248	1,136
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	5	3,1	0,257	1,179	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	4	1,57	0,202	0,926	
Görüntü 3	Konfor	Fiziksel Konfor	1	3	1,43	0,163	0,746
		Manzara Güzelliği	1	3	1,43	0,163	0,746
	Kullanım	Uyum	1	3	1,43	0,13	0,598
		Düzen	1	4	1,52	0,178	0,814
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	3	1,52	0,178	0,814
		Etkileşim	1	4	1,67	0,211	0,966
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	4	2,67	0,222	1,017	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	4	2,05	0,253	1,161	
Görüntü 4	Konfor	Fiziksel Konfor	1	4	2,10	0,168	0,768
		Manzara Güzelliği	1	5	2,57	0,254	1,165
	Kullanım	Uyum	1	5	2,95	0,271	1,244
		Düzen	1	5	2,86	0,261	1,195
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	4	2,43	0,245	1,121
		Etkileşim	1	3	2,33	0,126	0,577
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	4	1,95	0,189	0,865	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	4	1,76	0,181	0,831	
Görüntü 5	Konfor	Fiziksel Konfor	1	4	2,38	0,189	0,865
		Manzara Güzelliği	1	4	1,90	0,168	0,768
	Kullanım	Uyum	1	4	2,19	0,203	0,928
		Düzen	1	3	2	0,195	0,894
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	4	2,43	0,202	0,926
		Etkileşim	1	4	2,52	0,178	0,814
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	4	2,24	0,217	0,995	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	4	2,67	0,159	0,73	

Çizelge 4: Devamı

Görüntü 6	Konfor	Fiziksel Konfor	1	5	2,14	0,242	1,108
		Manzara Güzelliği	1	5	1,81	0,214	0,981
	Kullanım	Uyum	1	5	2,19	0,225	1,03
		Düzen	1	5	2,57	0,245	1,121
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	5	2,81	0,264	1,209
		Etkileşim	1	5	2,19	0,281	1,289
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	4	2,38	0,189	0,865	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	4	1,86	0,221	1,014	
Görüntü 7	Konfor	Fiziksel Konfor	1	4	1,43	0,202	0,926
		Manzara Güzelliği	1	3	1,43	0,177	0,811
	Kullanım	Uyum	1	4	1,81	0,225	1,03
		Düzen	1	4	2,14	0,199	0,91
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	4	2,14	0,27	1,236
		Etkileşim	1	5	2,14	0,21	0,964
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	4	2,38	0,161	0,74	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	4	1,76	0,181	0,831	
Görüntü 8	Konfor	Fiziksel Konfor	1	4	1,81	0,19	0,873
		Manzara Güzelliği	1	4	2,29	0,197	0,902
	Kullanım	Uyum	1	5	2,48	0,255	1,167
		Düzen	1	4	2,52	0,19	0,873
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	3	2,1	0,153	0,7
		Etkileşim	1	4	2,38	0,189	0,865
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	4	1,90	0,168	0,768	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	4	2,19	0,203	0,928	
Görüntü 9	Konfor	Fiziksel Konfor	1	4	2,38	0,129	0,59
		Manzara Güzelliği	1	3	1,9	0,181	0,831
	Kullanım	Uyum	1	3	2,05	0,129	0,59
		Düzen	1	3	2,19	0,148	0,68
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	5	2,67	0,187	0,856
		Etkileşim	1	5	2,86	0,221	1,014
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	4	2,57	0,224	1,028	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	3	2,33	0,144	0,658	
Görüntü 10	Konfor	Fiziksel Konfor	1	3	2,10	0,168	0,768
		Manzara Güzelliği	1	4	2,10	0,217	0,995
	Kullanım	Uyum	1	4	2,29	0,197	0,902
		Düzen	1	4	2,29	0,171	0,784
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	5	2,76	0,206	0,944
		Etkileşim	1	4	2,90	0,168	0,768
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	4	2,67	0,199	0,913	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	5	3	0,218	1	
Görüntü 11	Konfor	Fiziksel Konfor	1	5	2,52	0,19	0,873
		Manzara Güzelliği	1	5	2,76	0,206	0,944
	Kullanım	Uyum	1	5	3,14	0,278	1,276
		Düzen	1	5	3,19	0,29	1,327
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	5	2,95	0,271	1,244
		Etkileşim	1	5	2,76	0,181	0,831
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	5	2,9	0,228	1,044	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	5	2,48	0,245	1,123	

Çizelge 4: Devamı

Görüntü 12	Konfor	Fiziksel Konfor	1	5	3	0,258	1,183
		Manzara Güzelliği	1	5	2,57	0,281	1,287
	Kullanım	Uyum	1	5	3,1	0,292	1,338
		Düzen	1	5	3,29	0,294	1,347
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	5	2,95	0,305	1,396
		Etkileşim	1	4	2,38	0,129	0,59
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	3	1,90	0,181	0,831	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	3	2,05	0,129	0,59	
Görüntü 13	Konfor	Fiziksel Konfor	1	5	3,52	0,264	1,209
		Manzara Güzelliği	1	5	3,29	0,277	1,271
	Kullanım	Uyum	1	5	3,19	0,264	1,209
		Düzen	1	4	3,14	0,261	1,195
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	5	3,52	0,281	1,289
		Etkileşim	1	5	3,57	0,263	1,207
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	5	3,71	0,25	1,146	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	5	3,14	0,261	1,195	
Görüntü 14	Konfor	Fiziksel Konfor	1	5	3	0,229	1,049
		Manzara Güzelliği	1	5	2,95	0,212	0,973
	Kullanım	Uyum	1	5	3,19	0,264	1,209
		Düzen	1	5	3,24	0,292	1,338
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	5	3,10	0,33	1,513
		Etkileşim	1	5	3,19	0,273	1,25
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	5	3,19	0,264	1,209	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	4	2,10	0,238	1,091	
Görüntü 15	Konfor	Fiziksel Konfor	1	4	2,10	0,217	0,995
		Manzara Güzelliği	1	4	1,90	0,238	1,091
	Kullanım	Uyum	1	5	2,81	0,273	1,25
		Düzen	1	5	2,90	0,3	1,375
	Sosyallik	Çeşitlilik	1	5	2,52	0,29	1,327
		Etkileşim	1	4	2	0,195	0,894
Bağlantı	Algılanabilirlik	1	5	3,52	0,264	1,209	
	Kütle/Boşluk Oranı	1	5	3,29	0,277	1,271	

Çizelge 5 de ise; uzman grubunun foto anket sonuçlarının parametrelere göre belirlenen en yüksek ve en düşük puanlı görüntülere ilişkin aritmetik ortalama değerleri verilmiştir.

Çizelge 5 incelendiğinde, uzman görüşlerine göre parametre bazında alt ölçütler açısından yapılan değerlendirmelerde; fiziksel konfor, manzara güzelliği, uyum, çeşitlilik ve algılanabilirlik açısından en yüksek puanı alan görüntü 13 nolu görsel olmuştur. Fiziksel konfor, manzara güzelliği, uyum, düzen, çeşitlilik ve etkileşim açısından en düşük puanı alan görüntü ise 3 nolu görsel olmuştur.

4. SONUÇLAR

Çalışmada; uzman grubunun Maltepe İlçesi özelinde geçmiş ve günümüz görsellerine dayalı tercihleri kapsamında görsel kalite derecelendirilmesi oluşturabilmek için, Likert ölçütleri kapsamında elde edilen puanlar, yüksek ve düşük olmak üzere parametre bütününde toplanarak, toplam 840 puan üzerinden (yüksek (560-840), orta (280-559), düşük (1-279)) kademelendirilmiştir. Çizelge 6. da uzman tercihleri doğrultusunda elde edilen sonuçlara ilişkin genel değerlendirmeler yapılmıştır.

Çizelge 5: Temel ve alt parametrelere göre en yüksek ve en düşük alan görüntü değerleri

		Temel ve Alt Parametreler							
		Konfor		Kullanım		Sosyallik		Bağlantı	
		Fizik. Konfor	Manzara Güzelliği	Uyum	Düzen	Çeşitlilik	Etkileşim	Algılanabil.	Kütle-Boşl. O.a
Görüntü 1	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 2	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 3	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 4	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 5	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 6	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 7	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 8	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 9	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 10	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 11	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 12	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 13	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 14	En düşük								
	En yüksek								
Görüntü 15	En düşük								
	En yüksek								

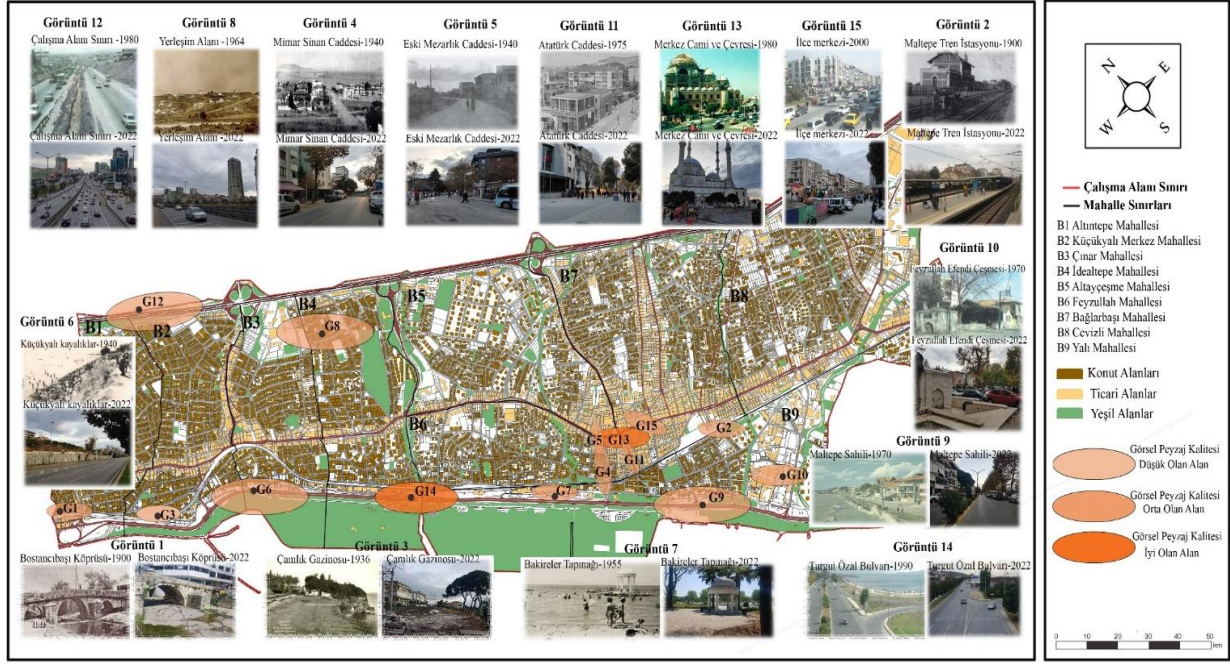
Çizelge 6: Görsel peyzaj kalitesi değerlendirmesi

		Mahalle/ Kamusal Alan	Görüntü No	Puan	Bulgu
DÜŞÜK	ORTA	Küçükyalı Mahallesi, Çamlık Gazinosu	Görüntü 3	256	Tarihsel değerinin korunmaması, kamusal alan özelliğini kaybetmesi
		Maltepe İlçesi, Çalışma alan sınırı	Görüntü 12	488	Görsel değişimin yaşanması
Bağlarbaşı Mahallesi, Atatürk Caddesi		Görüntü 11	483	Tarihsel değerinin/dokunun korunmaması, kimlik özelliğini yitirmesi	
Bağlarbaşı Mahallesi, Maltepe Tren İstasyonu		Görüntü 2	473		
Fezullah Mahallesi, Mimar Sinan Caddesi		Görüntü 4	416		
Yalı Mahallesi, Fezullah Efendi Çeşmesi		Görüntü 10	413		
Yalı Mahallesi, Sahil		Görüntü 9	398		
Yalı Mahallesi, Süreyya Plajı		Görüntü 6	390		
Fezullah Mahallesi, İlçe merkezi		Görüntü 15	380		
Fezullah Mahallesi, Mezarlık Caddesi		Görüntü 5	385		
Altıntepe Mahallesi, Bostancıbaşı köprüsü		Görüntü 1	362		
İdealtepe Mahallesi, Yerleşim alanı		Görüntü 8	360	Görsel değişimin yaşanması	
YÜKSEK	ORTA	Yalı Mahallesi, Bakireler Tapınağı	Görüntü 7	308	Tarihsel değerinin korunmaması
		Fezullah Mahallesi, Merkez Camisi	Görüntü 13	569	Estetik ve işlevsel açıdan mekânsal kalitenin geçmişe kıyasla artması
		Yalı Mahallesi, Turgut Özal Bulvarı	Görüntü 14	527	

İlgili parametreler çerçevesinde uzman grubu açısından yapılan tercihlerde, düşük peyzaj değerine sahip olan görüntü 13 nolu görsel olmuştur. İlgili görsel, tarihi öneme sahip Çamlık Gazinosu'nun yakın zamanda işletmesinin yıkılarak mekân özelliğini kaybettiği görüntüyü içermektedir. Bu durum, geçmişte bireylere rekreasyonel aktivite olanağı sağlayarak, tarihi kimlik değerine de etki eden kamusal alanların zamanla işlevini yitirmesi sonucu görsel kimlik değerini de azalttığını göstermektedir. Toplam 12 adet görüntünün (12, 11, 2, 4, 10, 9, 6, 15, 5, 1, 8, 7 nolu görseller) görsel değeri ise orta düzeyde çıkmıştır (Şekil 2).

Geçmiş-günümüz görsellerinde gerek tarihsel doku ve kültürel öğelerin eski değerini yitirmesi gerekse de yapılaşmanın getirdiği değişim görsel peyzaj değerinin değişimine neden olmuştur. Ayrıca ilgili görsellerde yer alan tarihi dokunun nispeten korunarak değişim gösterdiği görülmüştür. 13 ve 14 nolu görseller ise yüksek peyzaj değerine sahip alanlar olarak değerlendirilmiştir. Fezullah Mahallesi'nde hâlihazırda yenilenen ilçe meydanı çalışması ve Yalı Mahallesinde Turgut Özal Bulvarı deniz hattı boyunca kesintisiz devam eden yolun estetik ve işlevsel açıdan günümüze kıyasla olumlu değişim göstermesi uzman grubuna

göre görsel açıdan yüksek kalitede değerlendirilmiştir. Ayrıca ilçenin deniz manzarası etkisi de görsel unsuru güçlendirmiştir (Şekil 2).



Şekil 2: Görsel peyzaj kalite analizi

Sonuç olarak, kamusal alanlarda görsel kimlik ve mekânsal kalite ilişkili olup, görsel algıya dayalı olarak memnuniyet düzeyinin analiz edilmesi mekânsal kalitenin belirlenmesinde etkili olmuştur. Bu durum birçok çalışmada da vurgulanmıştır (Nijhuis, 2011; Perovic ve Folic 2012; Sharma, 2020; Dai vd., 2021; Aşur, 2022). Bu çerçevede İstanbul/Maltepe İlçesi özelinde kamusal alanların geçmiş ve günümüz görüntülerine dayalı olarak uzman grubu yardımıyla görsel açıdan düşük-orta-yüksek nitelikli peyzajlar belirlenmiş, mekânsal kalite parametreleri ile görsel algıya dayalı tercihler arasındaki ilişkiler saptanmıştır. Maltepe özelinde en az ve en çok tercih edilen görüntüler ile en düşük ve en yüksek puan alan parametreler belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kamusal alanlara yönelik mekânsal parametreler temelinde tanımlanan görsel peyzajlar, kentsel plan ve tasarım süreçlerinde yol gösterici bir nitelik taşıyacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

M.C.T. : Arazi çalışmaları, yöntem, bulgular, araştırma

T.K. : Kuramsal temeller, yöntem, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - gözden geçirme ve düzenleme

Not: Bu çalışma, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalında yürütülen Doktora tezinden yararlanılarak hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Ai, D., Wang, H., Kuang, D., Zhang, X. & Rao, X. (2024). Measuring pedestrians' moment and building a visual-based attractiveness map of public spaces using smartphones. *Computers, Environment and Urban Systems*, 108, 102070. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.102070>.
- Alan, S. (2009). Measuring the user experience. *Software Quality Professional*, 11, 54. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/measuring-userexperience/docview/214067293/se-2>.
- Ardıçoğlu, R. (2024). Tarihi kentsel mekânlarda görsel ve işitsel algının değerlendirilmesi: Palermo Örneği. *The Turkish Online Journal of Design Art and Communication*, 14 (1), 162-179.
- Aşur, F. (2022). Determination of user preferences on visual landscape at urban context: Van/Edremit (Turkey) Example. *Pol. J. Environ. Stud.* 31(2), 1543-1550.
- Carmona, M. (2010). Contemporary public space, part two: classification. *Journal of Urban Design*, 15(2), 157-173.
- Carr, S. (1992). *Public space*. Cambridge University Press.
- Cassatella, C. (2011). Assessing visual and social perceptions of landscape. Cassatella, C., Peano, A., (Eds.). *Landscape Indicators Assessing and Monitoring Landscape Quality* (p.105-140). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Cengiz Taşlı, T., Çelik Turan, A., Eren, B. & Dinç, S. (2023). Kentsel bellek alanlarında mekansal algı değerlendirmesi: Çanakkale Kent Merkezi örneği. *Trakya Mimarlık ve Tasarım Dergisi (Kapu)*, 3(1), 1-25.
- Clifton, K., Ewing, R., Knaap, G.J. & Song, Y. (2008). Quantitative analysis of urban form. *Journal of Urbanism*, 1(1), 5-18.
- Dai, L., Zheng, C., Dong, Z., Yao, Y., Wang, R., Zhang, X., Ren, S., Zhang, J., Song, X. & Guan, Q. (2021). Analyzing the correlation between visual space and residents' psychology in Wuhan, China Using Street-view images and deep-learning technique. *City and Environment Interactions*, 11, 100069. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100069>.
- De Lucio, J.V., Mohamadian, M., Ruiz, J.P., Banayas, J. & Bernaldez, F.G. (1996). Visual landscape exploration as revealed by eye movement tracking. *Landsc. Urban Plan*, 34, 135-142.
- Dodman, D.R. (2004). Nature, power and participation: An exploration of ecology and equity in Kingston, Jamaica. Oxford, UK: University of Oxford.
- Ebenberger, M. & Arnberger, A. (2019). Exploring visual preferences for structural attributes of urban forest stands for restoration and heat relief. *Urban For. Urban Green.*, 41, 272-282.
- English Heritage (2012). *Seeing the history in the view*. Retrieved from <https://thegardenstrust.org/wp-content/uploads/2016/11/EH-Seeing-the-History-in-the-View-with-revision-note-2012-1.pdf>
- European Council (2000). *European Landscape Convention*, European Council. Retrieved from <https://www.coe.int/en/web/landscape/the-european-landscape-convention>
- Ewing, R. & Clemente, O. (2012). *Measuring urban design. metric for liveable places*, (p. 183). Washington, DC: Island Press.
- Fairclough, G., Herlin, IS. & Swanwick, C. (2018). Routledge Handbook of Landscape Character Assessment, (p. 312) Routledge.
- Falihin, M. & N. Hanita, N. M. (2016). Roles of public art in Malaysian urban landscape towards improving quality of life: between aesthetic and functional value. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 222, 872-88.

- Fathi, M.S. & Masnavi, M.R. (2014). Assessing environmental aesthetics of roadside vegetation and scenic beauty of highway landscape: Preferences and perception of motorists. *Int. J. Environ. Res.*, 8, 941–952.
- Foster, N. (2003). *Architecture and sustainability*. Retrieved from <http://www.fosterandpartners.com/media/546486/essay13.pdf>.
- Gavrilidis, A.A., Ciocănea, C.M., Niță, M.R., Onose, D.A. & Năstase, I.I. (2016). Urban landscape quality index – planning tool for evaluating urban landscapes and improving the quality of life. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 155 – 167.
- Gehl, J. (1989). A changing street life in a changing society. *Places*, 6 (8), 8-17.
- Guan, X. (2023). The development and transformation of public space from the perspective of spatial flow. *ICMETSS 2022, ASSEHR*, 141–148.
- Hadavi, S. & R. Kaplan, M.R. (2018). Hunter how does perception of nearby nature affect multiple aspects of neighbourhood satisfaction and use patterns? *Landscape Research*, 43 (3), 360-379.
- Hu, X., Zou, X. & Fan, H. (2023). Analysis of landscape influencing factors of urban waterfront greenways based on the scenic beauty estimation method, Taking Tongjian Lake in Hangzhou as an example. *Front. Earth Sci.*, 11, 1211775. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1211775>
- Ivanov, R. (2017). An approach for developing indoor navigation systems for visually impaired people using building information modeling. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9 (4), 449-467.
- İnceoğlu, M. & Aytuğ, A. (2009). Kentsel mekanda kalite kavramı. *Megaron*, 4(3), 131-146.
- Jana, M.K. & De, T. (2015). Visual pollution can have a deep degrading effect on urban and suburban community: A study in Few Places of Bengal, India, with special reference to unorganized billboards. *Eur. Sci. J.*, 8, 94–101.
- Jaśkiewicz, M. (2015). Place attachment, place identity and aesthetic appraisal of urban landscape polish. *Psychological Bulletin*, 46(4), 573–578. <https://doi.org/10.1515/ppb-2015-0063>
- Jin, G., Peng, J., Zhang, L. & Zhang, Z. (2023). Understanding land for high-quality development. *J. Geogr. Sci.* 33, 217–221. <https://doi.org/10.3390/land13010103>
- Johansson, M., Sternudd, C. & Ferreira, I. (2015). The workshop: A tool to integrate research on human aspects of sustainable urban design in teaching. *Högskole Utbild.*, 5, 145–157.
- Kentsel Tasarım Rehberi (2016). *Kentsel Tasarım Rehberleri / Araştırma ve Tanımlama*. Cilt I, Ankara: TC. Çevre & Şehircilik Bakanlığı, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Kentsel Tasarım Uygulama & Araştırma Merkezi.
- Kerebel, A., Gélinas, N., Déry, S. & Voigt, A.S. (2019). Munson landscape aesthetic modelling using bayesian networks: Conceptual framework and participatory indicator weighting. *Landscape and Urban Planning*, 185, 258-271.
- Kırkık Aydemir, K.P., Çelikyay, S. & Sarar, Y. (2022). The importance of thresholds in visual perception assesment: examples of İstanbul-Maçka Street. *Journal of Current Researches on Social Sciences*, 12 (3), 259-282.
- Kürkçüoğlu, E. & Ocaççı, M. (2015). Kentsel dokuda mekânsal yönelme üzerine bir algı-davranış çalışması: Kadıköy Çarşı Bölgesi. *Megaron Journal*. 10(3), 365-388.
- Lange, E. & Legwaila, I. (2012). Visual landscape research—o&rview and outlook. *Chinese Landsc. Archit.*, 28, 5–14.
- Lynch, K. (1984). Reconsidering the image of the city. Rodwin, L., Hollister, R.M. (Eds.), *Cities of the Mind: Images and themes of the City in the Social Science* (pp. 151-161), New York: Plenum Press.
- Maltepe Belediyesi (2022). *Maltepe Belediyesi arşivi*. Maltepe Belediyesi.
- Martins Gnecco, V., Pigliautile, I. & Pisello A.L. (2023). Long-term thermal comfort monitoring via wearable sensing techniques: Correlation between environmental metrics and subjecti& perception. *Sensors*, 23 (2), 576.
- Mehta, V. (2014). Evaluating public space. *Journal of Urban Design*, 19(1), 53-88.

- Misthos, L.M., Krassanakis, V., Merlemis, N. & Kesidis, A.L. (2023). Modeling the visual landscape: a review on approaches, methods and techniques. *Sensors*, 23(19), 8135. <https://doi.org/10.3390/s23198135>
- Mohamed, N., Othman, N. & Ariffin, M.H. (2012). Value of nature in life: Landscape visual quality assessment at rainforest trail, Penang. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 50, 667–674.
- Moulaert, F., Van Dyck, B., Khan, A.Z. & Schreurs, J. (2013). Building a meta-framework to ‘address’ spatial quality. *International Planning Studies*, 18 (3–4), 389–409.
- Nadal, L. (2000). Discourses of urban public space, USA 1960–1995 A historical critique. [Ph.D. Thesis], Columbia University, New York, USA.
- Nasar, J.L. (1990). The evaluative image of the city. *J. Am. Plan. Assoc.*, 56, 41–53.
- Nijhuis, S. & Reitsma, M. (2011). Landscape policy and visual landscape assessment: the province of Noord-Holland as A case study. *Research in Urbanism Series*, 2, 229–259.
- Nijhuis, S. (2011). Visual research in landscape architecture. *Res. Urban. Ser.* 2, 103–145.
- Nijhuis, S., Nijhuis, S., Van, LR. & Antrop, M. (2011). Exploring visual landscapes. *Introduction. Research in Urbanism Series.*, 2(1), 15–39.
- Onuncu Kalkınma Planı (2013). *Onuncu Kalkınma Planı*. Ankara: T.C. Kalkınma Bakanlığı.
- Perovic, S. & Folic N. K. (2012). Visual perception of public open spaces in Niksic. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 68, 921-933.
- Project for Public Spaces (PPS) (2000). *How to turn a place around: a handbook of creating successful public spaces*. New York: Project For Public Space. Retrieved from <https://www.pps.org/>
- Qi, Z., Duan, J., Su, H., Fan, Z. & Lan, W. (2023). Using crowdsourcing images to assess visual quality of urban landscapes: A case study of Xiamen Island. *Ecological Indicators*, 154, 110793. <http://doi:10.1016/j.ecolind.2023.110793>
- Ringas, D., Christopoulou, E. & Stefanidakis, M. (2011). Urban memory in space and time. Styliaras, G., Koukopoulos D., Lazarinis, F. (Eds.), *Handbook of research on technologies and cultural heritage*. Information Science Reference.
- Rossetti, T., Lobel, H., Rocco, V. & Hurtubia, R. (2019). Explaining subjecti& perceptions of public spaces as a function of the built environment: A massi& data approach. *Landscape and Urban Planning*, 181, 169-178.
- Sharma, V. (2020). *Visual identity as a solution to urban challenges in Mumbai India*. Feb 06-07, Part VII.
- Sottini, V.A., Barbierato, E., Bernetti, I., Capecci, I., Cipollaro, M., Sacchelli, S. & Saragosa, C. (2018). Urban landscape assessment: A perceptual approach combining virtual reality and crowdsourced photo geodata. *AESTIMUM*, 73, 147-171.
- Stamps, A.E. (2004). Mystery, complexity, legibility and coherence: a meta-analysis. *Journal of Environmental Psychology*, 24 (1), 1-16.
- Subiza-Pérez, M., Hauru, K., Korpela, K., Haapala, A. & Lehvävirta, S. (2019). Percei&d environmental aesthetic qualities scale (PEAQS) – A self-report tool for the evaluation of green-blue spaces. *Urban For. Urban Green.*, 43, 12638. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126383>
- Swietek, A.R. & Zumwal, M. (2023). Visual capital: evaluating building-le&l visual landscape quality at scale. *Landscape and Urban Planning*, 240, 104880. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104880>
- Tak (2018). *Yaşayan sokak rehberi*. Tak Kartal Tasarım Araştırma Katılım (s. 152). Kartal Belediyesi yayını. <https://kentselstrateji.com/>.
- Tang, J. & Long, Y. 2018. Measuring visual quality of street space and its temporal variation: Methodology and its application in the Hutong Area in Beijing. *Landsc. Urban Plan.*, 191, 103436. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.09.015>

- Tudor, C. & England, N. (2014). *An approach to landscape character assessment*. London: Natural England, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/691184/landscape-character-assessment.pdf.
- UNESCO World Heritage Centre (2011). *Recommendation on the historic urban landscape*. Retrieved from <https://whc.unesco.org/en/hul/>.
- Url 1 (2023). Erişim adresi: <https://www.soylentidergi.com/kultur-101-antik-yunanda-kulturel-yasam-nasildi/>
- Url 2 (2023). Erişim adresi: <https://yapidergisi.com/kamusal-alan%E2%80%89-%E2%80%89ozel-alan-etkilesimi/>
- Url 3 (2023). Erişim adresi: Urban Development. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>
- Url 4 (2023). Erişim adresi: <https://www.hafencity.com/en/overview/about-hafencity>
- Url 5 (2023). Erişim adresi: <https://sourceable.net/stunning-forshaw-opens-on-sydneys-biggest-urban-renewal-project/>
- Url 6 (2023). Erişim adresi <https://www.publicspace.org/works/-/project/k127-zollverein-park>
- Uzun, M. (2021). Antropojenik kaynaklı jeomorfolojik değişimlerin oluşmasındaki faktörlerin coğrafi analizi: Maltepe İlçesi- İstanbul örneği. *Marmara Üniversitesi Öneri Dergisi*, 16 (56), 389-418.
- Ünker, A. (2013). *Fotograflarla dünden bugüne Maltepe*. İstanbul: Maltepe Belediyesi Kültür Yayını.
- Vlad, L.B. (2009). Urban aesthetics: emergence and development. *Theor. Empir. Res. Urban Manag.*, 4, 73–78.
- Vukomanovic, J., Singh, K.K., Petrasova, A. & Vogler, J.B. (2018). Not seeing the forest for the trees: Modeling exurban viewscales with LiDAR. *Landsc. Urban Plan.* 170, 169–176.
- Wartmann, F.M., Frick, J., Kienast, F. & Hunziker, M. (2021). Factors influencing visual landscape quality perceived by the public. results from a national survey. *Landsc. Urban Plan.* 208, 104024. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.104024>.
- Yun, Y. & Malek, N.A. (2024). Research on the application evaluation system of IP visual images in leisure agricultural landscape settings (pp.1-25). *International Conference of Heritage Conservation and Sustainable Management (ICHCSM 2024)*.
- Zhou, H., Liu, L., Lan, M., Zhu, W., Song, G., Jing, F., Zhong, Y., Su, Z. & Gu, X. (2021). Using google street view imagery to capture micro built environment characteristics in Drug Places, Compared With Street Robbery. *Comput. Environ. Urban Syst.*, 88, 101631. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101631>.
- Zulestari, A., Hasriyanti, N. & Ruslan, I. (2018). Design guidelines for urban aesthetic to strengthen visual quality at town corridor in Pontianak city center (pp. 39-48). *Built Environment, Science and Technology International Conference*. Retrieved from <https://www.scitepress.org/Papers/2018/89050/89050.pdf>.

Bir Uçağın Burun İniş Takımı Parçasının Yapısal Analizi ve Malzeme Seçimi

Emre ŞAHİN^{1*}, Cengiz ELDEM¹

¹Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Geliş: 12.06.2024, Kabul: 02.08.2024, Yayınlanma: 04.10.2024

ÖZ

Bir hava aracının iniş takımı en önemli parçalarından birisidir. Uçağın iniş anında uçak üzerindeki yükleri dengelemesi, tekerleri aracılığıyla darbeleri sönmüleyip, uçağın güvenli bir şekilde yere inip taksi yapabilmesi için gerekli görev elemanlarının başında gelmektedir. İniş takımları bir uçağın ömrü boyunca en çok yüke maruz kalacak parçalarından birisidir. Düşük hacim, yüksek dayanım, uzun ömür ve iyi performans sağlayabilmesi için doğru analiz edilmiş ve tasarlanmış olması gerekmektedir. İniş takımları burun iniş takımı ve ana iniş takımları olmak üzere ikiye ayrılır. İniş takımları tipine göre farklı alt parçalardan meydana gelmektedir. Bu çalışmada CATIA V5 programında tasarlanan burun iniş takımı parçalarından olan tork iletim parçası için farklı malzemelerdeki dayanımı hesaplanan yükler ile analiz edilmiş olup sonuçlardaki farklılıklar incelenmiştir. ANSYS Workbench programında tamamlanan analiz çalışmasında farklı malzemeler kullanıldığında oluşan gerilme ve deformasyon sonuçları karşılaştırılarak tasarım için uygun olan malzemeler belirlenmiştir. Analizlerde PH13-8 Mo çeliği, Titanyum Ti-6Al-4V, Alüminyum 7075 alaşımı, 15-5 PH çeliği ve AISI 4340 çelik malzemeleri kullanılarak elde edilen sonuçlardaki deformasyon ve gerilme değerleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Burun İniş Takımı; Statik Analiz; Deformasyon; ANSYS, Yapısal Malzemeler

Structural Analysis and Material Selection of Nose Landing Gear Part of an Aircraft

ABSTRACT

The landing gear of an aircraft is one of its most crucial components. It plays a vital role in balancing the loads on the aircraft during landing, absorbing shocks through its wheels, and enabling the aircraft to safely touch down and taxi. Landing gear is one of the components that undergoes the highest levels of stress throughout an aircraft's lifespan. To ensure low volume, high strength, long lifespan, and optimal performance, it must be accurately analyzed and designed. Landing gear is typically divided into nose landing gear and main landing gear, each composed of various sub-components depending on the type of landing gear. In this study, tork link parts of the nose landing gear, designed in the CATIA V5 program, was analyzed using loads calculated for different materials, and the differences in results were examined. In the analysis completed in the ANSYS Workbench program, stress and deformation results under different material conditions were compared to determine suitable materials for design. Materials including PH13-8 Mo steel, Titanium Ti-6Al-4V, Aluminum 7075 alloy, 15-5 PH steel, and AISI 4340 steel were used in the analysis, and displacement and stress values were examined.

Keywords: Nose Landing Gear; Static Analysis; Deformation; ANSYS, Structural Materials

1. GİRİŞ

Günümüzde havacılık endüstrisi sürekli olarak gelişmekte ve yenilikçi teknolojilerle donatılmış uçaklar, daha güvenli ve verimli seyahat imkanı sunmaktadır. Bu teknolojilerden biri de iniş takımlarıdır. Uçakların temel parçalarından birisi olan iniş takımları mekanik bir sistemdir. Bu sistem uçakların iniş ve kalkış sırasında statik ve dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Bu sebepten iniş takımı parçaları bu yükleri karşılayabilecek kadar sağlam olmalıdır. İniş takımları bu yükleri karşılayamaz ise uçakta felakete sebebiyet verecek yapısal hasarlar meydana gelebilecektir. Bu nedenle iniş takımı tasarımı ve malzeme seçimi oldukça önemlidir (Yaylacı, 2021).

İniş takımı tasarımı uçağın kullanım amacına, uçak tipine, ağırlığına göre değişmektedir. Tasarım sürecinde iniş takımı için minimum ağırlık, maksimum dayanım, yüksek ömür, düşük maliyet hedeflenmektedir. İniş takımı tasarımının en önemli kriteri yüksek dayanım, minimum ağırlıktır. Bir uçağın önemli parçalarından birisi olan iniş takımı ağırlık yönünden uçak üzerinden büyük paya sahiptir. Bu nedenle iniş takımlarında kullanılan malzemelerin analizi ve karşılaştırılması, havacılık endüstrisindeki mühendislik ve tasarım uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sebepten ötürü uçak üzerinde ağırlık azaltmak iniş takımı malzemesinin değiştirilmesi ile mümkündür (Aydın, 2023).

Bu makalede iniş takımı parçalarından birisi olan ve iniş takımının yük taşıma kapasitesini artırarak iniş ve taksit sırasında oluşan kuvvetlerin düzgün bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olan tork iletim parçasına yapısal analiz yapılarak tasarım güncellemeleri yapılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda iniş takımı parçaları üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Günümüzde en yaygın olan üç tekerlekli bisiklet tipi iniş takımı belirlenmiştir. Tasarım için gerekli olan ölçüler ve değerler hesaplanmıştır. CATIA V5 programında tasarlanan iniş takımı parçası ANSYS Workbench programında yapısal analiz sonuçları gerçekleştirilmiştir.

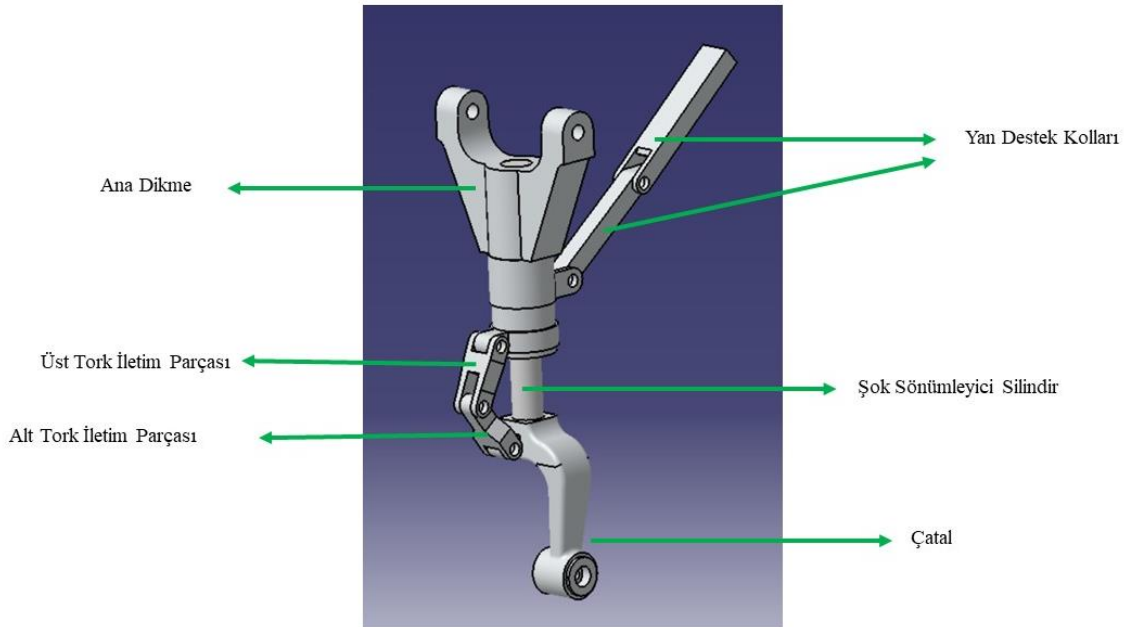
Makale için incelenen literatürde Currey (1988) tarafından yazılan "Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices" kitabı, iniş takımlarının tasarım prensiplerini ve uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Currey, iniş takımlarının uçak ağırlığının %3 ila %5'ini oluşturduğunu ve bu nedenle ağırlık optimizasyonunun kritik bir öneme sahip olduğunu belirtmektedir. Raymer (2012) "Aircraft Design: A Conceptual Approach" adlı eserinde, iniş takımlarının uçak performansı üzerindeki etkilerini vurgulamakta ve yapısal analizlerin önemini açıklamaktadır. Raymer, iniş takımlarının maruz kaldığı yüklerin doğru analiz edilmesi gerektiğini ve bu yüklerin dayanıklılığı etkilediğini belirtir. Caputo ve diğerlerinin (2018) yaptığı çalışmada, tek boyutlu ve üç boyutlu olarak modeli oluşturulan iniş takımının sonlu elemanlar analizi (SEM) ile sonuçları karşılaştırılmıştır.

"Design And Strength Analysis of Nose Landing Gear" (Raju M ve diğerleri, 2017) başlıklı makalede burun iniş takımının farklı malzemelerle yapılan sonlu elemanlar analizinde deformasyon, gerilme, yorulma ve titreşim değerlerini kıyaslamışlardır.

"Advanced Materials in Aerospace" (Mair, 1996) başlıklı çalışmada, hafif ancak yüksek mukavemetli malzemelerin iniş takımı tasarımında nasıl kullanıldığını incelemiştir. Özellikle alüminyum alaşımları, titanyum malzemelerin iniş takımı tasarımında sıkça tercih edildiğinden bahsetmektedir.

2. GEOMETRİ

İniş takımı birçok yapıdan meydana gelmektedir. İniş takımı tiplerine göre parçalar değişmektedir. Bu makalede üç tekerlekli bisiklet model iniş takımı üzerinde analiz uygulanacaktır. Şekil 1'de burun iniş takımı geometrisi gösterilmektedir. Tork iletim parçası iniş takımının dönüş hareketlerini kontrol etmeye yarayan önemli bir parçadır. İniş takımının stabilitesini artırarak, iniş sırasında veya taksi yaparken oluşabilecek titreşimleri ve sallantıları azaltır. Ayrıca iniş takımı üzerindeki yükün dağıtılmasını sağlayarak denge sağlamaya yardımcı olur. Tork iletim parçası, iniş takımının güvenliği ve etkinliği açısından kritik bir bileşendir. İniş sırasında veya taksi yaparken oluşabilecek mekanik sorunları ve aşırı yüklenmeleri önleyerek, uçak operasyonlarının güvenliğini artırır (Smith ve John, 2021).



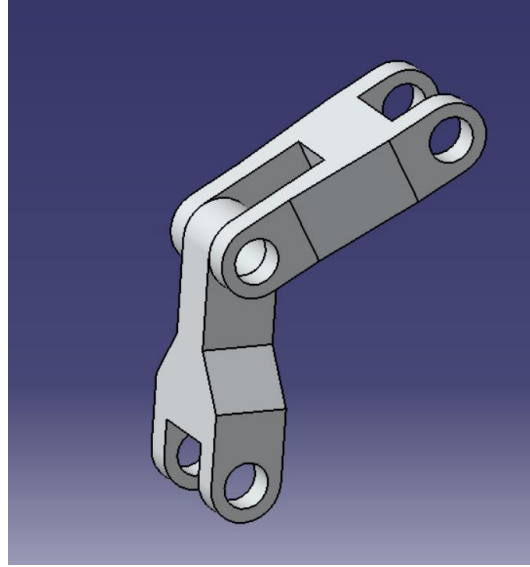
Şekil 1: Burun iniş takımı geometrisi.

3. SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu Elemanlar Metodu, karmaşık yapıların davranışlarını matematiksel olarak modellemek ve analiz etmek için kullanılan bir mühendislik aracıdır. Bu yöntem, bir yapıyı veya malzemeyi küçük parçalara böler, her bir elemanın davranışını diferansiyel denklemlerle ifade eder ve sonuçta geniş bir sistem oluşturur. Bu metodun temel amacı, bir yapı veya malzemenin gerilme, deformasyon, sıcaklık dağılımı gibi önemli parametrelerini belirlemek ve bu parametrelerin çeşitli çalışma koşullarında nasıl değişeceğini tahmin etmektir. Bu sayede, bir yapı veya malzeme tasarımının optimize edilmesi, dayanıklılığın artırılması ve güvenlik faktörlerinin belirlenmesi sağlanır (Güler ve Şen, 2016).

3.1. Geometrinin Modellenmesi

İniş takımı tork iletim parçası, bir iniş takımının en önemli alt elemanlarından birisidir. İniş takımının yük taşıma kapasitesini artırarak iniş ve taksit sırasında oluşan kuvvetlerin düzgün bir şekilde dağıtılmasına yardımcı parçasıdır. Tork iletim parçası CATIA V5 programı ile tasarlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: Burun iniş takımı tork iletim parçaları.

3.2. Mesh

İniş takımı tork iletim parçasının analiz edilebilmesi için en önemli kısımlardan biriside mesh yapısının doğru oluşturulmasıdır. Oluşturulan mesh yapısı analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Yeterince iyi bir mesh yapısı oluşturulamazsa analiz sonuçlarında çıkan değerler sağlıklı olmayacaktır. Bu durum doğrudan tasarımı etkileyebilmektedir. Kalite parametrelerine dikkat edilerek mesh yapısı oluşturulmuştur (Şekil 3). Mesh işlemi yapıldıktan sonra mesh kalite parametrelerinden aspect ratio (boyut oranı) ve

skewness (çarpıklık) değerleri kontrol edilmiştir. Skewness değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. İdeal ortalama değer 0,25' altında olmalıdır fakat 0,5'in altında olması genellikle kabul edilebilir olarak kabul görmektedir. 0,9'un üzerindeki skewness değerleri işe çözüm doğruluğunu ciddi şekilde etkilemektedir (Aydın ve Ozkol, 2022). Analizde uygulanan mesh yapısının skewness değeri ortalama 0,24'dür. Bu değer ideal bir çarpıklık değerine sahip olduğunu bizlere göstermiştir. Aspect ratio değeri bir elemanın en uzun kenarının en kısa kenarına oranıdır. İdeal ortalama değer 1'e yakın olmalıdır. Fakat 1 ile 5 arasındaki değerlerde kabul edilebilirdir (Aydın ve Ozkol, 2022). Analizde uygulanan mesh yapısının aspect ratio değeri ortalama 1,87'dir. Bu değer ideal bir boyut oranı değerine sahip olduğunu bizlere göstermiştir.



Şekil 3: Mesh yapısı.

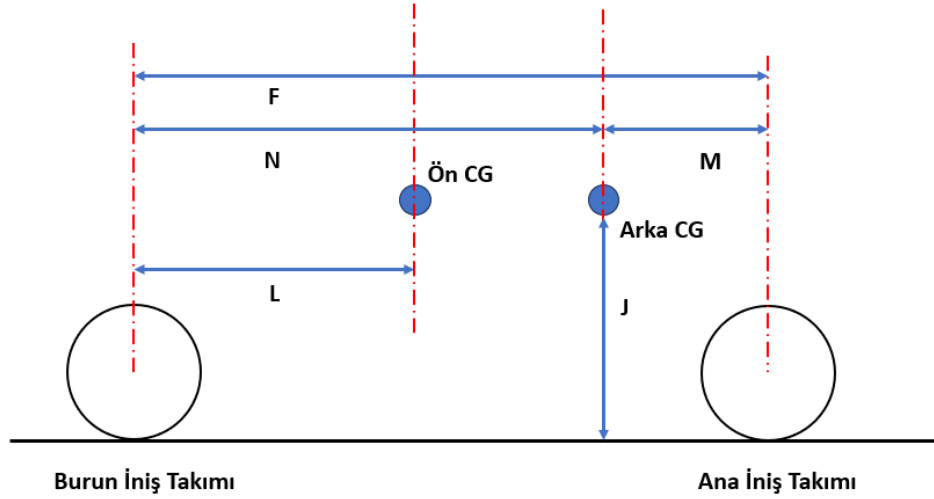
3.3. Yük ve Sınır Şartları

Yapılacak analizin sonuçlarını ve doğruluğunu etkileyen bir başka önemli noktada analiz yapılırken girilen sınır koşulları ve yüklerdir. Bu sebepten sınır şartları analiz yapılırken doğru tanımlanmalıdır. Burun iniş takımı tork iletim parçasının analizi için uçağın maksimum kalkış ağırlığı referans alınmıştır. Burun iniş takımının taşıyabileceği yük iniş takımı tasarımı için gerekli olan mesafelere göre hesaplanmaktadır (Çizelge 1). Bu çizelgeye göre maksimum uçak ağırlığı W, 166700 Newton'dur. Burun iniş takımına gelecek yükler aşağıda verilen Denklem 1 ve Denklem 2 eşitlikleriyle hesaplanmaktadır. Denklem 1'e göre burun iniş takımı üzerine gelen maksimum statik yük 54100 Newton olarak hesaplanmıştır. Denklem 2'e göre dinamik yük 10354 Newton olarak hesaplanmıştır. Denklem 3'e göre ise burun iniş takımına gelen net dikey yük 64454 Newton'dur (Çizelge 2).

$$F_{statik} = \frac{W(F-L)}{F} \quad (1)$$

$$F_{dinamik} = \frac{10.J.W}{(32,2).F} \quad (2)$$

$$F_{burun\ net\ dikey\ yük} = F_{statik} + F_{dinamik} \quad (3)$$



Şekil 4: İniş takımları yerleşimi.

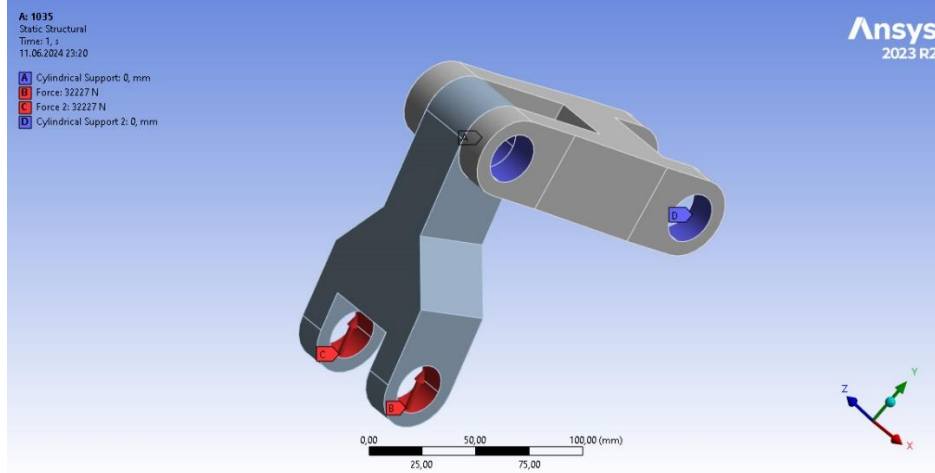
Çizelge 1: İniş takımı tasarımı için gerekli olan mesafeler.

Burun iniş takımı ile ana iniş takımı arasındaki mesafe (F)	Burun iniş takımı ile ön ağırlık merkezi arasındaki mesafe (L)	Burun iniş takımı ile arka ağırlık merkezi arasındaki mesafe (N)	Ana iniş takımı ile arka ağırlık merkezi arasındaki mesafe (M)	Uçak gövdesi ile iniş takımları arasındaki mesafe (J)
5m	3,378m	3,62m	1,38m	1m

Çizelge 2: Burun iniş takımı üzerine uygulanan yük ve parametreler.

Parametre	Değer
Uçak kalkış ağırlığı	17000 kg
F_{statik}	54100 N
$F_{dinamik}$	10354 N
$F_{net\ dikey\ yük}$	64454 N

Tork iletim parçasına uygulanacak dikey yük iki kola eşit olarak bölünmüş şekilde uygulanmıştır. İki tork iletim parçası arasında pim bağlantısı olacağı için silindirik destek tanımlanmıştır. Dönme hareketi serbest bırakılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: Sınır şartları ve yükler.

3.4. Malzeme Tanımlanması

Burun iniş takımı tork iletim parçasına malzeme seçimi yapılırken malzemelerin mekanik özellikleri, fiziksel özellikleri, korozyon dayanımı gibi kriterler incelenerek seçilmiştir. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan PH13-8 Mo çeliği, Titanyum Ti-6Al-4V alaşımı, Alüminyum 7075 alaşımı, 15-5 PH çeliği ve AISI 4340 çelik malzemeleri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yüksek dayanım, hafiflik gibi kriterler incelenerek uygun malzeme belirlenecektir. Analizde kullanılacak malzeme bilgileri çizelgeye işlenmiştir (Çizelge 3-4).

Çizelge 3: Malzeme özellikleri (Aydın ve Ozkol, 2022).

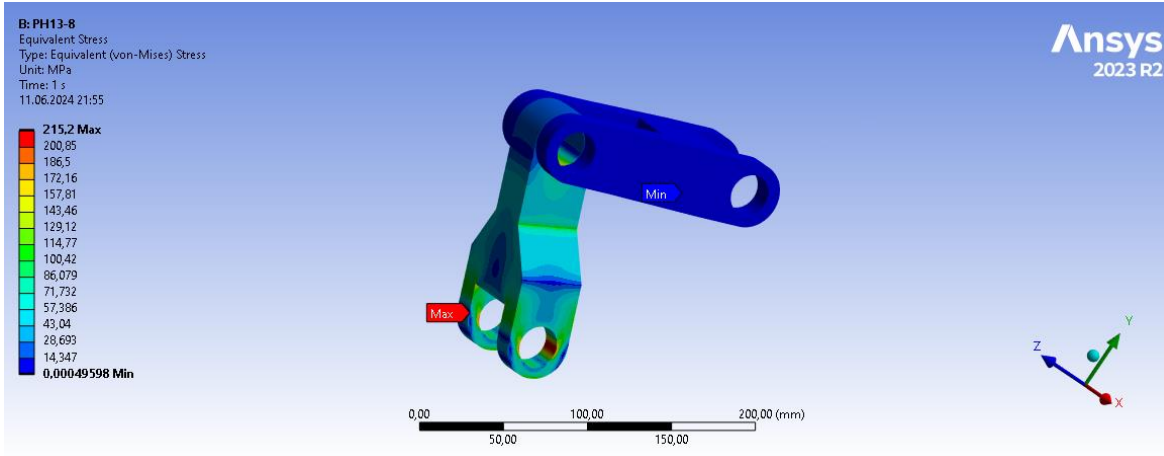
Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Dayanım (MPa)	
				Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı
PH13-8 Mo	7,8	221000	0,28	1480	1415
AISI 4340	7,7	200000	0,29	1792	1496
Ti-6Al-4V	4,43	113800	0,37	960	880
Al 7075	2,81	70960	0,33	572	503

Çizelge 4: 15-5 PH malzeme özellikleri (Aircraft Materials, 2021).

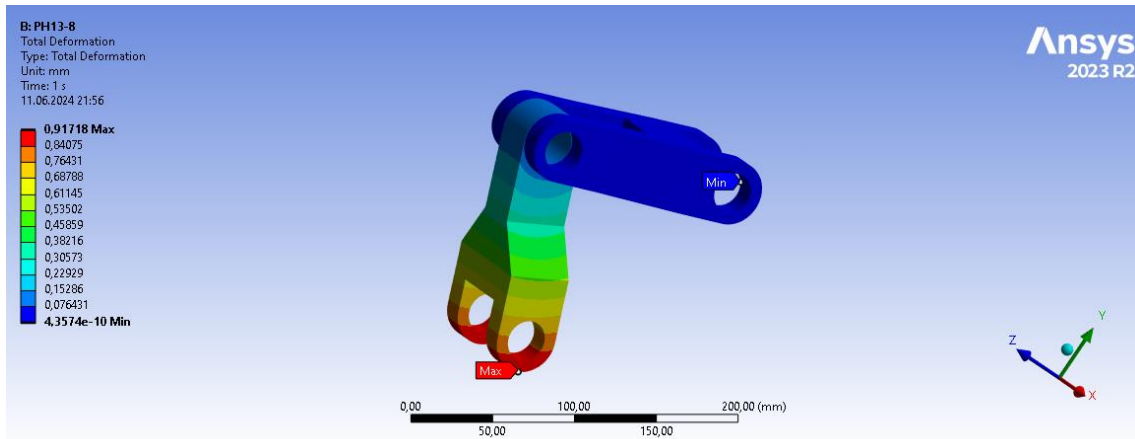
Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Dayanım (MPa)	
				Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı
15-5 PH	7,8	190000	0,28	1200	1140

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

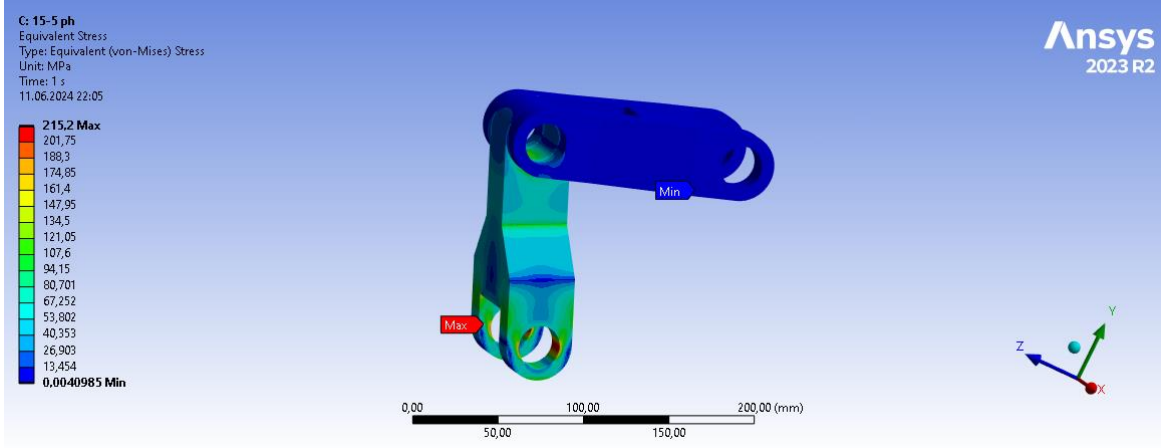
Gerilme analizi, montajların yapısal güvenliği ve bütünlüğünün değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Önceden tahmin edilen gerilme değerleri, uygun malzeme seçimi ve geometrik boyutların belirlenmesine yardımcı olur. Güvenlik faktörlerinin hesaplanmasıyla birlikte, gerilme tahminleri yapıların boyutlarının optimize edilmesini sağlar. Güvenlik faktörü, tasarlanan yapının güvenlik marjını yansıtarak, yapının ne kadar sağlam tasarlandığını ve bileşenlerinin ne kadar güvenli olduğunu belirler. Bu çalışmada, belirli bir yükü taşıyabilecek farklı malzemelerin kapasiteleri analiz edilmiştir ve ayrıca yer değiştirme analizleri de bu değerlendirmede incelenmiştir. PH13-8 Mo çeliği (Şekil 6-7), 15-5 PH çeliği (Şekil 8-9), Al 7075 alaşımı (Şekil 10-11), Ti-6Al-4V alaşımı (Şekil 12-13), AISI 4340 çeliği (Şekil 14-15) malzemesi kullanıldığında oluşan gerilme ve deformasyon miktarları görselleştirilmiştir.



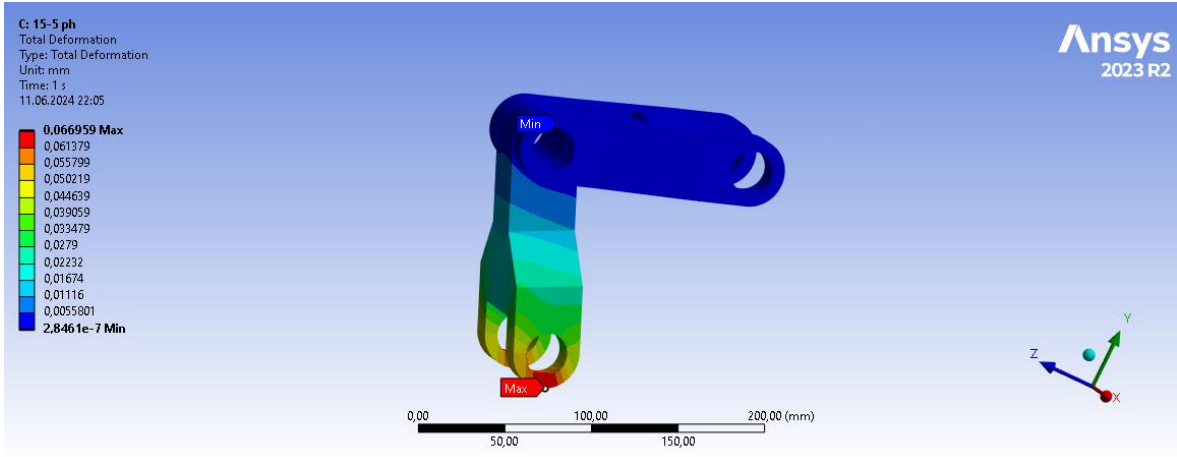
Şekil 6: PH13-8 Mo malzeme Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



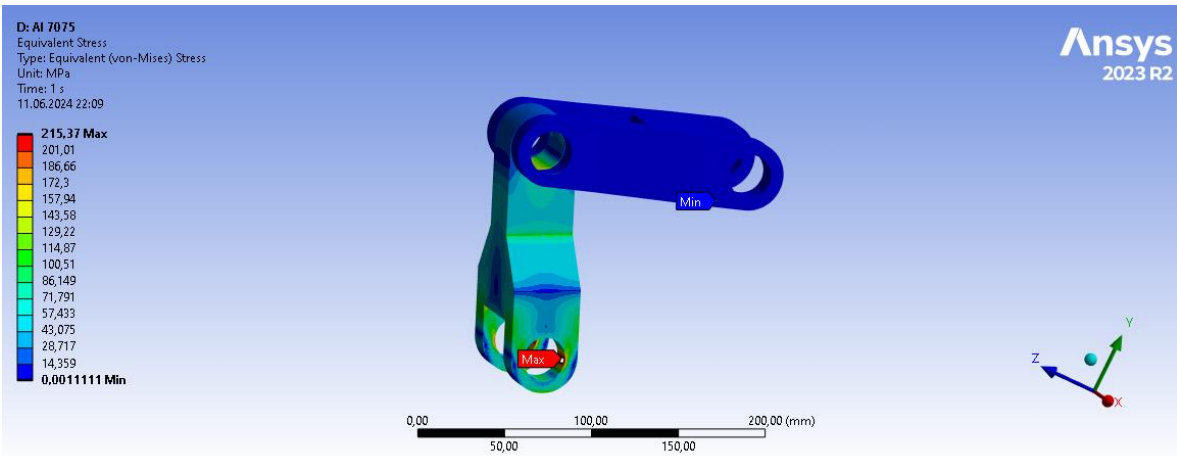
Şekil 7: PH13-8 Mo malzeme deformasyon analiz sonuçları.



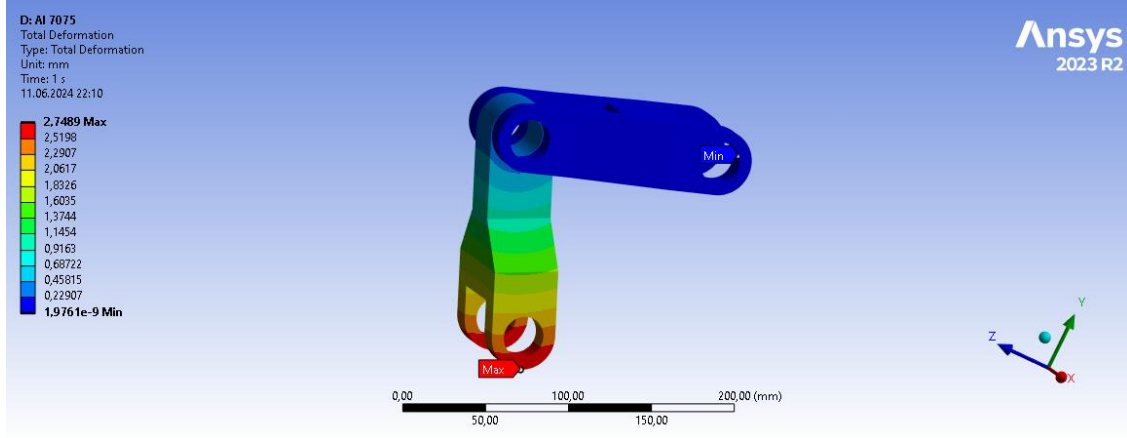
Şekil 8: 15-5 PH malzeme Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



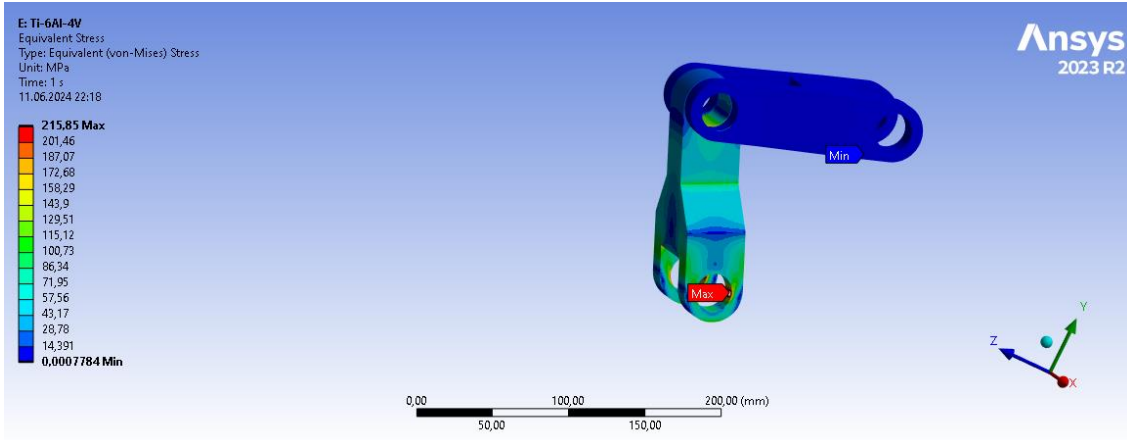
Şekil 9: 15-5 PH malzeme deformasyon analiz sonuçları.



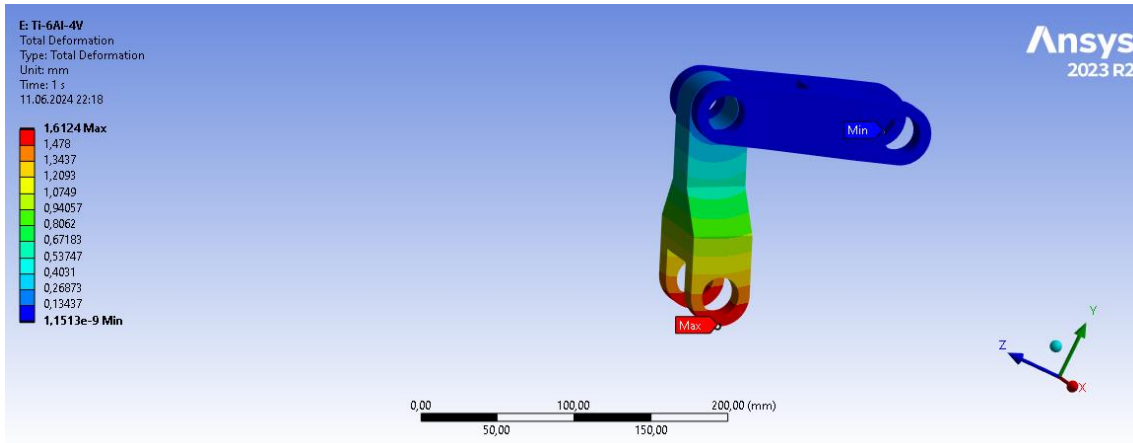
Şekil 10: Al 7075 Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



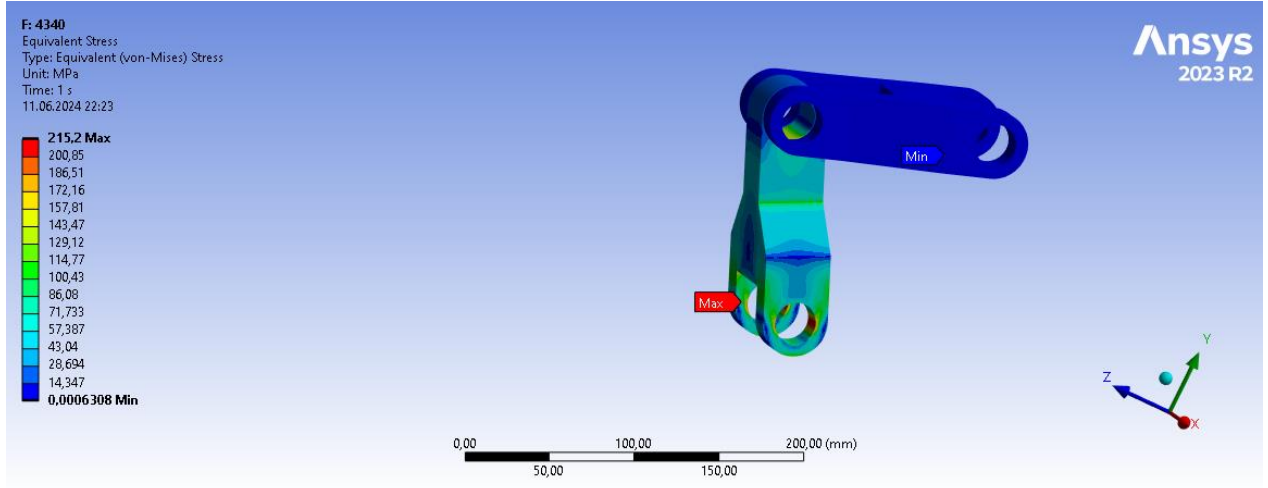
Şekil 11: Al 7075 malzeme deformasyon analiz sonuçları.



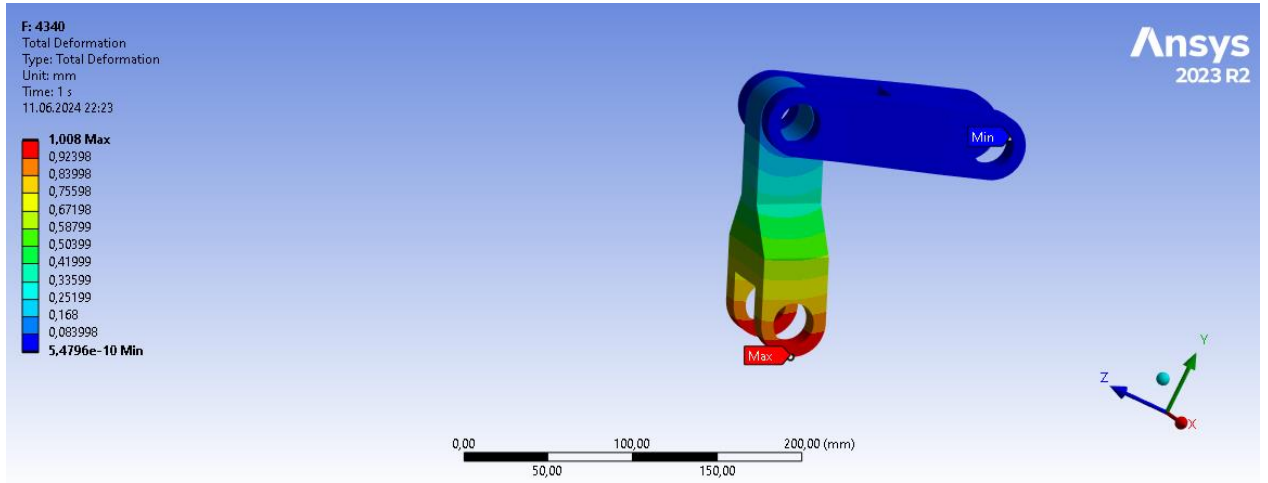
Şekil 12: Ti-6Al-4V malzeme Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



Şekil 13: Ti-6Al-4V malzeme deformasyon analiz sonuçları.



Şekil 14: AISI 4340 malzeme Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



Şekil 15: AISI 4340 malzeme deformasyon analiz sonuçları.

Yapılan analiz sonucunda elde edilen gerilme değerlerinin anlamlandırılabilmesi için emniyet faktörü hesaplanır. Emniyet faktörü malzeme akma dayanımının analiz sonucu okunan maksimum gerilmeye bölünmesi ile bulunur. Emniyet payı ise emniyet faktöründen bir çıkartılması ile bulunur. Elde edilen sonuçlara göre emniyet faktörünün 1'den, emniyet payının ise 0'dan büyük olması beklenir (Smith ve Jones, 2010).

$$\text{Emniyet Faktörü} = \frac{\text{Akma Dayanımı}}{\text{Maksimum Gerilme}} \quad (4)$$

$$\text{Emniyet Payı} = \frac{\text{Akma Dayanımı}}{\text{Maksimum Gerilme}} - 1 \quad (5)$$

Çizelge 5: Analizde kullanılacak malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması.

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Ağırlık (kg)	Deformasyon (mm)	Max.Dayanım (MPa)	Emniyet Faktörü
PH13-8 Mo	7,8	3,306	0,917	215,2	6,575
Al 7075	2,81	0,922	2,749	215,37	2,335
15-5PH	7,8	3,306	0,067	215,2	5,297
Ti-6Al-4V	4,43	1,875	1,612	215,85	4,076
AISI 4340	7,7	3,260	1,008	215,2	6,951

5. SONUÇ

Bu çalışmada bir iniş takımı üzerinde bulunan tork iletim parçalarının sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Burun iniş takımı üzerine uygulanacak kritik iniş koşulları belirlenmiş ve yük hesaplamaları yapılmıştır. Tork iletim parçaları arasındaki temas ilişkileri tanımlanmış ve analiz gerçekleştirilmiştir. Gerilme analiz sonuçları incelendiğinde beş farklı malzemede de benzer sonuçlar çıktığı gözlenmiştir (Çizelge 5). Fakat deformasyon sonuçları incelendiğinde en çok Al 7075 malzemesinde 2,749 mm deformasyon gerçekleşirken, en az 15-5 PH çelik malzemesinde 0,067 mm deformasyon gerçekleşmiştir. Yoğunluk parametresine göre inceleme yaptığımızda en hafif malzeme Al 7075 olurken, en ağır malzeme PH13-8 ve 15-5PH olarak tespit edilmiştir. Emniyet faktörü değerleri incelendiğinde ise bütün malzemeler havacılık emniyet katsayılarına göre emniyetli bulunmuştur. Bütün bu sonuçlar ve parametreler incelendiğinde havacılık alanında malzemelerdeki dayanım ve deformasyon önemli olduğu için burun iniş takımı tork iletim parçalarının malzemesine en uygun 15-5 PH olduğu tespit edilmiştir. Parçaların ağırlığını azaltmak için gelecek çalışmalarda topoloji optimizasyonları uygulanarak parçalar üzerinde boşaltmalar yapılabilir. Ayrıca Al 7075 malzemesi kullanıldığında oluşan deformasyonu önlemek için tasarım üzerinde iyileştirmeler yaparak deformasyon miktarı azaltılırsa ağırlık yönünden Al 7075 kullanımı uygun olacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

E.Ş.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar, yazı yazma.

C.E.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar, gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

Aydın, G. (2023). *Bir savaş uçağının burun iniş takımı yapısal analizi*. İTÜ Uçak ve Uzay Mühendisliği.

Aydın, G., & Ozkol, I. (2022). Structural Analysis of the Nose Landing Gear of a Fighter Aircraft. *European Journal*

- of Science and Technology*, (43), 126-135.
- Aircraft Materials. (2021). 15-5PH. <https://www.aircraftmaterials.com/data/alstst/ams5659.html>. Erişim Tarihi: 01.06.2024
- Currey, N. S. (1988). *Aircraft landing gear design: principles and practices*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Güler, M., & Şen, S. (2016). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Mair, H. U. (1996). *Advanced materials in aerospace*. Springer.
- Raymer, D. P. (2012). *Aircraft design: A conceptual approach (5th ed.)*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Caputo, F., De Luca, A., Greco, A., Marro, A., Apicella, A., Sepe, R. & Armentani, E. (2018). Established numerical techniques for the structural analysis of a regional aircraft landing gear. *Advances in Materials Science and Engineering*. Hindawi
- Raju, M.M., Patan, S. (2017). Design and strength analysis of nose landing gear. *International Journal and Magazine of Engineering, Technology, Management and Research*, 04, 71-750.
- Smith, J., & Johnson, M. (2021). Fatigue Analysis of Torque Link in Landing Gear. *Journal of Aircraft Engineering*, 45(3), 233-245. <https://doi.org/10.2514/1.C034567>
- Smith, J., & Jones, M. (2010). Evaluating Safety Factors in Engineering Design. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 132(2), 045001.
- Yaylacı, E. (2021). *Bir iniş takımı ve yuvasının tasarımı*. İTÜ Uçak Mühendisliği.

Sustainability and Industrial Design: A Study on AC EV Chargers' Material Selection

Mustafa CANBULAT^{1*}, Ahmet Fevzi SAVAŞ²

¹Department of Industrial Sustainability, Institute of Graduate Programs, Bilecik Seyh Edebali University, Bilecik, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bilecik Seyh Edebali University, Bilecik, Türkiye

Received: 06.07.2024, Accepted: 04.10.2024, Published: 15.11.2024

ABSTRACT

This study investigates sustainable material selection in industrial design and sustainable design, focusing on electric vehicle (EV) charging stations to address emissions. Through an extensive literature review and market analysis, the research highlights the critical importance of sustainable practices amid evolving environmental concerns. The study identifies polycarbonate (PC) as the primary material used in AC charging stations and explores alternatives to reduce emissions. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) emerges as a promising alternative, given its compatibility with PC and established industrial usage. Utilizing the rule of mixture approach, various ABS-PC combinations undergo thorough analysis to assess their impact on emissions, density, mass, mechanical properties, and safety factors. Optimal mixtures are identified based on safety factor values, which determine the part's lifespan under environmental conditions. Implementation of these identified mixtures has the potential to significantly reduce emissions per product, thereby advancing sustainability goals within the EV charging station domain. This study offers a comprehensive framework for designers and engineers to navigate sustainable material selection, advocating for the integration of sustainability considerations into design processes to promote environmental stewardship and sustainable development in the manufacturing sector.

Keywords: Sustainability; Industrial Design; Sustainable Design; Safety Factor; Rule of Mixture

Sürdürülebilirlik ve Endüstriyel Tasarım: AC Elektrikli Araç Şarj Cihazları Malzeme Seçimi Üzerine Çalışma

ÖZ

Bu çalışma, elektrikli araç (EV) şarj istasyonları kaynaklı emisyonlara odaklanarak endüstriyel tasarım ve sürdürülebilir tasarım üzerinden sürdürülebilir malzeme seçimini araştırmaktadır. Kapsamlı literatür taraması ve pazar analizi yoluyla, gelişen çevresel kaygılar karşısında sürdürülebilir uygulamaların kritik öneminin altı çizilmektedir. AC şarj istasyonlarında kullanılan başlıca malzeme olarak polikarbonat (PC) ele alınmış ve emisyonları azaltmak için alternatifleri araştırılmıştır. Akrilonitril bütadien stiren (ABS), polikarbonat ile uyumluluğu ve endüstriyel kullanımıyla dikkat çeken bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Karışım kuralı yaklaşımı kullanılarak, çeşitli ABS-PC kombinasyonları oluşturulmuş, emisyon, yoğunluk, kütle, mekanik özellikler ve güvenlik faktörleri üzerine detaylı analizlere tabi tutulmuştur. Güvenlik faktörü değerlerine dayanarak, parçanın çevresel koşullar altında ömrünü belirleyen optimal karışımlar tespit edilmiştir. Belirlenen karışımların uygulanması, ürün başına emisyonları önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip olduğu ve bu sayede EV şarj istasyonları alanında sürdürülebilirlik hedeflerine

yaklaşılabilirliğini göstermiştir. Çalışma, tasarımcılar ve mühendisler için sürdürülebilir malzeme seçiminde rehberlik sağlayan kapsamlı bir çerçeve sunmuş olup, endüstrinin çevresel yönetim ve imalat tarafında sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmek amacıyla tasarım süreçlerine sürdürülebilirlik düşüncelerinin entegrasyonunu savunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik; Endüstriyel Tasarım; Sürdürülebilir Tasarım; Güvenlik Faktörü; Karışım Kuralı

1. INTRODUCTION

In this study, research is conducted on sustainable material selection at the design stage in relation to raw material emission analysis, industrial design and sustainable design for electric vehicle charging stations, whose supply and demand have accelerated with the transition to electric vehicles. As a result of literature and market research, material data will be obtained, emissions from AC electric vehicle charging stations will be determined, material mixtures for a long product lifetime and sustainable use and solutions to reduce emissions will be revealed as a result of analysis. Basic geometric calculations and the rule of mixture approach will be used for this part. Also, it is an exemplary study to facilitate the material selection of designers with thermal stress analysis and to make selections according to the emission and durability relationship through design constraints.

With the increase of environmental disasters in the 20th century, the concept of sustainability has gained its current meaning and importance with the definition of the WorldWatch Institute and has taken its place in the international arena (Barbosa et al., 2014). As a result of this journey, which started with the increase in mechanization and the Industrial Revolution, production accelerated and supply and demand increased in direct proportion to each other. With easier access to products, the population growth rate has accelerated (Lucas Jr., 2004). An increasing population has brought with it increased demand and therefore supply. For this reason, mass production technologies have improved day by day and more efforts have been made for high-capacity production. These situations mean that the linear economy is getting stronger, and resource consumption has increased with the motto of “take, make, throw away” and therefore the demand for energy has increased (Stereve, 2019). Increasing energy demand has increased global warming by directly triggering greenhouse gas emissions, which is the world's biggest problem (Letcher, 2021). These events have required technological innovations to reduce emissions, and an environment has been created in which these problems can be overcome by making the policies and technologies developed by countries mandatory for other countries.

In line with the Sustainable Development Goals, the United Nations has shared specific targets with the global community to reduce emissions, encompassing political, human, and industrial aspects (United Nations, 2023). On the other hand, the European Union has introduced concepts such as carbon taxes, regulations, and emissions trading systems to reduce emissions, to prevent producers in its region from suffering financial losses when producing green products, to reduce emissions, and to spread the concept of sustainability all over the world. In this context, the 0 emission target, called "Net Zero" in line with the European Union emission targets, has concerned and affected the countries that export products to Europe (European Commission, 2023). If companies within the European Union are above a certain economic size, it is mandatory to reduce the damage they cause to nature, and it has become an obligation to pay carbon

taxes according to the emissions they create. In this context, the sectors and scopes affected by the relevant regulations will continue to increase every year as of 2024. Along with these regulations, the fact that companies from other countries that will export products to Europe will also pay carbon tax has raised emission awareness all over the world and various regulations are being made to pay less carbon tax and cause less damage to nature (Andersen and Ekins, 2009).

In addition to the policies developed to reduce emissions, technologies have also had to adapt to this situation. In energy production, which is the sector that causes the most emissions globally, fossil fuel energy production was intended to be reduced, and renewable energy production from the sun and wind is encouraged. Since vehicles are one of the sectors where fossil fuel is used the most, electric vehicles have been developed and launched under alternative fuel vehicle technologies. With the support and incentives of policies in the global market, the conversion of vehicles to electric has been much faster than expected, and supply and demand have grown rapidly (Thompson, 2023). On the one hand, steps are being taken to reduce emissions, on the other hand, the world is struggling with the concept of sustainability with the emissions of transformation brought about by change. While producing electric vehicles, plastics and metals that are harmful to nature are produced, and the supply is trying to keep up with the demand, and continues to increase emissions. In addition, due to battery technologies, production is limited in mines, which are among the world's limited resources (Jones et al., 2020). Under the circular economy, the linear economy is again applied. In order to be a fully circular economy, resources must be recycled instead of being depleted, or must be destroyed without harming nature and produced without harming nature (Morseletto, 2020). Implementing a 100% circular economy model among product manufacturers has become very difficult. Due to issues such as water, energy and emissions, the models applied cannot be fully circular, but efforts are made to be more circular.

The industrial design discipline has a wide range, from market research to data collection for product needs, from design constraints and concept drawing to computer-aided design and prototype making, from product life cycle services to machine-human interface design, from material selection and analysis for the product to after-sales support and data collection (Industrial Designers Society of America, 2024). Within the scope of this study, three design strategies will be investigated due to their global impact and importance in terms of sustainability. These strategies are European Union Ecodesign, dematerialization, and green product design.

1.1. Sustainable Design Strategies

The EcoDesign strategy has evolved over time, aiming to express product design that minimizes harm to ecological life through various definitions. However, the multitude of approaches proposed by different sources has made it challenging to measure the effectiveness of the EcoDesign approach, leading to

discrepancies in the understanding of what EcoDesign entails. In response, the European Union Commission has established regulations and defined specific criteria for EcoDesign, ensuring that products adhere to measurable standards of environmental friendliness (European Commission, 2024). The EcoDesign approach has also been given to the products of manufacturers and designers as an incentive label, thus increasing the emphasis on studies in this field. Today, with the European Commission EcoDesign approach, the product's reproducibility is examined in terms of how durable it is, its reusable features, the ability to increase its features without changing the product, its repairability, the presence of non-cyclical materials, energy and resource efficiency, recyclable content, reproducibility, carbon and other footprints in the environment, and the damage it causes to nature is comprehensively determined. Based on these results, it is determined whether the product will receive the EcoDesign label or not. Since it is defined that each product will have a digital product passport within the framework of the relevant regulations of the European Commission, it is known that such sustainability parameters of the products will also be recorded in this passport (European Commission, 2024). In this sense, the EcoDesign strategy is not only an environmentally friendly product design strategy, but also one of the design strategies that should be followed in order to be least affected by the European Commission carbon tax regulations.

It is known that different sources have different approaches to sustainable product design strategies, and another strategy that meets in a typical cluster and is known globally in terms of its widespread use is the dematerialization strategy (Watkins et al., 2021). This strategy involves reducing the materials that need to be used on the basis of product design and reducing the use of materials, including the packaging prepared for the sale of the products (Mouëllic et al., 2023). In this strategy, where simplicity is prioritized in terms of service design, the manufacturer will be able to reduce carbon tax, reduce emissions, and reduce material and production expenses because it uses fewer materials. Since this strategy is also directly related to the material focus used in the production of the products, it also includes designing the product with a completely different material that will create fewer emissions, instead of the material determined in direct proportion to emission reduction.

The green product design strategy involves designing new products within the framework of the circular economy and the unsustainable damage that products cause to the environment. It includes the direct use of green materials and the creation of environmentally friendly products (Xue et al., 2021). In this context, a sustainable supply chain constitutes one of the important points of the green product design strategy. In these cases, where indirect emissions such as scope-2 and scope-3 are also calculated and added to the business in the emission calculations determined by the European Commission, the size of the emissions occurring at the stages in the supply chain is also critical (European Commission, 2019). However, the green product design strategy encompasses more than just minimizing the environmental impact of a product. It also has social effects, which in turn contribute to increased profits. When a product is manufactured using

a green product design strategy, both its sales price and quantity tend to rise, leading to higher profit margins due to its popularity. The global increase in the number of environmentally conscious consumers, often referred to as green consumers, further boosts the sales and profitability of green products. Therefore, the green product design strategy involves not only calculating indirect emissions such as those from the supply chain alongside direct emissions within the product life cycle but also adding the monetary equivalent of these emissions to the product.

1.2. European Market and Known Brands for EV Chargers

Electric vehicles and electric vehicle charging stations, which stand out worldwide within the scope of developing alternative fuel vehicles and reducing fossil fuel-based emissions, show today's new supply-demand increase trend (Agamloh et al., 2020). This change in all vehicles used worldwide is accepted as a market target, and in this sector, fossil fuel vehicles are being replaced by vehicles called electric vehicles, which work by storing electrical energy. As the change occurred faster than expected, problems such as emissions, supply and demand imbalances began to emerge. Due to various factors such as uninterrupted mass production, cost and time, vehicles are not renewed and converted to electric, but are replaced by electric vehicles produced from scratch. This situation has brought about the question of how sustainable electric vehicles are (Ionnides and Wall-Reinius, 2015). The fact that the demand for electric vehicle charging stations has increased dramatically has enabled various products to be produced in various parts of the world and sold in both regional and global markets.

When we look at what is happening, the mass production craze continues in the face of these moves made by the world to get rid of emissions, and the consumption of finite resources, especially the mines required for the production of energy storage units, is accelerating (Jones et al., 2020). The amount of thermoplastic used outside of recycling also increases due to the market size. Reducing emissions is not a legal regulation everywhere in the world, such as in the countries within the European Union (Baer, 2002). In those with legal regulations, deterrent penalties are unavailable in all countries.

Charging at electric vehicle charging stations is carried out in two types: AC and DC. AC stands for alternating current, while DC stands for direct current (Schwarzer and Ghorbani, 2015). However, due to differences in infrastructure, cost and internal parts, AC and DC electric vehicle charging stations are quite different in terms of price differences, materials and design (Kielsen et al., 2016). While AC charging stations are cheaper, smaller and portable, DC charging stations are larger and consist of metal structures.

According to International Energy Agency data, by the end of 2022, 600.000 AC electric vehicle charging stations have been installed in public areas (International Energy Agency, 2023). While 360.000 of these were installed in China, it was observed that China had more than 1 million stocks in terms of global market

stock. It has been stated that by the end of 2022, more than half of the AC electric vehicle charging station product stocks in the world market are in China. According to the International Energy Agency 2022 year-end data, it is stated that there are more than 117.000 stock AC electric vehicle charging stations in the Netherlands, 74.000 in France, and more than 64.000 in Germany.

Within the scope of market research, research was conducted on the products available in the market and the technical features and optional features of these products. According to the research, the main AC electric vehicle charging stations operating within the European Union countries were selected (Sevdari, 2020). The reason for this selection was the European Union, which has a remarkable goal of reducing emissions when viewed globally. The European Union wants to reduce greenhouse gas emissions by around 55% which is in line with its 2030 targets (European Commission, 2020). Accordingly, the products selected within the scope of market research are; ABB- Terra, EVBox- BusinessLine, Kempower- AC Satellite, Schneider Electric- EVlink ProAC, and Siemens – VersiCharge.

ABB-Terra product has single-phase and three-phase features and can provide products up to 22 kW in the AC electric vehicle charging station category (ABB, 2022). It has the IP54 standard. The EVBox – BusinessLine product has been introduced to the market with up to 22 kW per socket (EVBox, 2023). The product’s IP rating is 45. The Kempower-AC Satellite product appears as a floor-mounted product with an aluminum frame (Kempower, 2024). Apart from the protection standard of IP 54, the product is also marketed as a DC Charger with a similar design. The Schneider Electric- EVlink Pro AC product is produced with polycarbonate material with IP55 protection standard (Schneider Electric, 2023a). The Siemens – VersiCharge product is an AC electric vehicle charging station, which has single phase AC output up to 11.5 kW (Siemens, 2023). The IP standard is a protection rating called “Ingress Protection”. According to this rating, the deterioration of electrical and electronic products due to sand or water ingress was intended to be bound to a certain standard. Accordingly, it is stated to what extent the products can withstand water or sand (International Electrotechnical Commission, 2024).

Table 1: Selected Products and General Specifications.

Product Names	Product Dimensions (Width x Length x Height (mm))	Body Material	Net Weight
ABB- Terra	195 x 320 x 110	*	4.1 KG
EVBox- BusinessLine	205 x 255 x 600	Polycarbonate	10 KG
Kempower- AC Satellite	300 x 300 x 1518	Aluminium	33 KG
Schneider Electric- EVlink ProAC	317 x 153 x 529	Polycarbonate	7.2 KG
Siemens – VersiCharge	181 x 96 x 409	**	7.7 KG

The information obtained from researching the products determined within the scope of market research and extracting their technical data is given in Table 1. Accordingly, it has been observed that companies in

the European Union market use thermoplastic material in the outer body in the production of AC charging stations. When looking at these materials in general, polycarbonate comes to the fore, while ABS, namely acrylonitrile butadiene styrene and various mixtures are also used, varying according to the usage and performance demands of the companies (Greco, 1996).

2. METHODS AND ANALYSIS

A literature review was conducted on the selected AC electric vehicle charging station products to select sample materials for the product to be designed industrially under sustainable design. With the data obtained from this, the materials used in the AC electric vehicle charging station were determined. As a result of the literature review, detailed material usage data for sustainability was obtained for one of the products researched. Within the scope of the study, in order to select the material used on the body of the product in accordance with the European Commission EcoDesign parameters, the raw material emission of the product, whose data is available, is calculated with the CCaLC 2 software and constitutes the constraint in this study. With this constraint, the optimum material that will reduce emission values and provide a longer product lifetime according to the design features will be determined at the design stage. According to the physical properties of the materials, the optimum mixture is calculated by a theoretical calculation called the "Rule of Mixture" (Wongpajan et al., 2016). According to the resulting optimum material and emission values, it is aimed to conduct a theoretical study that will guide designers on sustainable material selection before mass production or engineering design. The target will be achieved by using the Autodesk Fusion360 software in the material properties to be analyzed in the study and parameters such as mass and volume to be obtained based on the geometric features of the design.

Two main software programs were used in this study. One of them is Computer aided Design (CAD) software for engineering and design, and the second is for emission calculations. Autodesk Fusion360 is CAD software that allows for basic static and dynamic analyses. It has an embedded and expandable material library. While the software offers free usage for academic studies, it is a paid software for industry. The CCaLC 2 open-source software was used for material emission calculations and access to the EcoInvent Material Database based on material sources. This software was developed by the University of Manchester and does not charge any fees. However, the EcoInvent Material Database is a paid database, and access to it through the CCaLC 2 software is limited and free.

In Autodesk Fusion 360, which facilitates the definition of materials and submission for analysis on the designed part, material selection is done as shown in Figure 1.

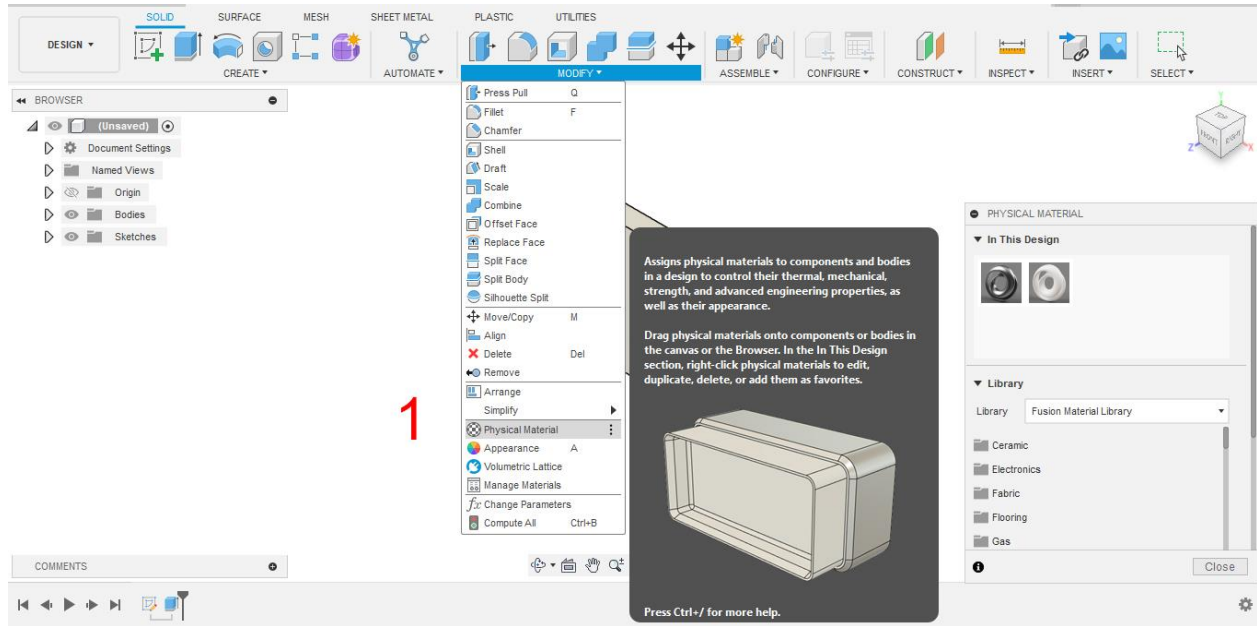


Figure 1. Autodesk Fusion360 Material Selection

When defining the material for the designed part, click on the 'Physical Material' section, select the desired material from the opened material library, and then drag and drop it onto the part to be defined, as shown in Figure 1.

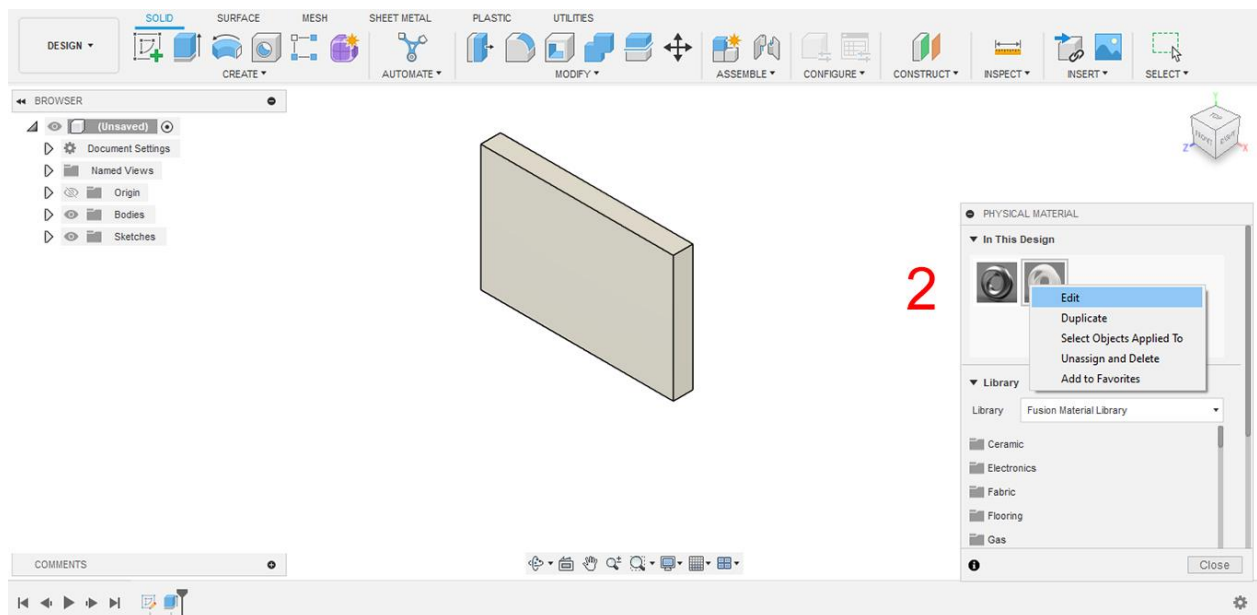


Figure 2. Autodesk Fusion360 Material Properties

As shown in Figure 2, by right-clicking and selecting the edit button, the properties of the desired material can be modified or its details viewed. Additionally, a new material not available in the library can be manually added, allowing for the definition of a new material by changing its name and all its mechanical and thermal properties.

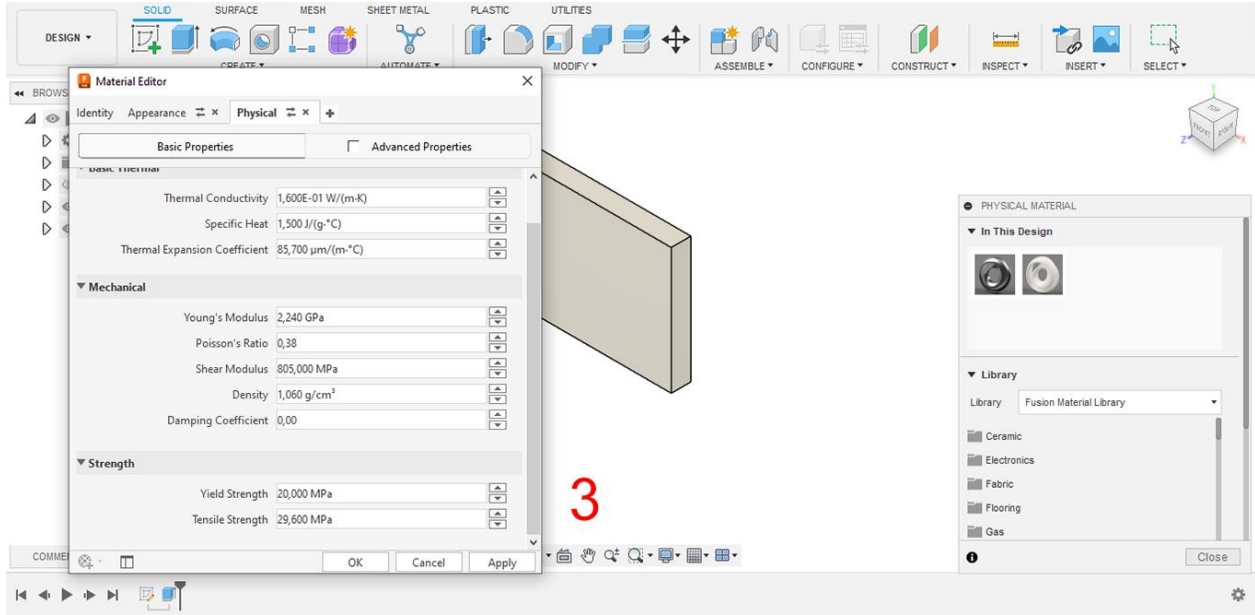


Figure 3. Autodesk Fusion360 Material Editor

Figure 3 displays the basic mechanical and thermal properties of the ABS material defined for calculations and obtained from the Autodesk Fusion 360 Material Library. New materials can be defined by performing the edit operation from this screen.

While raw material emission calculations are made with the CCaLC 2 software,

$$\sum CO_2(kg) = Emissions\ per\ Kg\ x\ Used\ Raw\ Material\ (Kg) \quad (1)$$

Equation is used to find results (Canbulat and Savaş, 2023). Using this equation (1), the emissions caused by the use of raw material will be revealed according to the amount and type of material used. The Rule of Mixture equation is (Wongpajan et al., 2016),

$$\beta_c^u = V_f \beta_f + V_m \beta_m \quad (2)$$

β_c^u refers to the predicted property of the mixture, V_f and V_m indicate the percentage ratios of the mixtures, β_f and β_m indicate the values of the desired properties of the materials to be mixed (2). Apart from the products in the literature review, the volume will be determined based on the material used, and this will strengthen the estimation aspect of the study as a parameter in terms of the weight and lightness of the

material in the optimum material selection. The equation to be used for the material density (d), mass (m), volume (V) relationship (Hawkes, 2004),

$$m = V \times d \quad (3)$$

In this equation, m stands for mass, V stands for volume, and d stands for density (3). In choosing the optimum material, the mixture ratios will be evaluated in terms of density, weight, CO² emissions, tensile strength, yield strength and safety factor, and the safety factor value will be analyzed with the material to be defined on plates with 3 mm wall thickness and 1000 mm width, according to the working coefficient under atmospheric conditions. Since the load on the part will not be defined, only atmospheric conditions will be defined and analysis will be made by establishing a relationship between how much it can be used under these conditions and the safety factor.

Safety factor value calculations are of critical importance in Computer Aided Design (CAD) and analysis software. It shows the state of the part under load or stress according to a certain score by calculating the time when disintegration will begin. The equation used on the basis of the calculations is (Niklas, 2000),

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Breaking Stress}}{\text{Load Capability}} \quad (4)$$

With given equation (4), safety factor values will be calculated. The product for which detailed information was obtained in terms of material and emission values in the literature research is Schneider Electric-EVlink ProAC.

According to the information obtained for the AC electric vehicle charging station product, the mass of the product, including its accessories and carrying box, is given as 8674 grams, approximately. The product transport box, made of 100% cardboard, weighs 1480 grams, according to the information given. In addition to the total mass of the product, 2.5 grams of battery, 555 grams of electronic card, and 25 grams of electrolyte capacitor masses are given. According to the information given, it is understood that the product tries to comply with EcoDesign design criteria and that the company wants to complete the design with a more environmentally friendly approach. The relevant sustainability information, the recycling potential is given as 76%, and this calculation is based on the "ECO'DEEE recyclability and recoverability calculation method, version V1, 20 Sep. It was stated that it was made within the scope of "2008 presented to the French Agency for Environment and Energy Management: ADEME" (Schneider Electric, 2023a; 2023b; 2023c).

Schneider Electric- EVlink ProAC Materials

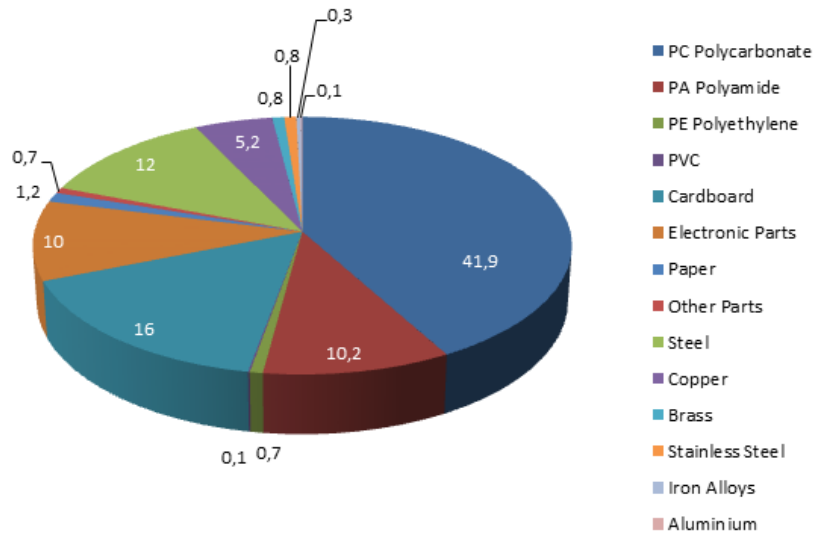


Figure 4. Materials and Percentages of the Selected Product (Schneider Electric, 2023a)

Figure 4 shows the material percentage distribution for the product for which detailed material data is available.

Table 2. ABS and PC Material Specifications

Materials	Density (g/cm ³)	Overall Emissions (Kg / CO ²)	Tensile Strength	Yield Strength
ABS	1.06	4.40	29.6 MPa	20 MPa
PC	1.2	7.79	68.9 MPa	62.01 MPa

As a result of the literature review, Table 2 is made according to Autodesk Fusion 360 material library. While the emission per kilogram of the ABS material is lower than the PC material, it is understood that the PC material is much superior in performance criteria. This means that a mixture between the two materials will be effective in finding the desired properties. By mixing two opposite features, it will be possible to achieve optimum results.

3. FINDINGS

According to the research and information obtained, polycarbonate is generally chosen as the material used in the shell structure of the electric vehicle charging station. According to the material distribution given in Figure 4, it was concluded that 3878.62 grams of polycarbonate was used. Including parts such as battery,

electronic card, electrolyte capacitor, the total mass of the product is 9256.85 grams. When we look at the general thermoplastic usage, it is seen that 944.19 grams of polyamide, 64.79 grams of polyethylene, 9.25 grams of PVC and 3878.62 grams of polycarbonate are used, and the total thermoplastic usage is 4896.85 grams. In the situation where polycarbonate usage is 3878.62 grams,

$$3878.62 = 1.2 \times V \quad (5)$$

With this calculation, V will be resulted as 3232.183 cm³ (5). The material mixtures to be used to obtain this geometry and their density ratios are given in table 3. The mass was determined according to the density of the mixture, and total emissions were calculated according to this mass. With the Rule of Mixture approach, calculations were made for tensile and yield strength values according to the mixture, and finally, the stage of creating safety factor values with thermal stress analysis was started. At this stage, definitions were made under room temperature conditions of 25°C as a restriction to the study. 25°C is also a standard reference point for the International Organization for Standardization (ISO) and ASTM Standards (Shackelford, 2014).

Within the framework of the restrictions, in order for the volume value of the plate with a thickness of 3 mm and a width of 1000 mm to reach 3232.183 cm³,

$$0,3 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} = 30 \text{ cm}^2$$

$$3232.183 / 30 = 107.739 \text{ cm} \quad (6)$$

The third measure can be found using this equation (6).

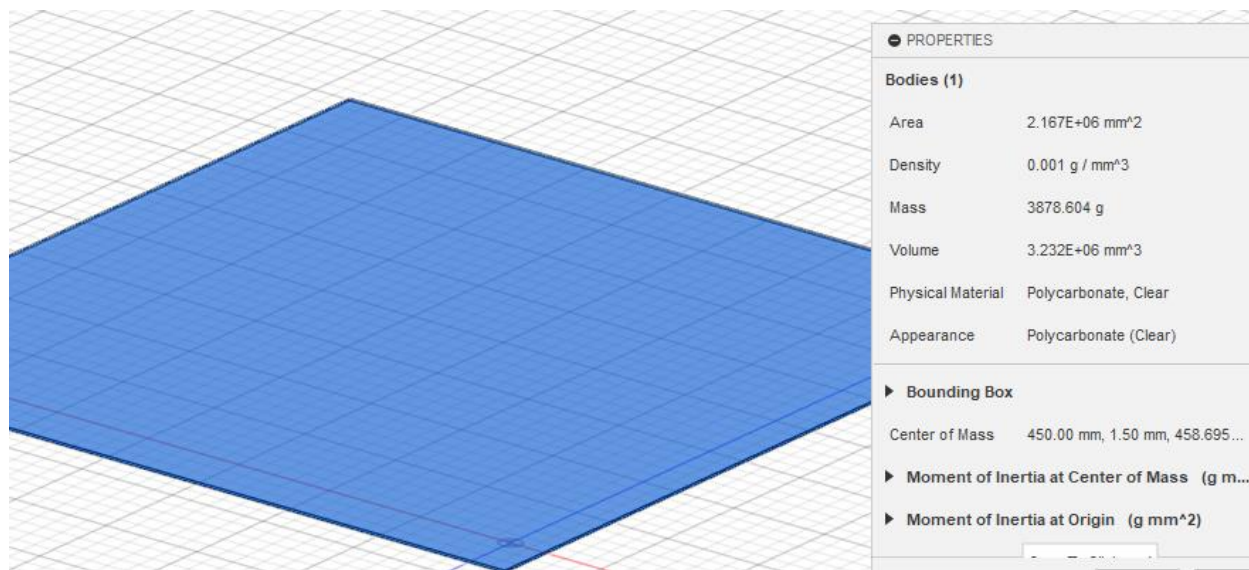


Figure 5. Part Form to be Analyzed Under Atmospheric Conditions

The form, based on the measurements specified in the calculations, is provided in Figure 5.

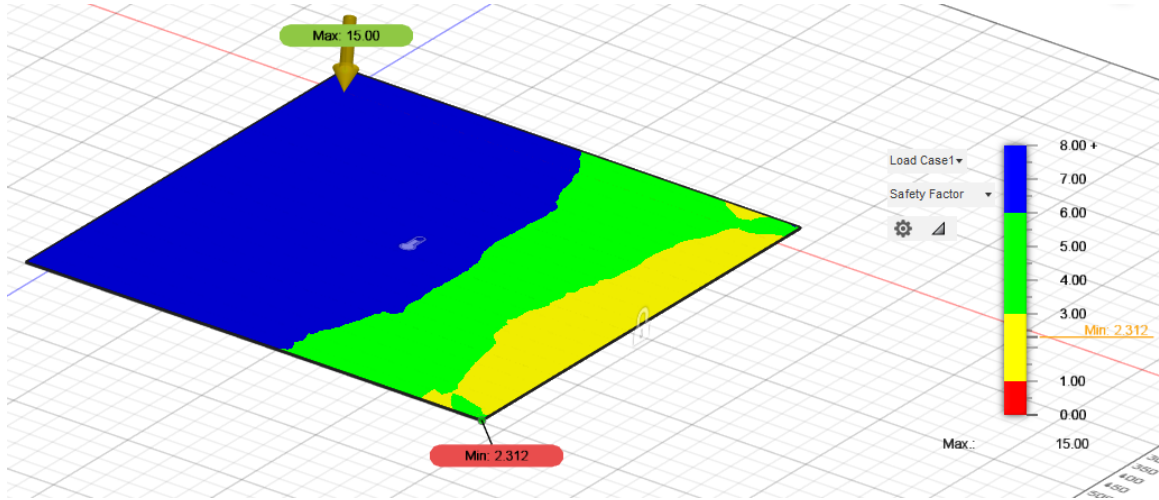


Figure 6. Plate Included in Safety Factor Analysis

The plate shown in Figure 6 was mounted on the wall on a single surface and subjected to a temperature of 25°C. The plate in the image belongs to the part made of 100% ABS material and shows the distribution of thermal stress.

Table 3. Rule of Mixture Results for ABS and PC

ABS (Rate of Mixture)	PC (Rate of Mixture)	Density (g/cm ³)	Overall Weight (g)	Overall Emissions (Kg / CO ²)	Tensile Strength	Yield Strength	Min. Safety Factor
0	100	1.2	3878.6196	30.214	68.9	62.01	6.534
10	90	1.186	3833.369038	28.561	64.97	57.809	6.149
20	80	1.172	3788.118476	26.94	61.04	53.608	5.754
30	70	1.158	3742.867914	25.349	57.11	49.407	5.353
40	60	1.144	3697.617352	23.789	53.18	45.206	4.944
50	50	1.13	3652.36679	22.26	49.25	41.005	4.526
60	40	1.116	3607.116228	20.761	45.32	36.804	4.1
70	30	1.102	3561.865666	19.294	41.39	32.603	3.666
80	20	1.088	3516.615104	17.856	37.46	28.402	3.223
90	10	1.074	3471.364542	16.45	33.53	24.201	2.772
100	0	1.06	3426.11398	15.074	29.6	20	2.312

In Table 3, While calculating the minimum safety factor value, not only mechanical properties but also thermal conductivity (W/(m.K), specific heat (J/(g.°C), thermal expansion coefficient $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ parameters were included in the calculations. In addition, young's modulus (GPa) was added to the mechanical parameters and safety factor results were obtained.

4. CONCLUSIONS

An example study on material selection in sustainable industrial design was carried out by making it easier for designers to choose materials and by making it possible to select these materials within the scope of their emission values. In this study, comprehensive literature research was conducted to analyze AC Charger products widely used in Europe in 2022. The analysis aimed to ensure that the material selection for the industrial design of the AC Charger was sustainable. According to the literature, polycarbonate emerged as the most common material. To effectively reduce emissions associated with polycarbonate, ABS, another widely used and mixable material in the industry, was chosen as an alternative. ABS and PC materials were mixed with the rule of mixture approach, and analysis was carried out on all possible mixtures with 10-point changes, and emission, density, mass, tensile strength, yield strength and safety factor results were determined for each mixture. According to the analysis results provided in Table 3, materials with safety factor values between 1 and 3 were found to be inadequate. Safety factor values between 3 and 6 were deemed optimal, while values of 6 and above were considered excessive in terms of price-to-performance ratio, indicating that they are overly robust and costly selections, hence unnecessary for the application. Since safety factor points and colors vary depending on the CAD software, part dimensions and materials, the colors that the software gives to the points are more important than the numerical values of the points. This situation can also be seen in Figure 6.

Since the basis of the study is to make it easier and more accurate for designers to choose the optimum material, the elimination stage should be started after the mixture tables are prepared, as in Table 3. At this stage, it has been shown that when proceeding with the safety factor, only mixtures with green values can be selected, and when it is desired not to be below specific durability values, the options can be reduced by making eliminations colored in yellow in the table. For example, if tensile strength requirements of 50 MPa and above and yield strength requirements of 45 MPa and above were a constraint for AC Charger product design, it is seen that only three mixtures meet these conditions and these are expressed in green color in the mixture percentages. Considering these three mixture options, if one of these three mixtures is used instead of a product produced entirely from PC material, the emission per product body can decrease from 30.214 kg/CO² to 23.789 kg/CO², that is, the emission per product can decrease by approximately 21.5%.

With this approach, a solution that requires basic physics and mathematics knowledge, which can be applied to the work of all industrial designers, designers and engineers who will design concept industrial products, has been presented to the literature. In this study, the method was used only for thermoplastic materials due to the external body materials of the AC Chargers, and they should not be used in application studies without researching the availability of the mixtures in the market.

RECOMMENDATIONS

The application stages are given as suggestions to designers and engineers in the industrial or academic world who will implement this study. From this point on, the text continues by naming designers and engineers as practitioners.

Practitioners should determine the mechanical and thermal property constraints of the product for which they will define the material selection approach before starting the analysis. Then, the thermoplastic materials they will use or can be used should be determined, and their supply availability in the market should be examined. While the rule of mixture approach can be applied to both mechanical and thermal properties, it can also be used for industry as it can be applied to the price per kilogram.

Raw material emissions should also be determined by the CCalc2 software, and the mixtures and their properties should be clearly revealed in the table to be created. Since safety factor analysis is required for each mixture, the safety factor value for each mixture must be determined by defining it on the designed part and performing thermal stress analysis under atmospheric conditions (25 °C and defined gravity).

It should be kept in mind that taking a safety factor analysis directly from the CAD form for the designed product will bring the results closer to reality.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Rudis F&E GmbH for their technical assistance with the key features of electric vehicle charging stations.

CONFLICT OF INTEREST

The author stated that there are no conflicts of interest regarding the publication of this article.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

M.C.: Conceptualization, Methodology, Formal Analysis & Writing, Investigation, Resources.

A.F.S.: CAD & CAS Analysis, Validation, Draft Preparations.

REFERENCES

- ABB. (2022). Terra AC Wallbox [Brochure]. Retrieved from <https://library.abb.com/d/9AKK107680A2257>
- Agamloh, E., Jouanne, V. A., Yokochi, A. (2020). An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. *Machines*, 8(2): 20. doi: 10.3390/machines8020020
- Andersen, M. S. & Ekins, P. (2009). *Carbon-Energy Taxation: Lessons from Europe*. Oxford University Press, 241-

260.

- Baer P. (2002). Equity, Greenhouse Gas Emissions, and Global Common Resources. *Part V. Development And Equity*, Stanford University, 393-408. Retrieved from [https://stephenschneider.stanford.edu/Publications/PDF_Papers/15-Ch15\(393-408\).pdf](https://stephenschneider.stanford.edu/Publications/PDF_Papers/15-Ch15(393-408).pdf)
- Barbosa, G. S., Drach, P. R., Corbella, O. D. (2014). A Conceptual Review of the Terms Sustainable Development and Sustainability. *International Journal of Social Sciences*, III(2), 01–15.
- Canbulat, M. and Savaş, A. F. (2023). Sürdürülebilir Tasarım ve Elektrikli Araç Şarj İstasyonları, A. Bilgiç, Ş. Balbay (eds.), *Endüstriyel Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Ekonomi Uygulamaları: Dünyadan ve Türkiye'den Yeşil Dönüşüm Örnekleri*, Ankara: Detay Yayıncılık, 1-16.
- European Commission. (2024). Ecodesign for Sustainable Products Regulation. Retrieved from https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_en
- European Commission. (2023). Carbon Border Adjustment Mechanism. Retrieved from <https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/documents/2023/Carbon%20Border%20Adjustment%20Mechanism.pdf>
- European Commission. (2020). 2030 Climate Targets. Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-targets_en
- European Commission. (2019). Guidelines on reporting climate-related information. Retrieved from https://ec.europa.eu/finance/docs/policy/190618-climate-related-information-reporting-guidelines_en.pdf
- EVBox. (2023). BusinessLine CE G4 Product Datasheet [Brochure]. Retrieved from <https://branding.evbox.com/web/6605d986cfba05ef/website---evbox-businessline-product-brochures-all-languages/?mediaId=49F209D6-864A-496F-871B7D7B685AE581&viewType=grid>
- Greco, R. (1996). Polycarbonate Toughening By ABS, E. Martuscelli, P. Musto, G. Ragosta (eds.), *Advanced Routes For Polymer Toughening*, Netherlands: Polymer Science Library, 10, 469-526.
- Hawkes, S. J. (2004). The Concept of Density. *Journal of Chemical Education*, 81 (1), 14. doi: 10.1021/ed081p14
- Industrial Designers Society of America. (2024). What Is Industrial Design? Retrieved from <https://www.idsa.org/about-idsa/advocacy/what-industrial-design>
- International Electrotechnical Commission. (2024). IP Ratings. Retrieved from <https://www.iec.ch/ip-ratings>
- International Energy Agency. (2023). Trends in charging infrastructure. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-charging-infrastructure>
- Ionnides, D. and Wall-Reinius, S. (2015). Sustainable mobility in the periphery: Are electric vehicles the answer? *ETOUR*, Mid Sweden University, 2015; 3.
- Jones, B., Elliott, R. J.R., Nguyen-Tien, V. (2020). The EV Revolution: The Road Ahead For Critical Raw Materials Demand. *Applied Energy*, 280, 115072. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115072
- Kempower. (2024). AC Satellite, Technical Datasheet [Brochure]. Retrieved from <https://mediabank.kempower.com/l/65mpVmfjQGmZ>
- Kieldsen, A., Thingvad, A., Martinenas, S., Sørensen, T. M. (2016). Efficiency Test Method for Electric Vehicle Chargers, *In Proceedings of EVS29 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, 19-21 June, Montréal, Québec.
- Letcher, T. M. (2021). 1 - Global warming-a complex situation. *Climate Change (3rd Edition) Observed Impacts on Planet Earth*, 3-17. doi: 10.1016/B978-0-12-821575-3.00001-3
- Lucas Jr., R. E. (2004). The Industrial Revolution: Past and Future. *Economic Education Bulletin, American Institute for Economic Research*, XLIV (8), 1-8.
- Morseletto, P. (2020). Targets For A Circular Economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. doi:

10.1016/j.resconrec.2019.104553

- Mouëllic, M. L., Ventura, A., Heller, K., Loh, A., Roch, R., Spitzbart, J., Zanotelli, P. (2023, March 27). Six Strategies for Designing Sustainable Products. *Boston Consulting Group*. Retrieved from <https://www.bcg.com/publications/2023/six-strategies-to-lead-product-sustainability-design>
- Niklas, K. J. (2000). Computing factors of safety against wind-induced tree stem damage. *Journal of Experimental Botany*, 51 (345), 797-806. doi: 10.1093/jexbot/51.345.797
- Schneider Electric. (2023a). Charging station, EVlink Pro AC/AC Metal [Brochure]. Retrieved from <https://www.se.com/uk/en/product/EVB3S22N4/charging-station-evlink-pro-ac-ac-metal-22kw-32a-3p+n-t2s-socketoutlet-rdcdd-6ma-mnx-aux->
- Schneider Electric. (2023b). Product Environmental Profile, EVlink ProAC 7.4 kW [Brochure]. Retrieved from https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Environmental+Disclosure%20&p_File_Name=PEP+ecopassport+SCHN-00768-V01.01-EN_1.pdf
- Schneider Electric. (2023c). Product End of Life Instructions, EVlink ProAC 7.4 kW [Brochure]. Retrieved from https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=ENVEOLI2202024&p_enDocType=Circularity+Profile&p_File_Name=EoLI_ENVEOLI2202024_5.pdf
- Schwarzer, V. and Ghorbani, R. (2015). Current State-of-the-Art of EV Chargers. Electric Vehicle Transportation Center, University of Central Florida. Retrieved from <https://www.hnei.hawaii.edu/wp-content/uploads/Current-State-of-the-Art-EV-Chargers.pdf>
- Sevdari, K. (2020). Electric Vehicle Chargers Market Outlook. *DTU, Department of Electrical Engineering, Denmark*, 2020. Retrieved from https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/246855622/Electric_vehicle_chargers_market_outlook_2020.pdf
- Shackelford, J. F. (2014). *Introduction to Materials Science for Engineers, 8th Edition*. Pearson.
- Siemens. (2023). VersiCharge AC series [Brochure]. Retrieved from <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:03a863c4-306e-46b0-8b43-2831fac37a93/versicharge-gen-3-datasheet-si-ep-1683.pdf>
- Sterev, N. (2019). New Industrial Business Models: From Linear To Circular Economy Approach. *Trakia Journal of Sciences*, 17 (1), 511-523. doi:10.15547/tjs.2019.s.01.082
- Thompson, M. (2023, September 25). EV Growth Is Surging Faster Than Expected & Could Hit Two-Thirds Of Sales By 2030, Studies Say. *RepairerDrivenNews*. Retrieved from <https://www.repairerdrivennews.com/2023/09/25/ev-growth-is-surging-faster-than-expected-could-hit-two-thirds-of-sales-by-2030-studies-say>
- United Nations. (2023). Sustainable Development Goals. Retrieved from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material>
- Watkins, M., Casamayor, J. L., Ramirez, M., Moreno, M., Faludi, J., Pigosso, D. C. A. (2021). Sustainable Product Design Education: Current Practice. *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation*, 7 (4), 611-637. doi: 10.1016/j.sheji.2021.11.003
- Wongpajan, R., Mathurosemontri, S., Takematsu, R., Xu, H. Y., Uawongsuwan, P., Thumsorn, S., Hamada, H. (2016). Interfacial Shear Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites by the Modified Rule of Mixture and Kelly-Tyson Model. *Energy Procedia*, 89(2016), 328-334. doi: 10.1016/j.egypro.2016.05.043
- Xue, K., Sun, G., Wang, Y., Niu, S. (2021). Optimal Pricing and Green Product Design Strategies in a Sustainable Supply Chain Considering Government Subsidy and Different Channel Power Structures. *Sustainability*, 13(22), 12446. doi: 10.3390/su132212446

Hidrofilik Aşı Kopolimer Membranların Şişme Davranışının Kinetik İncelenmesi

Fatma KURŞUN BAYSAK^{1*}, Gülcan GEYİK²

¹*Kimya Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye*

²*Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, Alaca Avni Çelik Meslek Yüksekokulu, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye*

Geliş: 06.10.2024, Kabul: 24.10.2024, Yayınlanma: 02.12.2024

ÖZ

Son yıllarda, çevreyle uyumlu malzeme ve süreçlerin kullanımı, biyolojik çeşitliliği koruma, su, toprak ve hava kirliliğini azaltma ve yenilenebilir kaynakları teşvik etme hedefleri doğrultusunda büyük önem kazanmıştır. Yeni çevresel sorunların ortaya çıkmasını engellemek ve mevcut problemlere çözüm bulmak da bu çabaların temel amaçları arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, yeşil kimya malzemelerinden biyolojik olarak uyumlu polimer olarak bilinen poli (vinil alkol) (PVA), hazırlanan membranlarda destek polimer olarak tercih edilmiştir. Destek materyeli olan PVA içerisine konulan aşı kopolimerler yine biyolojik uyumluluk gösteren polivinil alkol-aşı-poli(etilen glikol dimetakrilat) (PVA-aşı-ED) ve sodyum aljinat-aşı-poli(etilen glikol dimetakrilat) (ALG-aşı-ED) aşı kopolimerleri kullanılarak hazırlanmıştır. Termal çapraz bağlı membranların şişme davranışı pH 6'da çalışılmış, en iyi şişme oranı membran₆'da %528,8 olarak bulunmuştur. Membranların şişme davranışları Fick difüzyon kanunu ve Schott'un ikinci derece kinetik modeli kullanılarak incelenmiş ve sonuçlarından yararlanılarak kinetik parametreler hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Poli(vinil alkol); Sodyum aljinat; Membran; Şişme

Kinetic Investigation of Swelling Behavior of Hydrophilic Graft Copolymer Membranes

ABSTRACT

In recent years, the use of environmentally compatible materials and processes has gained great importance in line with the goals of protecting biodiversity, reducing water, soil, and air pollution, and promoting renewable resources. These efforts' main objectives include preventing the emergence of new environmental problems and finding solutions to existing problems. In this study, poly (vinyl alcohol) (PVA), known as a biocompatible polymer from green chemistry materials, was preferred as a support polymer in the prepared membranes. The graft copolymers placed in the support material PVA were prepared by using the biocompatible polyvinyl alcohol-graft-poly(ethylene glycol dimethacrylate) (PVA-graft-ED) and sodium alginate-graft-poly(ethylene glycol dimethacrylate) (ALG-graft-ED) graft copolymers. The swelling behavior of the thermally cross-linked membranes was studied at pH 6 and the best swelling ratio was found to be 528.8% at membrane₆. The swelling behavior of the membranes was investigated using Fick's diffusion law and Schott's second-order kinetic model, and kinetic parameters were calculated using the results.

Keywords: Poly(vinyl alcohol); Sodium alginate; Membrane; Swelling

1. GİRİŞ

Membranların şişme davranışlarının anlaşılması, çeşitli endüstriyel, biyomedikal ve çevresel uygulamalar açısından kritik öneme sahiptir. Şişme çalışmaları, polimer bazlı malzemelerin su veya diğer çözücülerini absorplamasıyla ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal değişimlerin analizini sağlar. Şişme mekanizmalarının anlaşılması, biyomedikal cihazlarda ve ilaç salım sistemlerinde polimer bazlı materyallerin performansını optimize etmek için hayati bir rol oynar. Özellikle hidrojel membranlar, biyouyumlulukları ve yüksek su tutma kapasiteleri nedeniyle ilaç taşıma sistemleri, yara örtüleri ve doku mühendisliği gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar (N. A. Peppas, Bures, Leobandung, & Ichikawa, 2000). Membranların su tutma kapasiteleri ve şişme özellikleri, atık suyun içindeki kirleticilerin filtrelenmesini sağlar. Su geçirgenliği ve mekanik dayanıklılık gibi faktörler, membranın şişme özellikleriyle ilişkilidir. İyi optimize edilmiş bir şişme kapasitesi, membranın gözenekliliğini artırarak filtrasyon verimliliğini yükseltir (Baker, 2023). Membranların şişme davranışını açıklamak için çeşitli kinetik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, genellikle bir polimer membran ya da jel fazına su veya çözücünün difüzyonunu ve polimerin bu sıvıyı absorbe etmesiyle gerçekleşen şişme sürecini açıklamaya odaklanır.

Membranların şişme davranışını Fick difüzyon modeli ile açıklamak mümkündür. Polimerik membranların bir çözücü veya su ile etkileşimi sırasında meydana gelen kütle taşınım süreçlerini açıklamaya çalışır. Şişme, polimer yapısının çözücüyü absorplaması ile oluşur ve bu süreç genellikle zamana bağlı olarak gerçekleşir. Fick'in yasaları, bu süreçte polimer içindeki çözücünün difüzyonunu ve buna bağlı olarak membranın şişme davranışını modellemekte kullanılır (Korsmeyer, Gurny, Doelker, Buri, & Peppas, 1983; Nicholas A Peppas & Brannon-Peppas, 1994; Ritger & Peppas, 1987). Polimerik membranların şişme dinamikleri üzerinde Fick'in difüzyon yasaları kullanılırken, bu difüzyon davranışını daha iyi anlamak için n sabiti ile temsil edilen bir kinetik model kullanılır. Bu yaklaşım, özellikle Fickian ve non-Fickian (anormal) difüzyon süreçlerinin ayrımını yapmada önemli rol oynar (Geyik & Işıklan, 2021). Şişme kinetikleri Peppas-Korsmeyer modeli adı verilen bir denklemle tanımlanır ve bu denklem Fick'in n sabitini içerir (Bal, Özkahraman, Gök, & Acar, 2014);

$$F = \frac{Q_t}{Q_e} kt^n \quad (1)$$

F: Şişme kesri,

Q_t: Membranın t anında absorpladığı su miktarı

Q_e: Membranın denge durumunda absorpladığı maksimum su miktarı

k: Fick sabiti,

n: Difüzyon mekanizmasını tanımlayan üstel.

Bu denklem, polimerik membranların şişme davranışını açıklamak için kullanılır ve n değeri, şişme sırasında hangi tip difüzyon mekanizmasının etkili olduğunu belirler. Difüzyonun türüne bağlı olarak, membran içinde suyun emilim hızı ve miktarı değişiklik gösterir. Difüzyon süreci tamamen kontrol altında olduğunda, su moleküllerinin membrana giriş hızı bu süreci yönlendirir. Ancak, relaksasyon kontrollü bir durumda, suyun membranın moleküler yapısını değiştirmesi ve membranın bu değişim esnasında genişleme kapasitesi önem kazanır. Eşitlik 1, lineer bir biçimde yeniden düzenlendiğinde, Eşitlik 2 ortaya çıkar.

$$\ln F = \ln k + n \ln t \quad (2)$$

Eğer n sabiti 0,5 veya daha küçükse, şişme tamamen Fick difüzyonu ile kontrol edilir. Bu durumda, çözücü moleküllerinin difüzyonu membran yapısındaki polimer zincirlerinin hareketinden çok daha hızlıdır. Yani, difüzyon hızı, polimerin fiziksel şişme hızını belirleyen temel etkidir. n sabiti 0,5 ile 1 arasındaysa, difüzyon süreci Fick olmayan (anormal) difüzyon olarak adlandırılır. Bu durumda, difüzyon hızı ve polimer yapısının gevşeme hızı birbirine benzer hızlardadır. Yani hem çözücü molekülleri hem de polimer zincirlerinin hareketi şişme sürecini etkiler. Eğer n sabiti 1'e eşitse, bu durum Case-II difüzyon olarak adlandırılır. Bu durumda, polimer zincirlerinin gevşeme hızı, çözücü moleküllerinin difüzyon hızından çok daha yüksektir. Bu tür difüzyon, genellikle polimer zincirlerinin gevşemesinin ve çözücünün polimer yapısına girişinin sınırlı olduğu durumlardır. Burada polimer yapısının değişimi (örneğin, polimerin hidrolizi veya çözülmesi) daha baskındır (Geyik & Işıklan, 2021).

Membranların şişme davranışını inceleyen diğer denklem Schott'un ikinci dereceden kinetik modelidir. Polimerik materyallerin şişme kinetiklerini açıklamak için kullanılan bir modeldir. Bu model, şişme sırasında polimerin çözücü moleküllerini nasıl emdiğini ve polimerin nasıl genişlediğini tanımlar. Schott'un ikinci dereceden kinetik modeli, şişme hızının çözücünün polimer tarafından emilmesi ve polimerin genişlemesiyle bağlantılı olduğunu öngörür. Bu modelde, şişme oranının zamanla değişimi, mevcut şişme ile denge şişmesi (S_{eq}) arasındaki farkın karesi ile ilişkilendirilir. Schott'un kinetik formülü Eşitlik 3'te sunulmuştur.

$$\frac{dS}{dt} = k_2(S_{eq} - S)^2 \quad (3)$$

Bu denklemde, S şişme oranını, S_{eq} denge şişme oranını ve k_2 şişme hız sabitini temsil etmektedir. Bu model, bir polimerin belirli bir süre sonra suyu ne kadar hızlı emdiğini ve ne kadarının dengede kalacağını açıklamak için kullanılmaktadır. Başlangıç koşulları olarak, $t = 0$ anında şişme oranı $S = 0$ olarak alınmıştır. Ayrıca, t süresi sonunda şişme oranı $S = S_{eq}$ 'ye ulaşmaktadır. Bu başlangıç koşullarıyla birlikte, Eşitlik 3'ün integrali alındığında, Eşitlik 4'e ulaşılır.

$$\frac{t}{S} = \frac{1}{k_2 S_{eq}^2} + \frac{1}{S_{eq}} t \quad (4)$$

S: Membranın t zamanındaki şişme oranını

k_2 : Şişme hız sabiti,

S_{eq} : Denge şişme oranı, membranın su absorpsiyon sürecinde maksimum ulaştığı şişme oranı

$1/(k_2 S_{eq}^2)$: Başlangıç şişme hızı (r_0)

Eşitlik 4'te t/S oranı ile zaman (t) arasında doğrusal bir ilişki görülmektedir. Doğrusal grafiğin eğimi, şişme hız sabiti olan k_2 'nin bir fonksiyonudur. Buna göre, eğimin büyüklüğü, polimerin suyu ne kadar hızlı emdiği hakkında bilgi verirken, y-eksenini kestiği nokta ise polimerin denge şişme oranını (S_{eq}) göstermektedir.

Membranların şişme özellikleri, atık suyun içindeki kirleticilerin filtrelenmesini sağladığından, su geçirgenliği ve mekanik dayanıklılık gibi faktörler, membranın şişme özellikleriyle ilişkilidir. Bu bağlamda, doğal polimerler zayıf stabiliteyi nedeniyle dar kullanım alanlarına sahip olduklarından, polimerlerin hem doğallıklarını koruma hem de sahip oldukları kısıtlı özellikleri maksimum düzeyde kullanma olanağı sağlayan aşılı kopolimerizasyon yöntemi hayat kurtarıcı olmaktadır (Geyik & Işıklan, 2023; Meimoun et al., 2018; Pourmahdi, Abdollahi, & Nasiri, 2023; Rahman, Islam, & Maniruzzaman, 2023). Polimerlerin aşılama ile modifikasyonu, bu yolla elde edilen kopolimerlerin çeşitli kullanımına giden yolları açarak yeni bir umut doğurmuştur (Jayakumar, Prabakaran, Reis, & Mano, 2005). Aşılı kopolimerizasyon, polimerin morfolojisini, fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Aşılı kopolimerizasyonu, genellikle ilgili polimerlerin özelliklerinin bir kombinasyonuna sahip malzemelere erişim sağlayan çok yönlü bir fonksiyonelleştirme yolu olup, ana polimerin çözünürlüğünü, nano boyutlu morfolojisini, biyouyumluluğunu, mevcut iletkenliğini ve özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir (Meimoun et al., 2018; Purohit, Bhatt, Mittal, Abdellatif, & Farghaly, 2023).

Doğal polimer olan sodyum aljinat, deniz yosunlarından elde edilen bir polisakkarittir. Özellikle kahverengi deniz yosunlarından (Phaeophyceae sınıfı) elde edilen bir biyopolimer olan aljinat, sodyum tuzu formunda yaygın olarak kullanılır. Kimyasal yapısı, β -D-mannuronik asit ve α -L-guluronik asit monomerlerinin birbirine bağlanmasından oluşan bir yapıya sahiptir (Geyik, Güncüm, & Işıklan, 2023). Sodyum aljinat, hidrojel oluşturma yeteneği, biyouyumluluk ve biyobozunurluk gibi özellikleri sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Biyouyumluluğu ve biyobozunurluğu nedeniyle yara iyileştirme, doku mühendisliği ve ilaç taşıma sistemlerinde hidrojel formunda kullanılmaktadır (Nuran Işıklan & Küçükbalci, 2012). Gıda sanayisinde, gıda katkı maddesi, emülgatör, stabilizatör ve kıvam artırıcı olarak işlev görmektedir. Jelleştirici özelliği ile yenilebilir filmler ve kapsüller için de kullanılmaktadır. Su arıtma süreçlerinde ağır metallerin uzaklaştırılmasında etkili olduğu kanıtlanmıştır (Gao et al., 2020). Bu

avantajlarının yanı sıra mekanik dayanımı sınırlı olması ve hızlı şekilde parçalanması gibi özelliklerini bertaraf etmek için aşı kopolimerizasyon yöntemi tercih edilmektedir (Geyik, 2023; Lee & Mooney, 2012).

Suda çözünür sentetik bir polimer olan PVA çeşitli endüstriyel ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. PVA, yüksek kimyasal dayanıklılığı, mükemmel film oluşturma kapasitesi, biyoyumluluğu ve çevre dostu olması nedeniyle birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Kurşun, 2020). PVA bazlı hidrojeller, ilacın kademeli ve sürekli bir şekilde salınmasını sağlaması kontrollü ilaç salımı için kullanımını genişletmektedir (Jadoun & Nirmala Kumari, 2019). Nem tutma yeteneği, jel formunda yaraya uygulandığında nemli bir iyileşme ortamı sunduğu için yara örtülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çevre dostu uygulamalar için PVA bazlı hidrojel ve membranlar su arıtma sistemlerinde filtrasyon, ağır metallerin uzaklaştırılması ve kirleticilerin tutulması için kullanılmaktadırlar (Wang et al., 2021). PVA, yüksek sıcaklıklarda kararlılığını yitirebilmektedir ve mekanik özellikleri değişebilmektedir. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için aşı kopolimerizasyonu kullanılmaktadır (Nikolaos A. Peppas & Merrill, 1976).

Etilen glikol dimetakrilat (ED), çapraz bağlayıcı özelliklere sahip bir vinil monomeridir. Kimyasal formülü $C_{10}H_{14}O_4$ olan bu bileşik, iki metakrilat grubuna sahip bir yapıdır ve polimerizasyon süreçlerinde zincirler arası bağlar oluşturarak çapraz bağlı ağ yapılarının meydana gelmesini sağlar (Ayhan & Ayhan, 2014; Lin, Tai, Ou, & Don, 2012; Şen Karaman & Pamukçu, 2022). ED, diş hekimliği, biyomedikal malzemeler, kaplamalar, kompozitler ve çeşitli polimer üretimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ED, diş hekimliğinde kullanılan akrilik bazlı dolgu malzemelerinde, protezlerde ve diş yapıştırıcılarında çapraz bağlayıcı olarak kullanılmaktadır (Moszner & Salz, 2001). Bu sayede malzemelerin dayanıklılığı ve sertliği artırılır. Polimerizasyon sürecinde, metakrilat grupları diğer diş reçineleriyle etkileşime girer ve daha güçlü ve kararlı yapılar oluşmasını sağlamaktadır (N. A. Peppas et al., 2000).

Bu çalışmada PVA membranın sudaki zayıf stabilitesini azaltmak ve aynı zamanda membranın hidrofilik yapısını korumak amaçlanmıştır. Bu amaçla, yine hidrofilik karakter gösteren ve ayrıca biyoyumluluk sergileyen ALG ve ED kullanılarak aşı kopolimerizasyon yapılmıştır. Serbest radikal katılma polimerizasyonu ile PVA ve ALG üzerine ayrı ayrı ED monomeri CAN, APS ve BPO başlatıcıları ayrı ayrı kullanılarak aşılanmıştır. Elde edilen PVA-aşı-ED ve ALG-aşı-ED kopolimerleri, PVA ile karıştırılarak membranlar hazırlanmış ve bu membranların PVA membrana göre hidrofilitesi karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

Poli(vinil alkol) (PVA), sodyum aljinat (ALG), etilen glikol dimetakrilat (ED), seryum amonyum nitrat (CAN), amonyum persülfat (APS), benzoil peroksit (BPO), N,N,N',N'- tetrametil-etilendiamin (TEMED), potasyum dihidrojen fosfat, sodyum hidroksit, asetik asit, aseton, etanol ve metanol Sigma firmasından temin edilmiştir.

2.2. Aşı Kopolimerlerin Sentezleri

Aşı kopolimerlerin sentezleri literatürde mevcut olan yöntemler üzerinde birkaç değişiklik yapılarak gerçekleştirilmiştir (Geyik & Işıklan, 2020; N. Işıklan & Kurşun, 2013; N. Işıklan, Kurşun, & Inal, 2009, 2010; Kurşun & Işıklan, 2016, 2020). Kısaca; PVA ve ALG'in ayrı ayrı çözeltileri hazırlanarak, azot gazı atmosferi altında ve sabit sıcaklıkta, ED monomeri, CAN, APS ya da BPO başlatıcısı ve TEMED hızlandırıcısı ilave edilerek aşı kopolimerizasyon gerçekleştirilmiştir. Oluşan aşı kopolimerler, soğuk asetonda çöktürülmüş ve etanolla yıkandıktan sonra vakum etüvünde kurutularak muhafaza edilmiştir. Aşı yüzdesi ve aşılama verimi aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Aşı Yüzdesi} = \left(\frac{m_g - m_p}{m_p} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Aşılama Yüzdesi (\%)} = \left(\frac{m_g - m_p}{(m_g - m_p) + m_h} \right) \times 100 \quad (6)$$

m_g : aşı kopolimer kütlesi

m_p : polimer kütlesi

m_h : homopolimer kütlesi

2.3. Membranların Hazırlanması

Aşı kopolimer çözeltileri %50 (v/v) oranlarında PVA çözeltisi ile karıştırılarak petri kaplarına dökülmüştür. Karışım membranlar 30 °C'de vakum etüvünde kurutulduktan sonra 1 saat boyunca 150 °C'de etüvde termal olarak çapraz bağlanmıştır. Membranların kalınlıkları mikrometre yardımı ile ölçülerek belirlenmiş ve 50 µm kalınlığa sahip membranlar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan membranlara ait bilgiler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1: Çalışmada kullanılan membranlara ait bilgiler.

Kısaltma	Birinci Bileşen	İkinci Bileşen	Aşı Kopolimer Başlatıcı Türü
Membran ₀	PVA	-	-
Membran ₁	PVA	PVA-aşı-ED ₁	Seryum Amonyum Nitrat
Membran ₂	PVA	PVA-aşı-ED ₂	Amonyum Persülfat
Membran ₃	PVA	PVA-aşı-ED ₃	Benzoil Peroksit
Membran ₄	PVA	ALG-aşı-ED ₁	Seryum Amonyum Nitrat
Membran ₅	PVA	ALG-aşı-ED ₂	Amonyum Persülfat
Membran ₆	PVA	ALG-aşı-ED ₃	Benzoil Peroksit

2.4. Şişme Oranlarının Belirlenmesi

Membranların şişme deneyi, oda sıcaklığında pH 6 tamponunda her 30 saniyede bir ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Şişme derecesi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır;

$$SO = \left(\frac{m_s - m_d}{m_d} \right) \times 100 \quad (7)$$

SO: şişme oranı

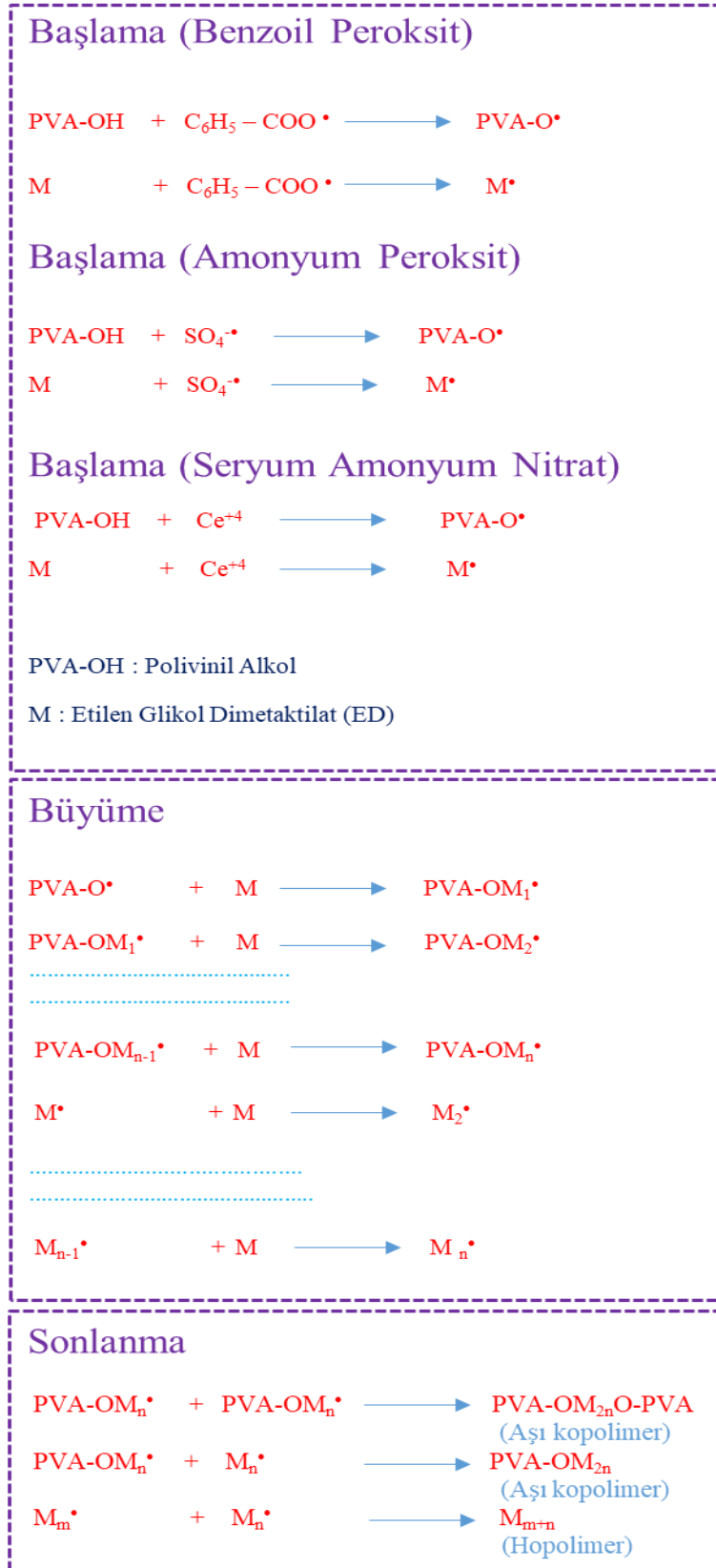
m_s: şişmiş membran ağırlığı

m_d: kuru membran ağırlığı

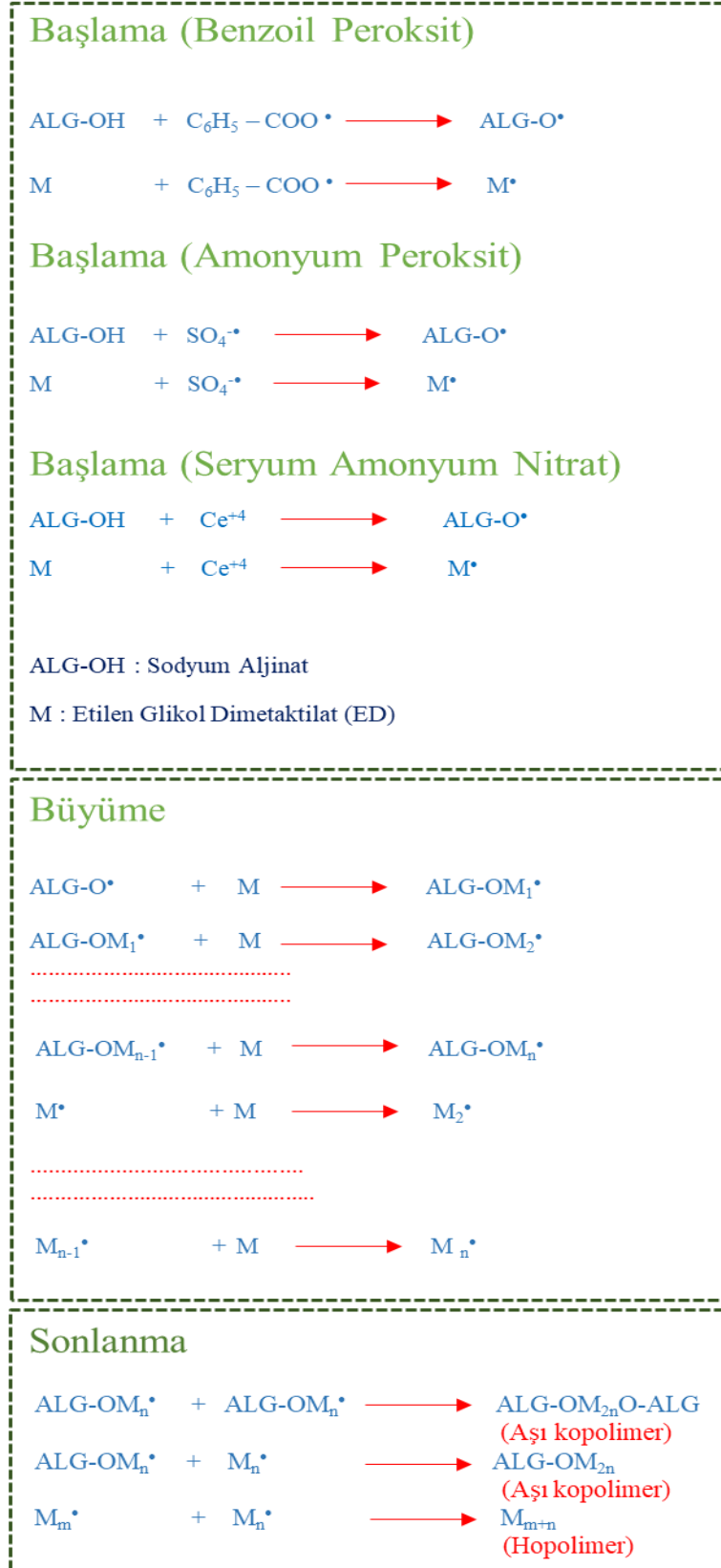
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Aşı Kopolimerizasyon Mekanizmaları

Bu çalışmada, serbest radikal aşı kopolimerizasyon yöntemi kullanılmış ve aşılama reaksiyonunun etkili bir redoks başlatıcı sistemi olarak CAN, APS ve BPO olmak üzere üç farklı başlatıcı seçilmiştir. ED gruplarının PVA ve ALG üzerine aşılmasının kesin mekanizması tam olarak bilinmemekle birlikte, önerilen mekanizmalar Şekil 1 ve 2’de verilmiştir. Bu redoks sistemlerinde, başlatıcılar birer oksitleyici madde iken, PVA ve ALG ise indirgeyici maddedir. TEMED, başlatıcıların homolitik parçalanmasını hızlandırarak serbest radikalleri oluşturur. Bu birincil serbest radikaller, PVA ya da ALG ana zincirindeki OH grubundan H’yi soyutlar ve Şekil 1 ve 2’de gösterildiği gibi PVA-O ya da ALG-O makro radikallerini oluşturur. Bu radikaller, ED yapısının çift bağını (C=C) açar ve monomerle kovalent bağ oluşturur. Böylece ilk monomerin makromoleküle aşılması gerçekleşir. Öte yandan, poli(ED)’nin homopolimer zincirleri, başlatıcı radikallerin ED monomerine saldırması ve ardından bir bağ ile başka bir ED ile bağlanan ve



Şekil 1: PVA-aşı-ED'nin aşı kopolimerizasyon mekanizması.



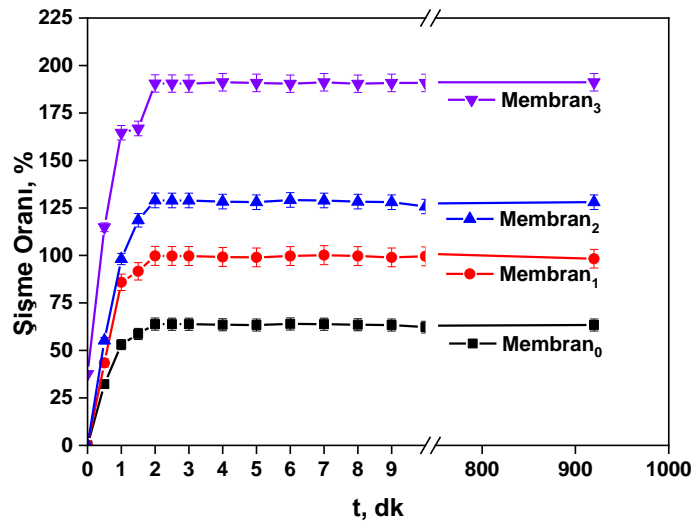
Şekil 2: ALG-aşı-ED'nin aşı kopolimerizasyon mekanizması.

poli(ED) makro radikallerinin yayılmasına yol açan ED serbest radikallerinin oluşması nedeniyle oluşabilir. ED veya poli(ED) makro radikalleri, PVA-aşı-ED ya da ALG-aşı-ED kopolimerini oluşturmak için PVA ya da ALG makro radikalleriyle birleşebilir (N. Işıklan & Kurşun, 2013; N. Işıklan et al., 2009, 2010; Kurşun & Işıklan, 2020).

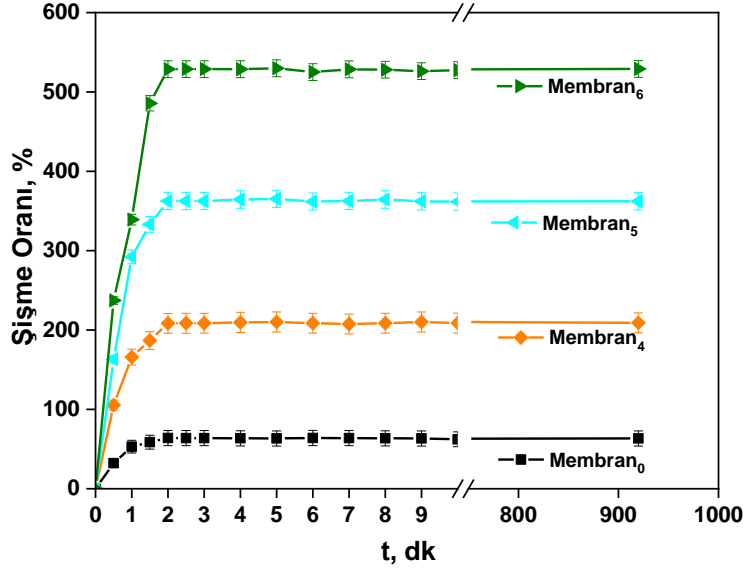
3.2. Şişme Oranları

Bir saf polimerin ya da karışım olarak hazırlanan polimerik malzemenin şişme performansı ilaç taşıyıcı sistemler, atık su arıtma sistemleri, kontrollü salım yapan sistemler gibi birçok uygulama için önemli bir parametredir. Çalışmada hazırlanan membranların atık su arıtımında kullanılabilirliği için ortalama atık su pH'sı olan pH 6 tamponunda şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Membranların pH 6 tamponunda, 25°C'de gerçekleştirilen şişme oranlarının zamana bağlı değişimleri Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir. Şekillerden, membranların şişme oranlarının aşı kopolimer içeriği arttıkça arttığı açıkça görülmektedir.

Membran içerisindeki PVA ya da ALG içeriğinin varlığı kıyaslandığında ise membran içerisinde ALG içeren aşı kopolimer varlığının membranın şişmesine olumlu katkı sağladığı bulunmuştur. PVA aşırı hidrofilik karakterde olmasına rağmen, membran haline getirildiğinde sıkı istiflenmesi nedeniyle daha kristalin bir yapı sergilemektedir. Buna karşın, ALG-aşı-ED aşı kopolimeri, PVA membrana kıyasla daha fazla dallanmış fonksiyonel gruplara sahip olduğundan membran içerisinde fazlaca serbest hacim oluşturarak daha fazla şişme sergilemesine olanak sunmaktadır. Başka bir deyişle, bu durum, aşılama ile yapıya ekstra fonksiyonel CO ve OH gruplarının dahil edilmesi nedeniyle membranlar ile su arasındaki afinitenin artmasına bağlı olarak zamanla değişimine atfedilebilir.



Şekil 3: Membranların süre ile % şişme oranları değişimi.



Şekil 4: Membranların süre ile % şişme oranları değişimi.

Ayrıca, çalışmada ALG-aşı-ED aşı kopolimeri CAN, APS ve BPO olmak üzere üç farklı başlatıcı kullanılarak sentezlenmiş ve her bir PVA/ALG-aşı-ED membranlarının şişme davranışları incelenmiştir. Kullanılan her bir başlatıcının aşı kopolimer karışım membranda farklı şişme sonuçları gösterdiği, şişme değerinin membran₄'ten membran₆'ya doğru arttığı bulunmuştur. Bu durum, başlatıcıların aşı kopolimerleşme sırasında polimerik zincirlerinin dizilimlerinde farklılıklar oluşturmasına, bu farklılıklar nedeniyle membran içi istiflenmenin etkilenecek şişme davranışlarının değişmesine atfedilebilir. Membran içi sıkı istiflenmenin şişme oranının, rastgele istiflenmeye kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, membran₆, PVA membranına kıyasla yüksek şişme performansı sergilemiştir. Bununla birlikte membranların denge şişme derecesine 2 dakikada ulaştığı ve en iyi şişme oranın membran₆'da %528,8 olduğu bulunmuştur.

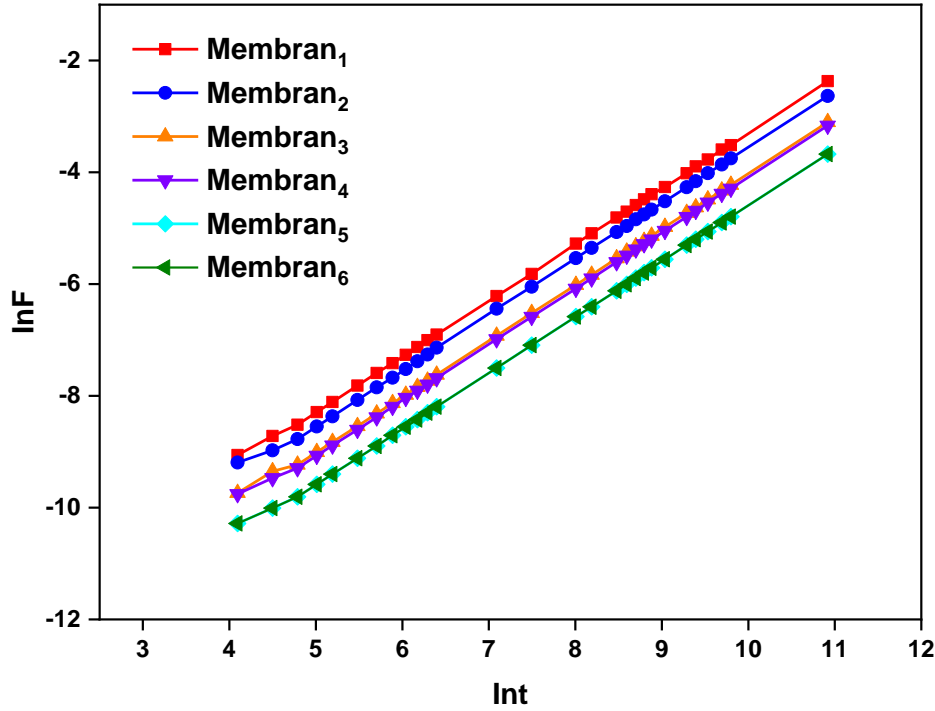
3.3. Kinetik Hesaplamalar

Membranların şişme davranışı Fick difüzyon ve Schott'un ikinci dereceden kinetik modelleri ile açıklanmıştır. PVA/PVA-aşı-ED ve PVA/ALG-aşı-ED membranlarının Fick difüzyon kanununa göre çizilen $\ln t$ 'ye karşı $\ln F$ grafiği Şekil 5'te sunulmuştur. Çizelge 2'deki verilere göre, PVA membranı hariç n değerlerinin 0,5 ile 1 arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu aralıktaki n değeri, suyun polimer zincirlerine nüfuz etme hızının, polimer zincirlerinin gevşemesinden daha hızlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, şişme hızını kontrol eden temel faktörün, polimer zincirlerinin gevşeme süreci olduğunu işaret eder. Yani, su molekülleri membrana hızlı bir şekilde girerken, polimerin genişlemesi daha yavaş gerçekleşir. Bu tip davranışa "Fick olmayan" (Non-Fickian) difüzyon adı verilir. Non-Fickian difüzyon, suyun polimer

matriksine yayılması sırasında hem difüzyon sürecinin hem de polimer zincirlerinin yapısal gevşemesinin aynı anda etkili olduğu durumlarda ortaya çıkarmaktadır. Polimer zincirlerinin gevşeme hızı, suyun matriks içine giriş hızına göre daha yavaş olduğunda, bu süreç şişme hızını sınırlayan ana faktör haline gelmektedir.

Çizelge 2: Fick yasasına ait kinetik parametreler.

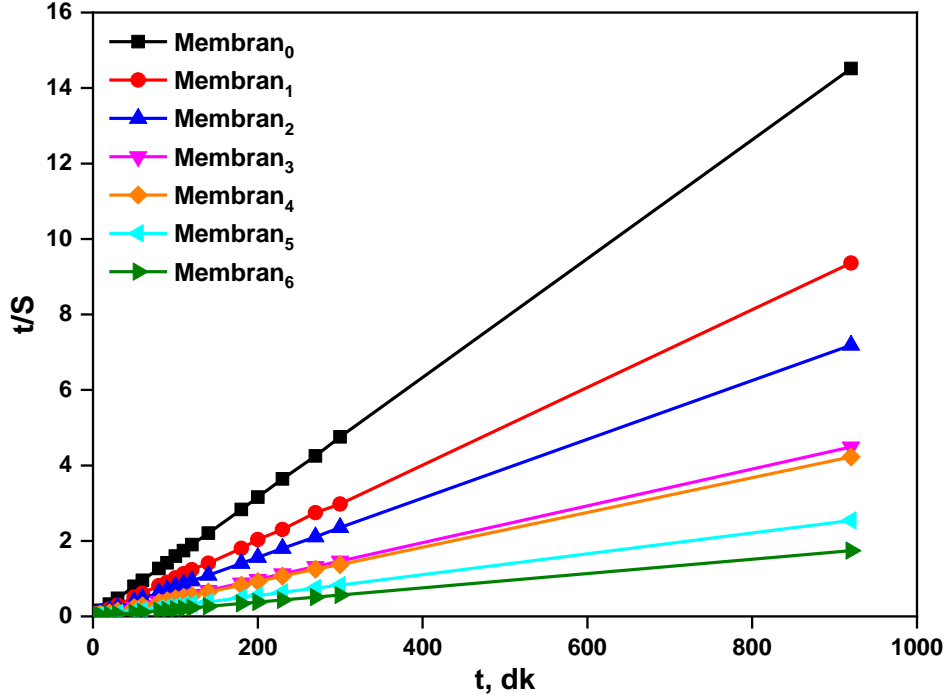
Kod	n	$\ln k$	$k \times 10^6$ (min^{-n})	R^2	Difüzyon Mekanizması
Membran ₀	0,4937	-2,7584	63	0,9423	Fick tipi
Membran ₁	0,9945	-13,247	1,76	0,9997	Fick olmayan
Membran ₂	0,9899	-13,463	1,42	0,9994	Fick olmayan
Membran ₃	0,9886	-13,922	0,89	0,9995	Fick olmayan
Membran ₄	0,9891	-13,986	0,84	0,9995	Fick olmayan
Membran ₅	0,9908	-14,541	0,48	0,9996	Fick olmayan
Membran ₆	0,9591	-14,887	0,34	0,9858	Fick olmayan



Şekil 5: 'ln t'nin 'ln F'ye karşı doğrusal grafikleri.

PVA/PVA-aşı-ED ve PVA/ALG-aşı-ED membranlarının t zamanındaki % şişme oranını, Schott'un ikinci dereceden kinetik modeli kullanılarak incelenmiş ve pH 6'da 't/S'nin 't'ye karşı doğrusal grafikleri Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'daki sonuçlar, membranların şişme yüzdelerinin ikinci derece kinetik denkleme uyduğunu göstermektedir. Bu kinetik model, membranların şişme oranlarının, su moleküllerinin membran

zincirlerine difüzyonu ve ardından zincirlerin gevşemesi tarafından yönetildiğini öne sürmektedir (Kurşun & Işıklan, 2020). Ayrıca ayrıntılı şişme kinetik faktörleri Çizelge 3'te sunulmuştur. t/S 'nin t 'ye karşı doğrusal grafiklerinin eğiminden bulunan teorik S_{eq} , deneysel S_{eq} şişme yüzdesine yakındır ve beklendiği gibi membranlarda kullanılan aşı kopolimerlerin hidrofilik karakteri arttıkça teorik S_{eq} ve k_2 değerleri Çizelge 3'de görüldüğü gibi PVA (Membran₀) membranından daha yüksektir.



Şekil 6: t/S 'nin t 'ye karşı doğrusal grafikleri.

Çizelge 3: Membranların şişme kinetik faktörleri.

Membran	Deneysel S_{eq} (%)	Teorik S_{eq} (%)	k_2 (min^{-1})	R^2	r_0 (min^{-1})
Membran ₀	63,37	63,29	12,01	1	333
Membran ₁	98,28	98,03	23,06	0.999	416
Membran ₂	128,04	128,20	26,29	1	625
Membran ₃	204,93	204,08	41,64	1	1000
Membran ₄	217,53	217,09	28,35	1	1666
Membran ₅	362,19	357,14	63,77	1	2000
Membran ₆	528,92	526,31	83,10	1	3333

4. SONUÇ

Bu çalışma, PVA membranındaki zayıf stabilitesini azaltmak ve aynı zamanda membranın hidrofilik yapısını korumak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Serbest radikal katılma polimerizasyon yöntemi kullanılarak PVA ve ALG üzerine ayrı ayrı ED monomeri CAN, APS ya da BPO başlatıcıları kullanılarak aşılanmıştır. Elde edilen PVA-aşı-ED ve ALG-aşı-ED kopolimerleri, PVA ile ayrı ayrı karıştırılarak membranlar hazırlanmış ve bu membranların PVA membrana göre hidrofilitesi karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde PVA destek polimerinin içerisine aşı kopolimer girmesi ile membranın daha hidrofilik karaktere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, üç farklı başlatıcı kullanılarak başlatıcının aşı kopolimerleşme üzerindeki etkisi incelendiğinde BPO başlatıcısı kullanıldığında aşı kopolimer zincilerinin daha çok hidrofilik özellik gösterdiği ve bu sayede daha çok şişme sergilediği gözlenmiştir. En iyi şişme oranı PVA membrandan yaklaşık 8,3 kat fazla olan membran₆'da %528,8 olarak bulunmuştur. Kinetik sonuçlar incelendiğinde membran₀'ın Fick tipi difüzyon gösterdiği, aşı kopolimerlerden elde edilen membranların ise Fick olmayan (Non-Fickian) difüzyon davranışı sergilediği görülmüştür. Ayrıca membran₀ ve aşı kopolimerlerden elde edilen diğer membranların şişme yüzdelерinin Schott'un ikinci derece kinetik modeline uyduğunu görülmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya KLÜBAP-238 ve KLÜBAP-264 numaralı projeler aracılığı ile destekte bulunan Kırklareli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimizi sunarız.

YAZARLARIN KATKILARI

F.K.B.: Yöntem, analiz, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

G.G.: Analiz, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- Ayhan, H., & Ayhan, F. (2014). Kontrollü ilaç salımı için fotoçapraz bağlı poli(Etilen glikol) hidrojeller. *Turkish Journal of Biochemistry*, 39(4), 403–415. Retrieved from <https://doi.org/10.5505/tjb.2014.09719>
- Baker, R. W. (2023). *Membrane technology and applications* (Third Edition). John Wiley & Sons.
- Bal, A., Özkahraman, B., Gök, M. K., & Acar, I. (2014). Investigation of Swelling, Adsorption and Mechanical Properties of Sodium Acrylate Based Hydrogel and Cryogels. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 20(7), 258–265. Retrieved from <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.08370>

- Gao, X., Guo, C., Hao, J., Zhao, Z., Long, H., & Li, M. (2020, December 1). Adsorption of heavy metal ions by sodium alginate based adsorbent-a review and new perspectives. *International Journal of Biological Macromolecules*. Elsevier B.V. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.046>
- Geyik, G. (2023). Ca²⁺ İyonları ile Çapraz Bağlı Sodyum Aljinat/κ-Karagenan Kürelerden Nifedipinin Kontrollü Salımı. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 16(1), 150–162. Retrieved from <https://doi.org/10.29137/umagd.1384946>
- Geyik, G., Güncüm, E., & Işıklan, N. (2023). Design and development of pH-responsive alginate-based nanogel carriers for etoposide delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 250, 126242. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126242>
- Geyik, G., & Işıklan, N. (2020). Synthesis, characterization and swelling performance of a temperature/pH-sensitive κ-carrageenan graft copolymer. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 359–370. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.129>
- Geyik, G., & Işıklan, N. (2021). Design and fabrication of hybrid triple-responsive κ-carrageenan-based nanospheres for controlled drug delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 192, 701–715. Retrieved 6 October 2023 from <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.10.007>
- Geyik, G., & Işıklan, N. (2023). Chemical modification of κ-carrageenan with poly(2-hydroxypropylmethacrylamide) through microwave induced graft copolymerization: Characterization and swelling features. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, 123888. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123888>
- Işıklan, N., & Kurşun, F. (2013). Synthesis and characterization of graft copolymer of sodium alginate and poly(itaconic acid) by the redox system. *Polymer Bulletin*, 70(3). Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00289-012-0876-x>
- Işıklan, N., Kurşun, F., & Inal, M. (2009). Graft copolymerization of itaconic acid onto sodium alginate using ceric ammonium nitrate as initiator. *Journal of Applied Polymer Science*, 114(1), 40–48. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/app.30549>
- Işıklan, N., Kurşun, F., & Inal, M. (2010). Graft copolymerization of itaconic acid onto sodium alginate using benzoyl peroxide. *Carbohydrate Polymers*, 79(3), 665–672. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.09.021>
- Işıklan, Nuran, & Küçükbalci, G. (2012). Microwave-induced synthesis of alginate-graft-poly(N-isopropylacrylamide) and drug release properties of dual pH- and temperature-responsive beads. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 82(2), 316–331. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2012.07.015>
- Jadoun, S., & Nirmala Kumari, J. (2019). Polyvinyl Alcohol (PVA) Based Nanocomposites for Biomedical and Tissue Engineering Applications. *Biocomp. Bio. Med.*, 20, 111–126.
- Jayakumar, R., Prabakaran, M., Reis, R. L., & Mano, J. F. (2005). Graft copolymerized chitosan - Present status and applications. *Carbohydrate Polymers*, 62(2), 142–158. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.07.017>
- Korsmeyer, R. W., Gurny, R., Doelker, E., Buri, P., & Peppas, N. A. (1983). Mechanisms of solute release from porous hydrophilic polymers. *International Journal of Pharmaceutics*, 15(1), 25–35. Retrieved 22 October 2024 from [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(83\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0378-5173(83)90064-9)
- Kurşun, F. (2020). Application of PVA-b-NaY zeolite mixture membranes in pervaporation method. *Journal of Molecular Structure*, 1201, 127170. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127170>
- Kurşun, F., & Işıklan, N. (2016). Development of thermo-responsive poly(vinyl alcohol)-g-poly(N-isopropylacrylamide) copolymeric membranes for separation of isopropyl alcohol/water mixtures via pervaporation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 41. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.07.011>
- Kurşun, F., & Işıklan, N. (2020). Synthesis, characterization, and swelling behavior of poly(N-hydroxymethylacrylamide) grafted poly(vinyl alcohol). *Journal of Applied Polymer Science*, 137(35). Retrieved from <https://doi.org/10.1002/app.49014>
- Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. *Progress in Polymer Science (Oxford)*. Elsevier Ltd. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>
- Lin, M. C., Tai, H. Y., Ou, T. C., & Don, T. M. (2012). Preparation and characterization of UV-sensitive chitosan for UV-cure with poly(ethylene glycol) dimethacrylate. *Cellulose*, 19(5), 1689–1700. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9758-5>

- Meimoun, J., Wiatz, V., Saint-Loup, R., Parcq, J., Favrelle, A., Bonnet, F., & Zinck, P. (2018, January 1). Modification of starch by graft copolymerization. *Starch/Staerke*. Wiley-VCH Verlag. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/star.201600351>
- Moszner, N., & Salz, U. (2001). New developments of polymeric dental composites, 26, 535–576. Retrieved from www.elsevier.com/locate/ppolysci
- Peppas, N. A., Bures, P., Leobandung, W., & Ichikawa, H. (2000). Hydrogels in pharmaceutical formulations, 50, 27–46. Retrieved from www.elsevier.com/locate/ejphabio
- Peppas, Nicholas A., & Brannon-Peppas, L. (1994). Water Diffusion and Sorption in Amorphous Macromolecular Systems and Foods. *Journal of Food Engineering*, 22, 189–210.
- Peppas, Nikolaos A., & Merrill, E. W. (1976). Poly(Vinyl Alcohol) Hydrogels: Reinforcement of Radiation-Crosslinked Networks by Crystallization. *J Polym Sci Polym Chem Ed*, 14(2), 441–457. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/pol.1976.170140215>
- Pourmahdi, M., Abdollahi, M., & Nasiri, A. (2023). Effect of lignin source and initiation conditions on graft copolymerization of lignin with acrylamide and performance of graft copolymer as additive in water-based drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 220, 111253. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111253>
- Purohit, P., Bhatt, A., Mittal, R. K., Abdellattif, M. H., & Farghaly, T. A. (2023, January 11). Polymer Grafting and its chemical reactions. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. Frontiers Media S.A. Retrieved from <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1044927>
- Rahman, M. M., Islam, M. M., & Maniruzzaman, M. (2023). Preparation and characterization of biocomposite from modified α -cellulose of Agave cantala leaf fiber by graft copolymerization with 2-hydroxy ethyl methacrylate. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 6, 100354. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100354>
- Ritger, P. L., & Peppas, N. A. (1987). A simple equation for description of solute release II. Fickian and anomalous release from swellable devices. *Journal of Controlled Release*, 5(1), 37–42. Retrieved 22 October 2024 from [https://doi.org/10.1016/0168-3659\(87\)90035-6](https://doi.org/10.1016/0168-3659(87)90035-6)
- Şen Karaman, D., & Pamukçu, A. (2022). Polietilen Glikol Dimetilakrilat Doku İskelelerinin Dentritik Gözenekleri Genişletilmiş Mezogözenekli Silika Nanoparçacıklar ile Katkılandırılması ve In Vitro İncelemeleri. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(1), 229–239. Retrieved from <https://doi.org/10.36306/konjes.1027750>
- Wang, M., Bai, J., Shao, K., Tang, W., Zhao, X., Lin, D., Ye, J. (2021). Poly(vinyl alcohol) Hydrogels: The Old and New Functional Materials. *International Journal of Polymer Science*. Hindawi Limited. Retrieved from <https://doi.org/10.1155/2021/2225426>

İlaç Taşıyıcı Sistemler ve Lipozomlar

Yunus Bora SUBAŞI¹, Beyza ÇALIK¹, Pelinsu KARATAŞ¹, Rumeysa ADIYIL¹,
Pelin SARAÇOĞLU², Murat IHLAMUR^{3*}

¹Biruni Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, İstanbul, Türkiye

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

³Biruni Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, Türkiye

Geliş: 23.07.2024, Kabul: 04.11.2024, Yayınlanma: 03.12.2024

ÖZ

İlaç taşıyıcı sistemler ve lipozomlar, farmasötik alanda son yıllarda önemli bir araştırma ve geliştirme alanı haline gelmiştir. Bu sistemler, ilaçların hedeflenen bölgelere daha etkili bir şekilde taşınması ve bu sayede tedavinin etkinliğinin artırılması amacıyla tasarlanmıştır. Geleneksel ilaç formülasyonları, ilaç moleküllerinin vücutta hızla metabolize edilmesi veya dağılması gibi sorunlarla karşılaşabilmektedir. Bu nedenle, ilaç taşıyıcı sistemler ve özellikle lipozomlar, ilaçların biyolojik sistemlerde daha uzun süre stabil kalmasını sağlayarak terapötik etkinliklerini artırma potansiyeline sahiptir. Bu makalede, ilaç taşıyıcı sistemlerin temel prensipleri, lipozomların yapısı ve özellikleri ile ilaç taşıyıcı sistemlerin kullanım alanlarına odaklanılacaktır. Bu çalışma, ilaç taşıyıcı sistemlerin modern tıpta sağladığı avantajları ve gelecekteki potansiyel uygulama alanlarını ele alarak, bu alandaki araştırmaların önemini vurgulamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Lipozom; İlaç taşıyıcı sistemler; Nanoteknoloji; Farmasötik

Drug Delivery Systems and Liposomes

ABSTRACT

Drug delivery systems and liposomes have become an important research and development area in the pharmaceutical field in recent years. These systems are designed to deliver drugs to targeted areas more effectively and thus increase the effectiveness of treatment. Traditional drug formulations may encounter problems such as rapid metabolism or distribution of drug molecules in the body. Therefore, drug carrier systems, and liposomes in particular, have the potential to increase the therapeutic efficacy of drugs by allowing them to remain stable in biological systems for longer periods of time. In this article, we will focus on the basic principles of drug delivery systems, the structure and properties of liposomes, and the areas of use of drug delivery systems. This study aims to emphasize the importance of research in this field by discussing the advantages of drug carrier systems in modern medicine and their potential future application areas.

Keywords: Liposome; Drug delivery systems; Nanotechnology; Pharmaceutical

1. GİRİŞ

Hastalıklara karşı insanlar ilaç olarak bitki bazlı doğal ürünleri sıklıkla kullanmışlardır. Günümüzde mevcut olan başlıca farmasötik bileşiklerin ve türevlerinin yaklaşık %25'i doğal kaynaklardan elde edilmektedir (Swamy ve Sinniah, 2016; Zengin vd., 2022). Doğal bileşikler kanser, diyabet, kardiyovasküler, inflamatuvar ve mikrobiyal hastalıklar dahil olmak üzere çeşitli hastalıkların tedavisi için araştırılmaktadır. Bunun başlıca nedeni, doğal ilaçların daha düşük toksisite, yan etkiler, düşük fiyat ve iyi terapötik potansiyel gibi avantajlara sahip olmasıdır (Thilakarathna ve Rupasinghe, 2013). Farklı moleküler geçmişlere sahip doğal bileşikler, yeni ilaçların keşfi için bir temel oluşturmaktadır. Bunlar onları yeni ilaçların keşfinde olumlu öncüler haline getirmektedir. İlaç dağıtımında büyük boyutlu malzemelerin kullanımı, in vivo instabilite, zayıf biyoyararlanım, zayıf çözünürlük, vücutta zayıf emilim ve ilaçların olası yan etkileri dahil olmak üzere büyük zorluklar ortaya koymaktadır. İlaçların içerisindeki etken maddenin dokuya ulaşım etkinliği göstermesi gerekmektedir. İlacın içeriğinde bulunan etken maddenin işlevini göstermesi büyük önem arz etmektedir (Armağan vd., 2024). İlacın etki edecek yere varması ve belirli bir süre kalması o bölgede kalması gerekmektedir. Fakat ilaçlar hedef bölgeye ulaşamayabilmekte ya da istenmeyen bölgelerde birikerek dokuya hasar verebilmektedir. Bu da ilaç tedavilerinde istenilmeyen bir durumdur (Ihlamur vd., 2024; Marangoz & Yavuz, 2020). Bu nedenle, ilaçları vücudun belirli bölgelerine hedeflemek için yeni ilaç dağıtım sistemlerinin kullanılması, bu kritik sorunları çözebilecek bir seçenek olabilmektedir. Nanoteknoloji, gelişmiş ilaç formülasyonlarında, hedefleme alanında ve bunların kontrollü ilaç salınımı ve dağıtımında önemli bir rol oynamaktadır. Bu istenmeyen durumların oluşmaması için ilaç taşıyıcı sistemler geliştirilmiştir.

2. İLAÇ TAŞIYICI SİSTEMLER

İlaç taşıyıcı sistemler, ilaçları ya da tanısal görüntüleme maddelerini hedeflenmiş doku ya da hücreye sağlam, güvenli ve etkin bir şekilde taşınımını sağlamaktadır (Ihlamur vd., 2024). Nanopartiküller iki bölümden meydana gelmektedir. Bunlar, taşıyıcı bölüm ve taşıyıcı bölüme bağlı olan ilaçtan meydana gelmektedir. Taşıyıcı bölüm doğal makromolekül ya da sentetik yapıya olabilmektedir. Bu sistem sadece tanı için kullanılacak ise fizyolojik ortamda parçalanması beklenmemektedir. Ancak tedavi için kullanılacak ise fagositoz ile girdiği hücreye ya da dokuya enzimsel aktivite ile parçalama yapmaktadır. Kontrollü salım meydana gelmektedir (Kelleci vd., 2023). Nanopartiküller, nanoküreler, nanokapsüller, lipozomlar, niyozomlar, polimerik sistemler, dendrimerler, kolloid altın, nano boyutlu yarı iletken kristal yapılar (kuantum noktacıkları- QDs), miseller, sfingozomlar, mikrobaloncuklar, mikroküreler ve süper magnetik partiküller, ilaç taşıyıcı sistemlerin bazılarıdır (Kelleci vd., 2024). Bu çeşitli taşıyıcı sistemler arasında hem

tanısal görüntüleme hem de tedavi için en dikkat çeken ve en uygun özelliklere sahip olanlar lipozomlardır (Tüylek vd., 2017).

2.1. Nanopartiküllerin İlaç Taşıma Sistemlerinde Kullanımı

Nanoteknoloji, organik ve inorganik maddeler üzerinde atomik seviyede yeni tasarımlar ve üretimler yapılmasına olanak tanıyarak, tüm alanlarda temel bilimsel kuramları ve üretim teknolojilerini kökten değiştirmiştir. "Nano" kelimesi teknik bir ölçü birimi olarak kullanılmakta olup, herhangi bir birimin milyarda biri anlamına gelmektedir. Bir nanometre (nm), bir milimetrenin milyonda birine eşit bir uzunluk birimidir. Nanoteknolojinin yapı taşı nanopartiküller oluşturmaktadır (Kelleci vd., 2024). Nanopartiküller, kimyasal kompozisyonlarına göre karbon nanomalzemeleri, metal oksitler, metal nanomalzemeleri, yarı iletkenler ve polimerik nanomalzemeler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu partiküller, eşsiz fizikokimyasal özellikleri, yüksek penetrasyon yeteneği, geniş yüzey alanı ve kimyasal aktivite gibi nitelikleri ile dikkat çekmektedir. Bu özellikler, endüstriyel ve tıbbi teknolojilerin büyük ilgisini çekmiştir. Şu ana kadar nanomateryallerle üretilmiş 1000'den fazla ürün piyasaya sürülmüştür. Grand View Research'e göre, küresel nanotıp pazarının 2024 yılında 344 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Ashfaq vd., 2023). Bunun nedeni, nanoteknoloji temelli yeni ilaçlar ve tedavilerin geliştirilmesiyle geleneksel yöntemlere göre daha uygun maliyetli ve daha az yan etkiye sahip tedavi ve ilaçların oluşturulmasıdır. Bu durum, büyük ölçekli mühendislik nanomateryallerinin kullanımı ve üretimiyle çevre ve insan sağlığı üzerinde potansiyel olarak etkilemekte ve çevreye salımı konusunda endişeleri arttırmaktadır (Özkan vd., 2016).

Nanopartiküler ilaç taşıyıcı sistemler, düşük toksisite, güvenli ve etkili kontrollü salım sağlama yetenekleri, aktif veya pasif hedefleme imkânları ve ilaç direncine karşı tedavi etkinliğini artırabilmeleri nedeniyle kanser tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, birçok avantajına rağmen, nanopartikül tabanlı anti-kanser tedavilerin sistemik uygulamaları sınırlı tedavi etkinliğine sahip olabilmektedir. Bu sınırlamalar, ilaç taşıyıcı sistemlerde karşılaşılan ilk çıkış etkisi ve spesifik olmayan etkileşimlerin yanı sıra, tümör heterojenitesi ve doku bariyerlerinden kaynaklanabilmektedir. Özellikle lokal kanser tedavileri düşünüldüğünde, kemoterapötik ajanların küçük boyutları nedeniyle hedef bölgeden hızlı bir şekilde elimine edilmeleri ve uzatılmış lokal etki sağlama kapasitesinin sınırlı olması dezavantaj oluşturmaktadır. Bu noktada, hidrojel bazlı ilaç taşıyıcı sistemler, etkili bir lokal tedavi sağlama potansiyeli ile ön plana çıkmaktadır. Üç boyutlu ağ yapıları, yüksek su tutma kapasiteleri, gözenekli ve geçirgen yapıları ile biyoyumlu ve biyoparçalanabilir özellikleri sayesinde farmasötik uygulamalarda umut vaat etmektedirler (Konca vd., 2023). İlaç dağıtımında nanobiyoteknolojilerin araştırılması için birincil hedefler şunlardır; daha spesifik ilaç hedefleme ve dağıtımı, terapötik etkileri korurken toksisitenin azaltılması, daha fazla güvenlik ve biyoyumluluk sağlanması, yeni güvenli ilaçların daha hızlı geliştirilmesidir.

İlaç dağıtım sistemleri olarak uygun taşıyıcıların aranmasında dikkate alınması gereken ana konular, yeni malzemelerin tasarımı için temel ön koşullardır. Bunlar; ilacın dahil edilmesi ve salınması, formülasyon stabilitesi ve raf ömrü, biyouyumluluk, biyodağıtım ve hedefleme, işlevselliktir. Ayrıca taşıyıcı olarak kullanıldıklarında, ilaç dağıtımından sonra kalan materyalin olası olumsuz etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bağlamda, terapötik olarak ihtiyaç duyulan sınırlı bir ömre sahip biyolojik olarak parçalanabilen nanopartiküller optimal olacaktır.

Nanoteknolojinin nanotıpta kullanılması, güvenlik ve toksikolojik konulara tam dikkat edilmesini gerektirmektedir. Spesifik ilaç dağıtım formülasyonları, klinik etkinlik için gereken doz ile olumsuz yan etkilere neden olan doz arasındaki marj olan terapötik oranı artırabilmektedir. Ancak, bu formülasyonlar için de toksikolojik bir değerlendirme gerekmektedir. Bu durum, özellikle ilaç dağıtımı için kullanılan nanopartiküller için geçerlidir. Bu nanopartiküller kasıtlı olarak insan vücuduna ve çevreye dahil edilmekte olup, sağlık hizmetlerinde önemli gelişmeler sağlaması beklenmektedir (Bayda vd., 2019). Toksikologlar, yeni bilim, yöntem ve protokollere ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Bu ihtiyacın altı, birkaç uzman raporuyla çizilmiştir ve özellikle şu kavramlarla vurgulanmıştır:

Nanomalzemeler: Dökme malzemelere kıyasla benzersiz yüzey özelliklerine sahiptir. Bu benzersiz özelliklerin toksikolojik açıdan araştırılması gerekmektedir.

Reaktif Özellikler: Nanopartiküller benzersiz reaktif özellikleri için kullanıldığında, bu özelliklerin toksisite üzerinde de etkisi olması beklenmektedir.

Test ve Prosedürler: İlaç ve cihaz değerlendirmesindeki testler ve prosedürler nanopartiküllerin kullanımıyla ilişkili riskleri tespit etmekte yeterli olsa da tüm potansiyel riskleri tespit edemeyebilir. Ek testler gerekebilmektedir.

Vücut Dağılımı: Nanopartiküller, mikron boyutlu parçacıklardan farklı fiziko-kimyasal özelliklere sahiptir, bu da vücut dağılımını, kan beyin bariyerini geçişini ve kan pıhtılaşma yollarını etkileyebilmektedir. Bu nedenle, farmakokinetik ve dağılım çalışmalarında nanopartiküllere özel vurgu yapılmalıdır.

Klinik Öncesi Değerlendirme: Sağlıklı hayvanlar ve gönüllülerde yapılan klinik öncesi taramalar, nanopartiküllerin risklerini tespit etmekte yetersiz kalmaktadır.

Nanopartiküllerin ilaç taşıyıcısı olarak kullanılması, dahil edilen ilacın toksisitesini azaltabilmektedir. Ancak, tüm formülasyonun toksisitesi araştırılırken, nanopartiküllerin toksik etkileri genellikle ayrı olarak incelenmez. Bu nedenle, boş (ilaç yüklü olmayan) nanopartiküllerin toksisitesine özel dikkat gösterilmelidir. Bu durum, özellikle yavaş veya parçalanamayan nanopartiküllerin kullanıldığı ilaç dağıtım sistemlerinde önemlidir. Çünkü bu tür partiküller vücutta birikerek kronik enflamatuar reaksiyonlara neden

olabilmektedir. Sonuç olarak, güvenlik değerlendirmesi ve risk-fayda analizi vaka bazında yapılmalıdır (De Jong & Borm, 2008).

3. LİPOZOM

Lipozomlar, fosfolipid temelli nanoveziküller olup, iç kısmında ve tabakalar arasında sulu faz barındıran yapılardır. Eş merkezli lipid tabakaların küresel yapı oluşturmasıyla meydana gelmektedir ve hücre zarı ile aynı malzemeden yapılmış küçük keseciklerdir. Bu kesecikler ilaçlarla doldurularak hastalıkların tedavisinde kullanılmaktadır. Hem hidrofilik hem de lipofilik ilaçların taşınmasında etkin olan lipozomlar, biyolojik olarak parçalanabilmekte, biyouyumlu ve immunolojik etki göstermektedir, bu nedenle çok yönlü ilaç taşıma sistemleri olarak kullanılmaktadır (Tüylek vd., 2017).

Lipozomal formülasyonlar, klinik olarak biyolojik olarak aktif moleküller için taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Özellikle gen terapisi ve ilaç dağıtım alanlarında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Lipozomlar, biyomolekülleri veya hidrofilik ilaçları kapsülleyebilmekte ve hücrelerin lipid çift katmanları aracılığıyla içselleştirmelerini ve çözünürlüklerini artırabilmektedir. Bu formülasyonlar, düşük immünojenisite, sınırlı toksisite ve hedef bölgelere daha büyük kargo taşıma yetenekleri nedeniyle viral vektörlerden daha güvenli bulunmuştur (Akbarzadeh vd., 2013; Liu vd., 2022).

Lipozomlu ilaç formülasyonları intra-venöz, intra-müsküler ve oral dağıtım için onaylanmıştır. Bu formülasyonlar, dolaşımdaki zamanlarını iyileştirmek ve ilacın bütünlüğünü korumak için pegile varyantlar olarak geliştirilmiştir. Lipozom aracılı ilaç dağıtım sistemleri, anti-kanser, anti-fungal ve anti-inflamatuar ilaçlar gibi çeşitli tıbbi alanlarda başarıyla kullanılmıştır. Doxil™, AmBisome® ve DepoDur gibi birçok klinik ürün, lipozomlar kullanılarak formüle edilmiştir. Lipozomların kullanımı, çeşitli ilaçların farmakokinetik ve farmakodinamik özelliklerini iyileştirerek terapötik etkinliklerini arttırmıştır. Bir dizi lipozom-bazlı ilaç formülasyonu insan kullanımı için onaylanmış olup birçok ek ürün ise farklı klinik çalışmalarda değerlendirilmektedir (Lamichhane vd., 2018).

3.1. Lipozomların Kanserde Kullanımı

Modern kanser tedavisi, çoğu kemoterapötik olan birkaç anti-neoplastik ajan içermektedir (Hamurci vd., 2022). Bu ilaçlar laboratuvar ortamında kanser hücrelerini etkili bir şekilde yok edebilirken, vücut içinde uygulandığında bazı önemli engellerle karşılaşmaktadır. Bu engeller arasında kanser hücrelerine özgü olmama, tümör bölgelerinde düşük biyoyararlanım, geniş dağılım hacimleri ve normal dokulara toksisite bulunmaktadır (Fulton & Najahi-Missaoui, 2023; Ihlamur vd., 2024). Nanoparçacık bazlı kanser terapötikleri, bu sorunları aşmada umut vaat etmektedir. Lipozomlar gibi nanoteknoloji tabanlı ilaç

sistemleri, küçük boyutları (10-100 nm) ve yüksek kapsülleme kapasiteleri sayesinde hücre içine alım için idealdir ve tümörleri spesifik olarak hedefleyebilmektedirler. Tümör dokularındaki bozulmuş vaskülarite ve lenfatik drenaj, nanoparçacıkların tümör içinde birikmesine olanak tanımaktadır (Amin vd., 2022).

3.2. Lipozomların Aşıda Kullanılması

Lipozomlar, aşılarda etkinliğini artırmak amacıyla da kullanılmaktadır. Lipozomal aşılarda hazırlanmasında, su bazlı maddeler lipozomun içindeki sulu bölgeye, lipit bazlı maddeler ise lipit tabakaya eklenmektedir. Lipozomlar, birçok hücre tarafından absorbe edilip içerdikleri maddeleri salarak hücrelere aktarılmaktadırlar. Bu yöntemle hazırlanan lipozomal aşılarda, makrofajlar ve diğer fagositik hücreleri hedef almaktadır (Tretiakova & Vodovozova, 2022).

Lipozomlar, antijen eklenerek hücrelere verildiğinde, içerdikleri antijeni serbest bırakmakta ve bu da bağışıklık yanıtını tetiklemektedir. Bu nedenle, lipozomlar gibi nanoparçacık dağıtım sistemleri aşılarda immünojenikliğini artırmak için araştırılmış ve potansiyel adjuvanlar geliştirilmiştir. Nanoparçacıklar, patojenle ilişkili moleküler kalıpları taklit ederek doğuştan gelen bağışıklık tepkisini harekete geçirebilmekte ve antijen sunan hücreler tarafından alınarak T hücresi aktivasyonunu artırabilmektedir. Katyonik lipozomlar, DNA bağlanma ve bağışıklık tepkisi oluşturma yetenekleri nedeniyle güçlü aşı tasarımı platformlarıdır. Ayrıca, bazı nanoparçacıklar, yüzeylerinde virüs benzeri yapılar oluşturarak gerekli bağışıklık uyarımını sağlayabilmektedir. Lipozomlar, antijen süresini uzatarak hedeflenebilir depo olarak da işlev görmektedir (Schwendener vd., 2010).

3.3. Lipozomların İlaçlar ile Kullanılması

Araştırmacılar, hücre zarı ile ilaçların ve diğer maddelerin etkileşim mekanizmalarını incelemek için lipozomları model zar olarak kullanmışlardır. Örneğin, Vitamin K1'in fosfolipid tabakasına etkilerini incelemek amacıyla DMPC (di-miristoil-fosfatidilkolin) ve DEPE (di-elaidoylphosphatidyl-ethanolamine) ile Vitamin K1'den oluşan model zar yapıları kullanılmıştır. Çalışmalarda, Vitamin K1'in 25°C'de DMPC'nin interlaminalar boşluklarını artırdığı ve DMPC sistemlerinde dairesel yapıyı bozarak altıgen yapı oluşumuna neden olduğu gösterilmiştir. Lipozomlar, tedavi edici uygulamaların yanı sıra hayvanlarda beslenme takviyesi olarak da kullanılmaktadır. Postpubertal inekler üzerinde yapılan bir çalışmada, ağız yoluyla uygulanan lipozom kapsüllü α -tokoferolün, diğer formülasyonlara göre daha yüksek plazma konsantrasyonu sağladığı bulunmuştur. Bu sonuçlar, gelecekte hayvan hastalıklarının önlenmesinde ve bağışıklık sistemini güçlendirmek amacıyla eser mineral ve vitaminlerin lipozom kapsüllü şekilde verilmesinin faydalı olabileceğini düşündürmektedir (Lewicki vd., 2017).

4. İLAÇ TAŞIMA SİSTEMLERİ VE LİPOZOM

İlaç taşıyıcı sistemler, ilaçların hedeflenen bölgelere ulaşmasını sağlayarak etkinliklerini artırabilmekte ve yan etkileri azaltabilmektedir. Bu sistemlerin avantajları arasında hedeflenen teslimat, ilaç stabilizasyonu, yan etkilerin azaltılması ve ilaç konsantrasyonunun kontrolü yer almaktadır. Dezavantajlar ise güvenlik, maliyet ve etik meselelerdir. Gelecekte, ilaç taşıyıcı sistemlerin teknolojik ilerlemelerle daha etkin ve güvenli hale getirilmesi beklenmektedir. Nanoteknoloji ve biyomalzeme alanlarındaki ilerlemeler, ilaç taşıyıcı sistemlerin daha spesifik hale gelmesini sağlayacaktır. Güvenlik, maliyet etkinlik ve etik konularına daha fazla odaklanılması gerekmektedir. İlaç taşıyıcı sistemlerin kombinasyon tedavilerinde kullanımı da gelecekte önemli bir rol oynayabilmektedir. Sonuç olarak, ilaç taşıyıcı sistemlerin kullanımı, ilaç geliştirme ve tedavi yöntemlerinde önemli bir ilerleme sağlamaktadır. Ancak, bu alanla ilgili tartışmaların ve araştırmaların devam etmesi gerekmektedir. Lipozomlar, ilaç taşıyıcı sistemlerin önemli bir parçası olarak son yıllarda büyük ilgi gören ve araştırılan bir konudur. Bu sistemler, ilaçların hedeflenen hücrelere veya dokulara taşınmasını kolaylaştırarak tedavi sürecinin etkinliğini artırmayı amaçlamaktadır (Allen & Cullis, 2013) .

Lipozomlar, yapısında bir veya daha fazla lipid katmanı bulunan küresel yapılardır. Bu lipid katmanları, hidrofobik ve hidrofilik yapıları sayesinde su bazlı ilaçları taşımak için ideal bir ortam sağlamaktadır. İlaç molekülleri, lipozomların hidrofobik iç tabakasına yerleştirilebilmekte veya hidrofilik dış tabakasına yüzeyine adsorbe edilebilmektedir. Bu şekilde, lipozomlar ilaçları koruyarak, taşıyarak ve hedeflenen hücrelere ulaştırarak ilaçların etkinliğini artırmaktadır. Lipozomların avantajlarından biri, ilaçların hedeflenen bölgelere daha etkili bir şekilde ulaşmasını sağlamasıdır. Çünkü lipozomlar, hedeflenen hücrelerin yüzeyindeki reseptörlere bağlanabilir ve bu sayede ilaçları spesifik olarak hedeflemeyi mümkün kılmaktadır. Bu, ilaçların yan etkilerini azaltırken etkinliklerini artırmaktadır. Ayrıca, lipozomların biyolojik uyumluluğu yüksektir ve vücutta uzun süre kalabilirler. Bu da ilaçların yavaş salınımını sağlayarak tedavi sürecini iyileştirmektedir. Ancak, lipozomların bazı dezavantajları da vardır. Öncelikle, lipozomların üretimi karmaşık ve maliyetlidir. Bu, ticari olarak kullanılabilirliklerini sınırlayabilmektedir. Ayrıca, lipozomların stabilitesi konusunda da bazı endişeler bulunmaktadır. Lipozomlar, fiziksel veya kimyasal etkilere karşı hassas olabilmekte ve bu da ilaçların taşınması ve depolanması sürecinde sorunlara yol açabilmektedir. Bununla birlikte, lipozomlar doğal olarak vücut tarafından metabolize edilebilmekte ve bu nedenle uzun süreli etkileri hala tam olarak anlaşılmamıştır (Nsairat vd., 2022).

Lipozomlar ve lipid/nükleik asit kompleksli lipid nanopartiküller, ilaç endüstrisinde önemli başarılar göstermiştir. Elde edilen başarılar arasında, stabil ilaç yükleme kapasiteleri, genişletilmiş farmakokinetik profilleri, hedef dışı yan etkilerin azalması ve kan-beyin bariyeri veya plazma membran bariyerlerini aşarak hastalık hedeflerine etkin dağıtım yapabilme yetenekleri bulunmaktadır. Gösterdiği bu özellikler, geleneksel

dozaj formlarında düşük terapötik indekslere sahip ve günümüzde "tedavi edilemez" olarak görülen hedefler için umut verici çözümler sunmaktadır. Son zamanlarda siRNA, antisens oligonükleotid veya CRISPR (Düzenli aralıklarla bölünmüş palindromik tekrar kümeleri) kompleksi yüklü lipid nanopartiküller ve lipozomal aşılardaki gelişmeler, bu nanopartiküllerin yeni farmasötik yöntemler için çok yönlü formülasyon platformları sağlama potansiyeli sağlamaktadır. Lipid nanopartiküllerin analitik karakterizasyonu, ilaç tasarımı, formülasyon geliştirme, in vivo performansın anlaşılması ve kalite kontrolü açısından önemlidir. Çeşitli lipid yardımcı maddeler, benzersiz çekirdek çift katmanlı yapı ve nano ölçekli boyut gibi özellikler, lipid türleri, ilaç kapsülleme verimliliği, nanopartikül özellikleri, ürün stabilitesi ve ilaç salımı gibi karmaşık kritik kalite özelliklerini vurgulamaktadır. Bu zorlukları aşmak ve lipid nanopartiküllerin ilaç geliştirmede gelecekteki uygulamalarını kolaylaştırmak amacıyla, lipid nanopartikül bazlı farmasötik yöntemlerin fizikokimyasal karakterizasyonlarına yönelik mevcut analitik yaklaşımlar araştırılmaktadır (Hamad vd., 2024).

FDA (Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi) tarafından onaylanan ilk lipozomal ürün, Doxil®'dir. 1995 yılında yumurtalık kanseri ve AIDS (Edinilmiş Bağışıklık Yetmezliği Sendromu) ile ilişkili Kaposi Sarkomu tedavisinde kullanılan Doxil®, doksorubisinin lipozomal formülasyona sahiptir. Bu ilaç günümüzde, 12'den fazla lipozomal formülasyon, bakteriyel enfeksiyonlar, kanser, mantar hastalıkları, göz, cilt ve solunum bozuklukları tedavisinde klinik kullanım için onay almıştır. Lipozomal formülasyonlar, klinikte kullanım için onay almış, en başarılı nanomateryal bazlı terapötikler arasında yer almaktadır. 2015 yılının başından bu yana dünya çapında yaklaşık 330 klinik çalışma başlamıştır. Bu süreç boyunca, 100 klinik çalışma tamamlanmıştır (Almeida vd., 2020).

2015'ten bu yana, FDA tarafından klinik kullanım için üç yeni lipozomal formülasyon onaylanmıştır. Bunlar; Onivyde® (2015), Vyxeos® (2017) ve Onpattro® (2018) dir. Onivyde®, ileri evre pankreas kanseri tedavisinde gemsitabin ile birlikte kullanılan irinotekanın PEGlenmiş bir nanolipozomal formudur. Onivyde®, irinotekani sükröz oktasülfat kullanılarak kapsüller ve şu anda küçük hücreli akciğer kanserinde topotekan ile birlikte kullanım için Faz III klinik denemelerinde araştırılmaktadır. Onivyde®, geleneksel irinotekana kıyasla daha yüksek ilaç kapsülleme ve yükleme verimliliği, uzatılmış dolaşım süresi, sürekli salım ve azaltılmış konakçı toksisitesi gibi birçok farmakokinetik avantaj sağlamaktadır (Almeida vd., 2020).

Vyxeos® (CPX-351), daunorubisin ve sitarabin içeren bir lipozomal formülasyondur. Bu lipozomal formülasyon, akut miyeloid lösemi tedavisi için onaylanmıştır. Sitarabin, bakır içermeyen tamponlarda karıştırılarak ve yüksek sıcaklıklarda inkübe edilerek kapsüllenirken, daunorubisin EDTA tamponunda çözündürülüp sitarabin yüklü lipozomlarla inkübe edilerek kapsüllenmektedir. Klinik deneylerde, Vyxeos® alan hastaların, geleneksel tedavi alanlara göre daha uzun bir ortalama yaşam süresine sahip oldukları

görülmüştür. Ancak, bazı hastalarda febril nötropeni, bakteriyemi ve pnömoni gibi ciddi yan etkiler gözlenmiştir ve hastaların %18'inde tedavi kesilmiştir (Almeida vd., 2020).

Onpattro®, antitransstiretin siRNA'yı terapötik ajan olarak kullanarak yenilikçi bir tedavi yöntemi olan, en son onay almış lipozomal terapidir. Bu yöntem, transtiretin aracılı amiloidoz tedavisi için onaylanmıştır. Onpattro®, iyonlaşabilir katyonik lipitler, fosfolipid, kolesterol ve PEG2000-C-DMG içeren lipozomal bir yapıya sahiptir ve asidik pH altında hızlı karıştırma yoluyla birleştirilmektedir. Lipozom, düşük pH nedeniyle katyonik hale gelen DLin-MC3-DMA'nın endozoma yönlendirilmesiyle vücutta hedefe ulaşmaktadır ve endozomal yırtılma sonucu kapsüllenmiş siRNA'nın sitozole salınmasını sağlamaktadır. Bu siRNA, transtiretin proteininin sentezini inhibe ederek serum ve doku birikintilerini azaltmaktadır. Faz III klinik denemelerinde, Onpattro® plasebo grubuna kıyasla transtiretin üretiminde %81 azalma ve kas gücü, duyuşal işlevler, refleksler ve kalp hızı gibi parametrelerde iyileşme göstermiştir. Ancak, hastaların %20'sinde periferik ödem ve infüzyonla ilişkili reaksiyonlar gibi hafif yan etkiler gözlenmiş, ciddi yan etkiler plasebo grubuyla benzer düzeyde olmuştur (Almeida vd., 2020).

Bunlara ek olarak nanopartiküllerin ilaç taşıyıcısı olarak kullanılması, dahil edilen ilacın toksisitesini azaltma potansiyeline sahiptir. Lakin, toksisite araştırması yapılırken genellikle nanopartiküllerin ayrı bir şekilde toksik etkileri incelenmez. Bu nedenle, özellikle boş nanopartiküllerin toksisitesine özel bir dikkat gösterilmelidir. Bu durum, uzun süreli veya parçalanamayan nanopartiküllerin kullanıldığı ilaç dağıtım sistemlerinde daha da önem kazanmaktadır. Çünkü bu tür partiküller vücutta birikerek kronik enflamatuvar reaksiyonlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, nanopartikül tabanlı ilaç taşıyıcı sistemlerin toksik etkilerinin detaylı bir şekilde araştırılması ve bu etkilerin minimize edilmesi önemlidir. Sonuç olarak, lipozomlar ilaç taşıyıcı sistemlerin önemli bir bileşenidir ve ilaçların hedeflenen bölgelere taşınmasında etkin bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerin avantajları, ilaçların etkinliğini artırırken yan etkilerini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Ancak, üretim ve stabilite gibi bazı zorluklar hala mevcuttur. Lipozomlar ve diğer ilaç taşıyıcı sistemler üzerine yapılan araştırmaların devam etmesi ve bu sistemlerin ticari kullanılabilirliklerinin artırılması için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

5. SONUÇ

İlaç taşıyıcı sistemler, modern tıbbın etkinlik ve güvenliği artırma açısından önemli bileşenlerindedir. Bu sistemler, ilaçların hedeflenen bölgelere ulaşmasını sağlayarak tedavi süreçlerini optimize etmektedir. Yan etkilerin azaltılması ve ilaç stabilizasyonunun sağlanması, bu sistemlerin sunduğu büyük avantajlardandır. Bu alandaki hızlı ilerlemeye rağmen, nanopartikül bazlı ilaç taşıma sistemlerinin çoğu, hedeflerine karşı özgüllük eksikliği ile uygunsuz yükleme kapasitesi göstermektedir (Peer vd., 2007). Sonuç olarak, ilaç

taşıma sistemlerindeki umut verici gelişmeler, spesifik olarak benzersiz veya aşırı ifade edilen biyobelirteçleri hedefleyen tanıma ligandları tarafından işlevselleştirilen yüksek ve düzenlenmiş kapasiteli nanotaşıyıcıların tasarlanmasını içermelidir (Alshaer vd., 2018). Özellikle lipozomlar, ilaç taşıyıcı sistemlerin en dikkat çekici örneklerinden biri olarak öne çıkmakta ve son yıllarda yapılan araştırmalar, lipozomların tedavi etkinliğini artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Lipozomların biyolojik uyumluluğu ve spesifik hücrelere ilaç taşıma kapasitesi, bu sistemlerin klinik uygulamalarda yaygın kullanımını sağlamaktadır. Ancak, lipozomların üretim maliyetleri ve stabilite sorunları gibi dezavantajlar, bu teknolojinin geniş çaplı ticari kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle, üretim süreçlerinin iyileştirilmesi ve lipozom stabilitesinin artırılması için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Ayrıca, nanopartikül tabanlı ilaç taşıyıcı sistemlerin toksik etkilerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi ve bu etkilerin minimize edilmesi de önemli bir araştırma alanıdır. Özellikle boş nanopartiküllerin uzun vadeli toksik etkileri konusunda yapılan çalışmalar, bu sistemlerin güvenliğinin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Gelecekte, nanoteknoloji ve biyomalzeme alanlarındaki ilerlemelerle birlikte, ilaç taşıyıcı sistemlerin daha spesifik, etkin ve güvenli hale getirilmesi beklenmektedir. İlaç taşıyıcı sistemlerin kombinasyon tedavilerinde kullanımı, tedavi protokollerinin kişiselleştirilmesi ve hastalıkların daha etkili yönetilmesi açısından büyük potansiyel taşımaktadır. Sonuç olarak, ilaç taşıyıcı sistemler, ilaç geliştirme ve tedavi yöntemlerinde önemli bir ilerleme sunmaktadır. Bu alandaki araştırmalar ve tartışmalar devam ettikçe, ilaç taşıyıcı sistemlerin klinik uygulamalarda daha geniş bir kullanıma sahip olması sağlanacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

Y.B.S.: Araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

B.Ç.: Araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

P.K.: Araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

R.A.: Araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

M.I.: Gözden geçirme ve düzenleme

KAYNAKLAR

- Akbarzadeh, A., Rezaei-Sadabady, R., Davaran, S., Joo, S. W., Zarghami, N., Hanifehpour, Y., Nejati-Koshki, K. (2013). Liposome: classification, preparation, and applications. *Nanoscale Res Lett*, 8(1), 102. doi:10.1186/1556-276x-8-102
- Allen, T. M., & Cullis, P. R. (2013). Liposomal drug delivery systems: from concept to clinical applications. *Adv Drug Deliv Rev*, 65(1), 36-48. doi:10.1016/j.addr.2012.09.037

- Almeida, B., Nag, O. K., Rogers, K. E., & Delehanty, J. B. (2020). Recent Progress in *Bioconjugation* Strategies for Liposome-Mediated Drug Delivery. *Molecules*, 25(23). doi:10.3390/molecules25235672
- Alshaer, W., Hillaireau, H., & Fattal, E. (2018). Aptamer-guided nanomedicines for anticancer drug delivery. *Adv Drug Deliv Rev*, 134, 122-137. doi:10.1016/j.addr.2018.09.011
- Amin, M., Seynhaeve, A. L. B., Sharifi, M., Falahati, M., & Ten Hagen, T. L. M. (2022). Liposomal Drug Delivery Systems for Cancer Therapy: The Rotterdam Experience. *Pharmaceutics*, 14(10). doi:10.3390/pharmaceutics14102165
- Armağan, B., Demirbaş E., Ihlamur, M. (2024) İlaç Tedavisi ve Beslenmede Pediatriye Özgü Yaklaşımlar, *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, (22), 395-411.
- Ashfaq, R., Rasul, A., Asghar, S., Kovács, A., Berkó, S., & Budai-Szűcs, M. (2023). Lipid Nanoparticles: An Effective Tool to Improve the Bioavailability of Nutraceuticals. *Int J Mol Sci*, 24(21). doi:10.3390/ijms242115764.
- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2019). The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical-Physical Applications to Nanomedicine. *Molecules*, 25(1). doi:10.3390/molecules25010112
- De Jong, W. H., & Borm, P. J. (2008). Drug delivery and nanoparticles: applications and hazards. *Int J Nanomedicine*, 3(2), 133-149. doi:10.2147/ijn.s596
- Fulton, M. D., & Najahi-Missaoui, W. (2023). Liposomes in Cancer Therapy: How Did We Start and Where Are We Now. *Int J Mol Sci*, 24(7). doi:10.3390/ijms24076615
- Hamad, I., Harb, A. A., & Bustanji, Y. (2024). Liposome-Based Drug Delivery Systems in Cancer Research: An Analysis of Global Landscape Efforts and Achievements. *Pharmaceutics*, 16(3). doi:10.3390/pharmaceutics16030400
- Hamurci, Y., Ihlamur, M., & Zengin, Y., (2022). Elettaria Cardamomum Ekstraktının Proleukin İlaç Kombinasyonu ile Mide Kanseri Hücre Hattı Üzerindeki İmmüностimulan/Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi DÜFED*, 11(2), 283–294. doi: 10.55007/dufed.1133501.
- Ihlamur, M., Akgul, B., Zengin, Y., Korkut Ş, V., Kelleci, K., & Abamor, E. (2024). The mTOR Signaling Pathway and mTOR Inhibitors in Cancer: Next-generation Inhibitors and Approaches. *Curr Mol Med*, 24(4), 478-494. doi:10.2174/1566524023666230509161645
- Ihlamur, M., Kelleci, K., Özkan, M., Abamor, E. Ş. (2024). A Herbal Treatment Method For Breast Cancer: Antitumor Effect Of Momordica Charantia. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23(45), 144-155.
- Ihlamur, M., Kelleci, K., Zengin, Y., Allahverdiyev, M. A., & Abamor, E. (2024). Applications of Exosome Vesicles in Different Cancer Types as Biomarkers. *Curr Mol Med*, 24(3), 281-297. doi:10.2174/1566524023666230320120419
- Kelleci, K., Allahverdiyev, A., Bağırova, M., Ihlamur, M., & Abamor E. Ş. (2024) Combining Killed Vaccine Candidate with Different Adjuvants to Determine Prophylactic Potential against Leishmaniasis. *Acta Parasitologica*, 69,1613–1620.
- Kelleci, K., Allahverdiyev A., Bağırova M., Ihlamur M., & Abamor E.Ş. (2024). Immunomodulatory activity of polycaprolactone nanoparticles with calcium phosphate salts against Leishmania infantum infection. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine* 14(8), 359-368.
- Kelleci, K., Allahverdiyev, A., Bağırova, M., Ihlamur, M., & Abamor, E. Ş. (2023). Particulate and non-particle adjuvants in Leishmaniasis vaccine designs: A review. *Journal of Vector Borne Diseases*, 60(2).
- Konca, S. F., Oz, U. C., & Bozkır, A. (2023). Lokalize Meme Kanseri Tedavilerinde Efektif İlaç Taşıyıcı Sistemler: Enjektabl Hidrojellereffektive Drug Delivery Systems In Localized Breast Cancer Therapies: Injectable Hydrogels. *Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 48, 3-3. doi:10.33483/jfpau.1348607
- Lamichhane, N., Udayakumar, T. S., D'Souza, W. D., Simone Ii, C. B., Raghavan, S. R., Polf, J., & Mahmood, J. (2018). Liposomes: Clinical Applications and Potential for Image-Guided Drug Delivery. *Molecules*, 23(2). doi:10.3390/molecules23020288
- Lewicki, S., Leśniak, M., Machaj, E. K., Antos-Bielska, M., Trafny, E. A., Kocik, J., & Pojda, Z. (2017). Physical properties and biological interactions of liposomes developed as a drug carrier in the field of regenerative medicine. *J Liposome Res*, 27(2), 90-98. doi:10.3109/08982104.2016.1166510
- Liu, P., Chen, G., & Zhang, J. (2022). A Review of Liposomes as a Drug Delivery System: Current Status of Approved Products, Regulatory Environments, and Future Perspectives. *Molecules*, 27(4). doi:10.3390/molecules27041372
- Marangoz, Ö., & Yavuz, O. (2020). Nano-ilaç taşıma sistemleri ve toksikolojik değerlendirmeleri. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*. 77, 509-526. doi:10.5505/TurkHijyen.37790
- Nsairat, H., Khater, D., Sayed, U., Odeh, F., Al Bawab, A., & Alshaer, W. (2022). Liposomes: structure, composition,

- types, and clinical applications. *Heliyon*, 8(5), e09394. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e09394
- Özkan Dağlıoğlu, Y., Kabakcı, D., & Akdeniz, G. (2016). Nanoteknoloji/Nanopartikül, Çevre Ve Bal Arıları Arasındaki İlişki.
- Peer, D., Karp, J. M., Hong, S., Farokhzad, O. C., Margalit, R., & Langer, R. (2007). Nanocarriers as an emerging platform for cancer therapy. *Nat Nanotechnol*, 2(12), 751-760. doi:10.1038/nnano.2007.387
- Schwendener, R. A., Ludewig, B., Cerny, A., & Engler, O. (2010). Liposome-based vaccines. *Methods Mol Biol*, 605, 163-175. doi:10.1007/978-1-60327-360-2_11
- Swamy, M. K., & Sinniah, U. R. (2016). Patchouli (*Pogostemon cablin* Benth.): botany, agrotechnology and biotechnological aspects. *Ind Crops Prod*. 87, 161–176.
- Thilakarathna, S. H., & Rupasinghe, H. (2013). Flavonoid bioavailability and attempts for bioavailability enhancement. *Nutrients*. 5, 3367–87.
- Tretiakova, D. S., & Vodovozova, E. L. (2022). Liposomes as Adjuvants and Vaccine Delivery Systems. *Biochem (Mosc) Suppl Ser A Membr Cell Biol*, 16(1), 1-20. doi:10.1134/s1990747822020076
- Tüylek, Z., (2017). İlaç Taşıyıcı Sistemler Ve Nanoteknolojik Etkileşim. *Bozok Tıp Dergisi*, 7(3), 89-98.
- Zengin, Y., Ihlamur, M., & Başarı, H., (2022). Immunostimulant/Cytotoxic Effect of Cardamom Extract with Adjuvant Combination on Breast Cancer Cell Line, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 229-234.

Classifiers and Image Processing to Identify Sign Language Phonemes

Ebru EFEOĞLU^{1*}, Ayşe TUNA²

¹Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Department of Software Engineering, Kütahya, Türkiye

²Trakya University, Edirne, Türkiye

Received: 09.09.2024, Accepted: 10.11.2024, Published: 03.12.2024

ABSTRACT

One of the most visible symptoms of autism spectrum disorder is difficulty in speech and language. Difficulties in speech and language are generally very different for each child with autism spectrum disorder. Although some children with autism spectrum disorder can speak fluently, others will not be able to speak normally or will be even nonverbal. In all cases, parents try to communicate with, and understand their children's needs, desires, and emotions. If a child with autism spectrum disorder cannot speak out loud, it is harder to communicate with him/her but there are other non-vocal methods for communication. In this paper, the benefits of teaching American sign language to children with autism spectrum disorder and the difficulties that families and children will experience while doing this are presented. In addition, technological solutions to these difficulties are given. In parallel with advancements in technology, novel solutions to understand and use sign language have been proposed and these solutions are supposed to help parents who cannot understand sign language. Such solutions typically rely on image processing methods and classification algorithms to recognise sign language. Therefore, in this paper, the performance of various classification algorithms used to classify American Sign Language phonemes is compared. As the results show, when combined with image processing methods, classification algorithms can be used in various technological solutions aiming at helping to identify sign language phonemes.

Keywords: Autism spectrum disorder; Classifiers; Image processing; Machine learning; Sign language

İşaret Dili Fonemlerini Belirlemek İçin Sınıflandırıcılar ve Görüntü İşleme

ÖZ

Otizm spektrum bozukluğunun en gözle görülür semptomlarından biri konuşma ve dil güçlüğüdür. Otizm spektrum bozukluğu olan her çocuk için konuşma ve dildeki zorluklar genellikle çok farklıdır. Otizm spektrum bozukluğu olan bazı çocuklar akıcı bir şekilde konuşabilse de, diğerleri normal konuşamayacak veya sözsüz bile konuşabilecektir. Her durumda ebeveynler çocuklarının ihtiyaçları, arzuları ve duygularıyla iletişim kurmaya ve onları anlamaya çalışır. Otizm spektrum bozukluğu olan bir çocuk yüksek sesle konuşmıyorsa onunla iletişim kurmak daha zordur ancak ses dışı iletişim yöntemleri de vardır. Bu makalede, otizm spektrum bozukluğu olan çocuklara Amerikan işaret dili öğretmenin faydaları ve ailelerin ve çocukların bunu yaparken karşılaştıkları zorluklar sunulmaktadır. Ayrıca, bu zorluklara yönelik teknolojik çözümler verilmektedir. Teknolojinin ilerlemesine paralel olarak işaret dilini anlamak ve kullanmak için yeni çözümler öneriliyor ve bu çözümlerin işaret dilini anlayamayan ebeveynlere yardımcı olması bekleniyor. Bu tür çözümler genellikle işaret dilini tanımak için görüntü işleme yöntemlerine ve sınıflandırma algoritmalarına dayanır. Bu nedenle bu makalede Amerikan İşaret Dili ses birimlerini sınıflandırmak için kullanılan çeşitli sınıflandırma algoritmalarının performansı karşılaştırılmıştır.

Sonuçların gösterdiği gibi, sınıflandırma algoritmaları görüntü işleme yöntemleriyle birleştirildiğinde işaret dili ses birimlerinin belirlenmesine yardımcı olmayı amaçlayan çeşitli teknolojik çözümlerde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Otizm spektrum bozukluğu; Sınıflandırıcılar; Görüntü işleme; Makine öğrenmesi; İşaret dili

1. INTRODUCTION

If a child with autism spectrum disorder (ASD) has difficulty in speech, intervention services should be provided as soon as possible in order to give the child the best possible chance of achieving functional communication later on. Therefore, the therapist may offer augmentative and alternative communication (AAC) that consists of different methods (White et al., 2021), such as picture exchange communication system (PECS), flash cards, communication boards, speech generating devices (SGDs), and tablets. It has been shown that when combined with ongoing speech therapy, sign language (SL) can foster language development in children with ASD (Bonvillian, Nelson, & Rhyne, 1981). However, through this approach, completely nonverbal children with ASD are not likely to gain spoken words, as it is estimated that about 25-30% of children with ASD will never develop any form of verbal communication or will remain minimally verbal (Rose, Trembath, Keen, & Paynter, 2016).

SL relies on using hand gestures, body movements, and facial expressions to express words and phrases, and it is not the same everywhere. SL can give deaf children with ASD a way to communicate and express themselves (Shield & Meier, 2014); therefore, it could also end up being a primary way of a child with ASD to communicate. SL may connect children with ASD to a broader community of individuals who use SL for communication. Notably, American Sign Language (ASL) is the primary language of many deaf and hard-of-hearing people in North America. ASL is also used by some hearing people (American Sign Language 2022).

Although verbal communication can be extremely difficult for a child with ASD to understand and use, SL is typically easier to understand and use (Brown, 1978). Because children with ASD understand visual information more easily than verbal information (Gladfelter, Barron, & Johnson, 2019). As a lack of communication skills is frustrating for children with ASD, it leads to difficult behaviours (De Giacomo et al., 2016; McNeil, Quetsch, & Anderson, 2019). On the other hand, being a functional way of communication, SL leads to a decrease in difficult behaviours (Lal & Sanghvi, 2015).

Image processing methods and classification algorithms are essential in vision-based solutions proposed to identify SL gestures. The vision-based solutions are easier to implement and cheaper; therefore, in this paper, the performances of various classification algorithms used to classify the phonemes of ASL are compared. The remaining sections of this paper are organized as follows. The next section provides a literature review in the related domain. The third section presents information on dataset used and analysis methodology used in this study. The fourth section reports results and provides discussion on the topic. Finally, this paper is concluded in the fifth section.

2. LITERATURE REVIEW

There are common misconceptions about SL. For instance, although some parents and professionals worry that teaching SL to children with ASD can hinder their verbal communication progress and the children's ability to speak; it is false (Thompson et al., 2007). However, SL helps enhance various speech and language skills essential for fundamental learning (Toth, 2009). It has been shown that learning and using SL helps children with ASD develop verbal language (Carr, 1979). Another common misconception is that SL is only for children with a hearing impairment. But SL is also for children with limited expressive and language skills. SL can also act as a bridge for bilingual children, aiding them in learning a new language (Tomaszewski, 2001). As SL allows children with ASD to interact and play with other children, it helps children with ASD build new social skills as well as imitation skills (Bonvillian, Nelson, & Rhyne, 1981). SL can also open the lines of communication between a child with ASD and his/her parents or teacher (Bonvillian & Nelson, 1976; Simpson & Lynch, 2007). Generally, learning SL does not take too much time and it is recommended to begin with a few signs and incorporate practicing it into daily activities (Schmeden, 2006).

SL can help children with ASD be able to express themselves (Schaeffer, Kollinzas, Musil, & McDowell, 1977; Carr, 1979), but also offer a number of other benefits for them. Learning and using SL will more likely lead to more spontaneous communication for children with ASD (Schaeffer, Kollinzas, Musil, & McDowell, 1977), and better social skills. Since SL is an alternative form of communication, it will possibly reduce aggression and meltdowns due to frustration at not being able to communicate (Jantzen, 2011). It may also lead to less depression and anxiety because when children with ASD make themselves be understood by others, they will more likely be happier (Tarver et al., 2021). However, while some children with ASD may find signing enjoyable, others may not. Therefore, other than SL, alternative and augmentative communication options may be offered to such children with ASD (Iacono, Trembath, & Erickson, 2016). Parents of children with ASD should learn signing if their children use it. They can learn SL through online courses, local classes, or private tutors.

Although SL offers many benefits, it is not suitable for everyone, as each child has unique strengths and weaknesses. First of all, it is important to use hands, facial features, head, and upper body carefully in SLs; however, some children with ASD have significant difficulties in motor skills (McCleery, Elliott, Sampanis, & Stefanidou, 2013). SL can involve facial expressions are used to express both linguistic information and emotions in order to have more nuanced conversation, but this is hard for children with ASD due to their having a difficulty in interpreting faces (Denmark, Atkinson, Campbell, & Swettenham, 2019; Sato et al., 2017). Most children with ASD prefer short eye contact and do not enjoy prolonged ones (Trevisan, Roberts, Lin, & Birmingham, 2017); however, eye contact is an essential part of SL when interacting with SL users

who are deaf. Although self-stimulatory behaviour is not a bad thing, if a child with ASD uses his/her hands for self-stimulatory behaviours, this can confuse or distract the conversation partner (Kapp et al., 2019). Finally, although some children with ASD find SL effective and enjoyable, others do not and get more out of a different method. Therefore, using different methods for different contexts may be recommended. In contrast to common belief, SL can enhance various speech and language skills essential for fundamental learning skills (Bowman-Smart et al., 2019). With regard to speech and language development, SL can provide a number of benefits. It can allow transitioning from gestures to speaking smoothly, improve vocabulary and confidence, enhance using adjectives and adverbs, empower earlier reading and recognition of sight words, and increase expressive and receptive language skills (Baker-Ramos, 2017). SL can bridge the gap between non-verbal communication and speaking, and if it is introduced and taught early in life, it helps to enhance speech and language development (Fitzpatrick, Stevens, Garritty, & Moher, 2013). If a child learns and uses SL, his/her parents must learn, too. As well as private tutors and local classes, online courses can help for this. Each SL has its own fingerspelling forms, and vocabulary that is important and more commonly used by the child should be prioritised to learn and memorise (Lal & Sanghvi, 2015). In case of difficulty in learning the SL, the parents can be offered technological solutions. Such solutions identify SL symbols and gestures, interpret the overall meaning of the sentence and then generate visual response to the counterparty. Both vision-based approaches and data glove approaches can be used to recognise hand gestures (Trigueiros, Ribeiro, & Reis, 2014). Compared to the data glove approaches, the vision-based ones offer a simpler and probably more intuitive method of communication between a human and a computer. They also enable to recognise SL in real-time (Trigueiros, Ribeiro, & Reis, 2014).

3. METHODOLOGY

In this study, the Sign Language MNIST (<https://www.kaggle.com/datasets/datamunge/sign-language-mnist>) open dataset was used. The fingerspellings of ASL represent a multi-class problem involving 24 classes of letters, with J and Z excluded as they require motion (Figure 1). The training dataset contains a set of 28x28 grayscale images in PNG format of the entire alphabet, except J and Z, and is composed of a total of 27455 instances. The data in its raw form is provided as a pixel to pixel intensity [0-255] class-wise distributed XLS files.



Figure 1: Alphabet (phonemes) of ASL

In this study, as shown in Figure 2, K-Nearest Neighbours (KNN), Extra Trees, Linear Discriminant Analysis (LDA) and Rep Tree algorithms were used for the classifications and their performances were compared. To avoid overfitting, the 10-fold cross-validation method was used as the performance analysis method.

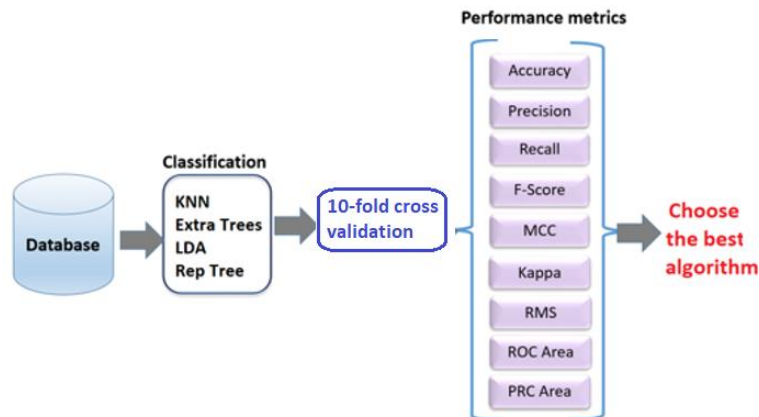


Figure 2: Methodology used in this study

3.1. Classification Algorithms

The KNN is a simple and yet effective algorithm; therefore, it is popular in studies focusing on classification and regression problems. It classifies a sample according to its proximity, i.e. distance, to other samples in the dataset (Abu Alfeilat et al., 2019). Although Euclidean distance is the commonly used distance measure of the KNN, there are others. Examples of the other distance measures that can be used by the KNN are Manhattan distance, Mahalanobis distance, Chebychev distance, Minkowski distance, and Hamming distance (Abu Alfeilat et al., 2019).

The Extra Trees is one of the decision tree algorithms that creates many unpruned decision trees from a given training dataset and is often used in classification problems (Kasliwal, 2018). As it relies on ensemble learning, it combines the predictions from many decision trees (Geurts, Ernst, & Wehenkel, 2006). The LDA was developed by R. A. Fischer in 1936 (Boedeker & Kearns, 2019). It searches for a linear combination of variables that can best separate existing classes. It can achieve good results in complex problems (Boedeker & Kearns, 2019). The Rep Tree relies on regression tree logic and first creates multiple trees at different iterations. It then selects the best of all trees produced and considers it as a representative (Weinberg & Last, 2019). Rep Tree relies on calculating the information gain with entropy and reducing the error due to variance (Weinberg & Last, 2019).

3.2. Performance Metrics

Various evaluation metrics have been proposed so that models created with classification algorithms can be evaluated, thereby determining which model produces more accurate results. True positive (TP), true negative (TN), false positive (FP) and false negative (FN) values are used in the calculation of these metrics. It is recommended to use precision and recall metrics together, but other metrics are needed for performance evaluation, too. Because the comparison of the results of two models with low recall and high precision and vice versa is not easy and reliable. In this case, F-Score calculated by taking the harmonic average of these two metrics is used. Matthews correlation coefficient (MCC) value is very useful in case of an imbalance between the classes in the dataset (Chicco & Jurman, 2020). For a good classification, performance metrics should take values close to 1. These metrics are explained in Figure 3.

Metric and Formula	
$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$	(1)
$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$	(2)
$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$	(3)
$\text{F - Score} = \frac{2}{\frac{1}{\text{Recall}} + \frac{1}{\text{Precision}}}$	(4)
$\text{MCC} = \frac{TP * TN - FP * FN}{\sqrt{(TP + FP) * (TP + FN) * (TN + FP) * (TN + FN)}}$	(5)

Figure 3: Performance metrics and their formulas

Another metric is Cohen's Kappa statistic. The kappa statistic is basically a measure of agreement between actual and predicted classes (Delgado & Tibau, 2019). Kappa statistics are calculated with Equation (6), where $\bar{P}(x)$ is the observed concordance rate and $\bar{P}(y)$ is the random concordance rate.

$$Kappa = \frac{P(x)-P(y)}{1-P(y)} \quad (6)$$

the predicted, and y represents the actual, RMSE can be calculated as shown in Equation 7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{(x_1-y_1)^2+\dots+(x_n-y_{1n})^2}{n}} \quad (7)$$

ROC area and PRC area values express the areas under the drawn curves (Fawcett, 2006). For example, the ROC area value is the area under the ROC curve. In the ROC curve, while the horizontal axis shows FP rate, the vertical axis shows TP rate. ROC graphs are useful for organising classifiers and visualising their performance (Delgado & Tibau, 2019). Similar to the ROC area, the PRC area shows the area under the PRC curve. It refers to the area under the curve drawn in the PRC curve with the horizontal axis, i.e. recall, and the vertical axis, i.e. precision.

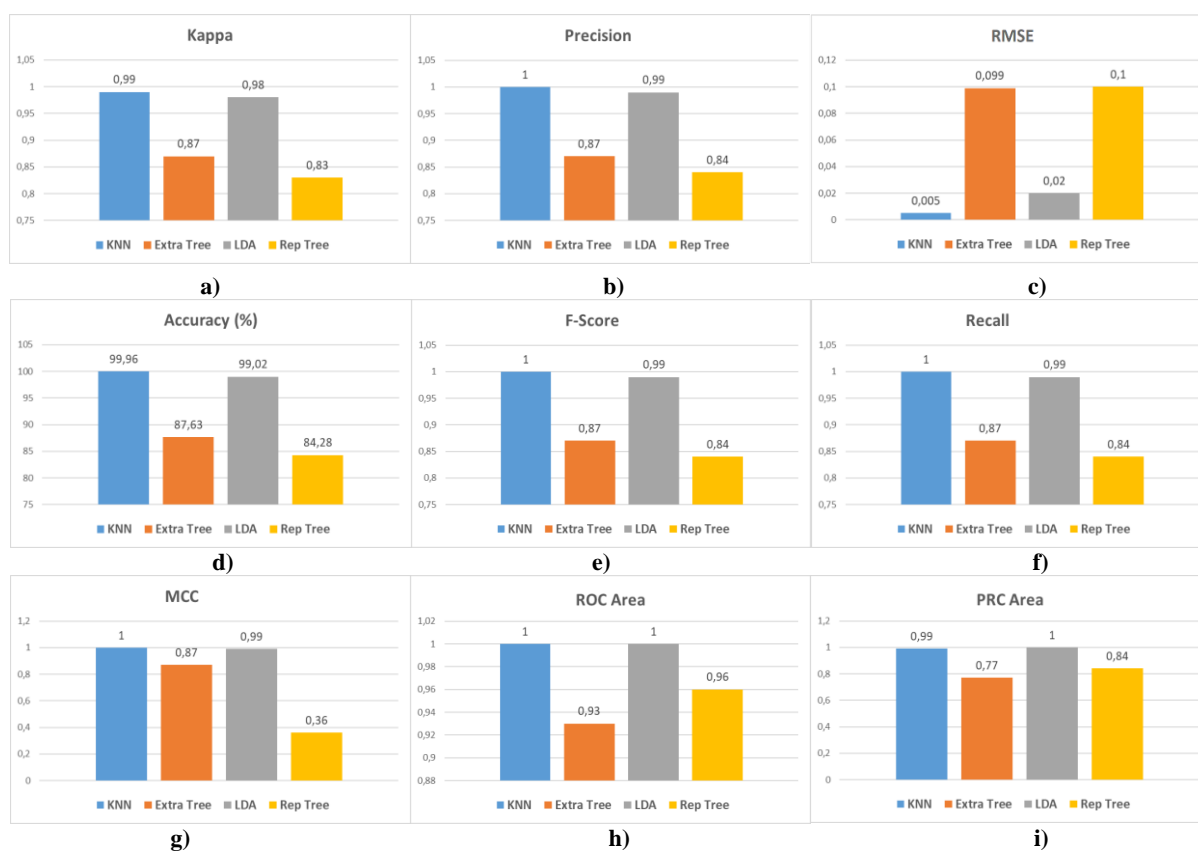
4. RESULTS

In this study, 10 different performance metrics explained in Section 2 were used to compare the success of KNN, Extra Trees, LDA and Rep Tree algorithms in the classification of ASL phonemes. The values of performance metrics obtained from 10-fold cross-validation are given in Figure 4. Considering all the performance metrics in Figure 3, the KNN algorithm demonstrated the best overall classification performance, achieving the lowest error rate. On the other hand, the Rep Tree algorithm had the worst overall performance. The parameters of the algorithms used are given in Table 1.

A confusion matrix contains basic but useful information about the results of a classification study. The parts coloured in green in the confusion matrix are TP and TN values. The TP and TN values represent the total number of the words that the algorithms predicted correctly. Other numbers in the confusion matrix indicate the number of incorrectly predicted words. The confusion matrices obtained by the algorithms from 10-fold cross-validation are given in Figure 5. The confusion matrices in Figure 4 indicate that the KNN and LDA algorithms delivered the best results. The KNN algorithm predicted almost all the letters correctly, only 1 i, 6 v letters and 1 w incorrectly. This indicates that the algorithm has difficulty in finding the letter v. The LDA algorithm, on the other hand, was found to have difficulty in detecting these letters due to incorrect predictions in the letters f, g, k, l, u, v, w, and y. When all the performance metrics are considered, it can be seen that the most successful algorithm is the KNN algorithm.

Table 1: Parameters of the algorithms used

Algorithm	Parameters
KNN	Number of KNN neighbors 1, batchsize 100, distance function Euclidean Distance.
Extra tree	Batch size: 100, Number of attributes to randomly choose at a node (k) :1, Seed:1
LDA	The tolerance of the termination criterion (eps) : 0.001, epsilon parameter 0.1, The cost parameter (cost): C:1.
Rep Tree	Batch size: 100, Seed:1, max deep:1, Determines the amount of data used for pruning. One fold is used for pruning, the rest for growing the rules(numfold) :3, The minimum total weight of the instances in a leaf (minNum):2. The number of decimal places to be used for the output of numbers in the model (numDecimalPlaces): 2.

**Figure 4:** Performance metrics a) Kappa, b) Precision, c) RMSE, d) Accuracy, e) F-Score, f) Recall, g) MCC, h) ROC Area, i) PRC Area

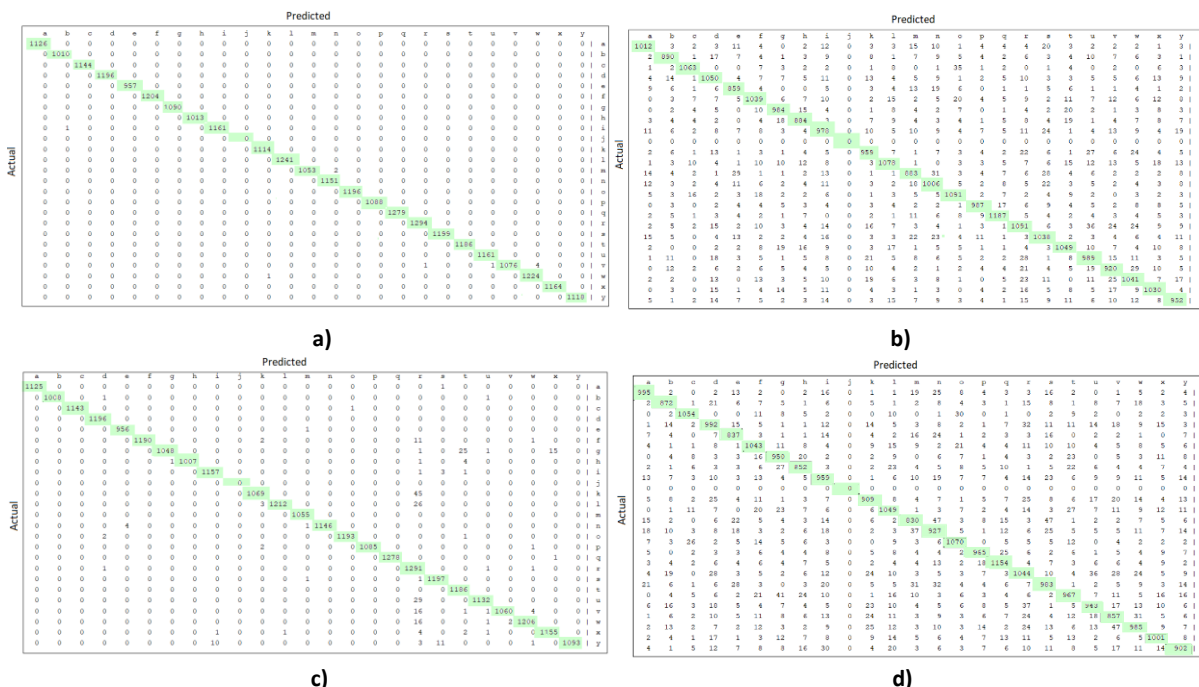


Figure 5: Confusion matrices a) The KNN, b) The Extra Trees, c) The LDA, d) The Rep Tree

When the algorithms' Time taken to build model and running times are examined, Time taken to build model KNN 0.08s, Extra tree 1.18s, LDA 0.9s, Rep tree 52.77s respectively. The running times are KNN 17 min, Extra tree 25s, LDA 9min, Rep tree 15min respectively. The fastest algorithm was Extra Trees, while KNN was the slowest.

5. DISCUSSION

Using the open dataset mentioned in the previous section, Rathi (2018) implemented a convolutional neural network (CNN) to recognise the alphabet of ASL. In deep learning, the CNN is a class of Artificial Neural Network (ANN), and it is commonly used to analyse visual imagery (Valueva et al., 2020). Although training the CNN takes a long time even across multiple graphical processing units, Rathi (2018) used two pre-trained models, Inception_v3 model (Szegedy, Vanhoucke, Ioffe, & Shlens, 2016) and MobileNet_v1 model (Howard et al., 2017). Both are open-source models and utilise the CNN at their cores. Rathi (2018) achieved an accuracy rate of 95.06% with MobileNet_v1 model and an accuracy rate of 93.36% with Inception_v3 model. In addition to the original mobile application solution proposed by Rathi (2018), the proposed solution could also be implemented in Raspberry Pi with OpenCV, and text- to-speech function can be used to achieve an improved and automated translation application.

SGDs can be used to teach language and literacy skills to children with ASD (Thunberg, Ahlsén, & Sandberg, 2007). Contrary to common belief that AAC and SGDs can obstruct the development of verbal speech, AAC helps children with ASD develop language and verbal speech faster. Because by providing a

visual and auditory representation of vocabulary words, it makes combining words easier (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2017). SGDs provided in the form of an application in a smart phone or tablet are relatively low-cost and highly portable. Examples of this are LAMP, Proloqu2go, Touch Chat, and Avaz (Proctor & Wang, 2016). Although AAC and SGDs can be quite useful to children with ASD, solutions that can help teachers who do not know SL are important because they may need to work with children with hearing impairment or children with speaking impairment. Biçek and Almalı (2020) proposed and developed a mobile application that allows educators who do not know SL to teach individuals with hearing impairment by using speech-to-text process.

Considering the numerous opportunities of virtual reality environment, Schioppo, Meyer, Fabiano, and Canavan (2020) proposed a virtual reality-based real-time system to recognise SL. The system relies on an egocentric view with a virtual reality headset along with a motion controller that consists of an optical hand tracking module to capture hand movements. In the demo, based on hand-crafted features that were extracted from the motion controller, the authors used random forest classifier to identify the 26 letters of ASL. After carrying out 10-fold cross-validation on 30 instances of each of the 26 letters, the authors achieved an accuracy of 98.33%.

6.CONCLUSION

The first step of starting to use signs is to learn the finger alphabet. Each SL comes with its own alphabet and parents are recommended to prioritise signs that their children use most often and learn vocabulary important to their families. There are commercially or freely available technological solutions that the parents can use to understand SL if they have difficulty with it. Image processing methods and classification algorithms lie on the core of these solutions; therefore, in this study, the performance of a group of classification algorithms for classifying ASL phonemes was compared. As the results show, when combined with image processing methods, classification algorithms can be used to identify ASL phonemes. In this study, the KNN achieved the best performance in terms of the used performance metrics. The proposed approach can be implemented in a smart phone or tablet or using a virtual reality headset.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

E.E.: Conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, writing—original draft preparation.

A.T.: Methodology, investigation, resources, writing—review and editing.


REFERENCES

- Abu Alfeilat, H. A., Hassanat, A., Lasassmeh, O., Tarawneh, A. S., Alhasanat, M. B., Eyal Salman, H. S., & Prasath, V. (2019). Effects of Distance Measure Choice on K-Nearest Neighbor Classifier Performance: A Review. *Big Data*, 7(4), 221-248. <https://doi.org/10.1089/big.2018.0175>
- Baker-Ramos, L. K. (2017). Gesture and Signing in Support of Expressive Language Development. i.e.: inquiry in education, 9(2), 2. Retrieved from: <https://digitalcommons.nl.edu/ie/vol9/iss2/2>
- Bıçek, E. & Almalı, M. N. (2020). A Mobile Application That Allows People Who Do Not Know Sign Language to Teach Hearing-Impaired People by Using Speech-to-Text Procedures. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 8(1), 27-33. <https://doi.org/10.18100/ijamec.682806>
- Boedeker, P., & Kearns, N. T. (2019). Linear Discriminant Analysis for Prediction of Group Membership: A User-Friendly Primer. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 2(3), 250-263. <https://doi.org/10.1177/2515245919849378>
- Bonvillian, J. D., & Nelson, K. E. (1976). Sign language acquisition in a mute autistic boy. *Journal of Speech & Hearing Disorders*, 41(3), 339-347. <https://doi.org/10.1044/jshd.4103.339>
- Bonvillian, J. D., Nelson, K. E., & Rhyne, J. M. (1981). Sign language and autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 11(1), 125-137. <https://doi.org/10.1007/BF01531345>
- Bowman-Smart, H., Gyngell, C., Morgan, A., & Savulescu, J. (2019). The moral case for sign language education. *Monash Bioethics Review*, 37(3-4), 94-110. <https://doi.org/10.1007/s40592-019-00101-0>
- Brown, R. S. (1978). Why Are Signed Languages Easier to Learn than Spoken Languages? Part Two. *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences*, 32(3), 25-44.
- Carr, E. G. (1979). Teaching autistic children to use sign language: some research issues. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 9(4), 345-359. <https://doi.org/10.1007/BF01531444>
- Chicco, D., & Jurman, G. (2020). The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC Genomics*, 21, 6. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6413-7>
- De Giacomo, A., Craig, F., Terenzio, V., Coppola, A., Campa, M. G., & Passeri, G. (2016). Aggressive Behaviors and Verbal Communication Skills in Autism Spectrum Disorders. *Global Pediatric Health*. <https://doi.org/10.1177/2333794X16644360>
- Delgado, R., & Tibau, X. A. (2019). Why Cohen's Kappa should be avoided as performance measure in classification. *PLoS One*, 14(9), e0222916. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222916>
- Denmark, T., Atkinson, J., Campbell, R., & Swettenham, J. (2019). Signing with the Face: Emotional Expression in Narrative Production in Deaf Children with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 49(1), 294-306. <https://doi.org/10.1007/s10803-018-3756-x>
- Fawcett, T. (2006). An Introduction to ROC Analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861-874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- Fitzpatrick, E. M., Stevens, A., Garritty, C., & Moher, D. (2013). The effects of sign language on spoken language acquisition in children with hearing loss: a systematic review protocol. *Systematic Reviews*, 2, 108. <https://doi.org/10.1186/2046-4053-2-108>
- Geurts, P., Ernst, D. & Wehenkel, L. (2006). Extremely randomized trees. *Machine Learning*, 63, 3-42. <https://doi.org/10.1007/s10994-006-6226-1>
- Gladfelter, A., Barron, K. L., & Johnson, E. (2019). Visual and verbal semantic productions in children with ASD, DLD, and typical language. *Journal of Communication Disorders*, 82, 105921. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2019.105921>

- Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., & Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. <https://arxiv.org/abs/1704.04861>
- Iacono, T., Trembath, D., & Erickson, S. (2016). The role of augmentative and alternative communication for children with autism: current status and future trends. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 12, 2349-2361. <https://doi.org/10.2147/NDT.S95967>
- Jantzen, T. M. (2011). The Power of Sign: Enhancing Oral Communication with Young Children with Typical Hearing. Research Papers, Paper 171, Northern Illinois University. <http://opensiuc.lib.siu.edu/gp/171>
- Kapp, S. K., Steward, R., Crane, L., Elliott, D., Elphick, C., Pellicano, E., & Russell, G. (2019). 'People should be allowed to do what they like': Autistic adults' views and experiences of stimming. *Autism: the international journal of research and practice*, 23(7), 1782-1792. <https://doi.org/10.1177/1362361319829628>
- Kasliwal, N. (2018). Natural Language Processing with Python Quick Start Guide: Going from a Python Developer to an Effective Natural Language Processing Engineer. Birmingham: Packt Publishing Ltd.
- Lal, R., & Sanghvi, D. (2015). Autism and Functional Language Development – An Experiment with AAC Intervention. In (Ed.), *Autism Spectrum Disorder - Recent Advances*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/59137>
- McCleery, J. P., Elliott, N. A., Sampanis, D. S., & Stefanidou, C. A. (2013). Motor development and motor resonance difficulties in autism: relevance to early intervention for language and communication skills. *Frontiers in integrative neuroscience*, 7, 30. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00030>
- McNeil, C. B., Quetsch, L. B., & Anderson, C. M. (2019). *Handbook of Parent-Child Interaction Therapy for Children on the Autism Spectrum*. Cham: Springer.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2017). *The Promise of Assistive Technology to Enhance Activity and Work Participation*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/24740>
- Proctor, L. A., & Wang, Y. (2016). Using iPads and Mobile Technology for Children with Developmental Disabilities: Facilitating Language and Literacy Development. In I. Management Association (Ed.), *Special and Gifted Education: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 268-301). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0034-6.ch012>
- Rathi, D. (2018). Optimization of Transfer Learning for Sign Language Recognition Targeting Mobile Platform. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 6(4), 198-203.
- Rose, V., Trembath, D., Keen, D., & Paynter, J. (2016). The proportion of minimally verbal children with autism spectrum disorder in a community-based early intervention programme. *Journal of Intellectual Disability Research*, 60, 464-477. <https://doi.org/10.1111/jir.12284>
- Sato, W., Sawada, R., Uono, S., Yoshimura, S., Kochiyama, T., Kubota, Y., Sakihama, M., & Toichi, M. (2017). Impaired detection of happy facial expressions in autism. *Scientific Reports*, 7, 13340. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11900-y>
- Schaeffer, B., Kollinzas, G., Musil, A., & McDowell, P. (1977). Spontaneous Verbal Language for Autistic Children Through Signed Speech (Vol. 17, p. 287-328). N.p.: Gallaudet University Press. <https://doi.org/10.1353/sls.1977.0009>
- Schioppo, J., Meyer, Z., Fabiano, D., & Canavan, S. (2020). Sign Language Recognition in Virtual Reality. *Proceedings of 2020 15th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 917-917, doi: 10.1109/FG47880.2020.00027

- Schneden, A. M. (2006). Sign to learn: sign language as a teaching tool in hearing classrooms. Graduate Research Papers, 1475, University of Northern Iowa. Retrieved from <https://scholarworks.uni.edu/grp/1475>
- Shield, A. & Meier, R. (2014). 4. The Acquisition of Sign Language by Deaf Children with Autism Spectrum Disorder. In D. Quinto-Pozos (Ed.), *Multilingual Aspects of Signed Language Communication and Disorder* (pp. 90-122). Bristol, Blue Ridge Summit: Multilingual Matters. <https://doi.org/10.21832/9781783091317-007>
- Simpson, C. G., & Lynch, S. A. (2007). Sign Language: Meeting Diverse Needs in the Classroom. *Exchange: The Early Childhood Leaders' Magazine Since 1978*, 176, 45-49.
- Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., & Shlens, J. (2016). Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision. *Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Las Vegas, NV, pp. 2818-2826.
- Tarver, J., Pearson, E., Edwards, G., Shirazi, A., Potter, L., Malhi, P., & Waite, J. (2021). Anxiety in autistic individuals who speak few or no words: A qualitative study of parental experience and anxiety management. *Autism: the international journal of research and practice*, 25(2), 429-439. <https://doi.org/10.1177/1362361320962366>
- Thompson, R. H., Cotnoir-Bichelman, N. M., McKerchar, P. M., Tate, T. L., & Dancho, K. A. (2007). Enhancing early communication through infant sign training. *Journal of applied behavior analysis*, 40(1), 15-23. <https://doi.org/10.1901/jaba.2007.23-06>
- Thunberg, G., Ahlsén, E., & Sandberg, A. D. (2007). Children with autistic spectrum disorders and speech-generating devices: communication in different activities at home. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 21(6), 457-479. <https://doi.org/10.1080/02699200701314963>
- Tomaszewski, P. (2001). Sign Language Development in Young Deaf Children. *Psychology of Language and Communication*, 5(1), 67-80.
- Toth, A. (2009). Bridge of signs: Can sign language empower non-deaf children to triumph over their communication disabilities? *American Annals of the Deaf*, 154(2), 85-95. <https://doi.org/10.1353/aad.0.0084>
- Trevisan, D. A., Roberts, N., Lin, C., & Birmingham, E. (2017). How do adults and teens with self-declared Autism Spectrum Disorder experience eye contact? A qualitative analysis of first-hand accounts. *PLoS One*, 12(11), e0188446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188446>
- Trigueiros, P., Ribeiro, F., & Reis L. P. (2014) Vision-Based Portuguese Sign Language Recognition System. In: Rocha Á., Correia A., Tan F., Stroetmann K. (eds) *New Perspectives in Information Systems and Technologies*, Volume 1. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 275. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05951-8_57
- U.S. Department of Health and Human Services. (n.d.). American sign language. National Institute of Deafness and Other Communication Disorders. Retrieved July 3, 2022, from <https://www.nidcd.nih.gov/health/american-sign-language>
- Valueva, M. V., Nagornov, N. N., Lyakhov, P. A., Valuev, G. V., & Chervyakov, N. I. (2020). Application of the residue number system to reduce hardware costs of the convolutional neural network implementation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 177, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.04.031>
- Weinberg, A. I., & Last, M. (2019). Selecting a representative decision tree from an ensemble of decision-tree models for fast big data classification. *Journal of Big Data*, 6, 23. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0186-3>
- White, E. N., Ayres, K. M., Snyder, S. K., Cagliani, R. R., & Ledford, J. R. (2021). Augmentative and Alternative Communication and Speech Production for Individuals with ASD: A Systematic Review. *Journal of autism and developmental disorders*, 51(11), 4199-4212. <https://doi.org/10.1007/s10803-021-04868-2>

Barlat89 Akma Kriterinin Detaylı İncelenmesi ve Model Katsayılarının Belirlenmesi Üzerine Farklı Yöntemlerin Geliştirilmesi

Süleyman Kılıç^{1*} 

¹*Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kırşehir Ahi Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye*

Geliş: 11.10.2024, Kabul: 10.12.2024, Yayınlanma: 25.12.2024

ÖZ

Bu çalışmada, Barlat89 akma kriteri kullanılarak farklı anizotropik malzemelerin deformasyon davranışlarının modellenmesi üzerine odaklanılmıştır. Söz konusu kriter, ortotropik levhaların plastik davranışlarını öngörmek amacıyla geliştirilmiş bir modeldir. Sonlu elemanlar analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılan Hill48 modeline kıyasla, daha az sayıda parametre ile yüksek doğruluk sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Çalışmada, AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımları ile DP600 çift fazlı çelik malzemeler analiz edilmiştir. Model parametrelerinin belirlenmesinde, sayısal ve analitik yöntemler birlikte kullanılmış ve yeni parametrik uyarılama yöntemleri önerilmiştir. Elde edilen model sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bulgular, kullanılan çözüm yöntemlerinin deformasyon davranışlarının öngörülmesinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, modelin doğruluğunu artırmak için parametrik uyarılama yöntemlerinin etkili bir araç olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, yalnızca bir parametrenin veya tüm model parametrelerinin optimize edilmesinin tahmin doğruluğu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, önerilen yöntemlerin farklı malzeme türleri ve gerilme koşulları için geçerliliği detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Barlat89 akma kriteri; Model katsayıları; Optimizasyon

Detailed Examination of the Barlat89 Yield Criterion and Development of Various Methods for Determining Model Coefficients

ABSTRACT

In this study, the modeling of deformation behavior of various anisotropic materials using the Barlat89 yield criterion has been focused on. This criterion is a model developed to predict the plastic behavior of orthotropic sheets. Compared to the Hill48 model, which is widely used in finite element analyses, it is preferred due to its higher accuracy with fewer parameters. In the study, AA5754 and AA7075 aluminum alloys and DP600 dual-phase steel materials were analyzed. In determining the model parameters, numerical and analytical methods were used together, and new parametric adaptation methods were proposed. The obtained model results were compared with experimental data. The findings revealed that the solution methods used play a significant role in predicting deformation behavior. Additionally, it has been determined that parametric adaptation methods are an effective tool for improving the accuracy of the model. In the study, the effect of optimizing only one parameter or all model parameters on prediction accuracy was evaluated. In this context, the validity of the proposed methods for different material types and stress conditions was investigated in detail.

Keywords: Barlat89 yield criterion; Model coefficients; Optimization

1. GİRİŞ

Barlat89 akma kriteri, anizotropik metal levhaların plastik davranışlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir plastik malzeme modelidir. Barlat ve Lian tarafından 1989 yılında geliştirilen bu model, özellikle ortotropik malzemelerin akma yüzeylemlerini tanımlamak için kullanılmaktadır (Barlat & Lian, 1989). Ortotropik malzeme, üç ortogonal yönde farklı mekanik özelliklere sahip anizotropik malzemelere verilen addır. Anizotropi ise metal levhaların imalat sürecindeki haddeleme gibi işlemler sırasında farklı yönlerde farklı mekanik özellikler göstermesi durumunu ifade eden bir terimdir.

Sonlu elemanlar analizlerinde sıklıkla kullanılan Von Mises modeli izotropik malzemeler için uygun olan ve malzemenin her yöndeki gerilme durumunu aynı şekilde ele alan bir kriterdir. Ancak, Barlat89 modeli, malzemenin farklı yönlerde duyarlılıklarını hesaba katmakta ve böylece malzemenin anizotropik (yöne bağlı) davranışlarını daha iyi modelleyebilmektedir. Bu nedenle metal şekillendirme süreçlerinde yüksek doğruluk sağladığı için otomotiv ve havacılık sektörlerinde geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Model, farklı yüklem koşulları altında malzemenin nasıl akacağını, nereden kırılma veya yırtılma olasılığının olduğunu daha doğru tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. Bu sayede kalıp ve zımba tasarımlarına da yardımcı olmakta ve deneme yanılma sürecini ortadan kaldırmaktadır. Örneğin bir otomobil kaportası panelinin şekillendirilmesi sırasında, panelin farklı bölgelerindeki gerilme ve gerinme durumları Barlat89 modeli ile analiz edilerek, bu bölgelerde malzemenin nasıl davranacağını ve hangi alanların zayıf veya risk altında olabileceğini, nerede aşırı incelleme veya kırışıklıkların oluşabileceği konusunda bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca süreç parametrelerinin belirlenmesine de yardımcı olmaktadır. Çizelge 1.'de Ticari yazılımlarda kullanılan akma kriterleri verilmiştir (Banabic, 2010).

Çizelge 1: Ticari yazılımlarda kullanılan akma kriterleri (Banabic, 2010).

Ticari Yazılım	Hill48	Barlat89
ABAQUS	X	X
AUTOFORM	X	X
LS-DYNA	X	X
OPTRIS	X	X
PAM STAMP	X	
STAM PACK	X	

Hill48 ve Barlat89 modelleri hem ticari yazılımlarda hem de literatürde sıkça kullanılmaktadır. Günümüzde birçok model geliştirilmesine rağmen bu eski modellerin popüler olmasının temel sebebi az sayıda deneysel parametre ile tahmin yapabilmeleridir. Çizelge 2.'de akma kriterlerinde ihtiyaç duyulan deneysel veri parametreleri verilmiştir. Tabloda da görüleceği üzere en az sayıda parametre ile çalışan (σ_0, r_0, r_{90}) model Barlat89 modelidir.

Çizelge 2: Akma kriterlerinde deneysel veri ihtiyacı (Banabic, 2010)

Model	σ_0	σ_{30}	σ_{45}	σ_{75}	σ_{90}	σ_b	r_0	r_{30}	r_{45}	r_{75}	r_{90}	r_b
Hill48	X						X		X		X	
Barlat89	X						X				X	
Barlat2004	X		X		X	X	X		X		X	X
Soare2007	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Shrivastava ve Digavalli (Shrivastava & Digavalli, 2023) tarafından yapılan araştırmada, AA5182 alüminyum alaşımının sıcak derin çekme işlemleri sırasında sürtünme özelliklerinin sıcaklık ve basınç gibi işlem parametrelerinden nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Barlat89 modeli kullanılarak sayısal modelleme çalışmasını başarıyla uygulamışlardır. Sıcaklık ve temas basıncı gibi değişkenlerin sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkilediğini ve değişken sürtünme koşullarının kullanılmasının simülasyon doğruluğunu artırdığını belirtmişlerdir. Barlat89 modeli, geri esneme tahminlerinde temel modellerle karşılaştırıldığında önemli başarılar göstermesine rağmen, karmaşık gerilme ve deformasyon etkilerinin daha iyi öngörülebilmesi için ilave model parametrelerine ihtiyaç duymaktadır. Conde ve arkadaşları (Conde, Coppieters, & Andrade-Campos, 2024), çalışmalarında model parametrelerinde kalibrasyon yaparak geri esneme tahminlerindeki hata oranları minimize etmişlerdir. Barlat89 modelinin anizotropik davranışların öngörülmesinde etkili bir yöntem olduğunu, ancak geri esneme gibi karmaşık şekil değişimlerinin tahmin edilmesi söz konusu olduğunda daha ileri modellerin (örneğin, Barlat89+Yoshida-Uemori) tercih edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Rickhey ve Hong (Rickhey & Hong, 2023) tarafından yapılan çalışmada, Barlat89 modeli ile genişletilmiş Barlat89 modeli arasındaki farklar incelenmiştir. Çalışmalarında, geri esneme tahminlerinin doğruluğu, hem kuvvet-yer değiştirme (FDL) eğrilerinde hem de farklı gerilme modları için incelenmiş ve geri esneme davranışının hassas bir şekilde tahmin edilebilmesi için r -değerlerinin gerinimle birlikte nasıl değiştiğini detaylandırmışlardır. Barlat89 modelinin doğruluğunun belirli koşullar altında yüksek olduğunu, ancak anizotropik malzemelerde özellikle karmaşık gerilme durumlarında geri esneme etkilerinin doğru tahmin edilmesi için genişletilmiş Barlat89 gibi daha ileri modellerin kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır. Dang ve arkadaşlarının (Dang, Đúc, Lê Quóc, Van Chinh, & Van Hoang, 2023) yaptığı çalışmada, SUS304 paslanmaz çeliğin derin çekme işlemi sırasında oluşan kulaklanma hataları, Barlat89 akma kriteri kullanılarak sayısal simülasyon ile öngörülmüştür. Elde edilen sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Barlat89 modelinin anizotropik katsayılarının doğru tanımlanmasının, malzemenin farklı yönlere gerilme-şekil değiştirme davranışlarının daha hassas bir şekilde tahmin edilmesini sağladığı gösterilmiştir. Shrivastava ve Kumar (Shrivastava & Kumar, 2024) tarafından yapılan çalışmada, çift fazlı DP600 çeliğinin derin çekme simülasyonları Mises, Barlat89 ve BBC2005 akma kriterleri kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmalarında, BBC2005 modelinin çift eksenli gerilme koşullarında daha iyi sonuçlar verdiği, Barlat89 modelinin ise yalnızca tek eksenli gerilme

durumlarında geçerli olduğu belirtilmiştir. Barlat89 modelinin çift eksenli gerilme koşullarında akma yüzeyini olduğundan daha yüksek tahmin ettiğini ve bu durumun geri esneme tahminlerini olumsuz etkilediğini ortaya koymuşlardır. Katiyar ve arkadaşlarının (Katiyar, Panicker, & Panda, 2023) yapmış olduğu çalışmada, Barlat89 modeli kullanılarak AA5754 ve AA6082 alüminyum alaşımlarının sıcak çekme işlemi sonrası davranışları analiz edilmiştir. Çalışmalarında, Barlat89 modelinin sıcaklık ve deformasyon hızına duyarlılığını ve bu parametrelerin malzeme performansı üzerindeki etkilerini detaylandırmışlardır. Geri esneme tahminlerinin doğruluğunu artırmak adına, Barlat89 modeline ek olarak, sıcaklık ve hız duyarlılığına sahip daha karmaşık modellerin kullanılması önerilmiştir.

Model katsayılarının doğru belirlenmesi, malzeme davranışlarının öngörülmesinde ve mühendislik uygulamalarında yüksek doğruluk sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, Barlat89 modeli için katsayılarının belirlenmesi üzerine farklı yöntemlerin karşılaştırılmasını yapmak ve önerilen denklemin etkinliğini incelemektir. Çalışma, deneysel veriler kullanılarak önerilen yöntemlerin doğruluğunu değerlendirmeyi hedeflemektedir. Elde edilen sonuçlar, farklı çözüm yöntemlerinin Barlat89 modeli üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir.

2. TEORİK ARKA PLAN

2.1. Barlat89 Akma Kriteri

Barlat89 Modeli, gerilme tensörü ve anizotropi tensörleri arasındaki ilişkiyi kullanarak matematiksel bir akma fonksiyonu oluşturmaktadır. Bu fonksiyon, belirli bir gerilme durumunda malzemenin ne zaman plastik deformasyona uğrayacağını tanımlamaktadır. Model, Eşitlik 1'de verilen k_1 ve k_2 olarak adlandırılan gerilme tensörünün iki sabit değeri ile ifade edilmektedir. Ayrıca M adı verilen bir üs ile formüle edilmektedir. M, malzemenin kristalografik yapısına bağlı olarak seçilen bir sayı olmakla birlikte BCC ve FCC metaller için sırasıyla 6 ve 8 olarak önerilmektedir (Banabic, 2010; Barlat & Lian, 1989). Modelin temel ifadesi Denklem 1 ile gösterilmektedir.

$$f = |k_1 + k_2|^M + |k_1 - k_2|^M + |2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2}$$

$$k_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \sigma_{12}^2} \quad (2)$$

Bu model, $\sigma_{12} = 0$ olduğunda $\sigma_{11} = \sigma_1$ ve $\sigma_{22} = \sigma_2$ olmakta normal anizotropi durumunda genişletilmiş olmakta ve Denklem 3 ile ifade edilmektedir.

$$f = a|k_1 + k_2|^M + b|k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (3)$$

2.2. Model Katsayılarının Belirlenmesi

Denklem 3'te yer alan a , b ve c model katsayıları anizotropi değerine (r) bağlı olup Denklem 4 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$a = b = 2 - c = \frac{2}{1 + r} \quad (4)$$

Düzlemsel anizotropi sergileyen malzemeler için Denklem 5 ile genelleştirmiştir.

$$f = a|k_1 + k_2|^M + a|k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\sigma_e^M$$

$$k_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2} \quad (5)$$

$$k_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2}\right)^2 + p^2\sigma_{12}^2}$$

Bu denklemlerdeki a , c , h , p parametreleri ise Denklem 6 yardımıyla belirlenmektedir. p parametresi ayrıca nümerik yöntemler yardımıyla da belirlenebilmektedir. Denklem 6'da verilen a , c , h parametrelerinin çözümü için sadece r_0 ve r_{90} deneysel anizotropi değerlerine ihtiyaç bulunmaktadır.

$$a = 2 - c = 2 - 2\sqrt{\frac{r_0}{1 + r_0} \frac{r_{90}}{1 + r_{90}}}$$

$$h = \sqrt{\frac{r_0}{1 + r_0} \frac{1 + r_{90}}{r_{90}}}$$

$$p = \frac{\sigma_0}{\tau_s} \left(\frac{2}{2a + 2M_c}\right)^{\frac{1}{M}} \quad (6)$$

Denklem 6'da ki τ_s farklı kayma gerilmesi durumundaki akma gerilmesini ifade etmektedir.

Bu katsayılar, malzemenin mekanik testlerinden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak, deneysel süreçler genellikle karmaşık ve zaman alıcıdır. Model katsayılarının belirlenmesinde kullanılan yaygın yöntemler arasında deneysel verilerin doğrudan kullanımı, sayısal optimizasyon teknikleri ve analitik çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Deneysel verilerin doğrudan kullanımı, malzeme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim verilerinin kullanılması ile gerçekleşir. Örneğin her bir derecelik açı değişimi için numuneler hazırlanıp çekme deneyleri yapılabilir. Bu yöntem, yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, deneysel süreçlerin karmaşıklığı ve maliyeti nedeniyle pratik olmamaktadır. Sayısal optimizasyon teknikleri, geniş veri setleri üzerinde etkili sonuçlar vermektedir. Bu tekniklerden genetik algoritmalar,

parçacık sürü optimizasyonu ve gradyan yöntemleri gibi çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanılarak model katsayıları belirlenebilmektedir (Kılıç, 2024). Ancak, bu yöntemlerin hesaplama maliyetleri yüksek olup yüksek bilgisayar işlem kapasitesi gerektirmektedir (David, 1989; Goldberg & Holland, 1988). Akma kriterleri için model katsayılarının belirlenmesinde deneysel veriler büyük önem taşımaktadır. Bu veriler, genellikle gerilme-gerinim testleri, çekme testleri ve üç nokta eğme testleri gibi mekanik testlerden elde edilmektedir. Bu testler sırasında, malzemenin farklı yönlerdeki gerilme ve gerinim davranışları ölçülerek model katsayıları hesaplanmaktadır (Banabic, 2010).

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında iki farklı alüminyum alaşımı ve bir çelik malzeme incelenmiştir. Malzemelere ait mekanik özellikler literatürden alınmış olup Çizelge 3.'de verilmiştir. İncelenen alüminyum alaşımlarından biri AA5754'tür. Bu alaşım, iyi şekillendirilebilirlik ve korozyon direnci özellikleri sayesinde otomotiv ve denizcilik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Erice, Rolfe, & Mendiguren, 2023; Ozturk, Pekel, & Halkaci, 2011; Toros, Alkan, Ece, & Ozturk, 2011). AA7075 ise yüksek mukavemetli bir alüminyum alaşımıdır. Özellikle havacılık ve uzay sanayinde, ayrıca spor ekipmanları ve askeri uygulamalarda tercih edilmektedir (S. Kilic, 2019; Rajendran, Duraisamy, Rajendran, & Loganathan, 2023). Bu alaşım, yüksek çekme dayanımı ve yorulma direnci ile bilinmektedir. DP600, çift fazlı (dual phase) bir çelik olup, özellikle otomotiv endüstrisinde kullanım alanı bulunmaktadır (Kacar, Öztürk, Toros, & Kılıç, 2020; Suleyman Kilic & Ozturk, 2016; Saxena, Drotleff, & Mukhopadhyay, 2016). Bu çelik malzeme, mükemmel şekillendirilebilirlik ve yüksek mukavemet özelliklerine sahiptir.

Çizelge 3: Malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	σ_0/σ_0	σ_{45}/σ_0	σ_{90}/σ_0	r_0	r_{45}	r_{90}	Ref.
AA5754	1,000	0,967	0,969	0,723	0,726	0,739	(Erice et al., 2023)
AA7075	1,000	0,956	1,012	0,38	0,69	0,47	(S. Kilic, 2019)
DP600	1,000	1,02	1,04	0,89	0,85	1,12	(Kacar et al., 2020)

Barlat89 akma kriterine dayalı malzeme modellerinde parametrelerin optimizasyonu, malzemenin anizotropik özelliklerini doğru bir şekilde temsil etmek için kritik öneme sahiptir. Bu parametrelerin en uygun değerlerinin belirlenmesi için türev temelli olmayan optimizasyon teknikleri sıkça kullanılmaktadır. Nelder-Mead simplex algoritmasına dayalı fminsearch fonksiyonu, bu tür optimizasyonlarda yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Nelder-Mead simplex algoritması, türevlere gerek duymadan bir fonksiyonun minimum değerini bulmaya çalışan bir optimizasyon tekniğidir (Lagarias, Reeds, Wright, & Wright, 1998).

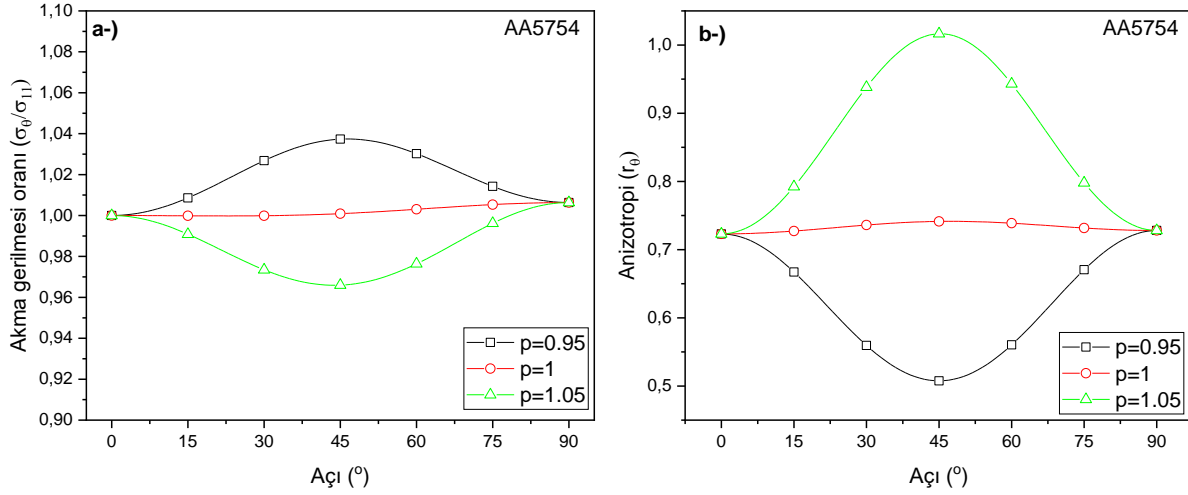
Bu yöntem, çok boyutlu uzayda simplex olarak adlandırılan bir çokgen oluşturmakta ve bu çokgenin köşelerini iteratif olarak güncelleyerek fonksiyonun minimum noktasına yaklaşmaktadır. Fminsearch fonksiyonu, özellikle türevlerin analitik olarak elde edilmesinin zor olduğu durumlarda kullanışlıdır. Bu özellikleri nedeniyle, Barlat89 akma kriterinin parametre optimizasyonunda fminsearch fonksiyonu tercih edilmiştir.

Barlat89 modelinin çözümünde önemli etkileri olan üç parametre a , c ve h parametreleridir. Bu çalışma kapsamında c ve h parametreleri için Denklem 7’de önerilen matematiksel ifadelerin etkisi de incelenmiştir.

$$\begin{aligned} c &= \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \\ a &= 2 - c \\ h &= \frac{r_0 + r_{45} + r_{90}}{r_{45} + 1} \end{aligned} \quad (7)$$

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, Barlat89 akma kriterinin alüminyum ve çelik alaşımlarının anizotropik davranışlarını modelleme üzerindeki etkinliği incelenmiş ve farklı yöntemlerle belirlenen model katsayılarının doğruluğu karşılaştırılmıştır. Deneysel veriler ve optimizasyon teknikleri kullanılarak, akma gerilmesi ve anizotropi katsayısı tahminlerindeki hata oranları analiz edilmiştir. Çalışmada ilk olarak p parametresinin etkisi araştırılmıştır. Şekil 1.’de AA5754 malzemesinde yapılan incelemede p değerinin etkisi görülmektedir. 6 numaralı eşitlikte verilen p katsayısının belirlenmesi için kullanılan denklemde kayma gerilmesi katsayısı olduğu için çoğunlukla nümerik yöntemlerle belirlenmektedir. Bu nedenle bu akma kriterinde en önemli model parametresi olarak p değerinin dikkatli belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 1 incelendiğinde akma gerilmesi tahmininde p değerinin artması 45° açı için gerilme tahmini değerini düşürmektedir. Ama anizotropi katsayısının tahmininde p değerinin artması 45° açı için anizotropi değeri tahminini artırmaktadır. Bu nedenle p değerinin doğru belirlenmesi bu model için kritik öneme sahiptir.

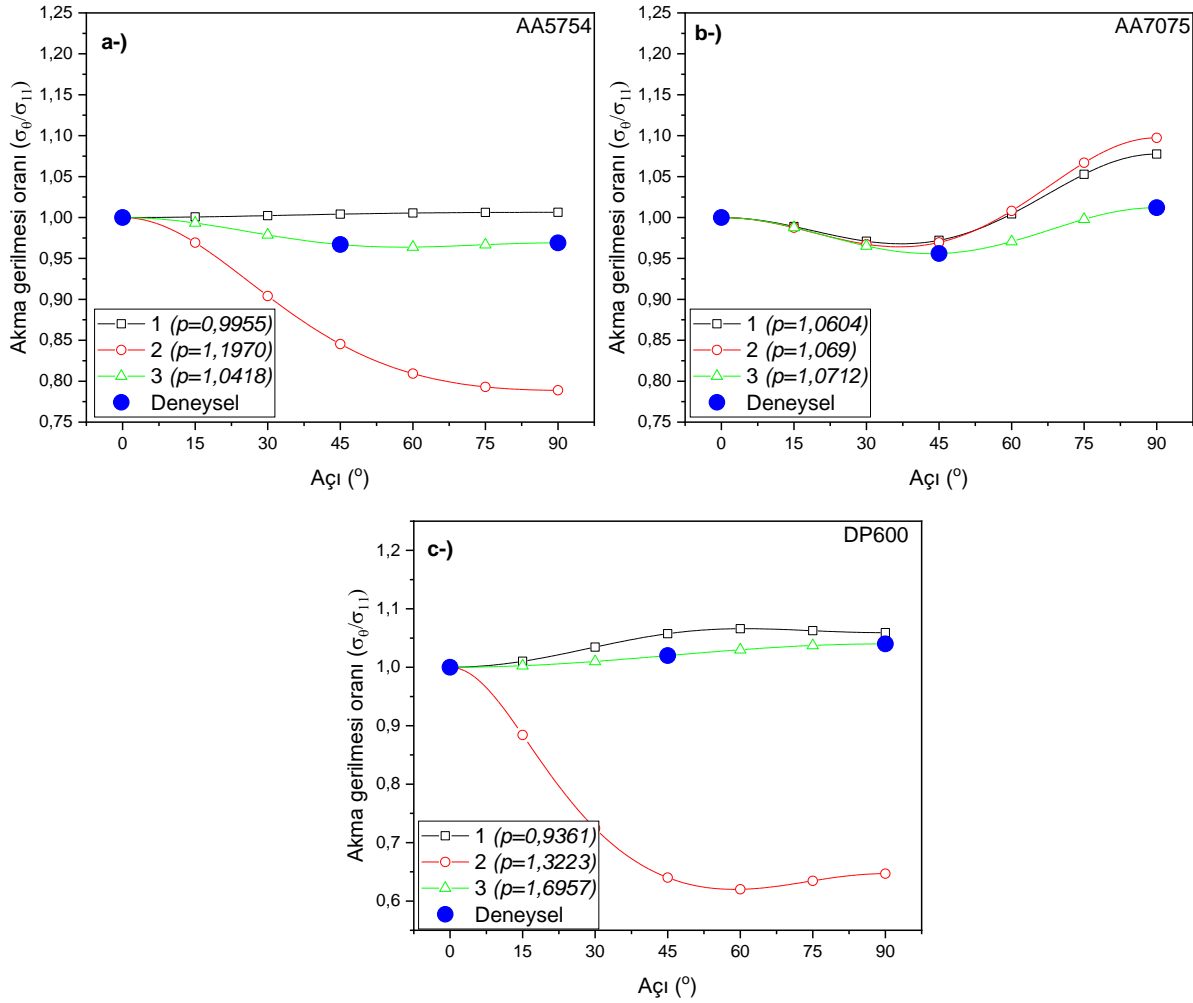


Şekil 1: AA5754 alaşımında farklı p parametrelerinin etkisi, a-) Akma gerilmesi değişimi, b-) Anizotropi değişimi

Çalışma kapsamında üç farklı model parametresi belirleme yöntemi incelenmiştir.

1. Model’de sadece p değeri optimize edilmiş, a, c, h parametreleri için 6 numaralı eşitlik ile analitik olarak çözüm sağlanmıştır.
2. Model’de sadece p değeri optimize edilmiş, a, c, h parametreleri için 7 numaralı eşitlik ile analitik olarak çözüm sağlanmıştır.
3. Model’de ise a, c, h, p parametrelerinin hepsi optimizasyon yöntemi ile elde edilmiştir.

Şekil 2.’de ki grafikler incelendiğinde sadece p değerinin optimize edilerek bulunması (1. Model) tahminler üzerindeki hata miktarının düşürülmesinde etkili olamamıştır. Bu karşılaştırılan üç farklı malzeme türünde de böyle olmuştur. Çalışma kapsamında önerilen 7 numaralı denklem ile de tahmin hatası oldukça fazla çıkmıştır (2. Model). Model parametrelerindeki a, c, h, p parametrelerinin hepsinin optimizasyonla belirlenmesi durumunda ise hata oranı en az olmuştur (3. Model).

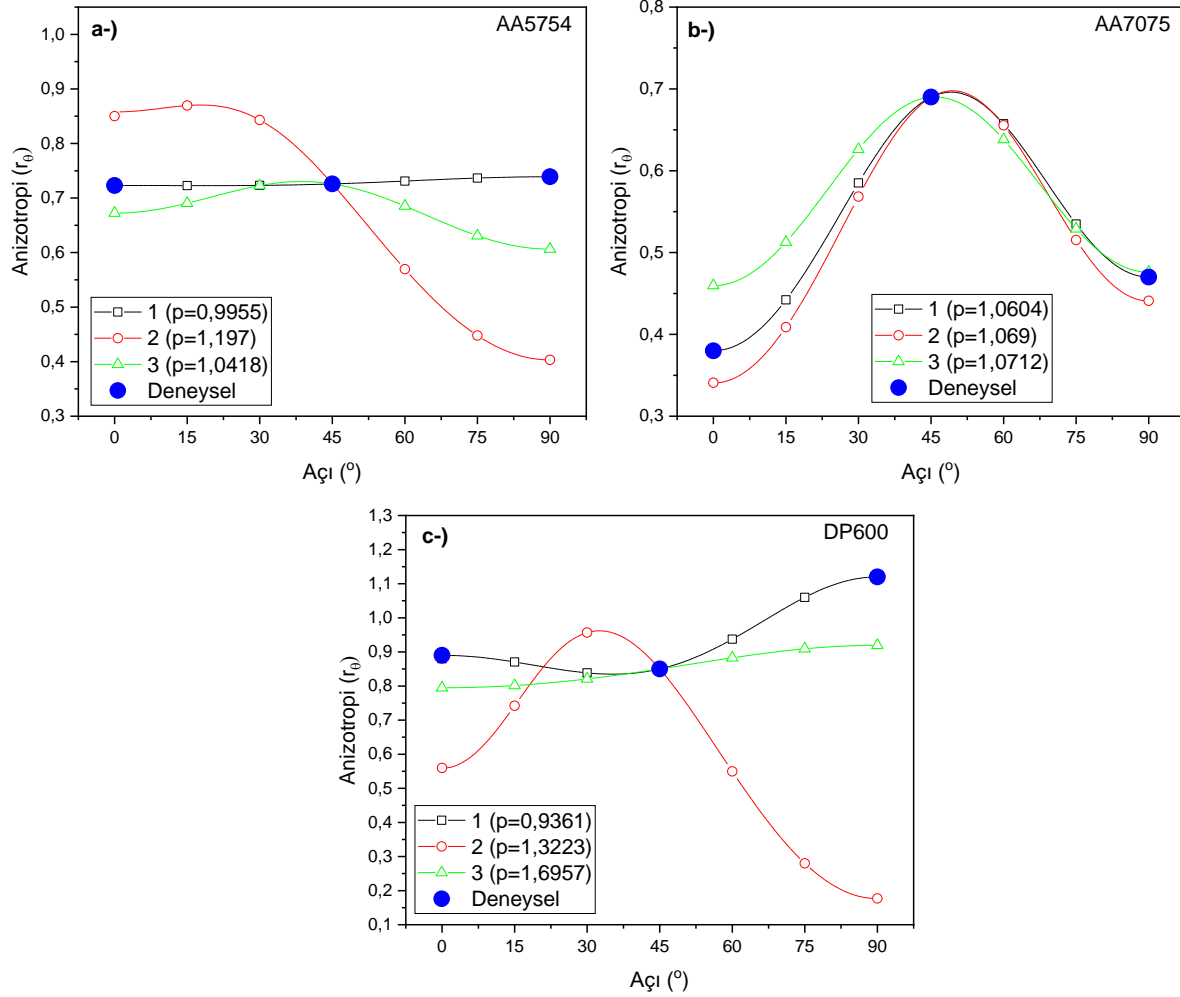


Şekil 2: Farklı modellerin akma gerilmesi tahminine etkisi, a-) AA5754, b-) AA7075, c-) DP600

Şekil 3.'de üç farklı modelin anizotropi değeri tahminleri verilmiştir. Birinci modelin üç farklı malzeme türünde de tahminleri en az hatayla yaptığı görülmektedir. Bunun temel nedeni Barlat89 akma kriterinin anizotropi katsayıları üzerine kurulmasıdır. Ama bu durum yukarıda bahsedildiği gibi akma mukavemetlerinin tahmininde hata oranının yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. İkinci modelin tahminlerinin yine hata oranı yüksek çıkmıştır. Üçüncü modelde ise hata oranı yüksek olmakla birlikte akma gerilmesi tahminleriyle birlikte değerlendirildiğinde yine kullanılabilir bir yöntem olduğu düşünülmektedir.

Akma gerilmesi ve anizotropi parametrelerinde farklı optimizasyon yaklaşımlarının başarılı olmasının temel nedeni, model parametrelerinin (a, c, h, p) matematiksel ifadelerinin farklı süreçlere dayalı olmasıdır. 6 numaralı denklemde, $a, c,$ ve h parametreleri anizotropi katsayıları olan r_0 ve r_{90} 'ye bağlıdır. Bu durum, bu parametrelerin malzemenin farklı yönlere deformasyon davranışlarını yansıtmasına neden olmaktadır. Buna karşın, p parametresi akma gerilmesi (σ_0) özelliklerine bağlıdır. Bu bağlamda, anizotropi

katsayılarının tahmininde r değerlerine odaklanması (1. Model), akma gerilmesi tahmininde ise tüm parametrelerin birlikte optimize edilmesi (3. Model) daha başarılı sonuçlar sağlamaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için, 3 numaralı denklemde verilen akma fonksiyonunun geliştirilmesi ve hem akma gerilmesi hem de anizotropi davranışlarını daha doğru temsil edecek yeni bir matematiksel fonksiyonun üretilmesi önerilmektedir.



Şekil 3: Farklı modellerin anizotropi katsayısı tahminine etkisi, a-) AA5754, b-) AA7075, c-) DP600

Literatürde yapılan çalışmalar, Barlat89 modelinin analitik çözümünün belirli sınırlarının olduğunu ve modelin daha karmaşık gerilme durumlarında doğruluğunu artırmak için geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, çeşitli araştırmalar modelin farklı parametrelerle iyileştirilmesine odaklanmıştır. Örneğin, Sanrutsadakorn ve arkadaşları (Sanrutsadakorn, Jhonthong, & Julsri, 2023), Barlat89 ve geliştirilmiş Barlat89+Yoshida-Uemori modellerini karşılaştırarak, temel modelin geri esneme

tahminlerinde yetersiz kaldığını belirtmiştir. Conde ve arkadaşları (Conde et al., 2024), model parametrelerinin kalibrasyonu ile geri esneme tahminlerindeki hata oranlarını minimize etmiş ve daha yüksek doğruluk sağlandığını vurgulamışlardır. Benzer şekilde, Rickhey ve Hong (Rickhey & Hong, 2023), modelin belirli koşullarda doğruluğunun yüksek olduğunu, ancak karmaşık gerilme modlarında geliştirilmiş modellerin tercih edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Yang ve arkadaşları (Yang, Chen, Hong, & Chen, 2023), Barlat89 modelinin geri esneme tahminlerinde sınırlı kaldığını ve karmaşık gerilme koşullarında daha gelişmiş modellerin (örneğin, Yoshida-Uemori veya Armstrong-Frederick modelleri) kullanılmasının önemini göstermiştir. Carvalho (de Carvalho, 2023) çalışması, DP980 çift fazlı çelikte farklı akma kriterlerini incelemiş ve Barlat89'un özellikle karmaşık geometriye sahip parçalar için geri esneme ve buruşma hatalarını öngörmeye yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Du ve arkadaşları (Du et al., 2022), 5182-O alüminyum alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmada, farklı akma kriterlerinin doğru parametre tanımlamalarıyla benzer doğrulukta sonuçlar sunduğunu ifade etmişlerdir. Lei ve arkadaşları (Lei et al., 2021), Barlat89 modelinin akma yüzeyi parametrelerinin Marciniak-Kuczynski yöntemiyle elde edilen analitik çözümlerle karşılaştırmasını incelemiş ve sayısal yöntemlerin model doğruluğunu artırdığını belirtmişlerdir. Aydın ve arkadaşları (Aydın, Gerlach, Kessler, & Tekkaya, 2011), akma kriterlerinin doğruluğunu artırmada optimizasyon yöntemlerinin etkili olduğunu vurgulamış ve Chaparro ve arkadaşları (Chaparro, Thuillier, Menezes, Manach, & Fernandes, 2008), hibrit optimizasyon yöntemlerinin daha yüksek doğruluk sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca, Hou ve arkadaşları (Hou et al., 2023), akma kriteri modellerinin doğruluğunu artırmak için parametrik kalibrasyonun önemine dikkat çekmiş ve bu süreçte deneysel verilerle karşılaştırma yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Sonuç olarak, bu çalışma literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, Barlat89 modelinin düşük parametre sayısı ile etkili bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır. Ancak, optimizasyon süreçlerinde tek parametre optimizasyonunun anizotropi tahminlerinde etkili olmasına rağmen, çok parametre optimizasyonunun akma gerilmesi gibi kritik özelliklerin tahmininde daha yüksek doğruluk sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sıcaklık, deformasyon hızı gibi ek parametrelerin modele dahil edilmesi hem tahmin doğruluğunu artırmak hem de modelin genel uygulanabilirliğini genişletmek açısından önemlidir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, Barlat89 modeli için katsayılarının belirlenmesinde çeşitli analitik ve sayısal yöntemleri kullanarak anizotropik malzemelerin deformasyon davranışlarını daha doğru tahmin etmeyi hedeflemiştir. AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımları ile DP600 çift fazlı çeliğin mekanik davranışları dikkate alınmış

ve önerilen parametrik uyarlama yöntemleriyle elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, aşağıdaki temel sonuçları ortaya koymuştur:

1. Barlat89 Modelinin Geçerliliği: Model, düşük parametre sayısı ile ortotropik levhaların anizotropik davranışlarını doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir. Bununla birlikte, Barlat89 kriterinin doğruluğunun artırılması için model parametrelerinin dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.
2. Parametrik Uyarlama Yöntemlerinin Etkinliği: Önerilen parametrik uyarlama yöntemleri, özellikle p katsayısının optimize edilmesi durumunda hata oranını düşürmüştür. Sadece p katsayısının optimize edilmesi, anizotropi tahmininde modelin doğruluğunu artırırken, akma mukavemeti tahmininde sınırlı düzeyde etki etmiştir. Tüm model parametrelerinin (a, c, h, p) optimizasyonu, hem akma gerilmesi hem de anizotropi katsayısı tahminlerindeki hata oranını etkilemiştir.
3. Farklı Malzemeler İçin Uygulama: Yapılan analizler, önerilen yöntemlerin malzeme türlerine göre değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle AA7075 alaşımında parametrik uyarlama yöntemleri sınırlı düzeyde hata sağlarken, AA5754 ve DP600 malzemelerinde tahmin doğruluğunun nispeten daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, çalışma kapsamında önerilen parametrik uyarlama yöntemleri, modelin doğruluğunu artırmak için etkili bir araç olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bu yöntemlerin farklı malzeme türleri ve karmaşık gerilme durumları için detaylı incelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Aydın, M. S., Gerlach, J., Kessler, L., & Tekkaya, A. E. (2011). Yield locus evolution and constitutive parameter identification using plane strain tension and tensile tests. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(12), 1957-1964. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.06.018>
- Banabic, D. (2010). *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*: Springer Science & Business Media.
- Barlat, F., & Lian, K. (1989). Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions. *International Journal of Plasticity*, 5(1), 51-66.
- Chaparro, B. M., Thuillier, S., Menezes, L. F., Manach, P. Y., & Fernandes, J. V. (2008). Material parameters identification: Gradient-based, genetic and hybrid optimization algorithms. *Computational Materials Science*, 44(2), 339-346. doi:<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.03.028>
- Conde, M., Coppieters, S., & Andrade-Campos, A. (2024). Strategies for automatic constitutive model selection and recommendation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 264, 108813.
- Dang, G. L., Đức, H. T., Lê Quốc, D., Van Chinh, N., & Van Hoang, N. (2023). Dự đoán sự tạo thành tai khi dập vuốt chi tiết hình trụ từ thép SUS304 bằng mô phỏng số. *Journal of Military Science and Technology*, 86, 129-136.
- David, E. G. (1989). Genetic algorithms in search. *Optimization and Machine Learning*, Reading, Massachusetts.
- de Carvalho, M. A. C. F. (2023). Industrialization of a dual-phase steel stamped component: Process optimization using AutoForm software.

- Du, K., Huang, S., Wang, H., Yu, F., Pan, L., Huang, H., . . . Yuan, X. (2022). Effect of different yield criteria and material parameter identification methods on the description accuracy of the anisotropic behavior of 5182-O aluminum alloy. *Journal of materials engineering and performance*, 1-19.
- Erice, B., Rolfe, B., & Mendiguren, J. (2023). Anisotropic plasticity and fracture modelling of cold rolled AA5754. *Engineering fracture mechanics*, 289, 109471. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109471>
- Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). Genetic Algorithms and Machine Learning. *Machine learning*, 3(2), 95-99. doi:10.1023/A:1022602019183
- Hou, Y., Myung, D., Park, J. K., Min, J., Lee, H.-R., El-Aty, A. A., & Lee, M.-G. (2023). A Review of Characterization and Modelling Approaches for Sheet Metal Forming of Lightweight Metallic Materials. *Materials*, 16(2), 836. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/2/836>
- Kacar, I., Öztürk, F., Toros, S., & Kılıç, S. (2020). Prediction of strain limits via the Marciniak-Kuczynski model and a novel semi-empirical forming limit diagram model for dual-phase DP600 advanced high strength steel.
- Katiyar, B. S., Panicker, S. S., & Panda, S. K. (2023). Crushing Performance of AA5754 and AA6082 Shells Fabricated by Warm Redrawing Process. *Journal of materials engineering and performance*, 1-11.
- Kilic, S. (2019). Experimental and numerical investigation of the effect of different temperature and deformation speeds on mechanical properties and springback behaviour in Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Mechanika*, 25(5), 406-412. doi:10.5755/j01.mech.25.5.22689
- Kilic, S., & Ozturk, F. (2016). Comparison of performances of commercial TWIP900 and DP600 advanced high strength steels in automotive industry.
- Kılıç, S. (2024). Hill48 akma kriteri kullanarak alüminyum alaşımlarının anizotropik davranışlarının modellenmesi ve optimizasyonu. [Modeling and optimization of the anisotropic behavior of aluminum alloys by using the Hill48 yield criterion]. *International Journal of Engineering Design and Technology*, 6(1), 16-21. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijedt/issue/84209/1496394>
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder--Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on optimization*, 9(1), 112-147.
- Lei, C., Mao, J., Zhang, X., Liu, J., Wang, L., & Chen, D. (2021). A comparison study of the yield surface exponent of the Barlat yield function on the forming limit curve prediction of zirconium alloys with MK method. *International Journal of Material Forming*, 14, 467-484.
- Ozturk, F., Pekel, H., & Halkaci, H. S. (2011). The Effect of Strain-Rate Sensitivity on Formability of AA 5754-O at Cold and Warm Temperatures. *Journal of materials engineering and performance*, 20(1), 77-81. doi:10.1007/s11665-010-9652-y
- Rajendran, P., Duraisamy, V., Rajendran, A. R., & Loganathan, R. V. (2023). Optimization on the electrical discharge machining (EDM) process parameters of aged AA7075/TiC metal matrix composites. *Revista De Metalurgia*, 59(3), e245-e245.
- Rickhey, F., & Hong, S. (2023). Validation of axial and transverse force–displacement responses and principal strain rate ratios in the critical zone as a precursor to anisotropic damage prediction in metal sheets. *International Journal of Material Forming*, 16(1), 10.
- Sanrutsadakorn, A., Jhonthong, N., & Julsi, W. (2023). Finite element modeling for analyzing the production of high-strength steel sheets for automobile parts.
- Saxena, K. K., Drotleff, K., & Mukhopadhyay, J. (2016). Elevated temperature forming limit strain diagrams of automotive alloys Al6014-T4 and DP600: A case study. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 51(6), 459-470.
- Shrivastava, A., & Digavalli, R. K. (2023). Effect of Process Variables on Interface Friction Characteristics in Strip Drawing of AA 5182 Alloy and Its Formability in Warm Deep Drawing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(5), 175.
- Shrivastava, A., & Kumar, D. R. (2024). *Deep drawing simulation of dual phase steel using hardening curves and anisotropic parameters from uniaxial and biaxial tensile tests*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Toros, S., Alkan, M., Ece, R. E., & Ozturk, F. (2011). Effect of pre-straining on the springback behavior of the AA5754-0 alloy. *Materiali in Tehnologije*, 45(6), 613-618.
- Yang, H., Chen, J., Hong, Q., & Chen, W. (2023). *Development of combined hardening model for spring-back simulation of DP600 in multi-stage sheet metal forming*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.

Diode and Photodetector Characterization of Van der Waals Type InSe/CdS Heterojunction Device

Fatih Ünal¹ 

¹Giresun University, Central Research Laboratory Application and Research Center, Giresun, Türkiye,

Received: 11.10.2024, Accepted: 12.12.2024, Published: 25.12.2024

ABSTRACT

In this study, an InSe thin film layer was deposited onto a CdS thin film layer produced via the chemical bath deposition (CBD) method using the Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) technique. The produced heterojunction devices were divided into two groups, and one group was annealed in an ambient atmosphere at 80°C for 1 hour. The electrical characterization of both heterojunction devices was performed in the dark and under an illumination intensity of 100 mW/cm². The fundamental diode parameters (n , ϕ_b , R_s , I_0) were analyzed using different methods. In the dark environment, these values are 8.47, 0.94 eV, $2.27 \times 10^8 \Omega$ and 2.12×10^{-11} A for In/InSe/In and 8.43, 0.96 eV, $7.27 \times 10^8 \Omega$ ve 7.07×10^{-12} A for In/InSe_{annealed}/In, respectively. Furthermore, key photodetector parameters such as photocurrent, photoresponsivity, photosensitivity, and specific detectivity were determined for these two devices.

Keywords: InSe; CdS; Photodetector.

Van der Waals tipi InSe/CdS Heteroeklem Cihazının Diyot ve Fotodedektör Karakterizasyonu

ÖZ

Bu çalışmada kimyasal banyo depolama (CBD) yöntemiyle üretilen CdS ince film tabakasının üzerine InSe ince film tabakası Sıralı İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyon (SILAR) yöntemiyle biriktirilmiştir. Üretilen heteroeklem cihazları iki gruba ayrılmış ve bir grup atmosfer ortamında 80 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansmıştır. Her iki heteroeklem cihazının elektriksel karakterizasyon karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddetinde gerçekleştirilmiştir. Temel diyot parametreleri (n , ϕ_b , R_s , I_0) farklı yöntemlerle analiz edilmiştir. Karanlık ortamda sırasıyla bu değerler In/InSe/In için 8.47, 0.94 eV, $2.27 \times 10^8 \Omega$ ve 2.12×10^{-11} A iken In/InSe_{annealed}/In için 8.43, 0.96 eV, $7.27 \times 10^8 \Omega$ ve 7.07×10^{-12} A'dir. Bu iki cihazın temel fotodedektör parametreleri olan fotoakım, fotoduyarlılık, fotohassasiyet ve özgül algılama değerleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: InSe; CdS; Fotodedektör.

1. INTRODUCTION

Wide photodetectors covering the visible, ultraviolet, and near-infrared electromagnetic spectrum are now used in a variety of applications, including aircraft, night vision medical imaging, solar cells, broad spectral switches, light communications, and biometric identification (Chen et al., 2017; Hu et al., 2014; Yan et al., 2022). The introduction of graphene has significantly transformed the van der Waals layered material family (Novoselov et al., 2004). This has also led to the development of photodetectors based on layered materials that have extremely high sensitivity. Properties such as atomic-level thickness and facile electrical structure adjustment by external forces (Wang et al., 2017) offer substantial potential for the development of nanoscale photodetectors (Islam et al., 2019). III-VI binary semiconductors have sparked intense research interest in recent years due to their intriguing electrical and optical characteristics, as well as potential applications in electronic and optoelectronic devices. Several high-performance devices, including solar cells, photodetectors, and transistors, have been reported (Chen et al., 2017; Huang et al., 2011). Among these semiconductors, indium selenide (InSe) is an essential layered semiconductor with a high direct bandgap and effective visible light absorption. These qualities make it a viable contender for a wide range of essential applications, including solar energy conversion, random access memory, photodetectors, and visible optoelectronics (Yadav & Salunke, 2015; Zhai et al., 2010). Cadmium sulfide (CdS), a member of the II-VI group, is a widely used compound in optoelectronic devices. It stands out due to its low resistivity, high transmittance in the visible region, and good electron affinity (Diso, Fauzi, Echendu, Weerasinghe, & Dharmadasa, 2011; Kumarage, Wijesundera, Seneviratne, Jayalath, & Dassanayake, 2017; Lade & Lokhande, 1997). CdS thin films are considered one of the most exciting options for heterojunction thin film photodetectors, solar cell etc. (Ashour, 2003). In this study, we combined CdS and InSe compounds in the form of a van der Waals heterojunction and investigated the diode and photodetector parameters.

2. EXPERIMENTAL DETAILS

The InSe thin film was previously deposited onto a CdS layer, approximately 100 nm thick, prepared by the chemical bath deposition method using the Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) technique. The precursor solutions were 0.07 M $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ and 0.05 M Na_2SeSO_3 . In each cycle, a layer approximately 1.5 nm thick was formed, and the total number of cycles was 45. The total thickness of the InSe thin film was approximately 70 nm. The details of the procedure have been presented in our previous studies (Ünal, 2013, 2021). The fabricated InSe/CdS heterojunctions were divided into two groups, with one group annealed at 80°C for 1 hour in an ambient atmosphere. Subsequently, In (indium) metal contacts were applied to the InSe layer. Figure 1 presents the production mechanism and a schematic representation

of the layers. The I-V measurements were performed using a Keithley 6486 picoammeter and Pasco Scientific SF-9585.

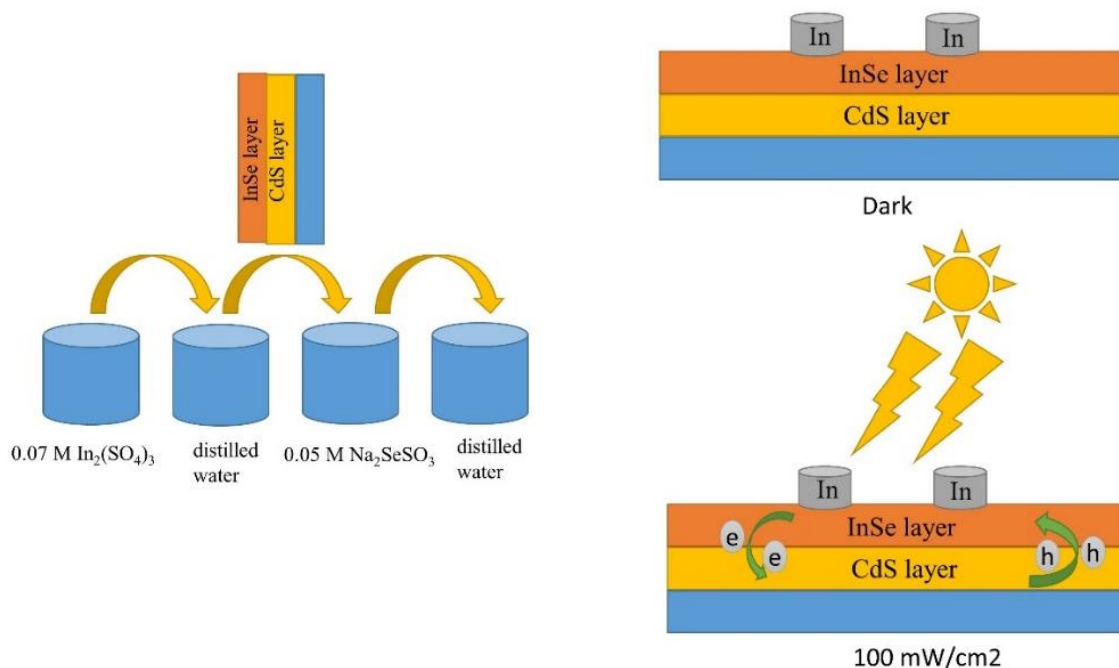


Figure 1: The production mechanism and schematic representation of the heterojunctions.

3. RESULT AND DISCUSSION

The basic electrical characterization of the In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices was determined using current-voltage (I-V) curves. The I-V characterization of the devices, fabricated with both annealed and unannealed InSe grown on CdS, was examined under forward bias at an applied potential range of 0-20 V at room temperature, in the dark, and under an illumination intensity of 100 mW/cm². The I-V curves of these devices, measured under dark conditions and at an illumination intensity of 100 mW/cm², are presented in Figure 2a. In all four curves, the current increased linearly up to approximately 0.5 V, after which this increase diminished due to the influence of series resistance. It is clearly observed that the current values increased with illumination intensity in both devices.

Based on the I-V curve and using different methods, the fundamental electrical parameters of the designed devices, such as diode ideality factor (n), barrier height (ϕ_b), reverse saturation current (I_0), series resistance (R_s), and others, can be determined. The most commonly used methods for this purpose include thermionic emission theory, the modified Norde method, and Cheung & Cheung functions (Cheung & Cheung, 1986; Norde, 1979; Racko, Grmanová, & Breza, 1996).

Thermionic emission theory (TE) is one of the most commonly used methods, and the link between current and voltage is given in Equation 1,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) [1 - \exp\left(\frac{-q(V-IR_s)}{kT}\right)] \quad (1)$$

where q , k , and T represent the electrical charge, Boltzmann constant, and temperature, respectively. Ideal diodes have n values of 1 and I_0 is determined using the line intercept of $\ln I$ at $V = 0$, as shown in Equation 2,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (2)$$

To compute n and ϕ_b , rearrange the equations above and use the slope and cut point in the linear zone of the graph of $\ln I - V$, as shown in Equations 3 and 4, respectively.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln(I))} \quad (3)$$

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{AA^*T^2}{I_0} \quad (4)$$

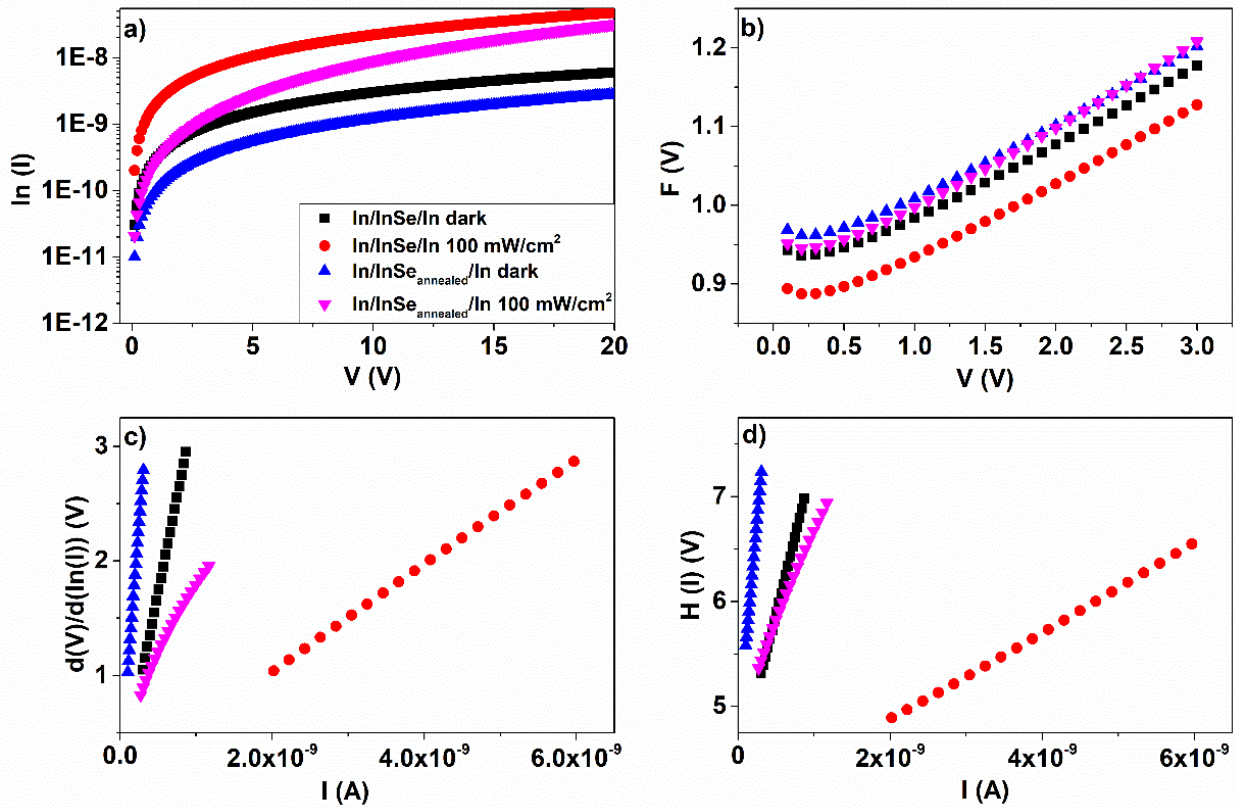


Figure 2: The In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices under dark conditions and at 100 mW/cm² illumination intensity: a) I-V characterization, b) the variation of the F(V) function with respect to V, c) the variation of the $d(V)/d(\ln(I))$ function with respect to I, and d) the variation of the H(I) function with respect to I.

The values of the n determined from thermionic emission (TE) for In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices under dark conditions are 8.47 and 8.43, respectively, whereas under an illumination intensity of 100 mW/cm², the n values for In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices are 8.45 and 7.91, respectively. ϕ_b values determined from TE under dark conditions for In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices are 0.94 eV and 0.96 eV, respectively, while under 100 mW/cm² illumination, the ϕ_b values for these devices are 0.89 eV and 0.94 eV, respectively. I_0 values determined under dark conditions for In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices are 2.12×10^{-11} A and 7.07×10^{-12} A, respectively, while under 100 mW/cm² illumination, the I_0 values for these devices are 1.41×10^{-10} A and 1.42×10^{-11} A, respectively.

The decrease in n and ϕ_b values calculated by TE under illumination, along with the increase in I_0 , is an expected behavior. Additionally, the decrease in the n value after annealing brings the device closer to ideality. However, the determined values remain far from the ideal value of 1. There could be several reasons for this, which are commonly encountered in the literature (Coşkun, Ünal, & Koç, 2023; İlhan, Gorunmez Gungor, Koc, Coşkun, & Yakuphanoglu, 2023; Koç et al., 2024) . These include barrier inhomogeneities, the influence of series resistance, the formation of unwanted oxide layers, recombination at the interface, and the occurrence of contamination during the experimental process (Güllü, Aydoğan, & Türüt, 2012; Unal et al., 2024).

The modified Norde technique is a typical method for finding the ϕ_b and R_s as indicated by equation 5.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} - \ln\left(\frac{I(V)}{A.A^*T^2}\right) \quad (5)$$

where $I(V)$ is the current acquired from the I - V experiment. γ is a dimensionless arbitrary integer computed from the I - V curve with a value higher than the ideality factor. Additionally, ϕ_b is determined using the information supplied below.

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (6)$$

$F(V_0)$ is the maximal point of $F(V)$, whereas V_0 represents the voltage at that moment. Furthermore, R_s values derived from Norde functions are supplied by the following equation:

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_0} \quad (7)$$

where, I_0 is the lowest current corresponding to the lowest current in $F(V)$.

In Figure 2b, the variation curve of the $F(V)$ function against V is presented. ϕ_b values for In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices, determined from the modified Norde method under dark conditions, are 0.93 eV and 0.95 eV, respectively. Under an illumination intensity of 100 mW/cm², the ϕ_b values determined for In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices using the modified Norde method are 0.88 eV and 0.94 eV, respectively. R_s values for In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices determined from the modified Norde method under dark conditions are $2.27 \times 10^8 \Omega$ and $7.27 \times 10^8 \Omega$, respectively, while under an illumination intensity of 100 mW/cm², the R_s values are $3.42 \times 10^7 \Omega$ and $5.21 \times 10^7 \Omega$, respectively.

In the Cheung and Cheung method, n , ϕ_b , and R_s values of the diode are determined using the Cheung and Cheung functions (Cheung & Cheung, 1986). The Cheung and Cheung functions are provided in Equations 8, 9, and 10.

$$\frac{dV}{d\ln(I)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (8)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (9)$$

$$H(I) = IR_s + n\phi_b \quad (10)$$

In the above equations, starting from the region where the curve bends in the $\ln(I)$ - V graph, the graphs of $dV/d\ln(I)$ and $H(I)$ as functions of I are plotted. The slope of the $dV/d\ln(I)$ vs. I graph gives the R_s while n is calculated from the y-intercept of the curve using other constants. In the $H(I)$ vs. I graph, the ϕ_b is determined from the y-intercept using the n value, and the slope of this curve gives the R_s .

Figure 2c presents the variation of $d(V)/d(\ln(I))$ as a function of I . The n values determined from the $d(V)/d(\ln(I))$ vs. I graph under dark conditions for the In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices are 1.86 and 6.05, respectively, while under 100 mW/cm² illumination, the n values are 4.37 and 21.81, respectively. The R_s values determined from the $d(V)/d(\ln(I))$ vs. I graph under dark conditions for the In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices are $3.33 \times 10^9 \Omega$ and $8.61 \times 10^9 \Omega$, respectively, while under 100 mW/cm² illumination, the R_s values are $4.63 \times 10^8 \Omega$ and $1.24 \times 10^9 \Omega$, respectively.

Figure 2d shows the variation of $H(I)$ as a function of I . The ϕ_b values determined from the $H(I)$ vs. I graph under dark conditions for the In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices are 2.37 eV and 0.72 eV, respectively, while under 100 mW/cm² illumination, the ϕ_b values are 0.91 eV and 0.22 eV, respectively. The R_s values determined from the $H(I)$ vs. I graph under dark conditions for the In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices are $2.93 \times 10^9 \Omega$ and $8.11 \times 10^9 \Omega$, respectively, while under 100 mW/cm² illumination, the R_s values are $4.21 \times 10^8 \Omega$ and $1.75 \times 10^9 \Omega$, respectively.

While there is consistency in the values of Φ_b and R_s calculated using different methods, no such consistency is observed for the n values. The n values determined via thermionic emission (TE) use the linear region of the I - V curve, whereas the Cheung & Cheung functions perform their calculations in the region where the linearity of the I - V curve starts to deviate. This difference in the regions of the I - V curve being used leads to discrepancies in the n values.

Figure 3 shows the variation of the photodetector parameters of the In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices under an applied potential of 0-20 V. In Figure 3a, the photocurrent ($I_{ph} = I_{ill} - I_{dark}$) (Demirezen et al., 2022; Ünal, 2022) variations of the devices are presented, where I_{ill} is the current under illumination, and I_{dark} is the current in dark conditions. For both devices, the I_{ph} values increased with rising applied voltage. The maximum I_{ph} values were observed at 20 V, with maximum I_{ph} values of 4.2×10^{-8} A for the In/InSe/In and 2.92×10^{-8} A for the In/InSe_{annealed}/In device. In all regions, the I_{ph} values for the In/InSe/In device were higher than those for the In/InSe_{annealed}/In device.

Figure 3b shows the photoresponsivity ($R = I_{ph} / PA$) (Demirezen et al., 2022; Kurt, Aktas, Ünal, & Kabaer, 2022) values of the devices, where I_{ph} is the photocurrent, P is the incident light power, and A is the active area. In Figure 3b, while the R values of the In/InSe/In device increased almost linearly, the R values of the In/InSe_{annealed}/In device increased exponentially and reached their maximum. For both devices, the maximum R values were observed at 20 V. The maximum R value was 2.8×10^{-5} A/W for the In/InSe/In device and 1.94×10^{-5} A/W for the In/InSe_{annealed}/In device.

Figure 3c presents the photosensitivity ($PS\% = 100 \times (I_{ph} - I_{dark}) / I_{dark}$) (Aktas et al., 2023; Demirezen et al., 2022) values of the devices. Between 0 and 9.6 V of applied potential, the $PS\%$ values of the In/InSe/In device were higher, while between 9.6 and 20 V, the $PS\%$ values of the In/InSe_{annealed}/In device were higher. The maximum $PS\%$ values for both devices were observed at 20 V. The maximum $PS\%$ value was 8.02×10^2 for the In/InSe/In device and 1.14×10^3 for the In/InSe_{annealed}/In device.

Figure 3d shows the specific detectivity ($D^* = R\sqrt{A} / (2qI_{dark})^{1/2}$) (Unal et al., 2024; Zheng et al., 2016) values of the devices. For both devices, the D^* values exhibited a similar trend to the other parameters. The maximum D^* values were observed at 20 V. The maximum D^* value was 6.4×10^8 Jones for the In/InSe/In device and 6.5×10^8 Jones for the In/InSe_{annealed}/In device.

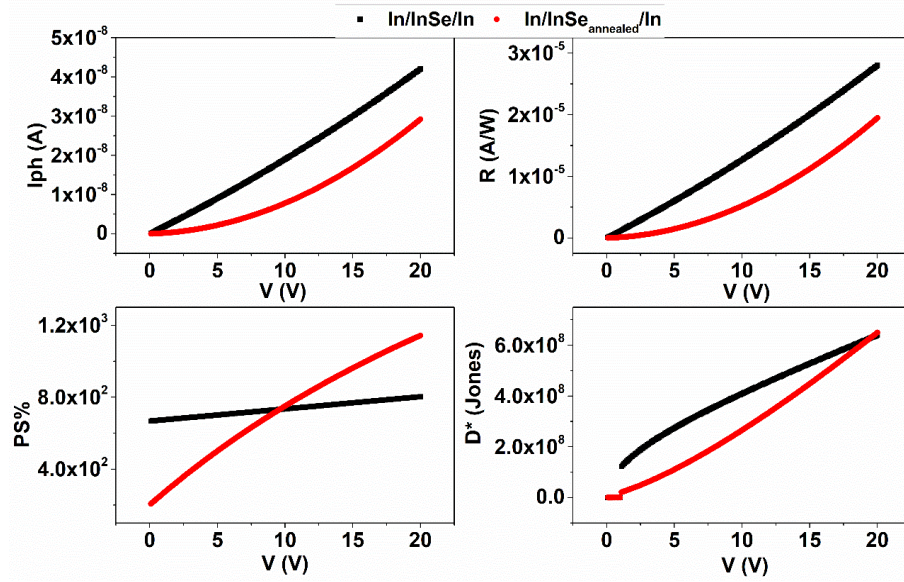


Figure 3: Variation of a) I_{ph} , b) R , c) $PS\%$, and d) D^* values as a function of applied voltage for In/InSe/In and In/InSe_{annealed}/In devices under 100 mW/cm^2 illumination intensity.

4. CONCLUSION

In this study, InSe/CdS van der Waals type heterojunction devices were successfully fabricated using different chemical methods, with one group being annealed. The basic diode parameters of the fabricated heterojunction devices were determined and compared under dark conditions and 100 mW/cm^2 illumination intensity using different methods. According to the TE method, the n values decreased due to both the effect of annealing and light intensity. The R_s and ϕ_b values, determined through various methods, increased with annealing but decreased under illumination. Additionally, the fundamental photodetector parameters of the fabricated heterojunction devices were determined in the 0–20 V applied potential range. Based on these determinations, it was observed that the I_{ph} and R values were higher in the In/InSe/In device, while the $PS\%$ and D^* values were higher in the In/InSe_{annealed}/In device at higher voltage regions.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was produced from the master's thesis titled "Growth of InSe thin films on different substrates and investigation of their optical, structural and photoelectric properties". I would like to thank Prof. Dr. Hasan Mammadova, who is not with us.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

F.Ü.: Conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, writing original draft preparation.

REFERENCES

- Aktas, S., Unal, F., Kurt, M. S., Koç, M. M., Arslan, T., Aslan, N., & Coşkun, B. (2023). Investigation of fundamental electrical and optoelectronic properties of an organic- and carbon-based MnPc/GC photodiode with high photosensitivity. *Physica Scripta*, 98(9), 095504. doi:10.1088/1402-4896/aceb41
- Ashour, A. (2003). Physical properties of spray pyrolysed CdS thin films. *Turkish Journal of Physics*, 27(6), 551-558.
- Chen, S., Liu, X., Qiao, X., Wan, X., Shehzad, K., Zhang, X., . . . Fan, X. (2017). Facile synthesis of γ -In₂Se₃ nanoflowers toward high performance self-powered broadband γ -In₂Se₃/Si heterojunction photodiode. *Small*, 13(18), 1604033.
- Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87. doi:10.1063/1.97359
- Coşkun, B., Ünal, F., & KOÇ, M. M. (2023). Photodiode characteristics of TiO: NiO composite thin structures. *JOURNAL OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES*, 2(1).
- Demirezen, S., Al-Sehemi, A. G., Yüzer, A., Ince, M., Dere, A., Al-Ghamdi, A. A., & Yakuphanoglu, F. (2022). Electrical characteristics and photosensing properties of Al/symmetrical CuPc/p-Si photodiodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(26), 21011-21021. doi:10.1007/s10854-022-08906-2
- Diso, D., Fauzi, F., Echendu, O., Weerasinghe, A., & Dharmadasa, I. (2011). *Electrodeposition and characterisation of ZnTe layers for application in CdTe based multi-layer graded bandgap solar cells*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Güllü, Ö., Aydoğan, Ş., & Türüt, A. (2012). High barrier Schottky diode with organic interlayer. *Solid State Communications*, 152(5), 381-385.
- Hu, X., Zhang, X., Liang, L., Bao, J., Li, S., Yang, W., & Xie, Y. (2014). High-performance flexible broadband photodetector based on organolead halide perovskite. *Advanced Functional Materials*, 24(46), 7373-7380.
- Huang, C.-Y., Lin, G.-C., Wu, Y.-J., Lin, T.-Y., Yang, Y.-J., & Chen, Y.-F. (2011). Efficient light harvesting by well-aligned In₂O₃ nanopushpins as antireflection layer on Si solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(26), 13083-13087.
- İlhan, M., Gorunmez Gungor, Z., Koc, M. M., Coşkun, B., & Yakuphanoglu, F. (2023). Infrared light sensing performance of CdO-doped TiO₂ thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(1), 67. doi:10.1007/s10854-022-09411-2
- Islam, S., Mishra, J. K., Kumar, A., Chatterjee, D., Ravishankar, N., & Ghosh, A. (2019). Ultra-sensitive graphene–bismuth telluride nano-wire hybrids for infrared detection. *Nanoscale*, 11(4), 1579-1586.
- Koç, M. M., Dayan, O., Dere, A., Çetinkaya, B., Coşkun, B., & Yakuphanoglu, F. (2024). A light-detecting Ru(II)/Si heterojunction system involving a binuclear Ru (II) complex with pyridine-2,6-diimine (pydim) ligand. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(17), 1121. doi:10.1007/s10854-024-12885-x
- Kumarage, W. G. C., Wijesundera, R. P., Seneviratne, V. A., Jayalath, C. P., & Dassanayake, B. S. (2017). A study on the enhancement of opto-electronic properties of CdS thin films: seed-assisted fabrication. *Semiconductor Science and Technology*, 32(4), 045014. doi:10.1088/1361-6641/aa5ee3

- Kurt, M. S., Aktas, S., Ünal, F., & Kabaer, M. (2022). Optical and Electrical Characterization of a ZnO/Coronene-Based Hybrid Heterojunction Photodiode. *Journal of Electronic Materials*. doi:10.1007/s11664-022-09910-2
- Lade, S., & Lokhande, C. (1997). Electrodeposition of CdS from non-aqueous bath. *Materials Chemistry and Physics*, 49(2), 160-163.
- Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053. doi:10.1063/1.325607
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D.-e., Zhang, Y., Dubonos, S. V., . . . Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666-669.
- Racko, J., Grmanová, A., & Breza, J. (1996). Extended thermionic emission-diffusion theory of charge transport through a Schottky diode. *Solid-State Electronics*, 39(3), 391-397.
- Unal, F., Aktas, S., Kurt, M. S., Koc, M. M., Coskun, B., Aslan, N., . . . Gur, M. (2024). Photodetector performance analysis of a hybrid MnPc/DLC device with high photoresponsivity, sensitivity, and On/Off ratio. *Physica B: Condensed Matter*, 695, 416584. doi:<https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416584>
- Ünal, F. (2013). *InSe ince filmlerinin farklı alt tabanlar üzerinde büyütülmesi ve optik, yapısal, fotoelektrik özelliklerinin araştırılması*. Fen Bilimleri Enstitüsü,
- ÜNAL, F. (2021). Investigation Of Some Optical And Electrical Properties Of InSe Thin Film, a Window Layer for Photovoltaic Cell Growth on Glass/GaSe Substrate by M-CBD Method. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 297-306.
- Ünal, F. (2022). Investigation of Diode Parameters of Photoconductive and Photovoltaic p-Type Si/Ge-Doped WO_x Heterojunction. *Journal of Electronic Materials*, 51(11), 6397-6409. doi:10.1007/s11664-022-09874-3
- Wang, J., Fang, H., Wang, X., Chen, X., Lu, W., & Hu, W. (2017). Recent progress on localized field enhanced two-dimensional material photodetectors from ultraviolet—visible to infrared. *Small*, 13(35), 1700894.
- Yadav, A. A., & Salunke, S. (2015). Photoelectrochemical properties of In₂Se₃ thin films: Effect of substrate temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 640, 534-539.
- Yan, Y., Abbas, G., Li, F., Li, Y., Zheng, B., Wang, H., & Liu, F. (2022). Self-Driven High Performance Broadband Photodetector Based on SnSe/InSe van der Waals Heterojunction. *Advanced Materials Interfaces*, 9(12), 2102068. doi:<https://doi.org/10.1002/admi.202102068>
- Zhai, T., Ma, Y., Li, L., Fang, X., Liao, M., Koide, Y., . . . Golberg, D. (2010). Morphology-tunable In₂Se₃ nanostructures with enhanced electrical and photoelectrical performances via sulfur doping. *Journal of Materials Chemistry*, 20(32), 6630-6637.
- Zheng, D., Wang, J., Hu, W., Liao, L., Fang, H., Guo, N., . . . Fan, Z. (2016). When nanowires meet ultrahigh ferroelectric field—high-performance full-depleted nanowire photodetectors. *Nano Letters*, 16(4), 2548-2555.

Gömülü Sistem Destekli Yapay Sinir Ağları ile Baskı Devre Kartlarındaki Hataların Otomatik Tespiti

Şennur İBRAHİMOĞLU¹, Erdal BÜYÜKBIÇAKÇI^{2*}

¹*Alplas Industrial Investments Incorporated Company, Embedded Software Department, İstanbul, Türkiye*
²*Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Bilişim Teknolojileri MYO, Güç Elektroniği Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye*

Geliş: 5.10.2024, Kabul: 3.12.2024, Yayınlanma: 25.12.2024

ÖZ

Bu çalışmada, yapay sinir ağları ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak baskı devre kartlarının kalite testlerinde insan gözüyle yapılan denetimlerden oluşacak zaman, iş gücü kaybı ve maliyet risklerini ortadan kaldırarak otomatik hata ayıklamayı sağlayan bir gömülü sistemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Teknolojik gelişmeler neticesinde geleneksel kalite kontrol yöntemleri, insan gözetimine dayalı denetimler düşük doğrulama gibi önemli sorunlar oluşturmakta ve bu sorunlar sürecin üretim safhasında devamlılığının sağlanabilmesi adına hızlı otomasyon sistemlerinin kullanımı gerekliliğini doğurmaktadır. Yapay zekâ ve görüntü işleme teknikleri akıllı otomasyon sistemlerinde etkili bir şekilde tercih edilir hale gelmiştir. Çalışmanın yapısal niteliğine özgünlük katmak açısından tasarlanan sistemde mikrodenetleyici olarak Raspberry Pi, 5 MP çözünürlüğe sahip bir kamera modülü ayrıntıların düzenlenmesi ve sınıflandırılmasında temel işlemci olarak tercih edilmiş, böylece sistemin taşınabilirliği ve maliyet durumu geliştirilmiştir. Elde edilen görüntüler bir veri tabanı aracılığı ile depolanmaktadır. Sistemdeki görüntü işleme sürecinde sayısal hale dönüştürülen veriler filtreleme, histogram, threshold, gri tonlama ve eşleme gibi yöntemler içererek üzerinde geliştirmeler yapılmıştır. Bu tekniklerle işlenen görüntüler, dijital hale getirilip iyileştirilerek hatalı ve hatasız nesne görüntüleri özellik çıkarımı yöntemiyle oluşturulmuştur. Bu ayırt edici özellik değerleri, ileri beslemeli yapay sinir ağı modeli olan çok katmanlı algılayıcı ile eğitme işlemi gerçekleştirilmiştir. Eğitme işlemlerinin ardından bulunan ağırlık katsayıları gerçek zamanlı ileri beslemeli görme algoritmasında işlenerek hatalı, hatasız ürün kontrolü yapılarak sonuçlar bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hata Tanıma Sistemi; Raspberry Pi; Görüntü İşleme; Yapay Sinir Ağı

Automated Detection of Faults in Printed Circuit Boards Using Embedded System Supported Artificial Neural Network

ABSTRACT

In this study, using artificial neural networks and image processing techniques, it is aimed to develop an embedded system that provides automatic debugging by eliminating the time, labour loss and cost risks that will arise from human visual inspections in the quality tests of printed circuit boards. As a result of technological developments, traditional quality control methods, inspections based on human supervision create significant problems such as low verification, and these problems necessitate the use of fast automation systems in order to ensure the continuity of the process in the production phase. Artificial

intelligence and image processing techniques have become effectively preferred in intelligent automation systems. In order to add originality to the structural nature of the study, Raspberry Pi was used as the microcontroller in the designed system, and a camera module with a resolution of 5 MP was preferred as the basic processor for organising and classifying the details, thus improving the portability and cost status of the system. The images obtained are stored in a database. In the image processing process in the system, the data converted into digital form are enhanced with methods such as filtering, histogram, threshold, grey scale and mapping. The images processed with these techniques are digitised and enhanced, and object images with and without errors are created by feature extraction method. These distinctive feature values were trained with a feed-forward artificial neural network model, a multilayer perceptron. After the training process, the weight coefficients were processed in the real-time feed-forward vision algorithm and the results were found by checking the defective and error-free products.

Keywords: Error Recognition System; Raspberry Pi; Image Processing; Neural Network System...

1. GİRİŞ

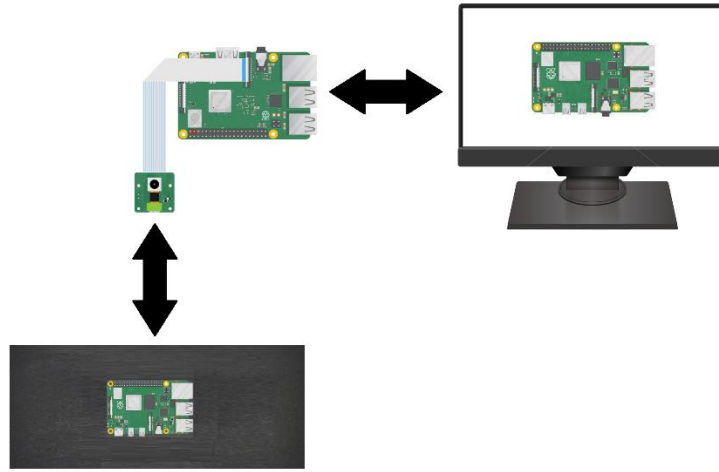
Üretim süreçlerinde kalite kontrolü ve iyileştirme için yapay zeka (YZ), özellikle yapay sinir ağları (YSA) tekniklerini kullanılabilir. Teknolojinin gelişmesiyle üretim sektörleri hızla büyüdükçe, geleneksel insana dayalı kalite kontrol sistemleri yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, yenilikçi yaklaşımlara her zaman ihtiyaç vardır. Uzman sistemler, genetik algoritmalar ve bulanık mantıkla birlikte YSA' lar, çeşitli endüstriyel kalite problemlerini çözmek için başarıyla uygulanmıştır (Kaya, 2011). YSA tabanlı sistemler için görsel arayüzler, gerçek zamanlı uygulamalarda öğrenmeyi ve uygulamayı kolaylaştırmak için tasarlanmıştır (Bayındır, 2008). Ek olarak, YSA' lar, Box-Jenkins (ARIMA) metodolojisi gibi geleneksel yöntemlere kıyasla tahminleme de daha iyi performans göstererek onları çeşitli sektörlerde tahmini modelleme için uygun hale getirmektedir (Ataseven, 2013).

Derin öğrenme ve yapay zeka, işgücü piyasalarını ve iş operasyonlarını hızla değiştiriyor. Bu teknolojiler, kalite kontrolü ve insan kaynakları yönetimi gibi görevlerde verimliliği, doğruluğu ve hızı önemli ölçüde artırabilir. Bilgisayarlı görme uygulamalarında derin öğrenme algoritmaları, yorulmadan sürekli kalite kontrolleri gerçekleştirebilir ve potansiyel olarak üretim hatlarındaki insan uzmanlarının yerini alabilir (Korkmaz, 2020). Derin öğrenme uygulamaları doğal dil işleme, tıbbi uygulamalar, görüntü işleme de dahil olmak üzere çeşitli teknolojik ve bilimsel alanları kapsamaktadır (Seker, 2017). Görüntü işleme ve yapay zeka teknolojilerinin çok çeşitli alanlarda kullanımı giderek artıyor. Nesnel tanıma ve iyileştirilmiş görüntüler elde etmek için sayısal görüntü işleme, tasarım, imalat, güvenlik ve sağlık gibi alanlarda kullanılmaktadır (Samtaş, 2012). Örneğin, elektronik devre kartlarının üretiminde hata tespiti ve kalite kontrol süreçlerinde bu teknolojiler önemli rol oynamaktadır. Bu teknolojilerin ilerlemesi, karar alma süreçlerinde yeni yöntemlerin benimsenmesini sağlamıştır.

Yapay sinir ağları (YSA), bilgisayarlı görme ve makine öğrenimi gibi teknolojilerin yaygın kullanımıyla karar alma sistemleri için önemli bir yapı haline geldi (Bayındır, 2008). Yazılım geliştirme, görüntü işleme teknikleri, öğrenme algoritmaları ve ışık koşulları bu sistemlerin nesne tespitindeki başarısını etkiler (Gültekin, 2019). Son çalışmalar, görüntü işleme yöntemlerinin ve yapay zekanın (YZ) kalite kontrol ve hata tespit sistemlerinde giderek önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Geleneksel el yordamıyla kontrol edilenlere göre bu yöntemler daha yüksek doğrulama, daha hızlı sonuç süresi ve daha kapsamlı değerlendirmeler sunar (Çelik, 2020). Şirketlerin verimliliği, kalite kontrolünü ve üretim planlamasını kolaylaştırmak için yapay zeka teknolojisinin kullanımı gün geçtikçe daha yaygın kullanılır hale geliyor (Ever, 2022).

Bu çalışmanın amacı, özellikle endüstride kullanılması amacıyla bir ürünün, malzemenin veya nesnenin hatalı yada hatasız olduğu durumları belirleyerek ayrıca hatalı ürünler için uyarı verecek bir sistem oluşturmaktır.

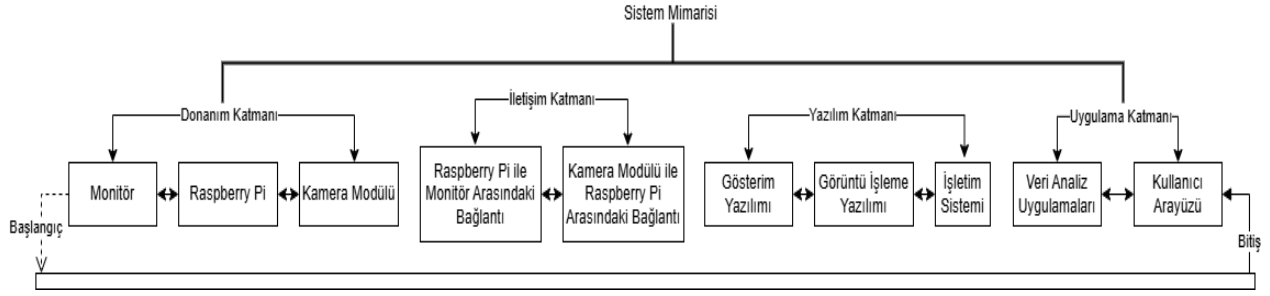
Çalışmada kullanılan yazılımlar, hedef alınan ürünün özellik çıkartımı ile elde edilen veri tabanını güncelleyebilir ve çeşitli malzemelerin kontrolünü sağlayabilir. Veri tabanı, bu sistem için tasarlanmış ve değiştirilebilir bir yapıya sahiptir. Şekil 1’ de görülen donanım düzeni, bu kontrol sisteminin temel bileşenlerini göstermekte olup, kamera, mikrodenetleyici ve ekran arasında veri akışını sağlayarak nesne analizi sürecini desteklemektedir.



Şekil 1: Hata tespit sisteminin genel şeması

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Hata tespiti yapılması hedeflenen malzemenin görüntüsünü oluşturabilmek için sensör olarak 5 MP, 2592x1944 piksel değerinde çözünürlük içeren Raspberry Pi 3 kamera modülü kullanılmıştır. Mikrobilgisayar olarak Raspberry Pi 3 seçilme nedeni ise kamera modülünden elde edilen görüntü üzerinde gerekli algoritmaların çalıştırılması, verilerin kaydedilerek yeni veriler ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Hata tespiti gerçekleştirilirken gerçek zamanlı olarak verilerin Raspberry Pi 3 programı üzerinde kurgulanmış yapay sinir ağları çıktı verileriyle beraber çalıştırılan algoritmalarla karşılaştırılarak, değerlendirme sonuçlarının Raspberry Pi HDMI çıkışına bağlanan monitöre aktarılıp takibi sağlanmaktadır.



Şekil 2: Sistemin kurulum mimarisi

Sistemin genel olarak kurulum mimarisinin işleyişi Şekil 2’ de verilmiştir. Bu blok mimaride, donanım katmanı fiziksel bileşenleri içererek temel işlevleri tanımlamaktadır. Bu katmanda bulunan; Kamera Modülü, görüntüleri yakalayan bileşendir, çekilen görüntüler, veri akışı yoluyla Raspberry Pi’ye iletilir. Raspberry Pi, sistem merkezi olarak çalışmakta ve verileri alarak, işler ve monitöre gönderir. Ayrıca, işlemci, hafıza ve diğer yardımcı bileşenleri de içermektedir. Monitör, işlenen görüntüleri veya çıktıları kullanıcının görmesini sağlar.

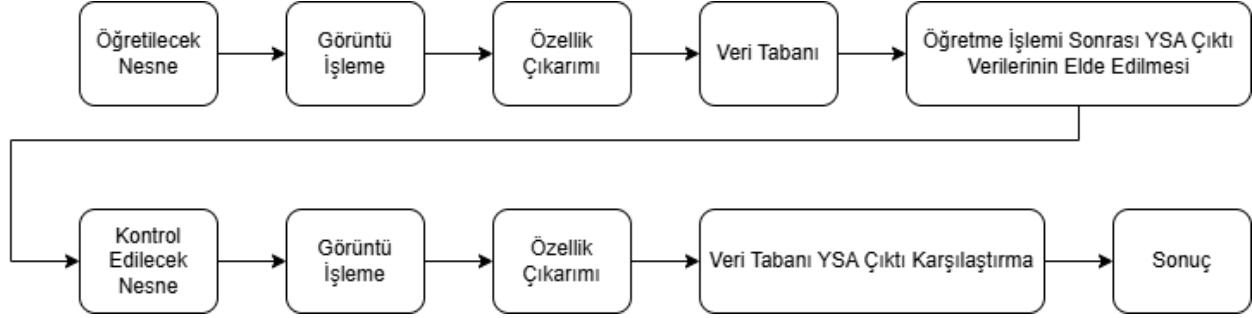
İletişim Katmanı, donanımlar arasındaki veri akışını ve kullanılan protokolleri tanımlamaktadır. Bu çalışmadaki iletişim, veri aktarımı yoluyla sağlanmaktadır. Bu katmanda, Kamera Modülü ile Raspberry Pi Arasındaki Bağlantı, kamera modülünden Raspberry Pi’ye veri akışını sağlamaktadır. Bu bağlantı genellikle CSI (Camera Serial Interface) protokolü üzerinden yapılmıştır. Raspberry Pi ile Monitör Arasındaki Bağlantı, Raspberry Pi’den monitöre veri aktarımı HDMI bağlantı kablosu üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Yazılım Katmanı, donanımı kontrol eden ve veri işleyen yazılımları içermektedir. İşletim Sistemi, Raspberry Pi üzerinde sürülen Linux tabanlı bir işletim sistemi (örneğin, Raspberry Pi OS). Bu işletim sistemi donanım bileşenlerini yönetmekte ve uygulamaların çalışmasını sağlamaktadır. Görüntü İşleme Yazılımı, Raspberry Pi üzerinde çalıştırılan görüntü işleme veya nesne tanıma yazılımları olarak ifade edilmektedir. Bu yazılım, kameradan gelen ham veriyi işlemekte ve monitöre gönderilecek hazır hale getirmektedir. Gösterim Yazılımı ise işlenen görüntüleri monitörde gösteren yazılım bileşenidir. Bu, genellikle Grafik Kullanıcı Arayüzü (GUI) içeren bir uygulamadır.

Uygulama Katmanı, kullanıcının sistemle etkileşime geçtiği ve spesifik görevleri yerine getirdiği uygulamaları içermektedir. Kullanıcı Arayüzü, kamera ile çekilen görüntülerin monitörde görüntülenmesi, işlenmiş verilerin kullanıcıya sunulması gibi işlevleri içerir. Veri Analiz Uygulamaları ise görüntü işleme sonrası elde edilen bilgilerin analiz edilmesi, yorumlanması veya kaydetmesi gibi görevleri içermektedir.

Raspberry Pi’de görüntü işlemek için görüntü işleme kütüphanesi olarak Python OpenCV (Open Source Computer Vision), Matlab yazılımdan ise Yapay sinir ağlarının (YSA) kullanımında yararlanılmıştır. Hata

tespit sistemlerinde sistem yazılımları bütünü en önemli parçasını temsil etmektedir. Geliştirilen sistemin hata tespitini sorunsuz olarak yerine getirebilmesi için yazılımın çevre girdilerinin iyi olması gerekmektedir. Şekil 3’de genel olarak geliştirilen hata tespit sistemin algoritması oluşturulmuştur.



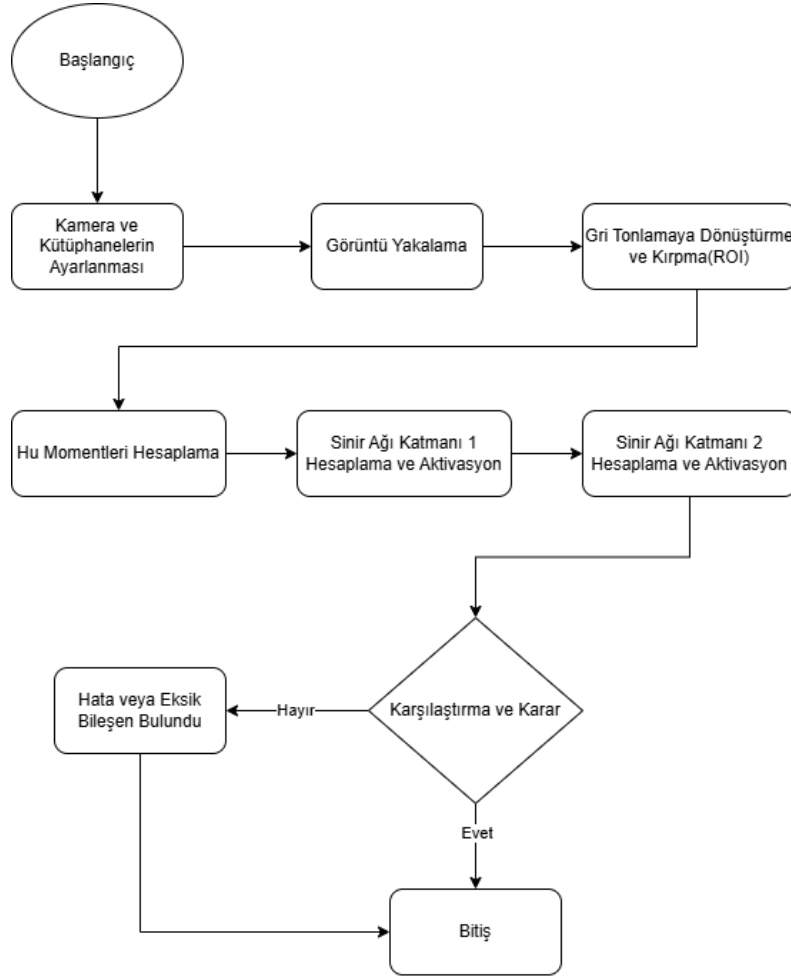
Şekil 3: Hata tespit genel algoritması

Şekil 3’ deki çalışma adımları açıklanacak olursa; örnek görüntü eğitilecek nesne algoritmasını kullanarak RPi kamera modülü ile renkli dijital olarak elde edilir. Python dilinde görüntü işleme teknikleri ve OpenCV açık kaynak kod kütüphanesi, elde edilen verileri kullanarak istenilen iyileştirmeleri yaparak görüntülemeyi geliştirir. Görüntü üzerinde sırasıyla yapılan dönüşümler; gri düzeye dönüştürme, histogram eşitleme, medyan filtreleme fonksiyonları ve eşikleme işlemleri kullanılarak görüntü üzerinde istenilen düzenlemeler gerçekleştirilir. Görüntü işleme işlemleri ile oluşturulan veriler belli bir dosyada saklanmak üzere kaydedilir. Bu kaydı sağlanan görüntüler için ayırt edici olacak, şekil ve piksel özellikleri de bu aşamada ortaya çıkartılır. Sistemin eğitime işlemi Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) YSA’ na bu veriler girdi olarak tanıtılarak gerçekleştirilir. Aynı zamanda hata tespiti algoritmasında da aynı işlemler uygulanır. Görüntü kaydedilerek görüntü özellikleri, özelliklerin aktarımı, görüntü işleme teknikleri de kullanılarak istenilen işlemler ve değişiklikler yapılır. Son olarak ise önceden öğretilen nesnelerin ÇKA ağırlık sonuçları, aynı ÇKA algoritması kullanılarak öğretilen nesne ve kontrol edilecek nesne ile önceden öğretilen nesneler arasındaki karşılaştırmalar yapılarak sonuç elde edilir.

2.1. Algoritmanın Pseudocode ve Akış Diyagramı ile Tanımlanması

Bu bölümde, PCB üzerindeki bileşenlerin doğruluğunu kontrol etmek için geliştirilen algoritmanın işleyişi hem pseudocode hem de akış diyagramı ile tanımlanmaktadır. İlk işlem olarak, görüntü ve kamera işleme ayarları yapılandırılarak PCB görüntüsü alınır ve gri tonlamaya çevrilir. Daha sonra ilgi bölgesi (ROI) kırılarak, Hu momentleri hesaplanır ve bu özellikler sinir ağına giriş verisi olarak kullanılır. İki katmanlı sinir ağı yapısında, ilk katmanda Hu momentleri ağırlıklarla çarpılarak aktivasyon fonksiyonuna tabi tutulur ve ara çıktılar elde edilir. İkinci katmanda bu çıktılar yeni ağırlıklarla çarpılarak nihai sonuç üretilir. Karar

aşamasında, PCB üzerindeki bileşenlerin doğruluğu değerlendirilir ve tüm bileşenlerin doğru yerleştirildiği veya hata durumu hakkında bilgi sağlanır. Bu süreç pseudocode ve akış diyagramı aracılığıyla Şekil 4 ve Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 4: Hata tespit pseudocode genel algoritması

BEGIN

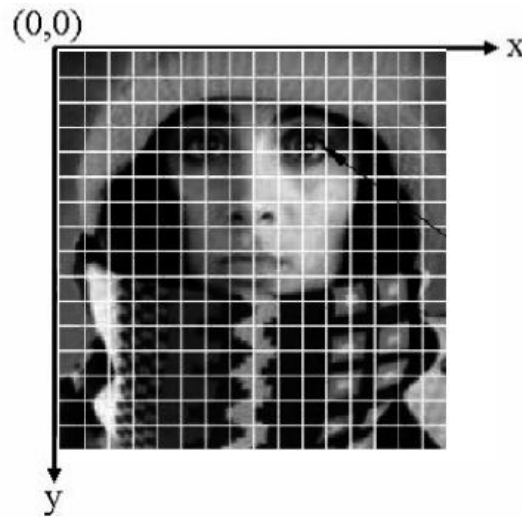
Kamerayı başlat ve gerekli ayarları yapılandır
Görüntüyü yakala ve kaydet
Yakalanan görüntüyü yükle ve gri tonlamaya çevir
İlgi bölgesini (ROI) kırp
Hu momentlerini hesapla
FOR i FROM 0 TO 24 DO

```
L[i] = SUM(hu[j] * iw1[i][j] FOR j FROM 0 TO 6) + b1[i]
L[i] = (2 / (1 + exp(-2 * L[i]))) - 1 # Aktivasyon
END FOR
FOR i FROM 0 TO 1 DO
  L1[i] = SUM(L[j] * iw2[i][j] FOR j FROM 0 TO 24) + b2[i]
  L1[i] = (2 / (1 + exp(-2 * L1[i]))) - 1
END FOR
IF L1[0] > L1[1] THEN
  Print "PCB kartında tüm bileşenler doğru yerleştirilmiş"
ELSE
  Print "PCB kartında bileşen hatası var"
END IF
END
```

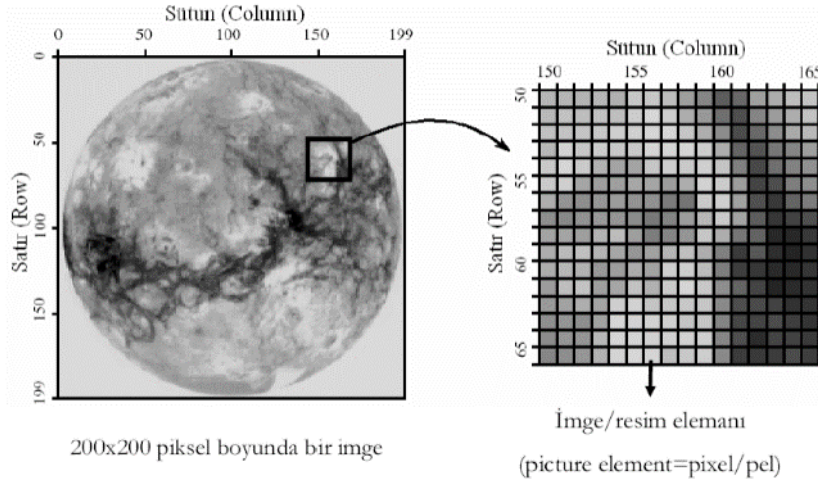
Şekil 5: Hata tespit pseudocode

2.2. Görüntü İşleme

Görüntü işleme işlemi görüntüyü dijital formata dönüştürerek belirli modelleri oluşturarak, bunlardan faydalı bilgiler çıkarma sonucunda bazı istenilen işlemleri gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen bir tekniktir. Şekil 6' da görüntüsü iki boyutlu olarak görülen nesnenin şık miktarını sıklık fonksiyonu olarak da tanımlayabiliriz. Ayrıca matematiksel olarak da $f(x, y)$ fonksiyonu olarak gösterilebilir. Oluşturulan bu görüntüler piksel değerleri olarak ifade edilir. Herhangi bir (x, y) değeri için kesiştiği pikselin ışık enerjisi ise görüntü sinyalinin değeridir (Gonzalez, 1992).



Şekil 6: Görüntünün iki boyutlu ifadesi



Şekil 7: Görüntünün piksel ifadesi

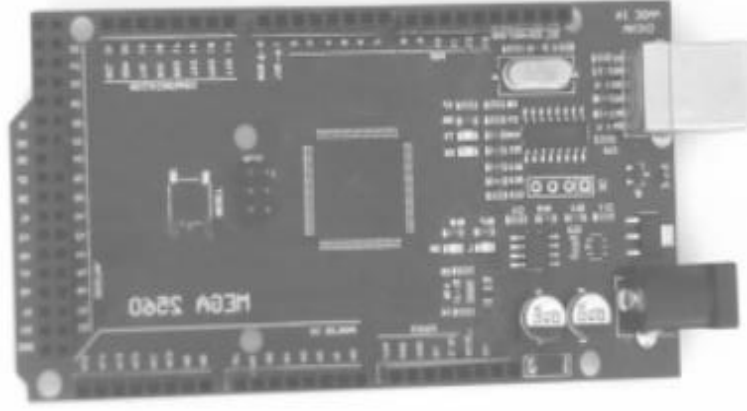
Piksel değerleri üzerindeki değişimler Görüntü üzerinde yapılan bütün işlemler sonucunda elde edilir. Görüntüde yapılan düzenlemeler piksel değerlerindeki değişimlerin miktarı ile elde edilir (Çetin, 2024). Görüntü üzerinde yapılan önemli düzenlemeler sonrasında, ilgili resim üzerinde yer alan nesnelere daha belirgin, net ve kolay işlenebilir hale gelmektedir.

Bu çalışmada görüntü iyileştirme teknikleri olarak gri seviyeye dönüştürme, medyan filtreleme, eşikleme (threshold) yöntemleri kullanılmıştır. Birçok alanda (astronomi, robotik, tıp ve imalat gibi) renkli bölümlerin grileştirilmesi, dönüştürülmesi popüler görüntü işleme tekniklerinden biridir. Bir piksel, renkli bir görüntüde Red (R), Green (G) ve Blue (B) renk paketlerini içerir. Bu renklerin değerlerinin ağırlıklı ortalaması alınarak renkli görüntüyü gri seviyeye çevirmek işleminde kullanılmaktadır. Aşağıdaki Denklem 1’ de görülen eşitlikte gri seviye ağırlıklı ortalamasının alınması ifade edilmiştir. Denklem 1’ de r, g ve b sembolleri değer olarak bir görüntüden elde edilen 0-255 arası renk değer aralığını göstermektedir.

$$x=(0.299\times r)+(0.587\times g)+(0.114\times b) \quad (1)$$

Denklem 1’ de renk değer katsayılarının aynı olamadığı ifade edilmektedir. Bu durumun sebebi görüntülerde renk tonlarının farklı olmasıdır. Mavi rengi daha soğuk renk tonuna, Yeşil rengi ise daha sıcak açık renk tonuna sahiptir. Bu nedendir ki mavi rengin katsayısı en düşük değere sahip olmaktadır (Saravanan, 2010).

İki renk, siyah – beyaz ve gri seviye görüntülerde yer alır. Bu durumda her piksel için değer 8 bit olarak kodlanmaktadır. Gri rengin tam sayı olarak değer aralığı 0-255 arasında olmaktadır. Renk değerleri kodlamaları gri seviye renk değerleri için, beyaz (255,255,255), siyah (0, 0, 0) ve orta seviye gri (127,127,127) şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 8: Gri seviyeye indirgenmiş Elektronik kart görüntüsü

Bir resim üzerinde, görüntüdeki bir piksel üzerinde işlem gerçekleştirildiğinde bu pikselin ve ona komşu pikselinin parlaklık değerleri işleme medyan filtreleme yöntemi yapılarak alınmaktadır. Orta parlaklık değeri, değerlendirilmesi yapılan bu pikseller içerisindeki değeri yeni parlaklık değeri olarak atanmaktadır. İşlem yapılan piksel sonuçlarında orta değerlerin seçilmesinde hedef bu yöntem kullanılarak, minimum ve maksimum değerlerin etkinliğinin düşürülmesi amaçlamaktır. Orta değeri dizinin orta sayısına karşılık gelen değer olarak belirleyecek piksel değeri küçükten en büyüğe doğru dizilmiş olmalıdır (Horozoglu, 2013).

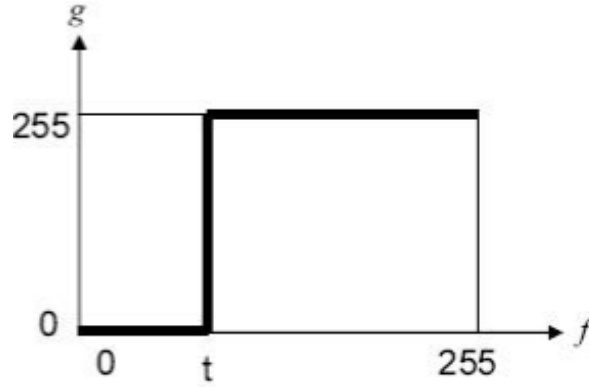
Medyan filtreleme, görüntü işleme alanında dürtüsel veya tuzbiber gürültüsünü azaltmada oldukça etkili ve doğrusal olmayan alçak geçiren bir filtre tipi olarak kullanılmaktadır (Akar, 2006; Yu, 1990). Medyan filtresi kullanarak görüntüdeki tespit edilen gürültüler ortadan kaldırılarak ayrıştırıldıktan sonra eşikleme yoluyla görüntüdeki ayırt edici bölümler arka plandan ayrılmıştır. Böylece görüntü 8 bit gri değerden 2 bit (0 veya 255) indirgenmiştir. Bu fonksiyon, cismi görüntünün arka planından ve birbirinden ayırmak için görüntü işleme teknikleri içerisinde oldukça fazla kullanılmaktadır (Saravanan, 2010). Eşikleme işleminin dijital görüntüye uygulanmasındaki amaç detayların ön plana çıkarılarak cisim özelliklerinin elde edilerek ayırt edici bölümlerin, noktaların belirlenmesinde kolaylık oluşturmaktır. Eşleştirme yöntemi, görüntünün iki renkle gösterilebilecek şekilde formata dönüştürülmesidir.

Eşik değeri görüntüye eşikleme işlemi uygulanmadan önce belirlenir. Bu eşik düşük olan piksellere 0, fazla olanlara ise 1 değeri atanır. Bu değer atamaları neticesinde görüntü siyah ve beyaza dönüşüm sağlar. İşlemlerin sonucunda, hatalı olan bölge arka plandan tamamen ayrı olarak görülebilir hale getirilmiş olur.

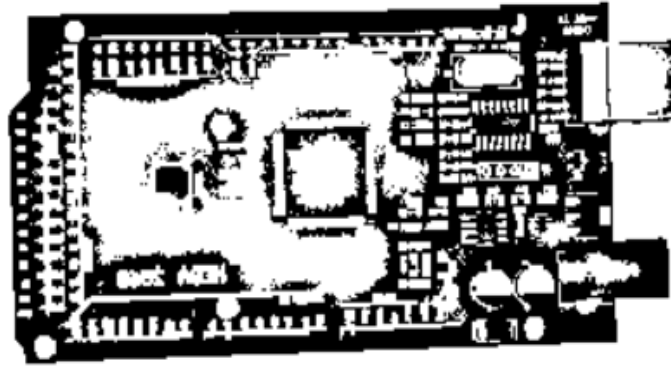
Görüntü işleme tekniklerinde en yaygın yöntemlerden biri eşiklemedir. Genellikle görüntüdeki arka plan ile nesneyi birbirinden ayırmak için tercih edilir. Dijital görüntüye uygulanan eşikleme işlemi, nesnenin ayırt edilebilir özelliklerini ortaya çıkarır. Bu yöntemle görüntü iki renkli bir formata dönüştürülür. Bu, önceden belirlenen bir eşik değeri kullanılarak pikselleri gri seviye değerlerine göre ayırt etmek için kullanılır.

Görüntü siyah-beyaz hale gelir çünkü eşik değerinin üzerindeki piksellere 1 değer, eşik değerinin altındaki piksellere ise 0 değer verilir. Bu prosedür, arka plandaki hataları ayrıca görebilir. Herhangi bir görüntü piksel değerleri, $f(i,j) > T$ durumunda nesneye ait kabul edilir; $f(i,j) \leq T$ durumunda ise arka plana ait kabul edilir. Bu fonksiyon, görüntü içeriği belirlenen eşik değerine göre Denklem 2' deki fonksiyonla ifade edilir. Bu eşikleme yöntemi, görüntünün nesne ve arka plan olarak ayrılmasını sağlayan etkili bir ayırım mekanizmasıdır.

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } f(x,y) > T \text{ ise} \\ 0 & \text{eğer } f(x,y) \leq T \text{ ise} \end{cases} \quad (2)$$



şekil 9: Eşiklemenin grafiksel ifadesi



şekil 10: Eşikleme işlemi uygulanmış elektronik kart görüntüsü

2.3. Özellik ıkarımı İşlemi

Özellik ıkarımı, bir görüntünün tanınmasında ve dijital hale getirilmesinde önem taşımaktadır. Görüntü zelliklerinin elde edilmesi için görüntünün sınıfları arasında ayrımı gerçekleştirmek gerekmektedir. Bunun için temel işlev görüntünün en belli olan, ayırt edici özelliklerinin çıkarımının yapılarak seçilen farklı özelliklerin yapay sinir ağının eğitme işleminde kullanılması gerekmektedir. Görüntünün önemli ayırt edici

özellikleri olan moment ve piksel değerleri Görüntü işleme teknikleri uygulanan görüntü üzerinden elde edilmektedir. Gerçekleştirilmesi amaçlanan sistem için dönme, taşıma ve ölçeklendirme gibi fiziksel etkilerden ve dış etkenlerin bozucu etkisinden etkilenmeden, nesnelerin tanınmasını sağlayacak nitelikte olmalıdır. İki boyutlu örüntü tanıma ve uygulamalarında momentler ve momentlerin polinom fonksiyon değerleri oldukça önemlidir. Momentleri, nesnelerin şekillerinin belirlenmesinde, doku (texture) analizinde, hata belirlemede ve sınıflandırma için özellik çıkarmada kullanılmaktadır. Bu amaçla, gerçekleştirilen çalışmada da, 1960'ların başında geliştirilen Hu' nun sabit olan yedi değişmez matematiksel moment teorisinden geliştirdiği moment modelleri hata tespitinde yararlanılmıştır (Yu, 1990).

Hu, normalize merkez momentlerini kullanarak yedi adet değişmez moment geliştirmiştir (Yu, 1990). Hu'nun geliştirdiği momentler şöyledir;

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \quad (3)$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11} \quad (4)$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \quad (5)$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{03} + \eta_{21})^2 \quad (6)$$

$$\phi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (7)$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \quad (8)$$

$$\phi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{12})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (9)$$



Şekil 11: Moment değerleri hesaplanan Türkçe karakterlerin görüntüsü

Çizelge 1.'de, Şekil 11.'de görülen her bir karakter için hesaplanan moment değerleri ayrı ayrı verilmiştir. Ön işlemlerden geçirilen görüntüler, Yapay Sinir Ağı (YSA) sınıflandırıcısının girişlerine gönderilmeden önce kendilerini karakterize edecek momentler hesaplanmıştır. Burada YSA girişine uygulanan moment sonuçları oldukça küçük olduğundan logaritmaları alınmıştır.

Çizelge 1: Moment değerlerinin sonuçları

Giriş 1	Giriş 2	Giriş 3	Giriş 4	Giriş 5	Giriş 6	Giriş 7
1.1275	3.5427	8.0562	10.3677	19.6363	12.2448	21.9169
1.1275	3.5427	8.0562	10.3677	19.6363	12.2448	21.9165
1.3729	5.5033	7.9705	12.1408	23.0868	15.8025	22.8975

Çizelge 2: Piksel değerlerinin sonuçları

Giriş 1	Giriş 2	Giriş 3	Giriş 4	Giriş 5
86	88	85	95	82
84	90	91	86	81
86	84	89	87	80

İki farklı özellik çıkarımı yapılarak hata tespit sistemi geliştirilmiştir. Çizelge 1 bir görüntüden elde edilen 7 adet ayırt edici moment değerlerini içermektedir. Çizelge 2 ise bir görüntüden elde edilen 528 adet piksel değerlerini içermektedir. 324 adet görüntünün moment ve piksel değerleri alınarak Çizelge 1 ve 2 tabloları oluşturulmuştur. Bu tablolardaki değerler YSA eğitime işleminde kullanılarak, ÇKA fonksiyonunun ağırlık ve bias değerleri elde edilmektedir. Bu değerler sistemin gerçek zamanlı karar sürecinde kullanılmaktadır.

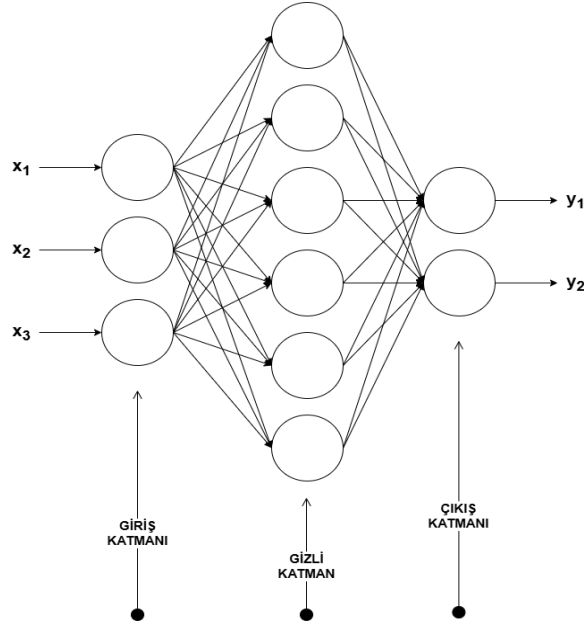
2.4. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağlarının çalışma yöntemi, işlevsel olarak insan beyin hücrelerinin çalışması yapısına benzer yapıdadır. Yapay öğrenme sistemi, örnek verileri ve olayları kullanarak öğrenebilen, bu bilgileri hatırlayıp yeni olaylarla ilişkilendirerek karar verebilen aynı zamanda çevreden gelen girişlere de tepki oluşturabilen sistemdir (Öztemel, 2020). Çalışma yapısına göre YSA sınıflandırma, ilişkilendirme, genelleme, öğrenme, özellik belirleme, en uygun şekle sokma (optimizasyon) sayesinde ilişkilendirme gibi işlevlerde başarılı şekilde uygulanmaktadır (Öztemel, 2020; AI Deport, 2024). Ayrıca YSA birçok problemin çözümünü geliştirebilir yapıdadır. YSA da ilk işlem olarak ağ eğitilmesi gerekmektedir.

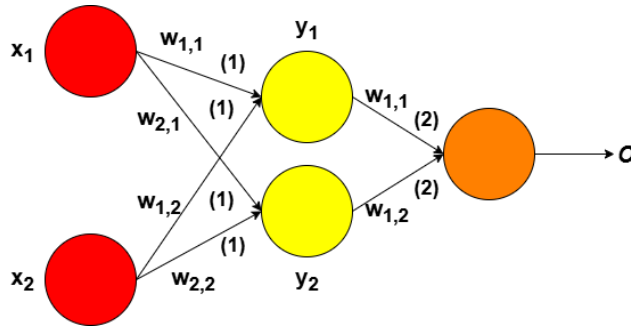
YSA eğitime işleminde örnek verilerin tanıtılması ağı girdi ve çıktıları arasında bağıntı kurması ile sağlanmaktadır. Ağı eğitime işlemi gerçekleştirildiğinde doğruluğun elde edilmesi, kullanılan veriler haricinde tutulan veriler ile yapılan test işlemi sonucunda gerçekleştirilir. Test sonucunda hedeflenen çıktılar üretiliyorsa YSA'nın performansının yeterli olduğu ifade edilebilir. YSA teknolojinin birçok farklı alanında ve uygulamalarda kullanılmaktadır (Öztemel, 2020; AI Deport, 2024). Geleceğin teknolojisinin altyapı niteliği taşımaktadır. Çalışmamızda eğitime ve karar işleminde çok katmanlı algılayıcı ağ yapısı kullanılmıştır.

İleri beslemeli YSA modeli, ağı eğitme aşamasında girdi değerlerine göre çıktı değerleri üreterek, girdi çıktı arası bağıntıyı kuran Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) modelidir (Haykin, 1994). Ağ modeli üç katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır. Bu katmanlar girdi katmanı (giriş değerlerinin işlendiği), ara/gizli ve çıktı

katmanıdır. Burada gizli katman miktarını ve katmanlarda yer alan hücre sayısını geliştirici belirlemektedir. Bu sayılar deneme yanılma yoluyla ya da başarıyla sonuçlanmış ideal projeler referans alınarak belirlenir. Ara katman girdi katmanından alınan verilerin işlendiği bölümdür. Çıktı katmanında ise gizli katmandan alınan verilerin durumuna göre çıktı değeri üretilmektedir. Yapıda bulunan tüm katmanlar ve katmanlara ait hücreler birbirleriyle bağlantılıdır. Üç giriş ve iki çıkışa sahip çok katmanlı olarak ifade edilen ileri beslemeli ağ yapısının modeli Şekil 12’ de görölmektedir.



Şekil 12: 3-girişli 2-çıkışlı çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı modeli



Şekil 13: ÇKA çalışma fonksiyonu

ÇKA çalışma fonksiyonu ise Şekil 13’de görölmekte olup, $F(x)$ aktivasyon fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Q değeri olarak ifade edilenler ise sistemin eşik değeri dir. Gizli katmanın NET değeri, giriş ile ağırlık değeri nin çarpılıp toplanmasıyla elde edilir. Gizli katmanın net çıktı değeri bulunurken,

NET gizli katman değerine eşik değerlerinin eklenmesi ve aktivasyon fonksiyonunun da uygulanması sonucunda elde edilir (Tsoukalas, 1997; Öztemel, 2020).

Katman 1: y_1 ve y_2 iki nörondur. Her nöron, x_1 ve x_2 girişlerini kendi ağırlıkları ve bias terimleri ile birleştirerek hesaplanmaktadır.

Denklemler:

$$\bullet y_1 = f(w_{(1,1)}^{(1)} x_1 + w_{(1,2)}^{(1)} x_2 + \theta_1^{(1)}) \quad (10)$$

$$\bullet y_2 = f(w_{(2,1)}^{(1)} x_1 + w_{(2,2)}^{(1)} x_2 + \theta_2^{(1)}) \quad (11)$$

Burada:

- $w_{(i,j)}^{(1)}$: Birinci katmandaki ağırlıkları temsil eder.
- $\theta_{i_j}^{(1)}$: Birinci katmandaki bias (sapma) terimlerini temsil eder.
- f : Aktivasyon fonksiyonunu temsil eder.

Katman 2: Bu katmanda yalnızca bir çıktı vardır. Bu çıktı, y_1 ve y_2 nöronlarının birinci katmandaki ağırlıklar ve bias ile birleştirilmesinden oluşur.

Denklem:

$$\bullet o = f(w_{(1,1)}^{(2)} y_1 + w_{(1,2)}^{(2)} y_2 + \theta_1^{(2)}) \quad (12)$$

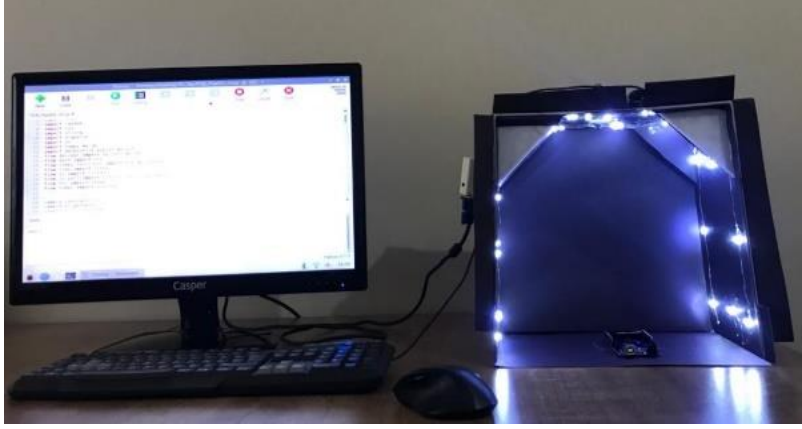
Burada:

- $w_{(i,j)}^{(2)}$: İkinci katmandaki ağırlıkları temsil eder.
- $\theta_1^{(2)}$: İkinci katmandaki bias terimi.

Bu denklemler 10., 11., ve 12., yapay sinir ağının her katmanındaki hesaplamalarının nasıl yapıldığını açıklar. Aktivasyon fonksiyonu f , ağın lineer olmayan öğrenme yeteneğini sağlar. Bu sinir ağı yapısı, temel iki katmanlı bir model olup, daha karmaşık yapılara göre oldukça basittir ancak temel prensipleri anlamak için etkilidir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Hata tespit sisteminin deneysel tasarımı Şekil 14'de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Uygulaması gerçekleştirilen deneysel sistemde Raspberry Pi 3 kamera modülü komponent kartın yerleştirildiği stant üzerinden 30 cm aralık olacak şekilde yukarıya konumlandırılmıştır. Uygulamalara başlanılmadan önce ışığın seviyesi ve çevresel etkileri azaltacak bir ortam oluşturulmalıdır.



Şekil 14: Hata tespit sistem tasarımı

Görüntüleri önceden yapılan çalışma ile elde edilen, komponent baskı devre kart görüntülerinin işlenmiş sonuçları gösterilerek sonrasında YSA yöntemi ile hata tespit işlemi gerçekleştirilmiştir. Kamera vasıtasıyla görüntülenen ham hatalı/hatasız görüntüler Şekil 15 ve Şekil 16' de verildiği gibi 8 bit 256 gri seviyeye dönüştürülmüştür. Alınan görüntü ilk olarak gri seviyeye indirgenmiştir. Kontrastı sınırlandırılarak gri seviyeye çevrilen görüntü, sonrasında 5x3 pencere genişliğinde medyan filtreden geçirilmiştir.

Medyan filtre yapılarak görüntü üzerindeki tespit edilen gürültüler kısmen ortadan kaldırılmıştır. Sonra aşamada ise eşikleme işlemi yapılarak görüntüde bulunan ayırt edici farklı bölgeler arka plandan ayrıştırılmıştır. Görüntü 8 bit gri seviyeden, 2 bite (0 veya 255) indirgenmiştir duruma getirilmiştir.



Şekil 15: Hatasız filtrelenmiş görüntüler

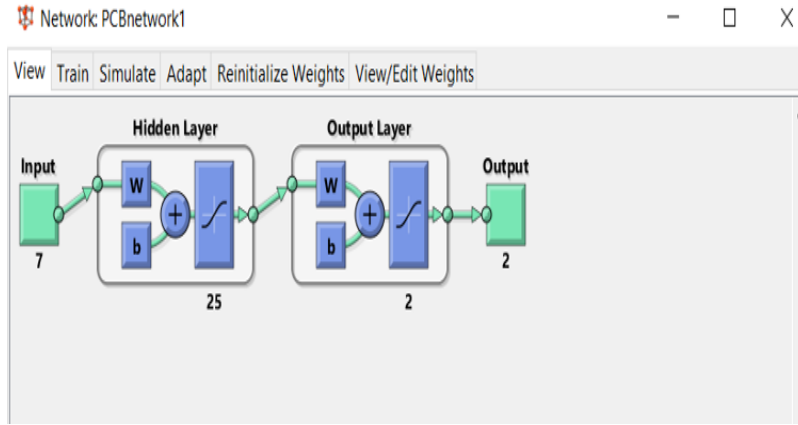


Şekil 16: Hatalı filtrelenmiş görüntüler

Yapay sinir ağı eğitime işlemleri için matlab programında nntool arayüzünde ÇKA kullanılarak yapılmıştır.. ÇKA modeli tasarımı öncesinde Raspberry Pi 3 mikrobilgisayarında Python programı ile 2 farklı özellik çıkarımı yapılmıştır. Printed Circuit Board (PCB) ayırt edici özellikleri olarak 7 adet hu vektör bileşeni ve 528 adet piksel değerleri elde edilmiştir. Ayırt edici özellikler (girdiler) ve bu değerleri oluşturan çıktı değerleri, eğitime işlemleri sürecinde de test amaçlı olarak kullanılan 24 adet test girdi verilerinin excel dosyaları oluşturularak matlab programında eğitime işleminde kullanılmıştır.

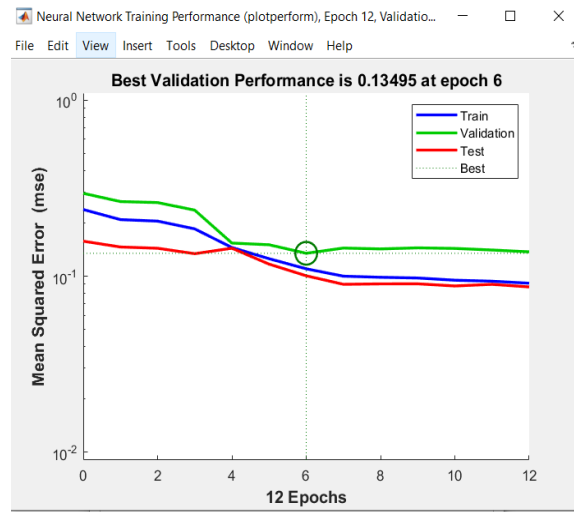
Bu girdi değerleri aynı ÇKA model mantığıyla farklı eğitime işlemleri için de gerçekleştirilmiştir. Eğitime için kullanılan algoritmada geri yayılım algoritması (trainlm), aktivasyon fonksiyonu olarak da tansig ve logsig fonksiyonları kullanılmıştır. Farklı fonksiyonların kullanım amacı hangi konfigürasyonda sistemin minimum hata maksimum performans ile çalışacağına karşılaştırılmalıdır. Geliştirilen ağda Performans ölçütü olarak hata karelerinin ortalaması olan MSE kullanılmıştır.

Grafik çıktıları ve ÇKA modeli hu vektörleri üzerinden anlatılmıştır. Gizli katmandaki nöron adedi 25 olarak belirlenmiş olup girdi ve çıktıların toplamının iki katına yaklaşık bir değer elde edilecek katsayıları en iyi şekilde sonuçlandırmaktır.



Şekil 17: Matlab ÇKA modeli

Girdi katmanında ise 7 adet baskı devre kartının (Printed Circuit Board-PCB) ayırt edici farklı özellikleri olan hu değerleri atanmıştır. Hatasız (1), hatalı (0) olarak 2 farklı duruma ait çıktı katmanı 2 olarak belirlendiği durum Şekil 17’ da görüldüğü üzere ÇKA modeli tasarlanmıştır.



Şekil 18: Eğitim işleminin çalışma performansı

Şekil 18’deki grafikte eğitim işleminin sonucunda elde edilen çalışma performansı grafiksel değer olarak gösterilmiştir. Eğitim işleminin performansı yaklaşık MSE 0.13495 olarak bulunmuştur.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.9080	1	1	0.9871	0.9979	0.9984	1	0.9731	0.9149	0.9783
2	0.0179	0	0	3.1833e-04	1.4142e-05	1.0209e-05	0	0.0300	0.0907	0.1234
3										
4										
5										
6										
7										

Şekil 19: Eğitim işleminin sonuçları

Hu moment değerleri referans alınarak kullanılan test yapısına göre yapay sinir ağı eğitim işlemi sonrasında doğru çalışıp çalışmadığının test edilmesi için eğitim işleminde kullanılan hatalı ve hatasız kart verileri dışında 12 adet hatasız, 12 adet hatalı kart verisi test edilmiştir. Test işlemini sonucunda hatasız kart verilerin karşılığı 1 değerinde hatalı kart verilerinin karşılığı 0 değerinde olmalıdır. Test işleminde kullanılan hatasız 12 adet test verisinde; 9 adet veri karşılığı 1'e yakın değerde, 3 adet veri karşılığı ise 0.7 olarak gözlemlenmiştir. 3 adet hatasız kartın karşılığı 1 değerine yakın olmadığı için başarısız olmuştur. Hatalı kart test verilerinde ise 6 adet verinin karşılığının 0'a yakın değerde doğru çıktı ürettiği, 6 adedin ise 0'a yakınsamadığı için hatalı çıktı ürettiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar bölümünde çıktılar detaylandırılmıştır (Tekin, 2021).

4. SONUÇ

Gerçekleştirilen çalışmada hata tespit sistemi tasarımı gömülü yapıda mikrobilgisayar Raspberry Pi 3 kullanılmıştır. Kameradan elde edilen görüntüler ilk olarak gri seviyeye çevrilerek daha sonra da gürültü azaltama teknikleri uygulanarak medyan filtre ile gürültülerden uzaklaştırılmış ve eşikleme yöntemiyle de karanlık – aydınlık bölgeler birbirinden ayrıştırılmıştır. Moment değerleri ise görüntünün bu ayrıştırılmış/arındırılmış son durum hali kullanılarak nesnelere için geometrik ağırlık merkezi noktası ve tamamlayıcı vektör seti kullanılarak bulunmuştur.

Çizelge 3: Eğitim ve test işlemi veri sayısı bilgileri.

Özellik Çıkarımı	Hatasız Kart Eğitim Veri Sayısı	Hatalı Kart Eğitim Veri Sayısı	Hatasız Kart Test Veri Sayısı	Hatalı Kart Test Veri Sayısı
Hu Vektör Değerleri	150	150	12	12
Piksel Değerleri	150	150	12	12

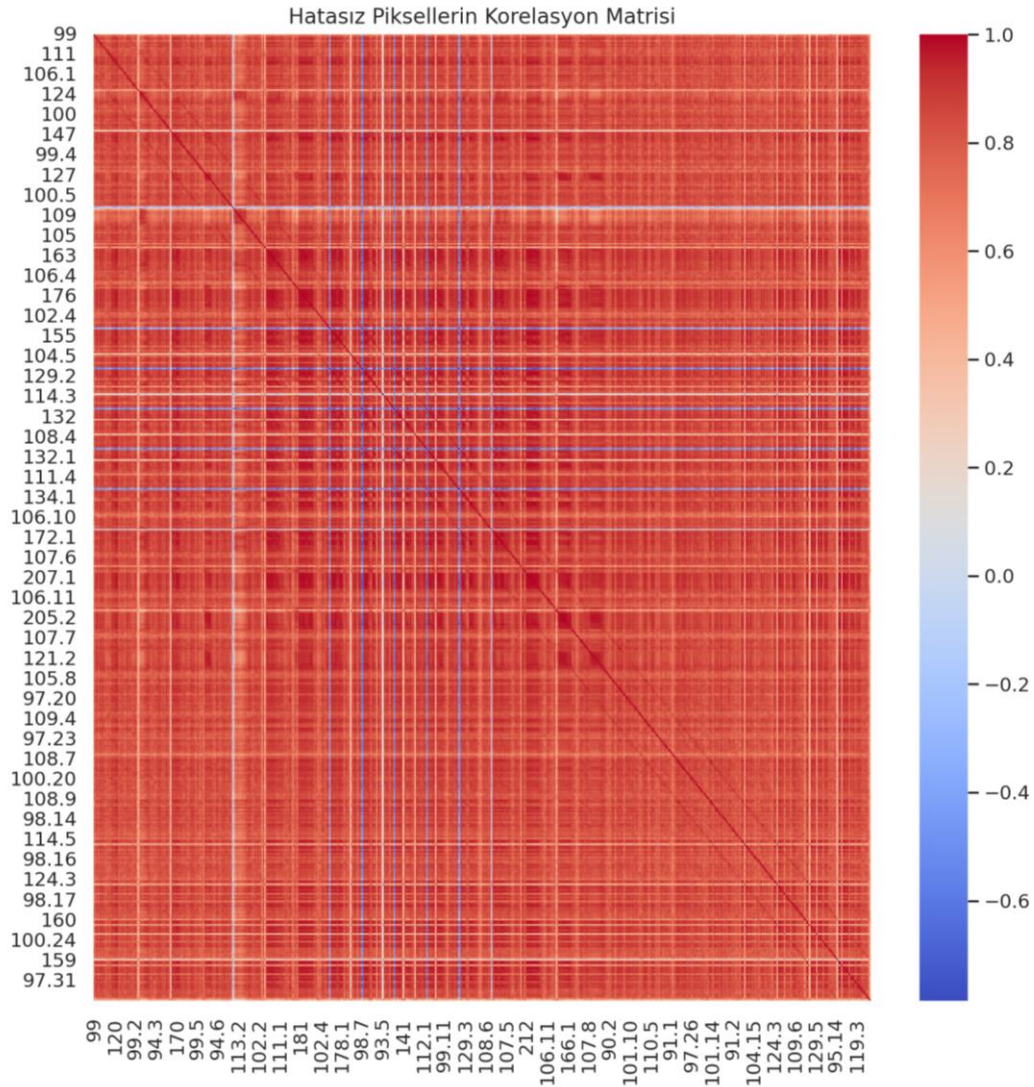
Çizelge 4: Matlab eğitime ve test işlemi sonuçlarının karşılaştırılması.

Özellik Çıkarımı-ÇKA Yapısı	Hatasız Kart (1) Test Sonucu	Hatalı Kart (0) Test Sonucu
Hu Vektör-Tansig Fonksiyon	3 Adet 0.7 /	6 adet 0, 6 /
2 Gizli Katman	9 adet 0, 99	6 adet 0, 1
Piksel-Tansig Fonksiyon	12 adet 1	12 adet yaklaşık
2 Gizli Katman		0, 00000998
Piksel-Logsig Fonksiyon	12 adet	12 adet yaklaşık
3 Gizli Katman	0, 999	0, 00000095

Hu vektör özellikleri kullanılarak YSA eğitime işlemi Çizelge 3' de verilmiştir. Burada 300 adet veri girdileri tanıtılmış olup, bunların dışında 24 adet de test veri girdileri ile doğruluk testi yapılmıştır. Yapılan test işlemleri sonucunda; 24 veri girdisinden 9 tanesinin hedeflenen 0 ve 1 değerine yakınsamadığı ölçülmüş, başarı oranı %62,5 olarak elde edilmiştir. Hu vektörlerinin özellik çıkarımında istenilen başarıyı yakalayamamasının nedeni olarak farklı çıktılarının aynı veri olarak algılanması yani hata vektörlerinin benzer cisimler için ayırt etme özelliğinin yetersiz kalması durumu söylenebilir.

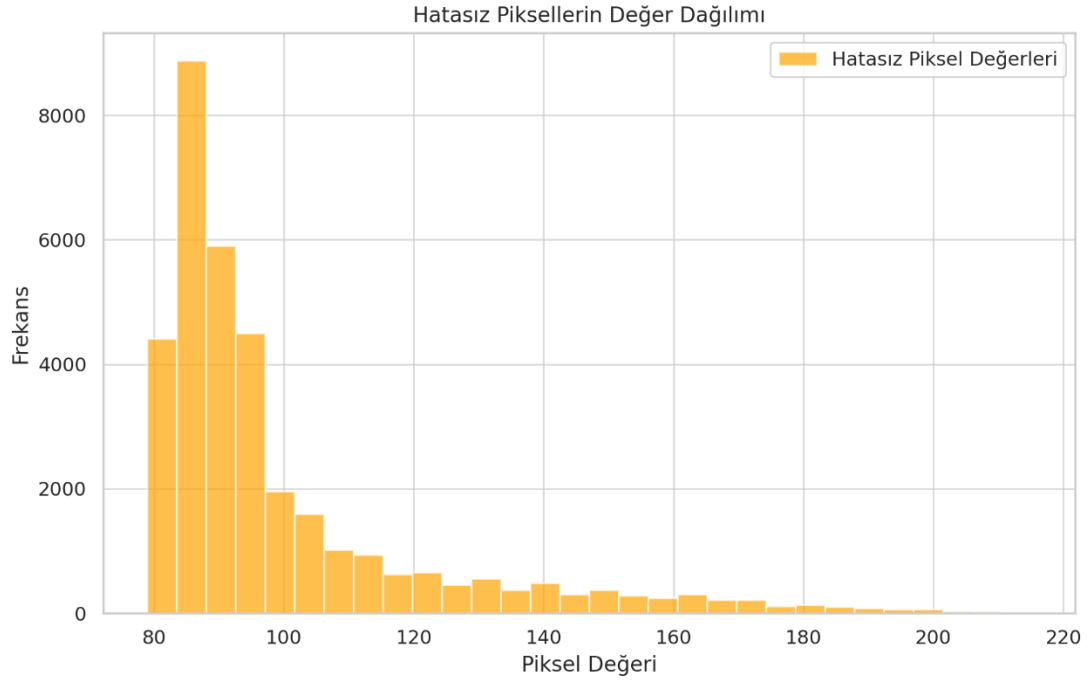
Aynı şekilde 300 adet veri girdisi ve bunların dışındaki 24 adet test girdisi kullanılarak doğruluk testi için görüntülerin piksel özelliklerine eğitime işlemi yapılmıştır. Bu işlemde transfer fonksiyonu ve katman sayı değişimleri yapılarak farklı eğitime işlemlerinin gerçekleştirildiği durumun sonuçları Çizelge 4' De verilmiştir. Eğitime işlemi sonuçlarına göre; hu ışığın bozucu etkisi ve nesnelerin şekillerinin benzer olması gibi durumlar göz önüne alındığında hu vektörlerin Off-line ve On-line çalışmada performansı düşük bulunmuştur. Performans durumu en yüksek başarıyı Off-line ve On-line hata tespit işleminde piksel özelliklerinin girdi olarak kullanıldığı, transfer fonksiyonu olarak logsig ve katman sayısı 3 seçildiğinde elde edilmektedir.

PCB hata tespit sisteminin YSA modelinde logsig transfer fonksiyonu referans olarak alındığında; Off-line % 98 performans, On-line kontrolde ise 75 adet kontrolde tamamını doğru tahmin yaparak % 100 başarılı performans sağlamıştır. Yapılan eğitime işlemlerinde aydınlatma seviyesinin doğru olarak belirlenmesi, sistemin doğru çalışmasında önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Görüntülerin kamera modülünden başarılı, net bir şekilde alınması sonraki adımlardaki işlemlerin performansını olumlu yönde etkilemektedir. YSA eğitime işleminde piksel değerlerine ve vektör setine karşılık gelen çıktılarının binary olarak kodlanması eğitime işleminin sürecini oldukça hızlandırdığı da ifade edilmelidir. Ayrıca benzer olacağı düşünülen nesnelerin hata tespitinde eğitime veri seti sayısının artırılması gerekmektedir. Bu bağlamda çalışmadaki piksel değerleri gerçek zamanlı sistemler için başarılı bulunmasına rağmen aydınlatma ve gürültüye karşı hassasiyet gösterdikleri için çalışmanın başarısını da direkt olarak etkiledikleri görülmüştür.



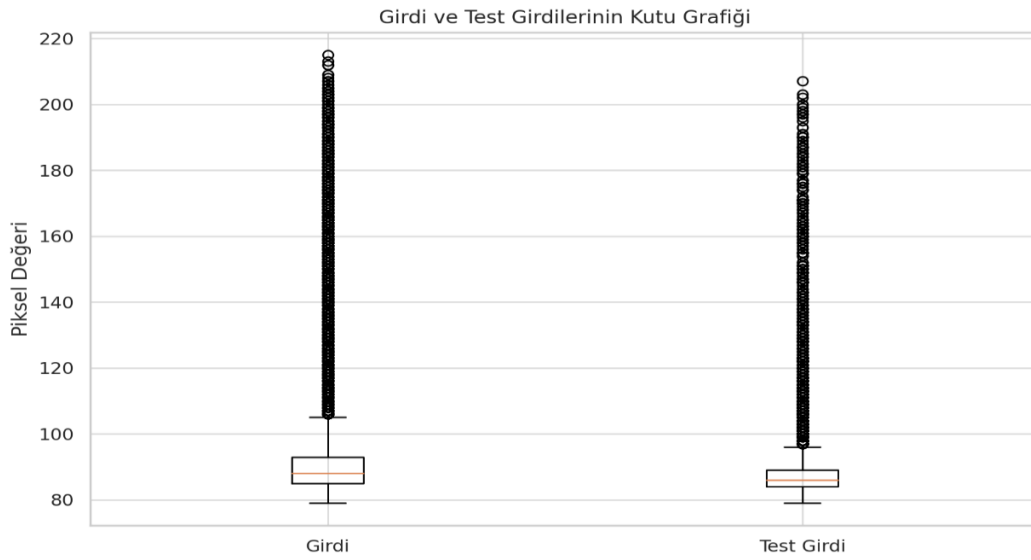
Şekil 20: Hatasız Piksellerin Korelasyon Matrisi

Şekil 20 Hatasız Piksellerin Korelasyon Matrisi; bu grafik, hatasız pikseller arasındaki korelasyonları görselleştirmektedir. Grafikte her bir piksel çifti arasındaki korelasyon katsayıları renk yoğunluğuna göre değişmektedir. Kırmızıya yakın renkler yüksek pozitif korelasyonu, maviye yakın renkler ise negatif korelasyonu gösterir. Bu grafik, hatasız piksellerin birbirleriyle olan ilişkilerini analiz etmek için kullanılır. Korelasyon katsayısının yüksek olduğu alanlar, piksellerin birbirine daha bağımlı olduğunu gösterir.



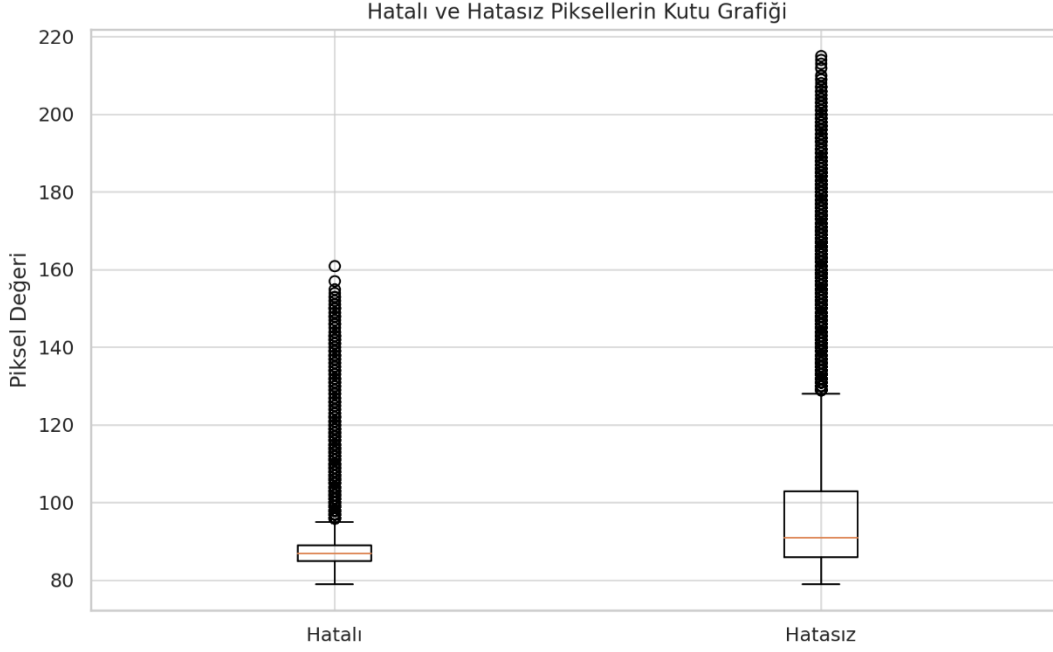
Şekil 21: Hatasız Pksellerin Değer Dağılımı

Şekil 21 Hatasız Pksellerin Değer Dağılımı; bu histogram, hatasız pksellerin değer dağılımını göstermektedir. X eksenini pksel değerlerini, Y eksenini ise bu değerlere sahip pksel sayısını temsil eder. Bu grafik, hatasız pksellerin yoğunlaştığı değer aralıklarını ortaya koyar. Pksel değerlerinin çoğunlukla 80-100 aralığında toplandığı gözlemlenebilir, bu da hatasız pksellerin büyük ölçüde düşük değerlere sahip olduğunu gösterir.



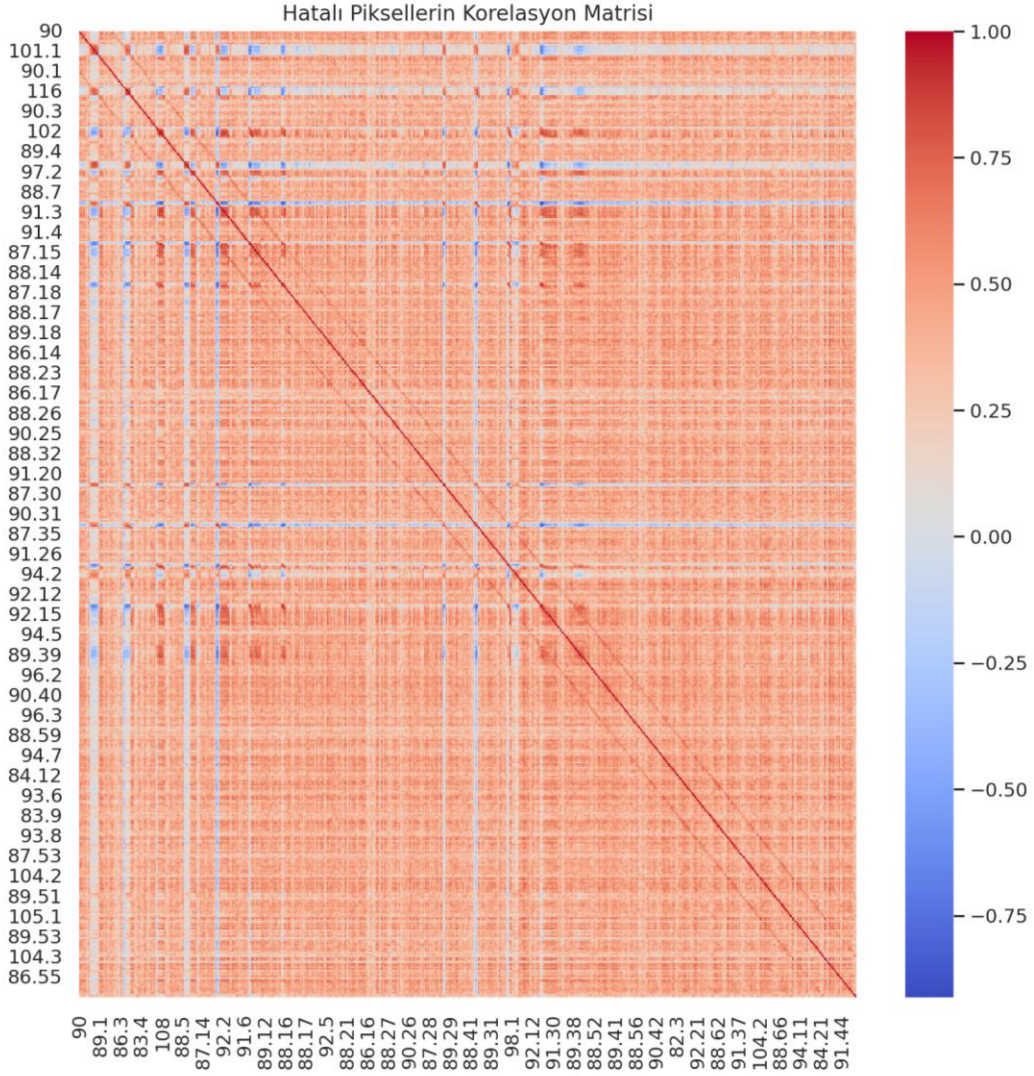
Şekil 22: Girdi ve Test Girdilerinin Kutu Grafiği

Şekil 22 Girdi ve Test Girdilerinin Kutu Grafiği; bu kutu grafiği, orijinal girdi verileri ile test girdilerinin piksel değeri dağılımlarını karşılaştırır. Girdi ve Test Girdi olarak iki farklı grup halinde görselleştirilen bu grafik, her iki grup için minimum, birinci çeyrek, medyan, üçüncü çeyrek ve maksimum değerleri içerir. Girdi ve test verileri arasında benzer bir dağılım olması, veri tutarlılığını gösterir.



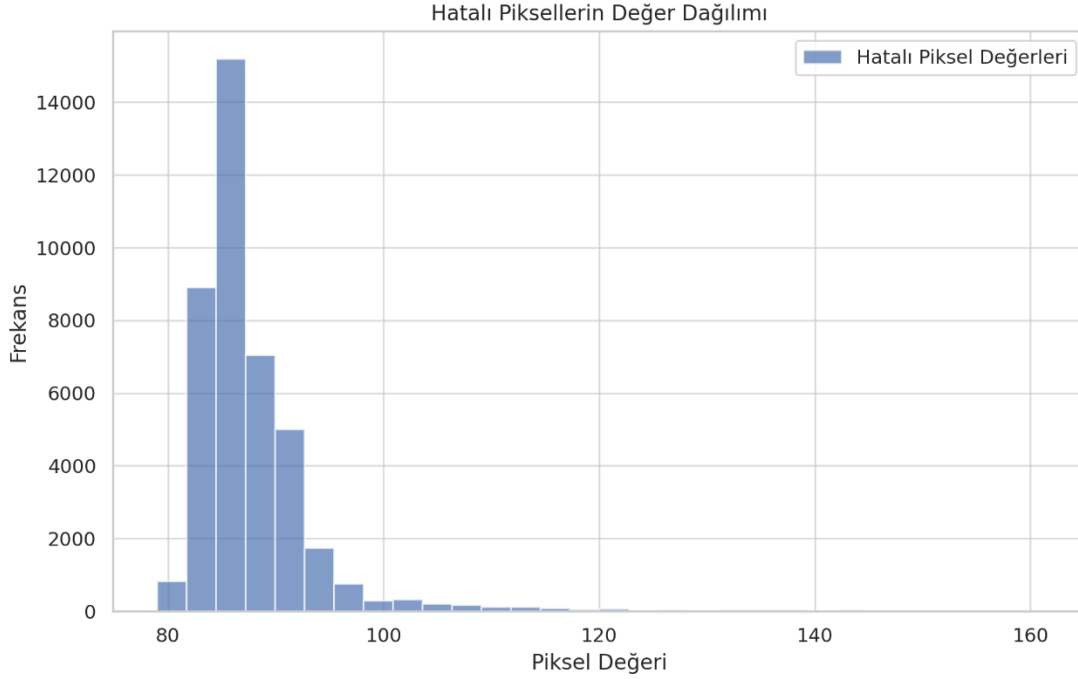
Şekil 23: Hatalı ve Hatasız Piksellerin Kutu Grafiği

Şekil 23 Hatalı ve Hatasız Piksellerin Kutu Grafiği; bu kutu grafiği, hatalı ve hatasız piksellerin dağılımlarını karşılaştırır. Hatalı ve Hatasız olarak iki ayrı grup halinde görselleştirilen bu grafik, her iki grup için de minimum, birinci çeyrek, medyan, üçüncü çeyrek ve maksimum değerleri içerir. Hatalı piksellerin değerleri daha düşük aralıklarda yoğunlaşırken, hatasız piksellerde daha geniş bir dağılım görülmektedir.



Şekil 24: Hatalı Piksellerin Korelasyon Matrisi

Şekil 24 Hatalı Piksellerin Korelasyon Matrisi; bu grafik, hatalı pikseller arasındaki korelasyonları görselleştirmektedir. Her bir piksel çifti arasındaki korelasyon katsayıları renk yoğunluğuna göre değişmektedir. Kırmızıya yakın renkler yüksek pozitif korelasyonu, maviye yakın renkler ise negatif korelasyonu gösterir. Hatalı pikseller arasındaki korelasyonun incelenmesi, hataların dağılımında belirli bir desen olup olmadığını anlamak için faydalıdır.



Şekil 25: Hatalı Piksellerin Değer Dağılımı

Şekil 25 Hatalı Piksellerin Değer Dağılımı; bu histogram, hatalı piksellerin değer dağılımını göstermektedir. X eksenini piksel değerlerini, Y eksenini ise bu değerlere sahip piksel sayısını gösterir. Hatalı piksellerin değerlerinin çoğunlukla 80-90 aralığında toplandığı gözlenmektedir. Bu, hatalı piksellerin daha düşük değerlere sahip olduğunu ve belirli bir aralıkta yoğunlaştığını gösterir.

Benzer geliştirilen uygulamalarda taşınabilirlik, maliyet yüksekliği, elde edilen görüntülerdeki çözünürlük değerlerinin düşük olması gibi sistemin optimum çalışmasına engel olacak eksiklikleri arasında sayılabilir durumlardır. Bu eksiklikleri en aza indirmek amacıyla bu sistem kontrol işlemlerinin daha hızlı ve hatasız gerçekleştirilebilmesi amacıyla tasarlanarak uygulanmıştır.

Aynı zamanda gömülü sistemde kullanılan yazılımların açık kaynak kodlu kütüphane ve görüntü işleme algoritmaları modelleri olduğu düşünülürse sistemin devamlı olarak güncellenebilir olması da çalışmanın sonuçları arasına eklenebilir. Son olarak bu sistemde kullanılan yazılım, ürün özellik çıkartımı ile oluşturulan veri tabanının da güncellenerek farklı nesnelerin kontrol edilebilmesi amacıyla değişik sektör/işletmelerde kullanılabilir olması çalışmanın güncelliğine ve geleceğine katkı vermektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

B.Y.: Kavramsallaştırma, yöntem, yazılım, doğrulama, formel analiz, araştırma, kaynaklar, yazı yazma.

İ.Y.: Yöntem, yazılım, kaynaklar, yazı yazma - gözden geçirme, orijinal taslak hazırlama ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- AI Deport.* (2024, 08 04). AI Deport: <https://ai-depot.net> adresinden alındı
- Akar, E. O. (2006). *Tarihi görüntülerin kalitesinin görüntü işleme teknikleri kullanılarak artırılması*. Konya: Selçuk Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ataseven, B. (2013). Yapay Sinir Ağları İle Öngörü Modellemesi. *Öneri Dergisi*, 101-115.
- Bayindir, R., Sesveren, Ö. (2008). YSA Tabanlı Sistemler İçin Görsel Bir Arayüz Tasarımı. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 101-109.
- Çelik, A., Tekin, E. (2020). Tekstil Baskı Kalite Kontrolünün Görüntü İşleme Teknikleri ile Gerçekleştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 268-276.
- Çetin, Ö. (2024, 08 04). Ömer Çetin: <http://www.omercetin.com.tr> adresinden alındı
- Ever, D., Demircioğlu, E.N. (2022). Yapay Zekâ Teknolojilerinin Kalite Maliyetleri Üzerine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 59-72.
- Gonzalez, R.C., Wood, R.E. (1992). *Digital Image Processing*. Massachusetts: Pearson.
- Gültekin, E. Çelik, H.İ., Dülger, L.C., Sünbül, H.İ., Kani, H. (2019). Image Processing Applications on Yarn Characteristics and Fault Inspection. *Journal of Textile Engineering*, 340-345.
- Haykin, S. (1994). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Pearson.
- Horozoğlu, E. (2013). *Görüntü işleme ile yüzey pürüzlülüğü ölçümü ve analizi /*. Konya: Selçuk Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü .
- Kaya, İ., Engin, O. (2011). Kalite İyileştirme Sürecinde Yapay Zekâ Tekniklerinin Kullanımı. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 103-114.
- Korkmaz, M. Barstuğan, M. (2020). A Deep Learning-Based Quality Control Application. *European Journal of Science and Technology*, 332 - 336.
- Öztemel, E. (2020). *Yapay Sinir Ağları*. İstanbul: Papatya Yayıncılık.
- Santaş, G., Gülesin, M. (2012). Sayısal Görüntü İşleme ve Farklı Alanlardaki Uygulamaları. *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 85-97.
- Saravanan, C. (2010). Color Image to Grayscale Image Conversion. *2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications* s. 196-199. Island: IEEE.
- Seker, A., Diri, B., Balık, H.H. (2017). Derin Öğrenme Yöntemleri Ve Uygulamaları Hakkında Bir İnceleme. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 47-64.
- Tekin, Ş. (2021). *Yapay Sinir Ağları İle Gömülü Sistem Tabanlı Hatalı Baskı Devre Kartı Tespiti*. Sakarya: Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisanüstü Eğitim Enstitüsü.
- Tsoukalas, L.A., Uhrig, R.E. (1997). *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.
- Yu, F.T.S., Yajun. L. (1990). Applications of moment invariants to neural computing for pattern recognition. *Hybrid Image and Signal Processing II*, (s. 1297-1307). Orlando.

Effect of Different Fluid Types on Cycle Performance in Electricity Generation with Geothermal Energy

Oguzhan Erbas^{1*} 

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kutahya Dumlupınar University, Kutahya, Türkiye

Received: 30.10.2024, Accepted: 8.11.2024, Published: 26.12.2024

ABSTRACT

Geothermal energy is a naturally renewable resource and can produce electricity and heat without harming the environment with less carbon dioxide emissions than fossil fuels. This makes it an environmentally friendly option. Our country is located on an active tectonic belt and has an important position in the world in terms of geothermal energy resources. For this reason, we have a high potential to benefit from geothermal resources. The design of the geothermal energy electricity generation system (turbine, heat exchanger, fluid properties, etc.) also plays a critical role in terms of efficiency. The system should be optimized according to conditions such as temperature and pressure. In this study, electricity production performances were compared for different fluid types in the secondary cycle, turbine efficiency and wellhead temperature in an energy conversion plant using a geothermal fluid with a source temperature of 195 °C.

Keywords: Geothermal energy, Electricity production, Fluid type, Performance analysis

Jeotermal Enerji ile Elektrik Üretiminde Farklı Akışkan Türlerinin Çevrim Performansına Etkisi

ÖZ

Jeotermal enerji, doğal olarak yenilenen bir kaynak olup, fosil yakıtlara göre daha az karbondioksit emisyonu ile çevreye zarar vermeden elektrik ve ısı üretebilir. Bu da onu çevre dostu bir seçenek haline getirmektedir. Ülkemiz, aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer almaktadır ve jeotermal enerji kaynakları bakımından dünya genelinde önemli bir konuma sahiptir. Bu sebeple jeotermal kaynaklardan faydalanma potansiyelimiz yüksektir. Jeotermal enerji ile elektrik üretim sistemi (türbin, ısı eşanjörü, akışkan özellikleri vb.) tasarımı da verimlilik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Sistem, sıcaklık ve basınç gibi koşullara göre optimize edilmelidir. Bu çalışmada da; 195 °C kaynak sıcaklığı olan bir jeotermal akışkan kullanılan enerji dönüşüm santralinde, ikincil çevrimdeki farklı akışkan tipleri, türbin verimi ve kuyu başı sıcaklığı için elektrik üretim performansları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji, Elektrik üretimi, Akışkan tipi, Performans analizi

1. INTRODUCTION

The global energy transformation is facing significant challenges. In order to achieve sustainable development goals on a national and global scale, it is extremely necessary to increase the use of renewable resources. Sustainable development requires the evaluation of resources with high efficiency in a manner compatible with the environment. In Turkey, a country aiming to become a member of the European Union; European Union standards should be taken into consideration in energy policies, structuring of energy management and legal regulations related to energy. In the building sector, enhancing efficiency is crucial for facilitating the energy transition. There is an increasing need for adopting efficient appliances, as well as rapidly renovating and refurbishing existing buildings. Projections suggest that to align with a pathway compatible with limiting temperature rise to 1.5°C, the share of renewables in this sector must increase to 86% by 2050. This includes highly decarbonized electricity, district cooling and heating, bioenergy, and direct use of renewables, such as solar thermal and geothermal energy (IRENA, 2023; Dinçer, 2020).

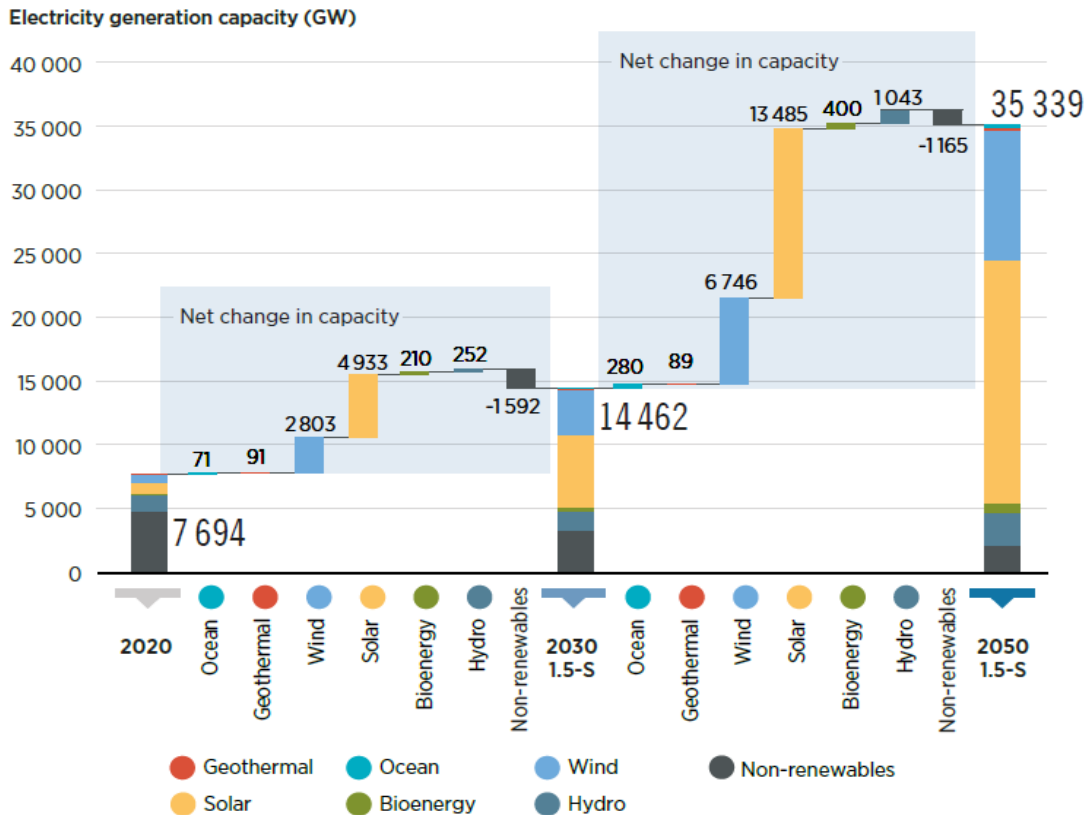
Direct use of geothermal energy refers to the ready use of heat energy without being converted into other forms of energy such as electrical energy. The main areas of direct use are; heating of swimming pools, balneology, space heating and cooling including regional heating, agricultural applications (greenhouse heating), aquaculture applications, industrial processes and heat pump applications (Arslan, 2010; Tuğcu, 2016). The simplest and cheapest cycle used for electricity production is the Direct-Steam Cycle. Direct-Steam (or dry steam) power plants are used in steam-heavy reservoirs. Dry, saturated or slightly superheated steam is obtained from wells. Steam carries non-condensable gases of various compositions and concentrations. This steam obtained from the wells is transported through pipes and used directly in the impulse/reaction type turbine in the power plant, and the waste steam is released into the atmosphere (Tuğcu, 2016; Rašković, 2013).

In a Binary power plant, the thermal energy of the geothermal fluid is transferred to a secondary working fluid to be used in a suitable conventional Rankine cycle via a heat exchanger. The geothermal fluid does not come into contact with the moving parts of the power plant and therefore erosion formation is minimized. Binary power plants are advantageous in certain conditions such as geothermal fluids with high dissolved gas content, high corrosivity or scaling potential. Naturally, another problem arises when the liquid geothermal fluid suddenly turns into vapor at the well exit, but this problem can be prevented by using downhole pumps (submersible pumps). In most Binary power plants, such pumps are used and the geothermal fluid remains in the liquid phase throughout the power plant (Zinsalo, 2022; Kabeyi, 2019).

Geothermal waters are waters that either seep down from the surface to the underground or emerge from magma. Geothermal energy is a type of energy formed by the heat accumulated in the workable depths of the earth's crust. This heat reaches the surface naturally in the form of hot water sources and steam or in the

form of hot water extracted by drilling, hot water + steam and steam. It can also be used economically directly or by converting it into other types of energy.

To limit global warming to 1.5°C, we must cut carbon dioxide (CO₂) emissions by about 37 gigatonnes from 2022 levels and achieve net-zero emissions in the energy sector by 2050. Although some progress has been made, there are still significant gaps in deploying energy transition technologies needed to meet the Paris Agreement goals. Achieving a 1.5°C pathway requires a complete transformation in energy consumption and production (IRENA, 2023). From 2013 to 2020, roughly 75% of global renewable energy investments came from the private sector, with 83% of solar financing from private capital. In contrast, geothermal and hydropower relied heavily on public funding, with only 32% and 3% of investments from private sources, respectively (IRENA and CPI, 2023). To encourage more equitable investment, stronger public sector intervention is necessary to allocate funding toward countries and technologies that are often underrepresented. Expanding global electricity generation capacity by 2030 and 2050 is essential to achieve the 1.5°C Scenario (Figure 1).



Notes: GW = gigawatt; 1.5-S = 1.5°C Scenario.

Figure 1. Total global electricity generation capacity needed (IRENA, 2023).

In the short term, rising fossil fuel prices make renewable energy solutions more attractive. Wind and solar power have become highly competitive with gas-fired power generation. Additionally, the increase in fossil fuel prices has narrowed the cost gap between biofuels, biomethane, and fossil-based transport fuels. This shift has also improved the cost competitiveness of bioenergy, as well as solar, geothermal, and heat pumps powered by renewable electricity (Bayer, 2013; Chitgar, 2023).

Our country ranks sixth in the world and first in Europe in terms of geothermal energy capacity. Thanks to its geological structure, there are geothermal resources at various temperatures across nearly all regions. These resources are currently utilized for multiple purposes, including electricity generation, residential heating, greenhouse farming, and health tourism. It is essential to evaluate this natural resource with effective, environmentally friendly practices that consider the needs of local communities, aiming for overall development. This study compares the electricity production performance of different fluid types and turbine efficiencies in the secondary cycle of a geothermal energy conversion plant operating at a wellhead temperature of 195 °C.

2. ENERGY AND EXERGY PROCESS IN GEOTHERMAL ENERGY CONVERSION SYSTEM

Due to the limited primary energy resources and the rapid increase in energy costs, exergetic analyses have gained great importance in determining energy losses in thermal systems. If exergy losses decrease, i.e. exergy efficiency increases, the destruction, resource consumption and lost exergy emissions that will occur in the process will decrease inversely proportional. In a steady-state, steady-flow process, mass, energy, entropy, and exergy balance equations determine work and heat interactions, exergy decrease, and efficiencies. The mass balance is presented in rate form (Arslan, 2010).

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

The mass flow rate is defined with 'in' for the inlet and 'out' for the outlet. The energy balance states that total energy inputs must equal total energy outputs.

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \quad (2)$$

This equation clearly expresses the first law of thermodynamics and can be rewritten, ignoring kinetic and potential energy changes, as follows:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (3)$$

Heat and work are the main transfers across a system boundary. Without electricity, magnetism, surface tension, or nuclear reactions, total exergy divides into four components: physical, kinetic, potential, and chemical exergy (Arslan, 2010).

The overall exergy balance is fundamentally important and can be stated as follows:

$$\dot{E}x_{\text{heat}} + \dot{E}x_{\text{work}} + \dot{E}x_{\text{mass, in}} - \dot{E}x_{\text{mass, out}} = \dot{E}x_d \quad (4)$$

In this context, $\dot{E}x_{\text{heat}}$ and $\dot{E}x_{\text{work}}$ represent the exergy components from heat and work interactions, while $\dot{E}x_{\text{mass}}$ and $\dot{E}x_{\text{mass, out}}$ refer to those from mass transfer across the system boundary. $\dot{E}x_d$ denotes the destroyed exergy.

$$\dot{E}x_{\text{heat}} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k \quad (5)$$

$$\dot{E}x_{\text{work}} = \dot{W} \quad (6)$$

$$\dot{E}x_{\text{mass, in}} = \sum (\dot{m}\psi)_{\text{in}} \quad (7)$$

$$\dot{E}x_{\text{mass, out}} = \sum (\dot{m}\psi)_{\text{out}} \quad (8)$$

Where \dot{Q}_k represents the heat transfer rate through the boundary at temperature T_k , located at k , ψ is defined as the flow (specific) exergy as follows:

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (9)$$

$$\dot{I} = \dot{E}x_d = T_0\dot{S}_{\text{gen}} \quad (10)$$

Energy and exergy efficiencies are clearly defined by the following equations(Arslan, 2010):

$$\eta = \frac{\dot{E}_{\text{out}}}{\dot{E}_{\text{in}}} \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}x_{\text{out}}}{\dot{E}x_{\text{in}}} \quad (12)$$

3. GEOTHERMAL POWER PLANT MODEL AND PROCESS FLOW CHARACTERISTICS

In the cycle shown in Figure 2. and optimized with the ‘‘THERMOFLEX’’ energy conversion system design program, steam obtained from the geothermal source underground is directed to a heat exchanger. While the geothermal fluid loses heat on one side of the heat exchanger, it heats the secondary fluid on the other side. The secondary fluid is a liquid with a low boiling point and therefore evaporates at lower temperatures. This liquid evaporates after receiving heat and this steam is directed to the turbine. The vapor of the organic liquid rotates the turbine and generates electricity. Then this vapor becomes liquid again through a cooling

system (heat exchanger-condenser). The cooled secondary fluid returns to the initial heat exchanger and the process starts again (Bu, 2013; Luo 2012).

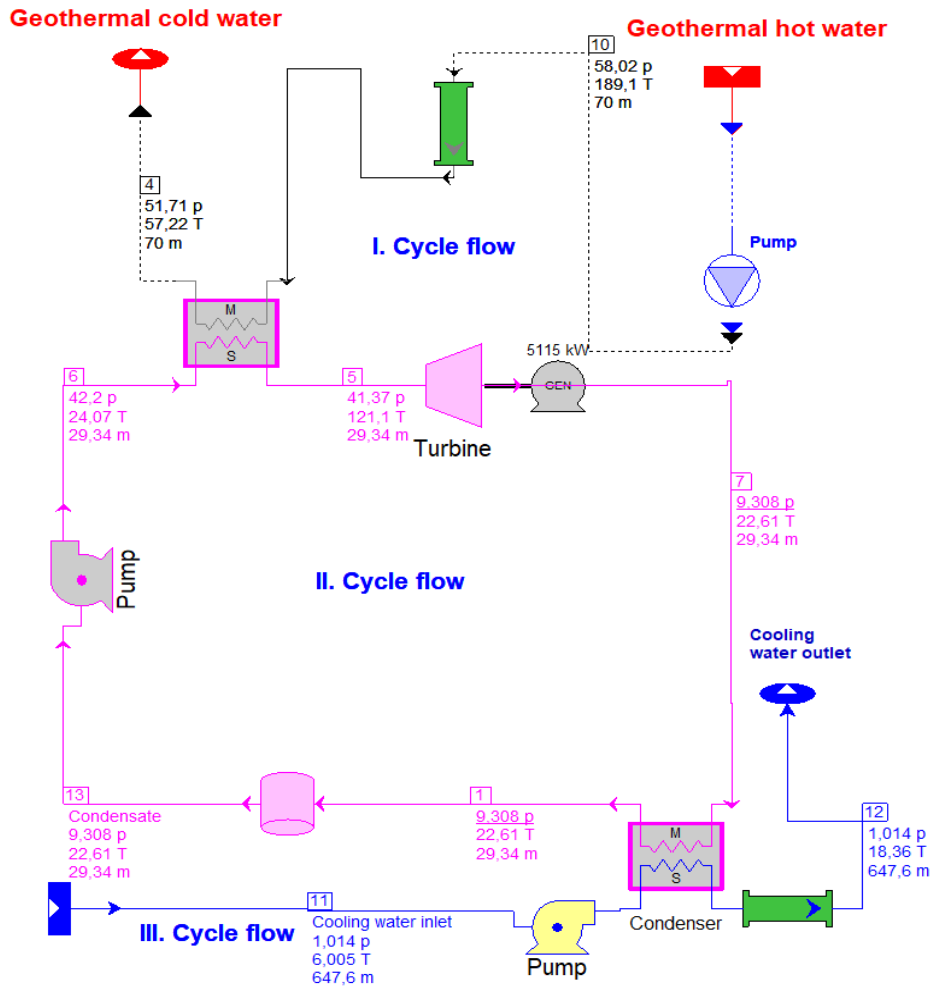


Figure 2. Electricity generation work flow chart with geothermal energy

In Binary cycle systems that generate electricity from geothermal energy, the dry step efficiency plays an important role in the design of the cooling turbine. The dry step efficiency indicates how effectively the turbine converts water vapor. Increasing this efficiency can positively affect the overall efficiency and energy output of the system. A high dry step efficiency means more energy production. This allows the turbine to produce more work and therefore to benefit more from the potential of the geothermal resource. In binary cycle systems, the efficiency of the cooling turbine also affects the heat exchanger performance. A better dry step efficiency helps the heat exchanger to operate more efficiently, thus increasing the overall efficiency of the system (Heberle, 2010 ; Beckers , 2022).

The properties of the secondary fluid directly affect the efficiency and performance of the binary cycle power plant, increasing the energy production capacity. Therefore, the selection and design of the secondary fluid is a critical element for the efficiency of geothermal power plants. Seven different types of fluids (Ammonia, R22, Propane, SO₂, R12, R134a, R21) were compared in terms of electricity production performance in the designed geothermal power plant model. The best fluid in terms of net electrical efficiency (%), net obtained power (kW) and plant auxiliary (kW) was ammonia. A low "plant auxiliary (kW)" value positively affects the efficiency, costs and environmental impacts of the plant. Therefore, it is aimed to minimize auxiliary energy consumption in energy production processes (Liu, 2013 ; Li, 2022).

4. RESULTS

In these types of energy conversion plants, the selected secondary fluid has a low boiling point, allowing it to evaporate at low temperatures. This makes it possible to produce effective energy even at the lower temperatures of the geothermal source. The high heat capacity of the secondary fluid allows it to store and use more heat, while a fluid with low viscosity reduces the flow resistance in the system. This enables components such as pumps and turbines to operate more efficiently. Again, the fact that this fluid is non-corrosive extends the life of the turbine and other system components and reduces maintenance requirements. Table 1. shows system performance values according to different fluid types used in the secondary cycle in the electricity production process from geothermal energy.

Table 1. Effect of Different Fluid Types on Optimizing Performance in Electricity Generation from Geothermal Energy

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Type of fluid used in energy conversion	Ammonia	R22	Propane	SO₂	R12	R134a	R21
Plant gross power (kw)	5458	5813	5889	3921	5655	5243	2261,6
Plant net power (kw)	5073	4923	4791	3417	4356	4229	1764,7
Plant auxiliary (kw)	385	889,2	1097,5	504,6	1299,4	1014,7	496,9
Miscellaneous plant auxiliary load (kw)	54,58	58,13	58,89	39,21	56,55	52,43	22,62
Plant gross heat rate (LHV) (kj / kwh)	27140	25487	25158	29283	26195	28253	29574
Plant net electric efficiency (LHV)	12,33	11,96	11,64	10,71	10,59	10,28	9,49
Plant net heat rate (LHV) (kj / kwh)	29200	30090	30921	33608	34009	35033	37900

The dry step efficiency affects the ability to optimize the temperature difference at which the turbine operates. Higher efficiency can increase energy production even at low temperature differences. At the same time, high dry step efficiency can affect the turbine size and system costs. The increased efficiency can allow for the use of smaller and lower cost turbines. In addition, higher efficiency means less energy loss and therefore lower environmental impacts. This allows for more sustainable use of geothermal resources.

In the cycle where ammonia is used as a fluid, the change of some important parameter values for different values of the refrigerant turbine design point dry step efficiency is shown in Table 2.

Table 2. Variation of parameter values for different values of turbine design point dry step efficiency (Ammonia)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Turbine design point dry step efficiency (%)	88	86	84	82	90	92	94
Plant gross power (kW)	5458	5333	5209	5084	5583	5708	5833
Plant net power (kW)	5073	4950	4826	4702	5197	5321	5445
Plant auxiliary (kW)	385	383,8	382,7	381,5	386,1	387,3	388,5
Miscellaneous plant auxiliary load (kW)	54,58	53,33	52,09	50,84	55,83	57,08	58,33
Plant gross heat rate (LHV) (kj / kWh)	27140	27776	28442	29141	26533	25952	25396
Plant net electric efficiency (LHV)	12,33	12,03	11,73	11,43	12,63	12,93	13,23
Plant net heat rate (LHV) (kj / kWh)	29200	29930	30698	31506	28504	27841	27208

In this system that produces electricity with geothermal energy, the mechanical efficiency of the turbine is also an important factor that directly affects the overall performance of the system. The mechanical efficiency of the turbine indicates how much of the energy input by the turbine can be converted into mechanical energy. High mechanical efficiency increases the efficiency of the system and provides more electricity production. In other words, it allows the energy obtained from geothermal resources to be converted into electrical energy more effectively. This increases the overall efficiency of the system and means more energy production. It reduces costs and environmental impacts while increasing energy production. Therefore, optimizing the mechanical efficiency of the turbine during the design phase is of critical importance. In the cycle where ammonia is used as the fluid, the changes of some important parameter values for different values of the turbine mechanical efficiency are shown in Table 3.

Table 3. Variation of parameter values for different values of turbine mechanical efficiency (Ammonia)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Turbine mechanical efficiency	99	97	95	93	91	89	87
Plant gross power (kW)	5458	5347	5236	5125	5014	4903	4792
Plant net power (kW)	5073	4963	4854	4744	4634	4524	4414
Plant auxiliary (kW)	385	383,9	382,8	381,7	380,5	379,4	378,3
Miscellaneous plant auxiliary load (kW)	54,58	53,47	52,36	51,25	50,14	49,03	47,92
Plant gross heat rate (LHV) (kj / kWh)	27140	27704	28292	28905	29545	30213	30913
Plant net electric efficiency (LHV)	12,33	12,06	11,79	11,53	11,26	10,99	10,73
Plant net heat rate (LHV) (kj / kWh)	29200	29847	30523	31230	31971	32748	33563

The increase in the temperature of the geothermal fluid positively affects the efficiency of binary cycle power plants. Figure 3. and Figure 4. show the effect of the geothermal source on the system with the increase in the wellhead temperature. As the temperature of the geothermal fluid increases, the heat energy

obtained from this fluid increases. This allows the organic fluid in the cycle to vaporize at higher temperatures and thus produce more energy. As a result, the overall efficiency increases. At the same time, the high temperature increases the vapor pressure of the organic fluid. This helps the turbine to produce more energy.

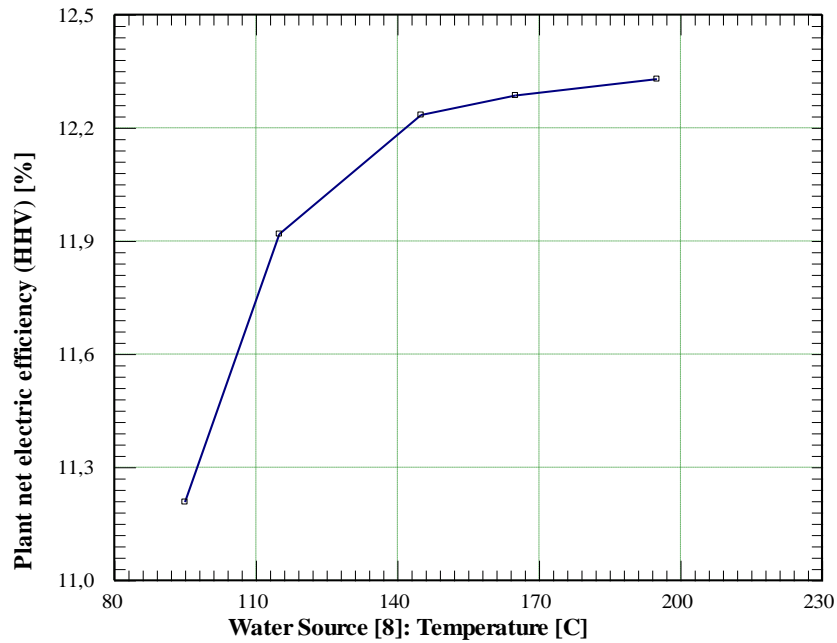


Figure 3. Effect of geothermal source temperature on net electricity efficiency

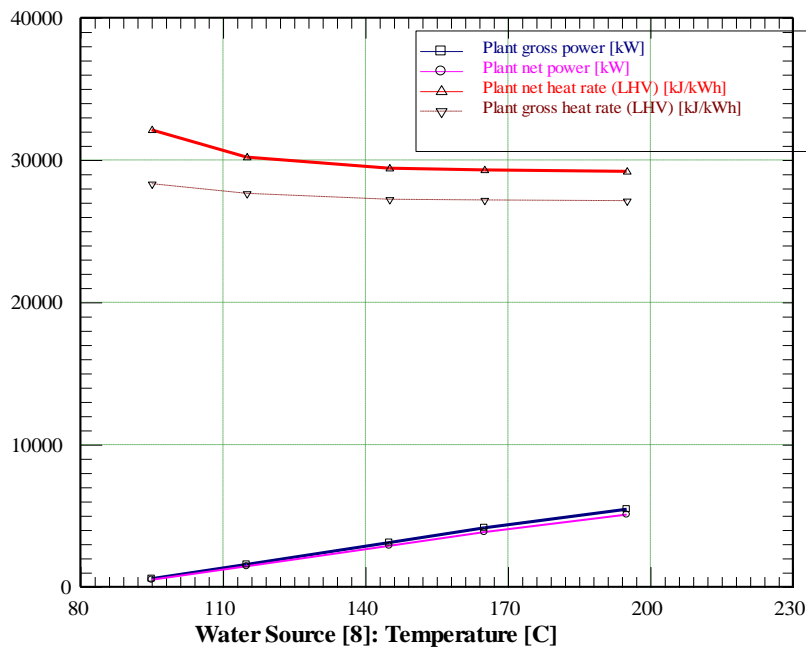


Figure 4. Effect of geothermal source temperature on power and heat rate in the system

5. CONCLUSION

Increased dry step efficiency in the turbine and increased geothermal flow binary cycle results in greater energy production and system efficiency. Therefore, paying attention to parameter selection at the design stage makes a critical contribution. Geothermal energy is expected to become more widely used in the coming years due to its numerous advantages. One of the main reasons for this is the role of geothermal power plants in providing baseload electricity generation. As renewable energy sources such as solar and wind continue to gain popularity, the importance of power plants that offer both renewable energy and baseload support, such as geothermal power plants, will increase.

Geothermal power plants generally have a lifespan of 20 to 50 years. However, this period may vary depending on the status of the resources, the design of the plant, maintenance practices and technological developments. In a new plant, efficiency is usually high. Over time, the pressure and temperature of the hot water and steam resources may decrease. This may affect the efficiency of the plant. Performance can be maintained with regular maintenance, resource management and, if necessary, system renewals. The most suitable type of plant for hydrothermal resources is dry steam plants or hot water plants (binary cycle). Such plants are systems where hot water is directly converted to steam or energy is transferred to another liquid through a heat exchanger. Geothermal steam sources are generally sources containing steam at high temperature and pressure. In this case, dry steam plants are the most suitable option. Such plants are systems where steam is directly used in turbines.

Geothermal energy can be integrated with other renewable energy sources in various ways. Geothermal energy can be integrated with wind and solar energy, increasing continuity in energy production. Especially during periods when solar energy is high, the geothermal energy system comes into play and helps maintain the balance in the grid. Geothermal energy systems can also work together with thermal energy storage systems. This allows hot water to be used during times of increased energy demand, especially through hot water storage systems. Geothermal power plants can also be integrated for both electricity and heat production (in combined cycle power plants). This increases energy efficiency and optimizes total energy output. Geothermal power plants can be sensitive to seismic activity due to the use of underground water and steam resources. Drilling operations for geothermal energy can change underground pressure, which can trigger seismic activity. Similarly, the injection of cold-water underground can change underground temperatures and pressure, which can affect seismic activity.

Information Note: This study was supported within the scope of Kutahya Dumlupınar University Scientific Research Project, No. 2024 – 44.

CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

There is no conflict of interest between the authors.

CONTRIBUTIONS OF THE AUTHORS

O.E.: Methodology, software, validation, investigation, resources, writing original draft preparation.

REFERENCES

- IRENA (2023), *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, Volume 1*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Dinçer, İ., & Ezan, M. E. H. M. E. T. (2020). Tuba-geothermal energy technologies report.
- Arslan, O., & Kose, R. (2010). Exergoeconomic optimization of integrated geothermal system in Simav, Kutahya. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 663-676.
- Tuğcu, A., Arslan, O., Köse, R., & Yamankaradeniz, N. (2016). Thermodynamic and economic analysis of geothermal supported absorption cooling system: Simav example. *Journal of Thermal Science and Technology*, 36(1), 143-159.
- Rašković, P., Guzović, Z., & Cvetković, S. (2013). Performance analysis of electricity generation by the medium temperature geothermal resources: Velika Ciglena case study. *Energy*, 54, 11-31.
- Zinsalo, J. M., Lamarche, L., & Raymond, J. (2022). Performance analysis and working fluid selection of an Organic Rankine Cycle Power Plant coupled to an Enhanced Geothermal System. *Energy*, 245, 123259.
- Kabeyi, M. J. B. (2019). Geothermal electricity generation, challenges, opportunities and recommendations. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (ijasre)*, 5(8), 53-95.
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 446-463.
- Chitgar, N., Hemmati, A., & Sadrzadeh, M. (2023). A comparative performance analysis, working fluid selection, and machine learning optimization of ORC systems driven by geothermal energy. *Energy Conversion and Management*, 286, 117072.
- Bu, X., Wang, L., & Li, H. (2013). Performance analysis and working fluid selection for geothermal energy-powered organic Rankine-vapor compression air conditioning. *Geothermal Energy*, 1, 1-14.
- Luo, C., Huang, L., Gong, Y., & Ma, W. (2012). Thermodynamic comparison of different types of geothermal power plant systems and case studies in China. *Renewable energy*, 48, 155-160.
- Heberle, F., & Brüggemann, D. (2010). Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation. *Applied Thermal Engineering*, 30(11-12), 1326-1332.
- Beckers, K. F., Rangel-Jurado, N., Chandrasekar, H., Hawkins, A. J., Fulton, P. M., & Tester, J. W. (2022). Techno-economic performance of closed-loop geothermal systems for heat production and electricity generation. *Geothermics*, 100, 102318.
- Liu, Q., Duan, Y., & Yang, Z. (2013). Performance analyses of geothermal organic Rankine cycles with selected hydrocarbon working fluids. *Energy*, 63, 123-132.

Li, T., Liu, Q., Gao, X., Meng, N., & Kong, X. (2022). Thermodynamic, economic, and environmental performance comparison of typical geothermal power generation systems driven by hot dry rock. *Energy Reports*, 8, 2762-2777.

İnce Daneli Zeminlerde Jet Grout ve Fore Kazık Yöntemleri ile Zemin İyileştirilmesi ve Yapılabilirliğinin Optimizasyonu

Furkan Hüseyin ATAŞ^{1*}, İbrahim Fedâ ARAL²

¹*Alsim Alarko Taahhüt Grubu, İstanbul, Türkiye*

²*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu, Türkiye*

Geliş: 17.09.2024, Kabul: 20.12.2024, Yayınlanma: 29.10.2024

ÖZ

Jet grout; ülkemizde ve dünyada oldukça geniş bir kullanımı olan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem ile zemin içerisinde jet grout kolonları oluşturulmaktadır. Yapım aşamasındaki ekipmanlar, jet grout harcının su/çimento oranı, tij dönme ve çekme hızları, tijlerin uç kısmında bulunan nozul sayıları gibi birçok üretim parametresi, oluşturulacak olan jet grout kolonlarının yapısı, performansı ve uygunluğunu belirlemektedir. Bu çalışmamızda jet grout kolonlarının üretimi, kullanım alanları, jet grout türleri ve jet grout ile zemin uyumluluğu, yöntem ile ilgili literatür taramalarının yanı sıra sahamıza uygulanabilirliği, işlem sürecinin maliyet ve adam x saat verileri ile paket olarak uygulanabilirliği belirlenilmeye çalışılmıştır. Bunun yanında jet grout yönteminin uygulama bazındaki avantajlarının konulması için yapılmış olan bir diğer projede farklı bir zemin iyileştirme yöntemi olan fore kazık yönteminin yapım koşulları ile karşılaştırılması yapılmış ve her iki zemin iyileştirme yönteminin optimizasyonu ortaya konulmaya çalışılmıştır. Yöntemlerden; 1 m fore kazık üretiminin, 1 m jet grout üretimine göre % 30 daha fazla zaman aldığı ve maliyet olarak da 11,5 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jet grout; Fore Kazık; Zemin İyileştirme; Optimizasyon,

Soil Improvement and Optimization of Fability with Jet Grout and Bored Pile Methods in Fine-Grained Soils

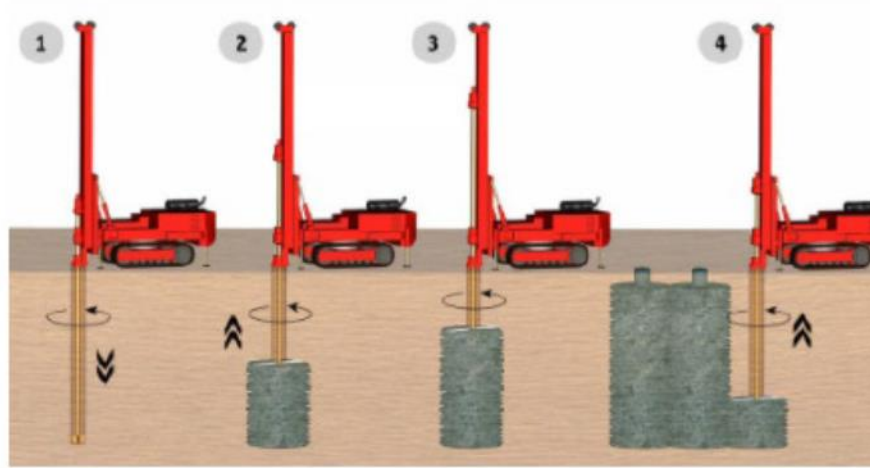
ABSTRACT

Jet grout; is a ground improvement method that is widely used in our country and in the world. Jet grout columns are formed in the ground with this method. Many production parameters such as the equipment in the construction phase, water/cement ratio of the jet grout mortar, rod rotation and withdrawal speeds, and the number of nozzles located at the tip of the rods determine the structure, performance and suitability of the jet grout columns to be formed. In this study, the production of jet grout columns, areas of use, jet grout types and jet grout and ground compatibility, literature research on the method as well as its applicability to our field, the cost of the production process and man x hour data and its applicability as a package were tried to be determined. In addition, in another project carried out to reveal the advantages of the jet grout method in terms of application, a comparison was made with the construction conditions of the bored pile method, which is a different ground improvement method, and the optimization of both ground improvement methods was tried to be revealed. Among the methods; It has been determined that 1 m bored pile production takes 30% more time than 1 m jetgrout production and costs 11.5 times more.

Keywords: Jet grout; Bored Pile; Soil Improvement; Optimization;

1. GİRİŞ

Artan nüfus ve yapılaşma gereksinimi nedeniyle zeminlerin sağlam ve yeter düzeydeki taşıma kapasitesinde, uygun mukavemet özelliklerde bir zemin bulabilmek, en önde gelen mühendislik sorunlarından biri durumundadır. Kentlerimizin artan nüfusa bağlı olarak yapılaşmanın nitelikli hale gelmesinde uygun özelliklerde zemin bulmak ya da uygun hale getirmek gerekmektedir. Yöntem; jet grout ekipmanı ile zemin içerisine su-çimento karışımı verilmesiyle oluşturulan harç zemin karışımı ile zeminin özelliklerinin iyileşmesidir. Bu yöntem ile zemin içerisinde kolonlar üretilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1: Jetgrout imalat görüntüsü

Zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan farklı yöntemlerde yapılan çalışmalarda; Kirsch ve Sonderman (2001) yapı temeli zemin iyileştirilmesinde kolon sıklığına bağlı olarak kazık ya da iyileştirilmiş zemin rol oynadığını belirtmiştir. Sağlamer vd., (2001) jet grout yöntemi ile zeminlerde oturmaların azaltılması ve sıvılaşma riskinin azaltılması olduğunu belirtmiştir. Gümüş (2002) jet grout yönteminin zemin iyileştirmelerinde son yıllarda en çok uygulanan yöntem olduğunu ve birçok geoteknik problemin de çözümünü gerçekleştirdiğini belirtmiştir. Burke (2004) jet grout sistemlerinin avantaj ve dezavantajlarını belirtmiştir. Sert vd. (2007) köprü ayağı oturmalarında 50 m aşağıdaki temel kayaya sadece çelik profil kazıklarla sıfırlanacağını, meydana gelecek uzun süreli oturmaların jet grout kolonlar ile kabul edilebilir düzeye çekilebileceğini belirtmişlerdir. Tschuchnigg ve Schweiger (2008), jet grout kolonların bilinen kazıklı radye temellere ekonomik anlamda alternatif olarak kullanılabileceğini belirtilmişlerdir. Algın (2013), geoteknik mühendisliğinde son derece karmaşık bir problem olan jet grout kolonları ile iyileştirilmiş zemin radye temel ile birlikte üç boyutlu sonlu elemanlar ile modellenmiş ve analizlerini yapmıştır. Kaymakçı (2014) kazıklı temellerin maliyetlerinin daha fazla olduğunu, ve jet grout ile kazıklı temelin

birlikte çalışma prensiplerini irdelemiştir. Zhao ve arkadaşları (2023), Jet grout kolonu çapının tahmini ve tasarımı için bir model önerilmiş, bu modelin kolon çaplarında % 95 güven aralığı olduğunu belirtmektedirler.

Jet grout yapımında kullanılan ekipmanlar, harcın su-çimento oranı, tij dönme ve çekme hızları, tijlere bağlı nozul sayıları ve basınç miktarı gibi birçok üretim parametreleri, yapılacak olan jet grout kolonunun yapısı, performansı ve uygunluğunu etkilemektedir. Bu çalışmada üretilen jet grout kolonunun, kullanım alanları, türleri ve zemin güçlendirme yöntemine yönelik literatür taramalarının yanında uygulanabilirliği, üretim aşamalarındaki maliyet ve adam x saat bulguları değerlendirilmiştir. Bununla birlikte bu çalışmada jet grout üretiminin uygulama bazındaki avantajlarının gösterilebilmesi için yapılmış olan farklı bir projeden bir başka zemin iyileştirme yöntemi olan fore kazık yöntemi ile karşılaştırılması ve deneştirilmesi yapılmıştır. Bu makalede yapılan karşılaştırmalar 3 aşamada değerlendirilmiştir;

1. Afyonkarahisar ilindeki bir konut projesinin zemin iyileştirilmesi ile üretimden önce ve sonraki zemine ait değerlerinin karşılaştırılması ve maliyet analizlerinin yapılması.
2. İstanbul İli, Beşiktaş ilçesinde yapılan zemin iyileştirilmesi ile üretimden önce ve sonraki zemine ait verilerin deneştirilmesi ve maliyet analizlerinin yapılması.
3. Afyonkarahisar da yapılan toplu konut projesi jet grout imalatı ve İstanbul ilinde yapılan metro istasyonu fore kazık imalatının uygulama, zaman, maliyet, avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması.

2. JET GROUT YÖNTEMİ

2.1 Jet Grout Yönteminin Tanımlanması

Üretimin yapılacağı zemine ait özelliklerin yetersiz olması bu durumda yapılacak yapılaşmayı sorunlu hale getirmekte ve/veya yapılacak yapının elemanlarının hizmet süresini azaltacaktır. Zemine ait değerlerin; taşıma gücü, zeminin oturma miktarı, sıvılaşma riski, geçirimsizlik kapasitesi vb. özellikler açısından değerlendirilir. Yapıya ait çalışmalar zemin değerlerinin güçlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Zemin güçlendirmenin amacı zeminin fiziksel ve mekanik değerlerinin iyileştirilmesini hedeflemektedir. Zeminin güçlendirilmesi; zeminin dayanımının, taşıma gücünün ve elastisite modülünün yükseltilmesi ile zeminin geçirgenlik düzeyinin azaltılması gibi özelliklerin iyileştirilmesini hedefler. Planlanan çalışmaya göre öncesinden tespit edilen, uygun zemin değerlerinin adına arazi koşullarına uyan bir metot seçilerek zemin güçlendirilmesine gidilir. Bu metodun uygulanabilirliği, zaman, maliyet, risk gibi birçok etkende zemin güçlendirme öncesinde proje üzerinde değerlendirilebilmektedir. Uygun ve en iyi

verim hedeflenen bir metot seçilerek zemin iyileştirme yöntemine geçilir. Uygulanan bu yöntemin neticesinde şu aşağıdaki maddelerde beklentiler gerçekleşir;

- Zemine ait taşıma gücünün yükseltilmesi
- Zemine ait geçirgenlik düzeyinin düşürülmesi
- Zeminin sıvılaşma dayanımının yükseltilmesi
- Zemine ait oturma miktarının düşürülmesi

Jet grout yöntemi ile zeminin güçlendirme yapılmasının başlıca kullanım alanları; Zeminde temel altı kullanılan bu yöntem yukarıdan gelecek düşey yüklere karşı taşıma gücünü yükseltmek ve deplasmanların (yer değiştirme) denetlenmesini sağlamaktır. Kolonların demirli olarak üretilmesi ile yeraltı suyu içerisinde yapımı gerçekleşecek yapıların temelinde oluşacak ters yönlü kaldırma kuvvetinin önüne geçilmesi. Kazıların olduğu kesimde, yanaldaki zemin yüklerine karşı güvenlik sağlamak amacı ile. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu bölgelerde kazı esnasında zemin geçirimsizlik oranını azaltarak zeminde bulunan taşıyıcı elemanlar arasında önleyici kapama elemanı olarak. Yeraltındaki yapılaşmalarda (tüneller, galeriler vb.), kazı üzerindeki zeminin güçlendirilmesine yönelik. İnce kumlu ve sıvılaşmaya yönelik zeminlerde, riskin azaltılması ve zeminde oluşacak olan kayma gerilmelerinin yükseltilmesi için. Deprem esnasında zayıf zeminlerdeki yer değiştirmelerin (deplasmanların) kısıtlanması için.

Jet grout yöntemi ile zemin iyileştirmesinde özen gösterilmesi gereken birtakım konular bulunmaktadır. Jet grout enjeksiyonu esnasında zeminden öğütülen danelerin bentonit şerbeti ile karıştırarak, kesici ucun bulunduğu kısımdan yukarıya doğru çıkabilmesi için kesici uç gövdeden daha geniş olmasıdır. Kesilen zemin daneleri ile karışan şerbetten oluşan malzemenin yüzeye yükselmesi sağlanarak yapılan zemin iyileştirme verimi artırılabilir. Basıncı yüksek olarak yapılan jet grout üretimi sırasında delme işlemi için kullanılan ekipmanın çevresinde belirli bir miktarda karışımın taşınması veya akması gerçekleşebilir. Enjeksiyonu yapılan zeminde basıncın aşırı olup olmadığını geri akış ile kontrol edilebilir. Aşırı basıncın olması, sistem içerisinde belirli bir kısmını ve ya tamamını ve bununla birlikte komşu yapıların stabilitesini de tehdit edebilir. Yüksek basınç zeminde deformasyonlara neden olabilir, bunun yanında jet kolonlarının da süreksizlik oluşmasına neden olur. İyileştirme sırasında olan geri akış miktarı zeminin türüne ve geçirebilme özelliğine bağlı olarak değişebilir. Geri akışın; ince daneli killi zeminlerde yüksek, iri daneli kumlu ve çakıllı zeminlerde ise düşük olması beklenmektedir. Proje çalışmalarında ortalama olarak zemine verilen şerbetin miktarının %10 u kadarlık bir kısmı geri akış olarak beklenebilir (Şekil 2).



Şekil 2: Jetgrout saha çalışması.

2.2 Jet Grout Sistemleri

• Tek Akışkanlı Sistem (Jet 1)

Zemin içerisine indirilen ekipmanın yardımı ile zemine su ve çimento karışım şerbeti belirli bir basınç altında enjekte edilebilir. Belirli bir basınç altında zemine verilen su-çimento karışımı, zeminin parçalanmasını ve şerbet ile (su-çimento) karışarak bütünleşmesini sağlamaktadır. Bu sistem tek bir sıvı olarak verildiğinden bu prosese tek akışkanlı sistem adı verilmektedir.

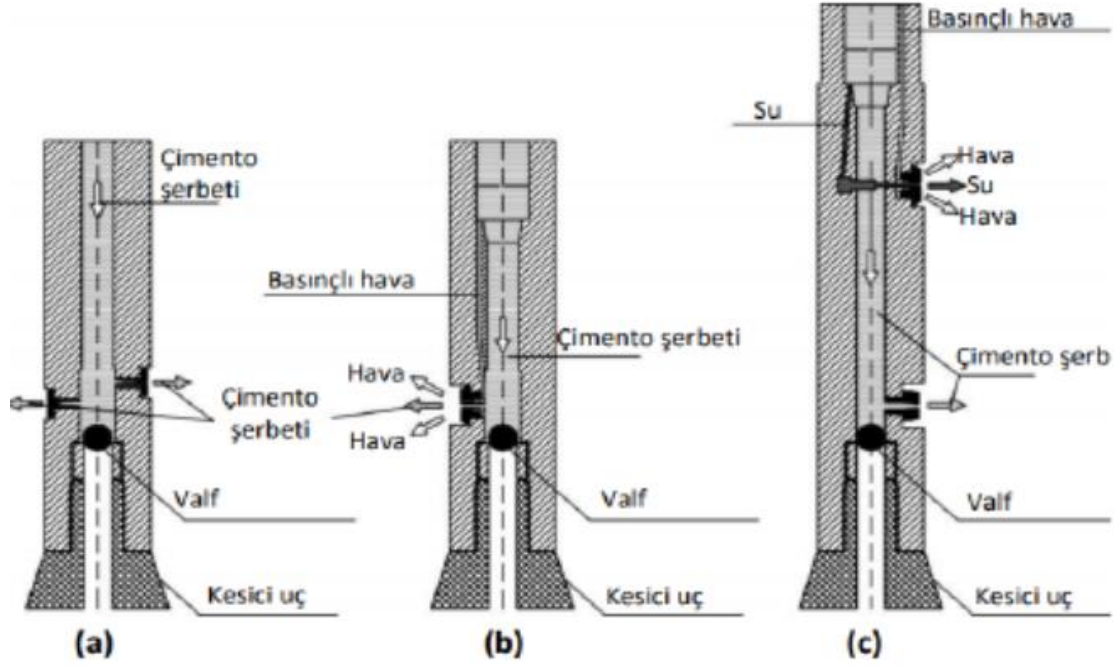
• Çift Akışkanlı Sistem (Jet 2)

Çift akışkanlı sistem; üretim aşamasında iki akışkan verilmesinden kaynaklanmaktadır. Tek akışkanlı sistemde zemine yüksek basınç ile verilen su-çimento karışımının zemini parçalayarak ve çimento ile karışarak bir bütün olmasını sağlamaktadır. Çift akışkanlı sistemde şerbet enjeksiyonu yapılırken ayrıca basınçlı hava jeti de verilmektedir. Bu metot da enerji kayıplarını minimize etmek ve sistemin verimliliğinin yükseltilmesi hedeflenmiştir.

• Üç Akışkanlı Sistem (Jet 3)

Bu sistemde ise ekipmanlar ile zemine yüksek basınçta verilen karışım, zeminin parçalaması ve şerbet ile bütünleşerek süreç tamamlanmaktadır. Tijlerin üst kısmına doğru bulunan nozuller yardımı ile uygulanan yüksek basınçta su jeti ile zeminin parçalanması gerçekleştirilirken, tijlerin alt kısmında bulunan diğer bir bölümde nozuller ile çimento şerbeti zemin içerisine verilmektedir. Bununla birlikte tijlerin yukarı kısmından verilen basınçlı su jeti enerji kaybını düşürerek, çift akışkanlı sistemdeki gibi hava ile beraber

verilmektedir. Alt kısımdan uygulanan şerbet ise sadece zemin ile karışımı hedeflediğinden üsttekilere nazaran düşük basınçta verilmektedir (Şekil 3).

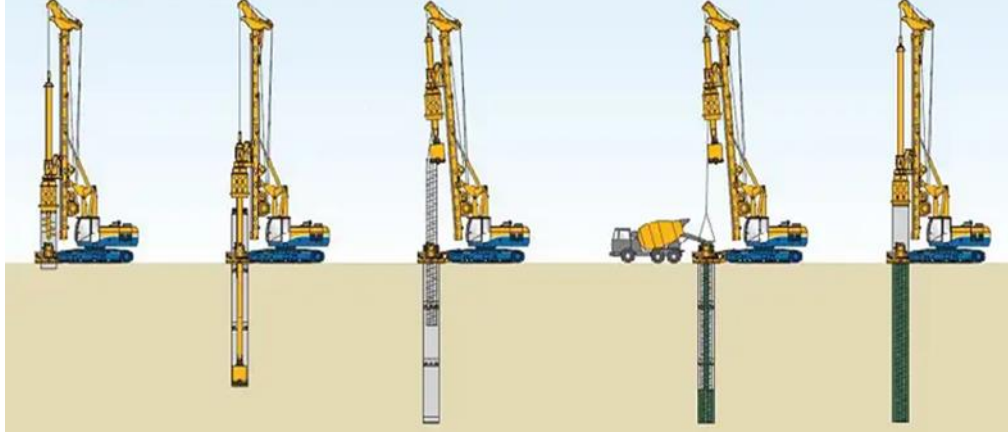


Şekil 3: (a) jet 1, (b) jet 2, (c) jet 3.

3. FORE KAZIK YÖNTEMİ

Fore kazıklar, değişik yöntemlerle zemin içerisinde oluşturulan betondan (donatılı veya donatısız) oluşturulan silindirik yapılardır. Yapıdan gelecek yükleri zemine ileten yapısal elemanlardır. Bir dizi halinde veya sekant konfigürasyonda yapıldıklarında, yükü sağlam zemine aktarmanın yanında ulaşılan yeraltı suyu için bir önleme duvarı oluşturabilirler. Kazıkların uzunluğu, çapı, yapımdaki kullanılan malzemesi, geometrisi ve yerleşimi, ne amaçla yapıldığına bağlı olarak değişebilir. Fore kazık üst yapıdan gelen ağır dikey yüklere karşı destekleyen, bir tür betonarmeden oluşan temel yapısıdır. Fore kazık, yerinde uygulanan bir temel yapısıdır. Bu fore kazıklar, prekast beton kazık ve kullanan eğrilmiş kazık ve bir de betonarme kare kazıklı temellerden farklıdır. Fore kazık eğer çakma şeklinde yapılmış ise bunlar köprü temellerinde, yüksek bina temellerinde ve büyük endüstriyel yapı temellerinde kullanılırlar. Fore Kazık işlemi oldukça derinlere kadar inebilen (60 m ye kadar yapılan vardır) ve 2,4 m. çapa kadar ulaşan kazıklar üretilebilmektedirler (Şekil 4). Zeminde kazık için delme işlemi çelik silindir ile gerçekleşir, zeminde silindirik boşluk açıldıktan

sonra, hazırlanmış silindirik donatı açılan deliğe indirilir, ardından delik hazır beton basılarak doldurulur (Şekil 5). Yığının tepesi, yukarıdaki yapıyı tutan yüzeye yakın bir temel veya payandayla kapatılabilir. Ayrıca yanal toprak basınçlarının tutulması ve yeraltı suyu perdeleme yapıları olarak da yapılabilmektedir.



Şekil 4: Fore kazık yapım aşamaları.



Şekil 5: Fore kazık yapım işleminin zemin içerisindeki yapım işleminin tamamlanmış hali.

4. PROJE ÖRNEKLERİ

Bu çalışmamızda Afyonkarahisar İli, Merkez İlçesi, Çetinkaya Mahallesiindeki 160 konutluk altyapı ve çevre düzenlemesi işinde blokların altındaki zemin iyileştirme projeleri, zemin elde edilen saha ve laboratuvar değerlerinin, jet grout uygulaması ile zemine ait değerler irdelenmiştir. Jet grout projesi ile birlikte; uygulanabilirlik, zaman, maliyet, avantaj ve dezavantajların değerlendirildiği ve

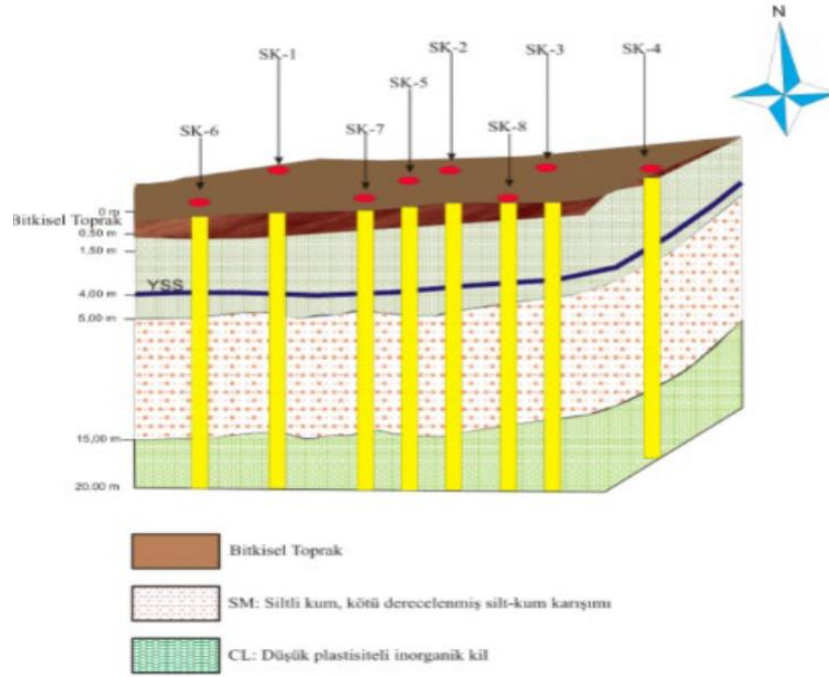
karşılaştırılabilmesi açısından yapılan bir diğer çalışma fore kazık imalatı ile kıyaslanmıştır. Fore kazık çalışması olarak da İstanbul İli, Beşiktaş İlçesinde bulunan ve Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro projesi kapsamında yapılan Beşiktaş Metro İstasyonu zemin iyileştirme projelerinden faydalanılmıştır. Değerlendirilen her iki projede de akredite olmuş firmaların çalışmaları ve arazi, laboratuvar çalışmaları bu çalışmamızda kullanılmıştır. Elde edilen bu bilimsel veriler bu çalışmamızda değerlendirilerek, kıyaslanması ve optimizasyonu yapılmıştır.

4.1. Afyonkarahisar İli Toplu Konut Zemin İyileştirmesinde Jet Grout Yöntemi

"Afyonkarahisar İli, Merkez Çetinkaya Mahallesi, 160 Konut ile Altyapı ve Çevre Düzenlemesi İnşaatı İşi" kapsamında 83 pafta 24 parselde kayıtlı, 30.000,000 m² büyüklüğünde alana projelendirilen toplu konut projesidir (Ataş, 2021).

Çoklu konut projesinin olduğu bu alanda bu projeden önce yapılmış bir başka zemin çalışması bulunmamaktadır. Yapılacak olan bu proje alanının bulunduğu Akarçay havzasında olması nedeni ile yeraltı su seviyesinin doğurduğu risklerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. DSİ Bölge Müdürlüğünden alınan görüş; 15/06/1951 tarihli Bakanlar Kurulu kararınca "*Akarçay'ın taşkın sahası içerisinde kalan kısmında her türlü yapılaşma yasaklanmıştır*" ifadesi bulunmaktadır. Bunun yanında çoklu konut yapısının konuşlandırılacağı bu sahanın eğim yapısı daha düşük kotlarda bulunması nedeni ile yeraltı su seviyesinin yükseldiği kış ve bahar mevsimlerinde yüzeye 0 ila 1 metreye kadar yaklaşan yeraltı suyuna maruz kaldığı belirlenmiştir. Gerekli drenaj ve izolasyon çalışmalarının yapılması ve zemindeki yeraltı su seviyesinin yükselmesini önleyecek zorunlulukların alınması koşuluyla bölgede konutlaşmaya izin verilmiştir.

İnceleme alanı ile ilgili yapılan zemin inceleme aşamasında 8 tane 20 m derinlikte, toplamda 160 m zemin sondajı açılmış ve jeolojik blok diyagram oluşturulmuştur (Şekil 6). İnceleme kuyularında her 1,5 m de bir SPT (Standart Penetrasyon Testi) yapılarak alınan zemin numuneleri TS 1901'e uygun olarak laboratuvar da analize tabi tutulmuşlardır. Kuyularda tespit edilen yeraltı su seviyelerinin 3,90 - 4,20 m arasında olduğu belirlenmiştir. Sondajlı çalışmalarda mevcut kuyulardan 24 tane SPT, 16 tane UD numunesi laboratuvarda incelenmiş ve zemin numuneleri üzerinde; serbest basma mukavemeti, doğal su muhtevası, doğal birim hacim ağırlık, konsolidasyon, dane boylanma analizi, atterberg limitleri, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı analizleri tamamlanmıştır (Çizelge 1). Zemin iyileştirme proje çalışmalarında ve yapılan zemin deneyleri verilerine göre; alanda jet grout yöntemi ile zemin iyileştirilmesi yapılmasının daha optimum olduğu kararı verilmiştir.



Şekil 6: İnceleme alanı jeolojik blok diyagramı.

Çizelge 1: SPT ile zeminden alınan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları (Ataş, 2021).

Açıklamalar	Tabaka Kotları (m)	Tabaka Kalınlığı (m)	B. Hacim Ağırlığı (kN/m ²)	Drenajsız Kohezyon (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ϕ
Nebati Toprak	0,00-0,50	0,50	-	-	-
Çakıllı kumlu siltli kil	0,50-5,50	5,00	17,0	35	0
Çakıllı killi siltli kum	5,50-14,50	9,00	17,0	0	22
Çakıllı kumlu siltli kil	14,50-20,00	5,50	17,0	35	0

Zemin inceleme çalışmalarına göre inceleme alanındaki mevcut zemine ait taşıma kapasitesi yaklaşık 0,50 kgf/cm² civarında olduğu saptanmıştır. Zeminin toplam oturma miktarı ise 7,56 m olduğu belirlenmiştir. Üst yapının statik projeleri ve hesaplamaları sonucu, temel maksimum gerilme miktarının 1,42 kgf/cm² olduğu saptanmıştır. Proje hesaplamalarında idealize edilmiş zemin modeli ve parametrelerinin üzerinden taşıma kapasitesi sorununun yanında, sıvılaşma ile ilgili analizler de yapılmıştır. Yapılan analizler ve hesaplamalar sonucu değerlendirildiğinde zeminin bir sıvılaşma riski ile karşı karşıya olduğu belirlenmiştir. Bu tespitler sonrası yapılan değerlendirmelerde gerek taşıma kapasitesi sorunu ve gerekse sıvılaşma sorununa karşılık;

önlem paketi olarak 2,60 m aralıklı 14 m derinliğine ve 80 cm çapa sahip jet grout kolonlarının üretilmesinin uygun olduğu kararı verilmiştir (Ataş, 2021).

Arazide yapılan çalışmalar esnasında sondaj kuyularında SPT deneyleri ile numune alınmıştır. Yapılan SPT- N_{min} değerleri N_{60}^1 olarak aşağıda verilen formüller (1, 2, 3 nolu) ile düzeltilerek Çizelge 1 de verilmiştir.

$$N_{düz} = 15 + \frac{(N-15)}{2} \quad (1)$$

$$N_{60} = \frac{N_{düz} \times E_M \times C_B \times C_S \times C_R}{60} \quad (2)$$

$$N'_{60} = N_{60} \sqrt{\frac{100}{\sigma'_z}} \quad (3)$$

- $N_{düz}$ = Boşluk suyu basıncı düzeltmesi yapılmış SPT sayısı
- N_{60} = Arazi prosedürlerine göre düzeltilmiş SPT N değeri
- E_M = Şahmerdan etkinlik oranı
- C_B = Kuyu çapı düzeltmesi
- C_S = Örnek alıcı düzeltmesi
- C_R = Tij uzunluğu düzeltmesi
- N'_{60} = Düzeltilmiş SPT-N değeri

Çizelge 2: İnceleme alanından alınan Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Elek Analizi verileri (Ataş, 2021).

Derinlik (m)	Arazide Ölçülen SPT- N_{min} Değeri	Düzeltilmiş SPT-N Değeri N'_{60}	200 Nolu Elekten Geçen Malzeme -%
1,50	7,0	5,3	73,5
3,00	8,0	6,0	67,7
4,50	13,0	11,1	61,6
6,00	10,0	9,5	73,8
7,50	9,0	8,0	18,8
9,00	8,0	6,7	-
10,50	10,0	8,3	-
12,00	5,0	4,0	-
13,50	8,0	6,0	19,3
15,00	13,0	9,4	70,1
16,50	10,0	7,0	73,5
18,00	12,00	8,1	67,7
19,50	15,00	9,8	61,6

Elde edilen sonuçlar sonrası, Skempton (1986) kuralına göre şahmerdanın etkime oranının % 60 olarak uygulanmasının daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen düzeltmelerin yanında sondaj kuyu çapı,

numune alıcı ve tijlere ilişkin verilerdeki düzeltmeler de yapılmıştır. Bu düzeltme çalışmaları akabinde zemine ait düzeltilmiş SPT-N değerleri aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir (Çizelge 2).

Projelendirilmesi yapılan jet grout kolonlarının imalat işlemlerine geçilmiş ve zamana bağlı olarak optimizasyon hesapları yapılmıştır. Optimizasyon hesaplarının yapılabilmesi adına öncelikle projede verilen 80 cm çapında ve jet 1 yöntemi ile üretilen 1 m jet kolonun birim uzunluk için adam x saat hesapları ortaya konulmuştur (Çizelge 3). Adam x saat hesaplamalarının yapılabilmesi adına gerekli verilerin tamamı Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının 2024 Yılı Birim Fiyat ve Analizlerinden alınmıştır.

Çizelge 3: 80 cm çapında ve Jet 1 yöntemi ile üretilen jet kolonunun Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İnşaat ve Tesisat 2024 Birim Fiyatlarına göre hesaplanmış 1 metrelik imalatın adam/saat hesabı.

Poz No	Poz Tanımı	Birim	Miktar	Toplam Adam x Saat Miktarı
15.135.1002	Her uzunluk her aç ve her türlü zeminde Ø 80 cm jet kolonu üretiminin yapılması, delgi dahil (jet 1 yöntemi ile)			5,635
	Monitoring sistemli; yüksek basınç pompası, su pompası, kompresör, karıştırıcı ünitesi, silo, su tankı ve benzerinden oluşan ekipman ile delgi makinesi ve sarf malzemeleri karşılığı			
19.100.1107	Jet grout ekipmanları ve delgi makinesi	saat	4,885	
19.100.1060	Formen	saat	0,250	
19.100.1062	İşçi (inşaat işçisi)	saat	0,500	

- Proje zemin iyileştirme işleri kapsamında 14 m derinliğinde ve 0,80 m çapında, toplamda 154 adet jet kolonu bulunmaktadır. Bu jet kolon üretimine ait; toplam adam x saat hesaplaması; (5,635 adam x saat/m tül) x (2156 m tül) = 12.149,06 adam x saat olarak belirlenmiştir.
- Her iki zemin iyileştirme çalışması hesabı yapılırken fore kazık ve jetgrout ekipmanlarından delgi makinesinden kaynaklı makine x saat hesabı ayrı olarak gösterilmemiştir. Bunun nedeni ise Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca her iki ekipmanın makine x saat değerlerinin esaslarca eşit olarak verilmesidir.

Bir sonraki adımda farklı jet grout tekniklerine göre adam x saat hesaplarının kıyaslanabilmesi adına 80 cm çapında ve jet 2 yöntemi ile üretilen 1 m jet kolonun birim uzunluk için adam x saat hesapları ortaya konulmuştur (Çizelge 4).

- Proje zemin iyileştirme işleri kapsamında 14,00 m uzunluğunda ve 80 cm çapında toplam da 154 adet jet grout kolonu bulunmaktadır. Bu jet grout kolon üretimine ait; toplam adam x saat hesaplaması (6,920 adam x saat/m tül) x (2156 m tül) = 14.919,52 adam x saat olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4: 80 cm çapında ve Jet 2 yöntemi ile üretilen jet kolonunun, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İnşaat ve Tesisat 2024 Birim Fiyatlarına göre hesaplanmış 1 metrelik imalatın adam/saat hesabı.

Poz No	Poz Tanımı	Birim	Miktar	Toplam Adam x Saat Miktarı
15.135.1004	Her uzunluk her açı ve her türlü zeminde Ø 80 cm jet kolonu üretiminin yapılması delgi dahil (jet 2 yöntemi ile)			6,920
	Monitoring sistemli; yüksek basınç pompası, su pompası, kompresör, karıştırıcı ünitesi, silo, su tankı ve benzerinden oluşan ekipman ile delgi makinesi ve sarf malzemeleri karşılığı			
19.100.1107	Jet grout ekipmanları ve delgi makinesi	saat	4,885	
19.100.1025	Kompresör	saat	1,285	
19.100.1060	Formen	saat	0,250	
19.100.1062	Düz işçi (inşaat işçisi)	saat	0,500	

Jet grout kolon üretimine ait (80 cm çaplı ve Jet 1 yöntemi ile) 1 m maliyet hesaplaması aşağıda çizelgede verilmiştir (Çizelge 5).

Çizelge 5: 80 cm çapında ve Jet 1 yöntemi ile üretilen jet kolonunun, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İnşaat ve Tesisat 2024 Birim Fiyatlarına göre hesaplanmış, 1 metre imalatın maliyet hesabı.

Poz No	Poz Tanımı	Ölçü Birimi	Miktar	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
15.135.1002	Her uzunluk her açı ve her türlü zeminde Ø 80 cm jet kolonu üretiminin yapılması delgi dahil (jet 1 yöntemi ile)				830,053
	Monitoring sistemli; yüksek basınç pompası, su pompası, kompresör, karıştırıcı ünitesi, silo, su tankı ve benzerinden oluşan ekipman ile delgi makinesi ve sarf malzemeleri karşılığı				
19.100.1107	Jet grout ekipmanları ve delgi makinesi	saat	0,085	6.015,20	511,29
10.130.9991	Su	m ³	0,650	35,00	22,75
19.100.1060	Formen	saat	0,250	272,00	68,00
19.100.1062	İşçi (inşaat işçisi)	saat	0,500	124,00	62,00
	Malzeme + İşçilik Tutarı				664,04
	% 25 Yüklenici Karı ve Genel Giderler				166,01
	1 m Ø 80 cm Jet Grout Kolonu Üretimi Yapılması birim Maliyeti				830,05

- Proje zemin iyileştirme işleri kapsamında 14,00 m uzunluğunda ve 80 cm çapında toplam da 154 adet jet grout kolonu bulunmaktadır. Bu jet grout kolon üretimine ait; toplam maliyet hesaplaması $(830,05 \text{ TL/mtül}) \times (2156 \text{ m tül}) = 1.789.587,8 \text{ TL}$ olarak hesaplanmıştır.
- Yapılan maliyet hesaplamalarında birim fiyat tarifine uygun olarak yapılan yükleme-boşaltma, yatay-düşey taşıma, malzeme ve kaybı, işçilik, makine, ekipman giderleri ile yüklenicinin genel giderleri ve kâr hesaplama kapsamaya alınmıştır.
- İmalatlarda ve enjeksiyonda kullanılacak çimento ve katkıları birim fiyata dahil edilmemiştir. Dahil edilmek istenirse rayiç fiyatlar üzerine yine tabloda gösterildiği gibi %25 yüklenici karı eklenmesi gerekmektedir. Çimento ve katkı nakliye fiyatları için S.N.B.F. kodlu 2018 yılı nakliye fiyatları alınarak 2024 yılına uygun yine Ç.Ş.ve İ. D. B. tarafından verilen katsayılar ile çarpılarak bulunacaktır.

Jet grout kolon üretimine ait (80 cm çaplı ve Jet 2 yöntemi ile) 1 m maliyet hesaplaması aşağıda çizelgede verilmiştir (Çizelge 6).

Çizelge 6: 80 cm Çapında ve Jet 2 yöntemi ile üretilen jet kolonunun, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İnşaat ve Tesisat 2024 Birim Fiyatlarına göre hesaplanmış, 1 metre imalatın maliyet hesabı.

Poz No	Poz Tanımı	Ölçü Birim	Miktar	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
15.135.1002	Her uzunluk her açı ve her türlü zeminde \emptyset 80 cm jet kolonu üretiminin yapılması delgi dahil (jet 1 yöntemi ile)				959,792
	Monitoring sistemli; yüksek basınç pompası, su pompası, kompresör, karıştırıcı ünitesi, silo, su tankı ve benzerinden oluşan ekipman ile delgi makinesi ve sarf malzemeleri karşılığı				
19.100.1107	Jet grout ekipmanları ve delgi makinesi	saat	0,085	6.015,20	511,29
19.100.1025	Kompresör 250 HP	saat	0,085	1.221,08	103,79
10.130.9991	Su	m ³	0,650	35,00	22,75
19.100.1060	Formen	saat	0,250	272,00	68,00
19.100.1062	İşçi (inşaat işçisi)	saat	0,500	124,00	62,00
	Malzeme + İşçilik Tutarı				767,83
	% 25 Yüklenici Karı ve Genel Giderler				191,96
	1 m \emptyset 80 cm Jet Grout Kolonu İmalatı Yapılması Birim Maliyeti				959,79

- Proje zemin iyileştirme işleri kapsamında 14,00 m uzunluğunda ve 80 cm çapında toplam da 154 adet jet grout kolonu bulunmaktadır. Bu jet grout kolon üretimine ait; toplam maliyet hesaplaması (959,79 TL/m tül) x (2156 m tül) = 2.069.307,24 TL olarak hesaplanmıştır (Çizelge 6).

4.2 Beşiktaş Metro İstasyonu Fore Kazık ile Zemin İyileştirme Yöntemi

Çalışmamızın bu bölümünde anlatılacak proje Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Projesi "Mecidiyeköy-Kabataş arası ve Depo Sahası İnşaat İşleri ve İnce İşleri, Elektromekanik Sistemleri Temini, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri" olarak belirlenmiştir. Çalışılan projede, fore kazık üretiminin uygulandığı proje bölümü ise "Beşiktaş İstasyonu'nun oluşturulması için yapılan kazıya dair zemin mekaniği ve temel mühendisliği açısından inceleme yapılması, kazı esnasında karşılaşılan jeolojik birimlerin; dayanım ve deformasyon özelliklerine göre kazı ve destek sistemlerinin tespitinin yapılması, aç-kapa sistemi ile yapılacak olan inşanın üretimi süresince, yeterli hassasiyeti sağlayacak şekilde tasarlanması" işidir. Artson Geoteknik Mühendislik Müşavirlik firması tarafından (2016a, 2016b) yapılan sahada yerinde ve laboratuvar koşullarındaki deneyler sonrası elde edilen proje hesaplarında kullanılmıştır. İnceleme alanındaki çalışmalarda 3 adet temel araştırma sondajı yapılmış ve SPT (standart penetrasyon testi), PMT (presiyometre testi) ve BST (basıncılı su testi/packer testi) testleri ile elde edilen zemin verileri oluşturulmuştur (Ataş, 2021).

İstasyondaki üretimlerin yapılacağı sahada; incelemeler ve sondajların verilerinde, yüzeyde yer alan dolgu (yol, kaldırım vb. yapay kaplamalar) altındaki farklı kalınlıklardaki alüvyal çökeller ile bu çökellerin altında kumtaşı, silttaşı aralanmasından oluşan Trakya formasyonunun varlığı belirlenmiştir. Bu devamında yapılan sondaj verilerine göre yüzeye yakın olan bölgelerde bulunan kaya ve kayalaşmaya yakın birimlerinin tamamen ayrılmış deforme olmuş halde oldukları tespit edilmiştir. İstasyon yapılan alan Beşiktaş ilçesi sınırları içerisinde bulunan, yoğun yapılaşmanın olduğu ve tamamen şehirleşmiş bir kesimde olduğundan zeminin herhangi bir yüzeyine ait bir gözlem yapılamamıştır. Aç-kapa yöntemi ile inşa edilecek istasyon kısmının kazı alanında kumtaşı, ince kumtaşı ve ara seviyeli silttaşlarının varlığı, peron bölgesinin içinde yer alacağı, ayrıca tünel yapılarının olduğu bölgede ise az ayrılmış ve ayrılmamış kaya birimlerinin bulunduğu bilgisi elde edilmiştir (Çizelge 7). Kaya birimlerinin bulunduğu sondaj bölgelerinde hem ayrışma oranı hem de kaya kalitesinin tespit edilebilmesi için TCR (Toplam Karot Oranı), SCR (Sağlam Karot Oranı), RQD (Kaya Kalitesi Değeri) sayıları değerlendirilmiştir. Sondaj loglarında yeraltı suyuna 3,46 m-4,45 m derinliklerde rastlanmıştır. Analizlerde ise yeraltı su seviyesi 4,00 m kotunda olarak varsayılmıştır.

Çizelge 7: Beşiktaş Metro İstasyonu Zemin Parametreleri (Ataş, 2021).

Tabaka kalınlığı kotları ve Jeolojik birim	γ (kN/m ³)	Etkatif Parametreler		Elastisite Modülü (kPa)	Poisson Oranı
		C' (kPa)	Φ'		
+8.25 m/+2.25 m Dolgu	17,0	2	28	10.000	0.40
+2.25 m/-6.45 m	18,0	5	28	15.000	0.40
Aluvyal Haliç Çökelleri					
-6.45 m/-13.35 m	22,0	10	34	35.000	0,35
Ayrışma Zonu-W5					
-13,35 m/...	25,0	60	26	200.000	0,30
Kaya, Çamurtaşı/Silttaşı					

Projelendirme yapılırken yukarıdaki şekilde gösterilen zemin verilerine ek olarak her kesitin hemen yanında $q=50$ kPa sürşarj yükü kabul edilmiştir. Bunun yanında tüm kesitlerde komşu olan yapılar için sürşarj yükü de dikkate alınmıştır. Standart sürşarj yüküne ek olarak komşu yapı tüm kesitlerinde $q=60$ kPa olarak alınmıştır. Laboratuvar sonuçları ve yapılan incelemeler neticesinde elde edilen zemin değerleri ve gerekli mekanik özellikler kadar, zaman, maliyet, uygulanabilirlik gibi niteliklerde seçilen zemin iyileştirmesinde büyük rol oynamaktadır. K.M.M. Metro Projesi Beşiktaş İstasyonu için belirlenen zemin iyileştirme modeli;

- Ø 100/80 cm Kesişen Fore Kazık + İçten Destek (Strut Kirişleri)
- Ø 100/100 cm Teğet Kazık + İçten Destek (Strut Kirişleri)

olarak oluşturulmuştur.

Sahada üretimi yapılmış olan projeye ait veriler ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının hazırlanmış olduğu ve İnşaat Mühendisleri Odası (İMO) tarafından web sayfasında (<https://www.imo.org.tr/TR,66886/mesleki-teknik-bilgiler-imo-web-sayfasinda.html>) yayınlanmış adam x saat çizelgeleri kullanılarak yapılan hesaplamalar aşağıda çizelgede verilmiştir (Çizelge 8).

- Projede bulunan toplam kazık (başlık ve kuşak kirişleri dahil) üretiminin yapılması için gerekli olan zaman; 51.079,83 adam x saat olarak hesaplanmıştır.

• Elimizdeki toplam adam x saat miktarını, projede üretimini gerçekleştirilmiş olduğumuz toplam fore kazık miktarına böldüğümüzde; 9,79 adam x saat gibi bir değere ulaşılmaktadır. Bu değer 1 metre/tül fore kazık üretimi yapılabilmesi için sarf edilecek süreye karşılık gelmektedir. Yapılan çizelgede ve açıklamalarında Beşiktaş İstasyonu fore kazık sistemi üretimine ilişkin değerlendirilerek elde edilmiş adam x saat verileri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bunun yanında sahada üretimi tamamlanmış bu projenin gerçek verileri şu şekildedir; Günlük 3-4 adet kazık üretimi ile devam edilen proje 21 ayda tamamlanmıştır.

Çizelge 8: Fore Kazık (Ø 100 cm çaplı) imalatının Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İnşaat ve Tesisat 2024 Birim Fiyatlarına göre hesaplanmış 1 metre imalata göre adam x saat hesabı.

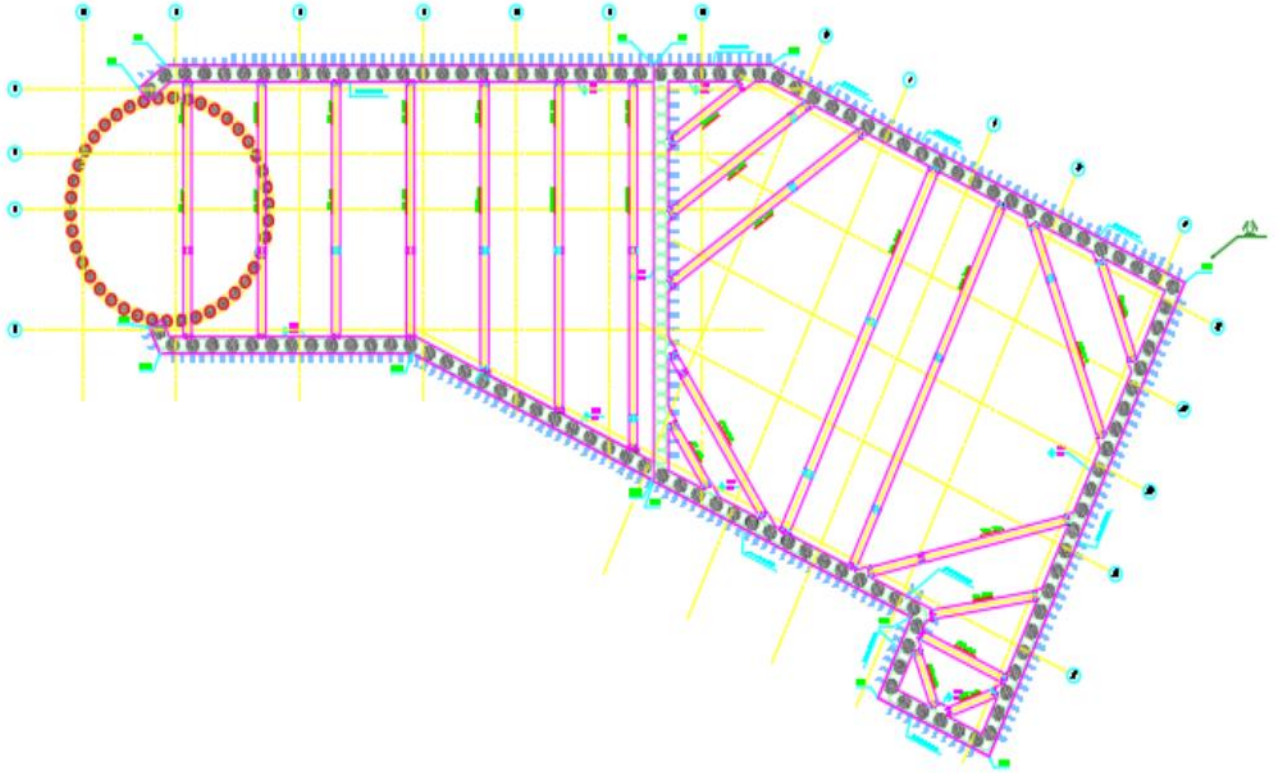
FORE KAZIK ÜRETİMİNİN YAPIMI						
Poz No	Poz Tanımı	Birimi	Miktar	Toplam İmalat	Toplam Adam x Saat	
151401007	Ø 100 cm çapında C 25/30 basınç dayanımında yerinde dökme betonarme fore kazık yapılması (0,00-18,00m arası, 18 m dahil, dış pasa nakli dahil)	m	6,50	5.216,80	33.909,20	
BAŞLIK KİRİŞİ ÜRETİMİ YAPIMI						
151801002	Ahşaptan düz yüzeyle beton ve betonarme kalıbı yapılması	m ²	2,055	840	2.940,00	
151501007	Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompası ile basılan C 35/45 basınç dayanım sınıfında, gri renkte, normal hazır beton dökülmesi (beton nakli dahil)	m ³	2,83	756,00	7.083,72	
151601006	Ø 14- Ø 28 nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi bükülmesi ve yerine konulması	ton	48,771	62,147	7.146,91	

• İksa üretiminin yapıldığı sahanın aynı zamanda İstanbul Arkeoloji Müzeler Müdürlüğü tarafından da kazı alanı ilan edilmiş olması, sahada aynı zamanda 10 kişilik arkeolog ekibi ile birlikte hem fore kazık kazılarını hem de arkeolojik kazıları hassasiyetle izlediği göz önünde bulundurulduğunda üretim süresinin uzunluğu kabullenilmiş olacaktır.

• Birçok farklı meslek gurubunun aynı anda çalışması gereken bir saha olması nedeni ile üretim çakışmaları oluşmuş ve bunlar da toplam süreyi uzatmıştır.

• Üretimin yapılmadığı, farklı farklı meslek grupları ile üretimin durduğu, dini ve milli bayramlar ile pazar vardiya tatilleri (5 ay) toplam gün sayısından (21 ay) çıkarıldığında yapılan üretimin gerçekte yukarıdaki çizelgede detaylıca verilen idealize adam x saat verilerinden yola çıkılarak hesap edilen süre (17,5 ay) ile örtüştüğü kabul edilmektedir.

Beşiktaş Metro İstasyonu'nun yapım öncesindeki kazı çalışmaları öncesinde alana ait sondajlar açılarak ve zemin incelemeleri yapılmış ve fore kazıkların plan görünüşü projelendirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7: Beşiktaş İstasyonu Fore Kazık Projesi Plan görünüşü (Ataş, 2021).

- Başlık kirişi üretimine ilişkin yapılan hesaplamalar ve maliyet analizleri projelerde bulunan toplam başlık kirişi imalatı (kalıp, beton demir) poz bazında hesaplanmış ve proje toplamında bulunan kazık boyuna bölünerek 1 metre/tül kazık üretimi için yapılan başlık kirişi üretimi bulunmuş ve bunun üzerinden maliyet hesabı yapılmıştır (Çizelge 9).

Çizelge 9: Fore kazık imalat büyüklükleri (Ataş, 2021)

Beşiktaş İstasyonu Fore Kazık İmalatı 5.216,80 metretül fore kazık

Toplam Foraj	Toplam Donatı İmalatı	Toplam Beton İmalatı
4097,27 m ³	579,958 ton	4097,27 m ³

- Yapılan bu değerlendirme proje toplamında yapılmış olan kazık üretim maliyetine eklenmiştir. Başlık kirişine ait alt pozlar fiyatlandırıldıktan sonra ana poz kaleminin birim fiyatına % 25 kar payı olarak eklenmiştir (Çizelge 10).
- Nakliye pozları hesaplamalara dahil edilmemiştir.

Çizelge 10: Fore Kazık (Ø 100 cm çaplı) imalatının Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İnşaat ve Tesisat 2024 Birim Fiyatlarına göre hesaplanmış 1 metre imalatın maliyet hesabı.

Ø 100 CM BETONARME KAZIK İMALATI YAPILMASI BİRİM MALİYETİ							
Poz No	Poz Tanımı	Ölçü Birim	Miktar	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)	Birim Miktar	Birim Tutar(TL/MT ÜL)
15.140.1007	Ø 100 cm çapında C 20/25 basınç dayanımında yerinde dökme betonarme fore kazık yapılması (0.00-18.00 m arası, 18.00 m dahil)				3.621,92	1.0	3.621,92
	Foraj					0	
19.100.1058	Fore kazık delgi makinesi (440 HP) Foraj işçiliği, montaj ve demontaj, paşanın yükleme, boşaltma ve taşınması karşılığı	saat	0,300	5.454,12	1.636,24		
10.100.1063	Erbab İşçi	saat	0,300	150,00	45,00		
19.100.1027	Kazı Yükleyici	saat	0,120	1.005,14	120,62		
	Betonlama						
15.150.1004	C 20/25 Hazır Beton	m ³	0,860	2.034,24	1.749,45		
19.100.1033	Beton Vibratör Minha	saat	-0,050	278,35	13,92		
19.100.1058	Fore Kazık delgi makinesi (440 HP)	saat	0,010	5.454,12	54,54		
10.100.1063	Erbab İşçi	saat	0,200	150,00	30,00		
15.160.1004	Ø 14- Ø 28 nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi bükülmesi ve yerine konulması				26.011,56	0,1	2.887,28
10.130.1705	Beton Çelik Çubuğu Nervürü	kg	1070	18,70	20.009,00		
19.100.1111	Demir Kesme ve Bükme Makinesi	saat	2,000	37,28	74,56		
19.100.1019	Soğuk Demirci Ustası	saat	8,000	190,00	1.520,00		
19.100.1047	Soğuk Demirci Usta Yardımcısı	saat	12,000	140,00	1.680,00		
19.100.1062	Düz İşçi	Saat	12,000	124,00	1.488,00		
19.100.1062	Düz İşçi	Saat	10,000	124,00	1.240,00		
	Başlık Kirişi İmalatı						
15.180.1002	Ahşaptan düz yüzeyli beton ve betonarme kalıbı yapılması				419,53	0,0	33,98
						81	
15.150.1007	Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompası ile basılan C 35/45 basınç dayanım sınıfında, gri renkte, normal hazır				2.274,24	0,0	109,16
						48	

	beton dökülmesi (beton nakli dahil)			
15.160.1004	Ø 14- Ø 28 nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi bükülmesi ve yerine konulması	26.011,56	0,0	936,42
			36	
	Malzeme + İşçilik Tutarı	7.588,77		
	% 25 Yüklenici Karı ve Genel Giderler	191,96		
	1 m Ø 100 cm Genişliğinde Betonarme Kazık İmalatı Yapılması Birim Maliyeti	9.485,96		

- Başlık kirişi üretimi ile alakalı hesaplamalar ve maliyet analizleri yapılırken projelerde bulunan toplam başlık kirişi üretimi (kalıp, beton demir) pozlara göre hesaplanmış ve proje toplamında bulunan kazık boyuna bölünerek 1 metre/tül kazık üretimi için yapılan başlık kirişi üretimi bulunmuş ve bunun üzerinden mali olarak boyutlandırılmıştır.
- Yapılan bu çalışma proje toplamında yapılmış olan kazık üretimi maliyetine eklenmiştir. Başlık kirişine ait alt pozlar mali olarak boyutlandırıldıktan sonra ana poz kaleminin birim fiyatına %25 kar payı eklenmiştir.

5.SONUÇLAR

Afyonkarahisar da yapılan toplu konut projelendirilmesine ait jetgrout zemin iyileştirme çalışmalarının incelenmesi ve değerlendirilmesi, üretim yapılacak sahada bulunan zeminin arazi ve laboratuvar değerlerini incelenmesi ve bu üretimin zaman ve maliyet açısından irdelenerek açıklanması yapılmıştır. Bunun yanında İstanbul ili Beşiktaş İlçesi'nde yapılan Beşiktaş Metro İstasyonuna ait fore kazık ile zemin iyileştirmesine ait bölümde, zemine ait verilerin irdelenmesi ve bu üretimin zaman ve maliyet açısından hesaplanarak açıklaması gerçekleştirilmiştir. Makale içerisinde bilgileri verilen bu iki proje uygunluk, uygulanabilirlik, zaman ve maliyet olarak karşılaştırılarak optimizasyonu yapılmıştır.

- Jet grout ile zemin güçlendirme yöntemi, fore kazık, diyafram duvar, derin karıştırma taş kolon gibi zemin güçlendirme uygulamalarına göre daha yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Jet grout ile istenen yapısal şekil ve açıda uygulanabilirken, diğer uygulamalar için aynı şeyleri söylemek mümkün değildir.
- Her zeminde rahatlıkla jet grout üretimi yapılabilmektedir. Taşıma gücü düşük her zeminde uygulanabilen ve zemin güçlendirilmesi sağlanması nedeni ile kullanılan bir yöntemdir.
- Jet grout yönteminde zemin içerisinde bulunan ekipman yüksek basınç altında zemine verilen su çimento şerbeti ile zeminin parçalanması ve çimento ile bütünleşmesi temeline dayalı olması nedeni ile zemin

içerisinde yapılacak kolonun çapı ve yerleşim özelliklerinin kontrol altında tutulması, pek kolay olmamaktadır.

- Jet grout genellikle demirsiz olarak üretilmesi nedeni ile fore kazık üretimine nazaran daha kolay ve uygulanabilirliği açısından üretim sahasında fazla yer işgal etmemektedir. İstenilen şekle sahip olarak üretilebilmesi özelliği ile yapım alanında fazla sahaya ihtiyaç olmaması gibi durumu bütününde düşündüğümüzde, şehirleşmenin yaygınlığı ve yapılaşmanın fazla olması yerleşime açık alanlarda uygulama açısından fazla miktarda avantajı olduğu belirtilebilir.

- Fore kazık ya da diyafram duvar üretimi ile karşılaştırıldığında üretim esnasında daha çok özene, ihtimama ihtiyaç vardır. Fore kazık üretiminde yapılacak üretimde kazığın boyu, çapı gibi ölçüler daha kolay belirlenebilirken, jet grout ile yapılan zemin güçlendirme yöntemi uygulamasında kolonun genişliği, derinliği, süreksizliği ve ürünün vereceği serbest basma dayanımı gibi nitelikleri birçok faktörden etkilenmektedir. Bunun gibi nedenlerden jet grout ile güçlendirme fore kazık ile güçlendirmeye göre daha fazla özen ve dikkat gerektiren bir metottür.

- Kumlu zeminlerdeki uygulamalarında, sıvılaşılabile potansiyeline karşı bir avantaj, bir olumluluk sağlamasından dolayı çoğunlukla jet grout uygulanmaktadır. Afyonkarahisar ilindeki yapılan toplu konut projesinde de bu zemin iyileştirme yönteminin sıvılaşıma potansiyeline karşı artıları olacaktır.

Bu çalışmada fore kazık ve jet grout kolon üretiminin 1 metresinin üretilmesi için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı pozlarına uygun olarak verilen adam x saat verileri çizelgeler olarak belirtilmiştir. Çizelgelerden elde edilen değerlere bakıldığında 1 metre jet grout üretiminin yapılabilmesi için gereken adam x saat değerinin 6,920 adam x saat olduğu saptanmıştır. Fore kazık üretiminin 1 metresinin üretilmesi için gerekli olan değer 9,79 adam x saat olduğu kanıtlanmıştır. Bu veriler ışığında 1 metre jet grout kolon üretiminin 1 metre fore kazık üretimine oranla yaklaşık olarak %30 daha hızlı yapılabildiği sonucuna varılmıştır. Sabit giderler, ekipman kiralari, projenin devamının zemin iyileştirmesine bağlı olması gibi faktörler dikkate alındığında üretim hızının; zaman ve maliyet olarak birçok artışının olduğu aşikardır.

Çalışmamızda fore kazık ve jet grout kolonu imalatlarının 1 metresinin üretiminin yapılması için referans alınan Bakanlığın pozlarına uygun olarak verilen maliyet analizleri, ana ve alt pozlar bazında çizelge halinde verilmiştir. Çizelgelerden elde edilen değerlere bakıldığında jet kolonu (80 cm çapında jet 1 yöntemi ile imal edilmiş) imalatının 1 metresinin değerinin 830,05 Türk Lirası olduğu görülmektedir. Fore kazık imalatının 1 metresi için gerekli olan maliyetin 9.485,96 TL olduğu hesaplanmıştır. Bu veriler ışığında 1 metre fore kazık üretimi ile 1 metre jet grout kolonu üretiminin maliyetleri karşılaştırıldığında aralarında yaklaşık 11,5 kat maliyet farkı olduğu görülmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

F.H.A.: Kavramsallaştırma, yöntem, yazılım, doğrulama, formel analiz, araştırma, kaynaklar, yazı yazma-orijinal taslak hazırlama.

İ.F.A.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar, yazı yazma-gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKÇA

- Akın M., Akkaya İ., Akın M., Özvan A, Ak Y., 2019, "Impact of Jet Grouting Pressure on the Strength and Deformation Characteristics of Sandy and Clayey Soils in the Compression Zone", Korean Society of Civil Engineers Journal of Civil Engineering, p.p. 13, June 24
- Algın, H.M., 2013, "Jet Grout Kolon-Zemin Etkileşiminin Gerçekçi Modellemesi ve ara Yüz Geometrisinin Geoyapısal Sistemin Davranışına Etkisi" TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Geoteknik Sempozyum. Adana
- Artson Geoteknik (Artson Araştırma Sondajları Mühendislik Ticaret Limitet Şirketi), 2016a, "İstanbul Metrosu Kabataş-Mecidiyeköy arası Jeolojik-Jeoteknik etüd raporu". Cilt 1, İstanbul (yayımlanmamış).
- Artson Geoteknik (Artson Araştırma Sondajları Mühendislik Ticaret Limitet Şirketi), 2016b. "İstanbul Metrosu Kabataş-Mecidiyeköy arası Jeolojik-Jeoteknik etüt raporu". Cilt 2, İstanbul (yayımlanmamış).
- Ataş, F.H., 2021, "İnce Daneli Zeminlerin Jet Grout Tekniği ile Zemin İyileştirilmesi Yapılabilirliğinin Optimizasyonu" Tekirdağ Namık Kemal Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnş. Müh., ABD., Yüksek Lisans Tezi, 86 s.
- Bakım M.A., 2007, "Enjeksiyon Yöntemleri İle Zemin İyileştirmesi". Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta,
- Baumann V., 1984. Das Soilcrete - Verfahren in der Baupraxis. Vortrage der Baugrundtagung, Duesseldorf, 49 – 83, DGEG.
- Burke, G., K., 2004. Jet Grouting Systems: Advantages and Disadvantages. ASCE, GEOSUPPORT 2004, s.s. 875-885
- Correia T., Valente J., Tinoco J., Falcao J., 2009. "Ecaluation of Mechanical Properties of Jet- Grouting Columns Using Different Test Methods". 17. Uluslararası Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Kongresi, Mısır. s.s. 2179-2171
- Durgunoğlu H. T., 2004. Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, s.s. 39-52, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Erkan İ.H., 2013 "Jet Grout Kolonlarının Performansını Etkileyen Faktörlerin Deneysel Olarak Araştırılması", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya,
- Gümüş, G., 2002, "Jet Grout Tequque and Strength Properties of Jet Grout Columns" Boğaziçi Üniv. Fen Bil. Enst. YL Tezi, İstanbul.
- İMO, İnşaat Mühendisleri Odası, (<https://www.imo.org.tr/TR,66886/mesleki-teknik-bilgiler-imo-web-sayfasinda.html>), Erişim Tarihi: 05.09.2024.

- Kaymakçı, S., 2014, "Jet Grout Kolona Soketli Fore Kazığın Çalışma Performansının Araştırılması". İTÜ. Fen Bil. Enst. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul
- Kirsch, F., Sonderman W., 2001, "Ground Improvement and Its Numerical Analysis" Proc. 15. th. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., İstanbul, AA. Balkema S., 1775-1778.
- Küsin, C, Yıldız, A, Örnek, M., 2016, "Jet Grout Kolonları İle İyileştirilen Zeminlerin Homojenleştirme Yöntemiyle Sayısal Analizi . Çukurova Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24. sayı, s.s. 121 - 131
- Lunardi P., 1977. Ground Improvement by Means of Jet-Grouting. Ground Improvement, ISSMFE Thomas Telford, 1, 2,s.s. 65 - 86.
- Mısır G., 2020, "Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirme ve Deplasman Tahmini: Vaka Analizi", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Sayı 18, s.s. 290-299,
- Njock P.G.A., Chen J., Modoni G., Arulrajah A., Kim Y.H., 2018 " A Review of Jet Grouting Practice and Development", Arabian Journal of Geosciences ,edition 11, pp 31,
- Prota Mühendislik AŞ., 2020, "Beşiktaş İstasyonu Geçici Kazı Destek Sistemi Geoteknik Hesap Raporu", AL-PRT-M7- S02- CT00-01-02-UT-1D-001-1A, 2020 Haziran
- Sağlamer A., Düzceer R., Gökalp A., Yılmaz E., 2001. "Recent Applications Of Jet Grouting For Soil Improvement In Turkey". 15. Uluslararası Zemin Mekaniği Konferansı. Sayı 1-3, s.s. 1839-1842.
- Sert, S., Önalp, A., Özocak, A., 2007, "Derin Yumuşak Kil Üzerinde Köprü Ayağı Temeli" 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, 29-30 Kasım, Antalya.
- Skempton A.W., 1986, "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relativa Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation", Geotechnique 36, No: 3, p.p. 425-447,
- TC. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024, İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları, 648 s., Ankara. Erişim Linki: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/1--2024-b-r-m-f-yatlar-20240603-1019-20240603093641.pdf>, Erişim Tarihi: 05.09.2024
- Tschuchnigg, F., Schweiger, H.F., 2008, "Comparizon of Different Models for Analysing Foundation on on Jet Grout Colomns", Proc. 12 th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, 3149-3157.
- Welsh, J.P., Rubright, R.M. and Coomber D.B., 1986. Jet Grouting for Support of Structure Session. ASCE Spring Convention, Seattle.
- Wong J.G., Poh T.Y., 2000. Effects of Jet Grouting on Adjacent Ground and Structures. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, s.s. 247 -256.
- Zhao, L-S., et all., 2023, Anew prediction models of the jet grouting column diameter for three jet grouting systems. Computers and Geotechnics, 163-105753, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.10575>

Nikel-Kobalt (Ni_xCo_y) Nano Kümelerinin Yapısal, Elektronik ve Manyetik Özelliklerinin Teorik İncelenmesi

Murat KALKANLI¹, Fethi Mehmet AKİS¹, Isil Ilgaz AYSAN¹, Fatih ERSAN^{1*}

¹Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye

Geliş: 15.11.2024, Kabul: 9.12.2024, Yayınlanma: 29.12.2024

ÖZ

Bu çalışmada Ni_xCo_y ($1 \leq x \leq 3$; $1 \leq y \leq 6$) nano kümeleri için kuantum mekaniğinin temel yasalarından yola çıkarak yoğunluk fonksiyoneli teorisini temel alan paket programlar kullanılarak enerjistik olarak en kararlı olduğu geometrik yapılar belirlendi. Enerjistik olarak kararlı bulunan Ni_xCo_y nano kümelerinin orbital enerji seviyeleri, atomlar arası bağ uzunlukları, kümelerin toplam manyetik moment değerleri ve seçili nano kümeler için CO ve H₂ molekülü ile olan etkileşimleri hesaplandı. Nano küme içerisindeki Ni ve Co atomlarının bulunduğu konumun nano kümenin sahip olduğu toplam manyetik moment değerini değiştirdiği, fakat değişen manyetik moment değerlerinde azalma olsa da, incelenen Ni_xCo_y nano kümelerin hiç birisinin manyetik olmayan bir düzene sahip olmadığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar nikel ve kobalt atomlarından yeni nano kümelerin elde edilebilir olduğunu ve bu nano kümelerin seçili moleküller ile yapmış oldukları etkileşimler sonucu yeni kullanım alanlarına sahip olabileceklerini göstermiştir. CO ve H₂ molekülleri NiCo₄, Ni₂Co₄ ve Ni₃Co₃ nano kümelerine Ni atomu üzerinden bağlanmaktadır. H₂ molekülünün nano kümelere görece güçlü bağlandığı ve Ni_xCo_y nano kümelerinin hidrojen depolamada kullanılabilir nano yapılar olduğu sonucu ortaya çıkartılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nano kümeler; HOMO-LUMO; Gaz seçimi; manyetik özellikler

Theoretical Investigation of Structural, Electronic and Magnetic Properties of Nickel-Cobalt (Ni_xCo_y) Nanoclusters

ABSTRACT

In this study, the most energetically stable geometric structures were determined for Ni_xCo_y ($1 \leq x \leq 3$; $1 \leq y \leq 6$) nanoclusters using the basic laws of quantum mechanics and using package programs based on density functional theory. Orbital energy levels, interatomic bond lengths, total magnetic moment values of the clusters and interactions with CO and H₂ molecules for the selected nanoclusters were calculated for the energetically stable Ni_xCo_y nanoclusters. It was observed that the position of Ni and Co atoms in the nanocluster changed the total magnetic moment value of the nanocluster, but although there was a decrease in the changing magnetic moment values, none of the Ni_xCo_y nanoclusters examined had a non-magnetic order. The obtained results showed that new nanoclusters can be obtained from nickel and cobalt atoms and that these nanoclusters may have new areas of use as a result of their interactions with the selected molecules. The results show that CO and H₂ molecules bind to NiCo₄, Ni₂Co₄ and Ni₃Co₃ nanoclusters via Ni atom. It has been revealed that the H₂ molecule binds relatively strongly to the nanoclusters and Ni_xCo_y nanoclusters are usable nanostructures for hydrogen storage.

Keywords: Nano cluster; HOMO-LUMO; Gas selection; magnetic properties

1. GİRİŞ

Nano kümeler, nanoteknolojinin en ilgi çekici ve hızla gelişen alanlarından biridir. Atomların veya moleküllerin belirli bir düzende toplanmasıyla oluşan nano kümeler, genellikle birkaç nanometre çapında olup farklı özelliklere sahip yapı taşları olarak öne çıkar. Kimya, fizik, malzeme bilimi ve biyoteknoloji gibi çeşitli disiplinlerde araştırma konusu olan nano kümeler, özellikleri sayesinde elektronik, enerji, çevre ve tıp gibi birçok alanda yenilikçi uygulamaların önünü açmaktadır. Nano boyutlarda bu yapıların yüzey alanlarının büyük olması ve kuantum boyut etkileri göstermesi, onları geleneksel malzemelerden ayıran en önemli özelliklerindedir. Bu özellikler, nano kümeleri katalizörler, sensörler, manyetik malzemeler ve optik bileşenler gibi yüksek performanslı uygulamalarda vazgeçilmez hale getirmiştir.

Nikel nano kümeler ile ilgili yapılan “Ni nano kümelerin atomik karbon adsorbsiyonu” adlı çalışmada; Wang ve arkadaşları, karbon atomlarının küçük Ni nano kümeler üzerinde yüksek koordinasyon bölgelerinde adsorbe edildiğini ve yüksek enerjiye sahip olduklarını bulmuşlar. Bu sonuçlar bize Karbon nanotüp mekanizmasının büyütülmesinde Ni nano kümeler ile üst ve alt tabakada bulunan karbon atom çiftleniminin yeniden yapılandırılmasını içermekte olduğunu göstermektedir (Qiang Wang, 2010).

Rad ve çalışma grubu, $Al_{12}P_{12}$ nano kafes yapısının Ni nano kümeler ile olan etkileşiminin elektronik ve geometrik özelliklerini incelemiştir. İncelenen üç farklı yönde Ni atomundan $Al_{12}P_{12}$ nano kafes yapısına elektron transferi gerçekleşirken, tek bir yönde tersine bir elektron transferi gözlemlenmiştir. AIP nano kafes yapısı üzerindeki farklı bağlanma noktalarında bulunan Ni atomlarının bağlanma enerjileri sırasıyla -136.7, 108.5, 102.7 ve 99.4 kcal/mol dir. Oluşan yeni Al-Ni ve P-Ni bağları ile nano kafes yapısında bulunan bazı Al-P bağlarının ayrışması gözlemlenmektedir (Ali Shokuhi Rad,2016).

Ni nano kümelerin ilgi çekici özelliklerden biri olan katalitik reaksiyonlar oldukça umut vaad edici olup, hava kirliliğine sebep olan karbon, nitrojen ve kükürt dioksit gibi gazların doğrudan veya dolaylı olarak hava kirliliğine yol açtığı gözlemlenmiştir. Ni nano kümeler ile NO, SO ve CO gazları arasındaki etkileşimi inceleyen Amorim ve çalışma grubu, elde ettiği sonuçlar neticesinde, SO gazı ile olan etkileşimin NO ve CO gazına göre daha yoğun olduğu tespit etmişler. Güçlü bir şekilde bağlanan S-Ni bağı, SO gazının nano küme üzerindeki kimyasal bağlanmasıyla açıklanır (R. V. de Amorim, 2020).

Rad ve çalışma grubunun incelemiş olduğu diğer bir çalışma ise; Ni atomları dahil edilmiş $B_{12}P_{12}$ nano kümesinin asetilen ve etilen molekülleri ile olan etkileşimidir. Elde edilen sonuçlar neticesinde Asetilen molekülü saf $B_{12}P_{12}$ nano kümesiyle zayıf fiziksel bağlanma gerçekleştirmiş, bağlanma enerjisi -34.1 kJ/mol bulunmuştur. Asetilen için bulunan en yüksek bağlanma enerjisi, Ni atomları dahil edilmiş $B_{12}P_{12}$ nano kümesiyle olan etkileşimi sonucunda bulunmuştur. Ni atomları dahil edilmiş olan $B_{12}P_{12}$ nano kümesinde

bant aralığı azalırken, asetilen ve etilen molekülleri ile yüzey etkileşimi yapması sonucu bant aralığı tekrardan artar (A. S. Rad, 2017).

Ni nano kümelerin yanı sıra farklı malzemeler ile oluşturulan nano kümeler ile ilgili olan çalışmalar literatürde mevcuttur. Kadioğlu ve çalışma grubu tarafından yapılan araştırmada; Pt_n ($n=2-5, 18, 22, 24$) tabanlı nano kümeler ile NH_3 ve H_2 moleküller arası etkileşim araştırılmıştır. Pt-N atomları arasında güçlü bir etkileşim olduğu tespit edilmiş olup, NH_3 ayrışması Pt_{14} kümesinde meydana gelmiştir. H_2 molekülü ise, Pt_3 kümesi hariç tüm kümelerde farklı adsorpsiyon bölgelerinde ayrılmıştır. Pt_n kümelerinin metalik ve iletkenlik özellikleri, NH_3 ve H_2 molekülleri ile olan etkileşimi sonucu değişmiştir. Pt_2 kümesi ile NH_3 molekülü etkileşimi yarı metalik özellik göstermiştir (Y. Kadioğlu, 2014).

Bimetalik nano alaşımların geniş uygulama alanları nedeniyle tercih edilen bir araştırma konusu olmasından ötürü Ag_mAu_n ($m+n=2-8$) nano alaşımlar Ranjan ve çalışma grubu tarafından fiziko-kimyasal özellikleri açısından araştırılmıştır. Yapının sertlik, elektronegatiflik, yumuşaklık ve elektrofilité indeksi açısından değerlendirilmiştir. Herhangi bir niceliksel karşılaştırmanın yokluğunda olduğu gibi, Ag-Au nano kümesinin optik özelliği HOMO-LUMO boşluğunun tam olarak eşdeğer olduğu varsayılmıştır. Değerlendirilen veriler ile bu bileşiklerin optik özelliklerinin sertlik ile doğrudan bir ilişki içinde olduğunu ve yumuşaklıkla ters orantılı ilişkide olduğunu ortaya koymaktadır (Prabhat Ranjan, 2014). Au_xCu_y nano kümelerin MoS_2 tek tabaka yüzeyleri ile olan adsorpsiyon özellikleri ve adsorbe edilen CO ve H_2O molekülleri ile olan etkileşimlerini araştıran Kadioğlu ve çalışma grubu, ilk prensipler yöntemini kullanmıştır. Au_xCu_y nano kümelerin MoS_2 tek tabasına güçlü bir şekilde bağlandığını ve bunun neticesinde yalın haldeki MoS_2 tek katmanına kıyasla CO ve H_2O moleküllerine karşı kimyasal aktivitenin ve duyarlılığın arttığı bulunmuştur (Y. Kadioğlu, 2017).

Hekzagonal AlN tel tabaka yüzeyi ile Pt nano kümeleri etkileşimlerini inceleyen Fersan ve çalışma grubu, PtO ve Pt_2O nano kümelerinin h-AlN tek yüzeyi ile adsorpsiyonu sonucu ferromanyetik taban durumunda olduğunu ve 2 μB manyetik momente sahip olduğunu elde edilmiştir. Çeşitli ikame bölgelerinde yer alan Alo (yarı iletken), N_{Pt} (metalik), Al_{Pt} (yarı metalik) taban durumuna sahip olan yapılar ferromanyetik taban durumuna sebep olur (F. Ersan, 2015).

Netskina ve ekibi Nikel katalizörüne kobalt eklenmesi durumunda hidrojen üretim oranını arttırdığını çalışmaları ile göstermiştir. Bimetalik katalizörlerdeki kobalt içeriğinin artmasıyla birlikte hidrojen üretim hızında da artış olur ve belirli Co/Ni oranlarında kobalt katalizörüyle elde edilen değeri bile aşabilmektedir (O. V. Netskina, 2021).

Yang ve ekibi sentezlenen nikel sülfür ve kobalt sülfür ince filmleri elektrokimyasal yöntemler ile karakterize ederek Pt püskürtmeye karşı elektrotlar olarak katalitik aktivitelerde artış olduğunu çalışmalarında göstermiştir (Jie Yang, 2014).

On platin atomundan oluşan nano küme ile alüminyum yapısı üzerine etkileşimi yoğunluk fonksiyoneli teorisi ve x-ışını spektroskopisi ile incelenmiş ve bağ uzunlukları ile yapısal bozunmaların ortaya çıktığı sıcaklık değeri belirlenmiştir (Vila, 2008). Altın nanokümler sentezlenmiş moleküler nanokristal malzemeler arasında son zamanlarda araştırma odağı olmuştur. Bu, izole edilmiş ve pasifleştirilmiş altın kümelerinin yapısal, dinamik, elektronik ve diğer fiziksel ve kimyasal özellikleriyle ilgili teorik ve deneysel çalışmaların ve bunların boyut bağımlılığının küme biliminin ön saflarında yer almasının nedenlerinden biridir (Garzon, 1998). Bunların yanı sıra $(\text{IrO})_n$ ve $(\text{IrO}_2)_n$ ($n=1-5$) nano kümelerin Grafen yüzeyi ile olan etkileşimlerini araştıran Aysan ve çalışma arkadaşları elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda koordinasyon sayısındaki artışın, artan sayıda doymuş bağ ile daha kararlı bir nano küme ile sonuçlandığını bulmuşlar. HOMO-LUMO boşluk değerleri, kümenin boyutuna ve dolayısıyla bağ doygunluğuna bağlı olarak büyük farklılıklar göstermiştir (I. I. Aysan, 2020).

S. Aslanzadeh'nin yaptığı çalışmada saf ve Sc, Ti, V, Cr, Mn ve Fe katkılı $\text{Zn}_{12}\text{O}_{12}$ nano kümelerinin CO gazına karşı elektronik duyarlılığı, yoğunluk fonksiyoneli teorisi hesaplamaları kullanılarak elde edilmiştir. Bir Zn atomunun bir Sc veya Ti atomuyla değiştirilmesinin kümenin duyarlılığını değiştirmediği, ancak V ve Cr atomlarının eklenmesinin duyarlılığı önemli ölçüde artırdığı gözlenmiştir (Aslanzadeh, 2016). Son çalışmalar, fulleren benzeri nano kümelerin hücre duvarlarından geçebildiğini ve hedef bölgede ilaçları taşıyabildiğini ve salılabildiğini ortaya koydu. Chen ve ekibi $\text{Be}_{12}\text{O}_{12}$, $\text{Mg}_{12}\text{O}_{12}$ ve $\text{Zn}_{12}\text{O}_{12}$ nano kümelerinin reaktivitesi ve elektronik duyarlılığı, gaz fazı ve sulu çözeltide yoğunluk fonksiyoneli teorisi hesaplamaları kullanılarak hidroksiüre (HU) anti kanser ilacına karşı araştırdı. Sonuçlar, $\text{Mg}_{12}\text{O}_{12}$ ve $\text{Zn}_{12}\text{O}_{12}$ nano kümelerinin elektronik özelliklerinin HU varlığına önemli ölçüde duyarlı olduğunu ve nano kümelerin bu ilacın adsorpsiyonu için umut verici bir aday olabileceğini göstermişlerdir (Chen, 2019). Flor-karbon alaşımlı nano kümeler hakkında teorik bilgi sağlamak için yoğunluk fonksiyoneli teorisi kullanılarak hesaplamaları yapıldı. Çalışmalar sonucunda flor atomları kararlı bir nano küme yapılandırması göstermedi. Ancak karbon atomları güçlü F-C bağıyla flor-karbon nano kümelerinin oluşumunu etkiledi ve kararlı ve güçlü bir şekilde bağlanmış F_xC_y kümeleri oluşturdu. Nano kümelerin kohezif enerji değerleri karbon atomu sayısının artmasıyla arttı. Minimum enerji bileşimleri karbon kümeleri hariç FC_2 (3 atom), FC_3 (4 atom), FC_4 (5 atom) kümeleri için elde edildi. Bu nedenle tek flor sistemleri F_xC_y alaşımları için en uygun nano kümeler olarak bulundu. HOMO-LUMO değerlerine göre, tetraflorometan adı verilen F_4C molekülü, yapılan çalışmadaki nano kümeler arasında en düşük kimyasal aktiviteyi gösteren en yüksek HLG (enerji aralığı) değerini gösterdi (Y. Kadioğlu, 2021).

Ranjan ve ekibi DFT metodolojisini kullanarak (Cu–Ag)_{n=1-7} nano-alaşım kümelerinin deneysel özelliklerini analiz etmiştir. Bu analiz sonucunda bimetalik nano alaşımların optik özelliği ile küresel sertlik değerleri arasında doğru bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bu orantının deneysel verilerle tutarlı olduğunu göstermiştir. Sertlik ile HOMO-LUMO boşluğu arasındaki regresyon katsayısının yüksek değeri, yaklaşımlarını desteklemektedir. Cu₂, Ag₂ ve CuAg gibi türler için hesaplanan bağ uzunlukları, deneysel değerlere sayısal olarak çok yakın değerler tespit etmiştir (P. Ranjan, 2015).

Shamlouei ve ekibi yoğunluk fonksiyoneli teorisini kullanarak geçiş metali katkılanması Mg₁₂O₁₂ nano kümesinin yapısal, elektronik, enerjistik, doğrusal ve doğrusal olmayan özellikleri üzerindeki etkilerini araştırdı. Sonuç olarak geçiş metali atomlarının katkılanması E_g'yi azaltmaya ve dipol momentinin artmasına yol açtığı görüldü. Yanı sıra polarize edilebilirlik değerleri, atom numarasının artması sonucu azaldığı görüldü (Shamlouei, 2015).

Bu çalışmada Ni_xCo_y nano kümelerin (1 ≤ x ≤ 3; 1 ≤ y ≤ 6) farklı geometrik optimizasyonları için yapılan hesaplamalarda ilk prensipler yöntemi kullanılmış ve enerjistik olarak en kararlı durumlar elde edilmiştir. Elde edilen taban durumu ile CO ve H₂ gazları ile olan etkileşimleri incelenmiştir.

2. HESAPLAMA METODU

Bu çalışmada, nikel ve kobalt atomlarından oluşan çeşitli nano kümelerin geometrik optimizasyonları Vienna Ab initio Simulation Package (VASP) paket programı kullanılarak yapılmıştır (Kresse, G., & Furthmüller, J. (1996), (Hafner, J., & Kresse, G. (1997)). Geometrik optimizasyon öncesi her bir stokiyometri için olası atom dizilimleri belirlenmiştir. Bu nano kümeler AVOGADRO paket programı kullanılarak 30x30x30 Å³ luk bir hücrede oluşturulmuş ve her birisi basit bir optimizasyona tabi tutulmuştur (Hanwell, M. D., 2012). Elde edilen atomik koordinatlar VASP paket programı hesaplamalarında incelenecek olan sistemin hücre büyüklüğü, atomların cinsi, sayısı ve atomların konumları için girdi olarak kullanılmıştır. Tüm hesaplamalar spin nonpolarize ve spin polarize olacak şekilde düzlem dalga baz setleri yardımıyla yapılmıştır (Blöchl, P. E. (1994)). Atomların psödo potansiyelleri için projector augmented wave metot (PAW) potansiyelleri, elektronlar arasındaki değiş-tokuş-korelasyon etkilerini hesaba katmak için ise genelleştirilmiş eğim yaklaşımı (GGA) kullanılmıştır (Blöchl, P. E. (1994), (Perdew, J. P. 1996), (Grimme, S. (2006)). İncelenecek olan nano kümelerin izole moleküller gibi göz önünde bulundurulması için yukarıda da bahsedildiği üzere büyük kübik bir hücre oluşturulmuştur. Dolayısıyla sadece gamma yüksek simetri noktası için hesaplamalar yapılmıştır (Monkhorst, H. J., & Pack, J. D. (1976)). Ayrıca, serbest elektronun kinetik enerjisine eşit ve küçük olması gereken sistemin kesme kinetik enerji değeri için 600 eV belirlenmiştir. Hesaplamalar conjugate gradient optimization (CG) algoritması kullanılarak incelenen

sistemlerin taban durum enerjileri ve nano kümeleri oluşturan atomlar üzerindeki kuvvetin minimum olması gerekir ilkesi göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır (Shewchuk, J. R. (1994)). Minimum enerjiyi bulmak için yapılan hesaplamalarda, öz-uyumlu alan iterasyonlarında her bir iterasyon sonrası sistem enerjisi bulunur (Roothaan, C. C. J. (1960)). Bu enerjiler arasındaki fark 10⁻⁵ eV mertebesine erişinceye kadar geometrik optimizasyonun yapılmasına izin verildi. Optimize edilerek enerjistik olarak en kararlı yapıya sahip nano küme belirlendikten sonra, nikel ve kobalt atomları arasındaki yük geçişlerini hesaplamak için Bader yük analizi yöntemi kullanıldı (Henkelman, G. , 2006). Nano küme ve seçili gaz molekülleri arasındaki olası zayıf etkileşimleri de tespit edebilmek için Grimme vdW (van der Waals) düzeltme terimi hesaplamalarda girdi olarak kullanıldı (Grimme, S. (2006)).

İncelenen nano kümelerin atom başına bağlanma enerjileri ($E_{bağ}$) için aşağıdaki eşitlik kullanıldı.

$$E_{bağ} = (E_{toplam} - nE_{Co} - mE_{Ni}) / (n + m) \quad (1)$$

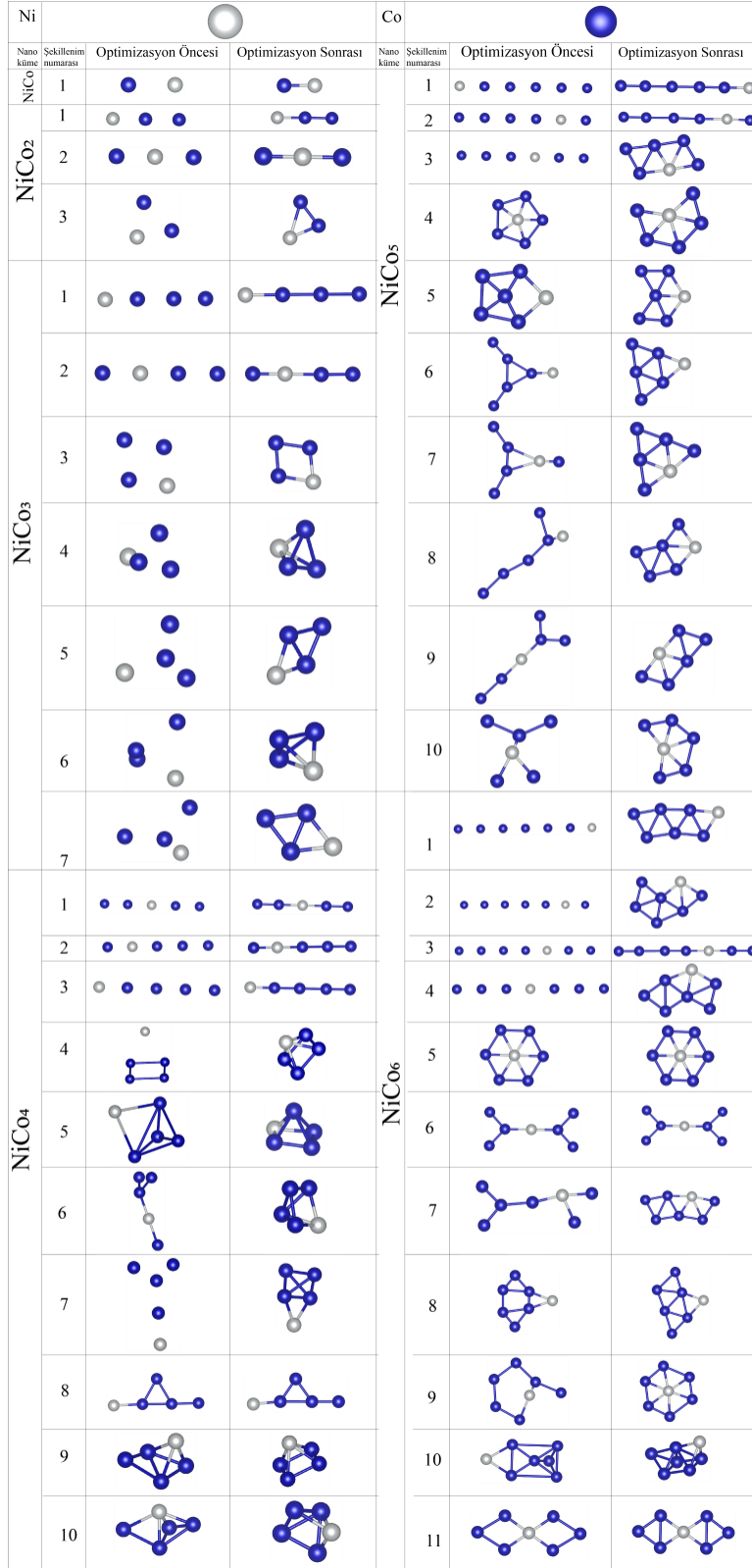
Burada, E_{toplam} nano kümenin toplam enerjisini, E_{Co} ve E_{Ni} sırasıyla kobalt ve nikel atomlarının spin polarize durumları için izole atom enerjilerini, n ve m ise nano küme içerisinde bulunan kobalt ve nikel atom sayısını temsil etmektedir. Enerjistik olarak en kararlı Ni_xCo_y nano kümelerinin CO ve H₂ gibi gaz molekülleri ile olan etkileşimleri ve bu moleküllerin nano kümeye tutunma enerjilerini ($E_{t.e}$) hesaplamak için aşağıdaki eşitlik kullanıldı.

$$E_{t.e} = E_{(nano + gaz)} - E_{nano} - E_{gaz} \quad (2)$$

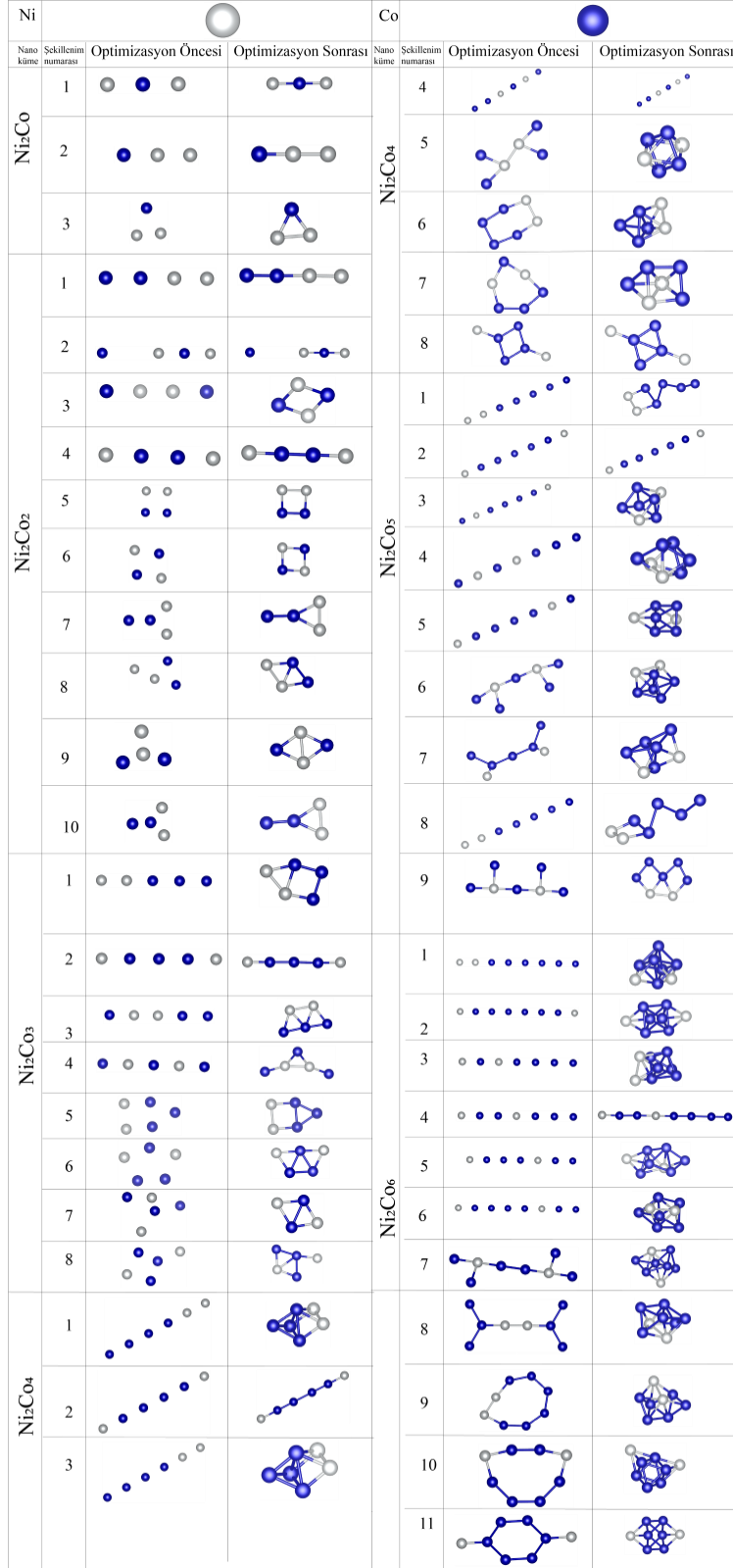
3. SONUÇLAR

Ni_xCo_y nano kümelerinde Ni atom sayısını belirleyen x değeri 1, 2 ve 3 olarak, Co atom sayısını belirleyen y değeri ise 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 olarak belirlenmiştir. İlk olarak Ni atom sayısını belirleyen x, 1 seçilerek nano kümedeki Co atom sayısı 1'den 6'ya kadar artırılmıştır. Sonrasında x=2 ve x=3 için Co atom sayıları yine 1'den 6'ya kadar artırılarak işlemler yapılmıştır. Bu işlemler yapılırken her bir stokiyometri için olası kombinasyonlar ilk atom konumlarını belirlemek için AVOGADRO programı ile oluşturulmuş ve optimize edilmiştir. İlk optimizasyon sonrasında dağılan veya benzer başlangıç konfigürasyonuna dönüşen nano kümeler için VASP paket programı yardımıyla hesaplamalar yapılmamıştır.

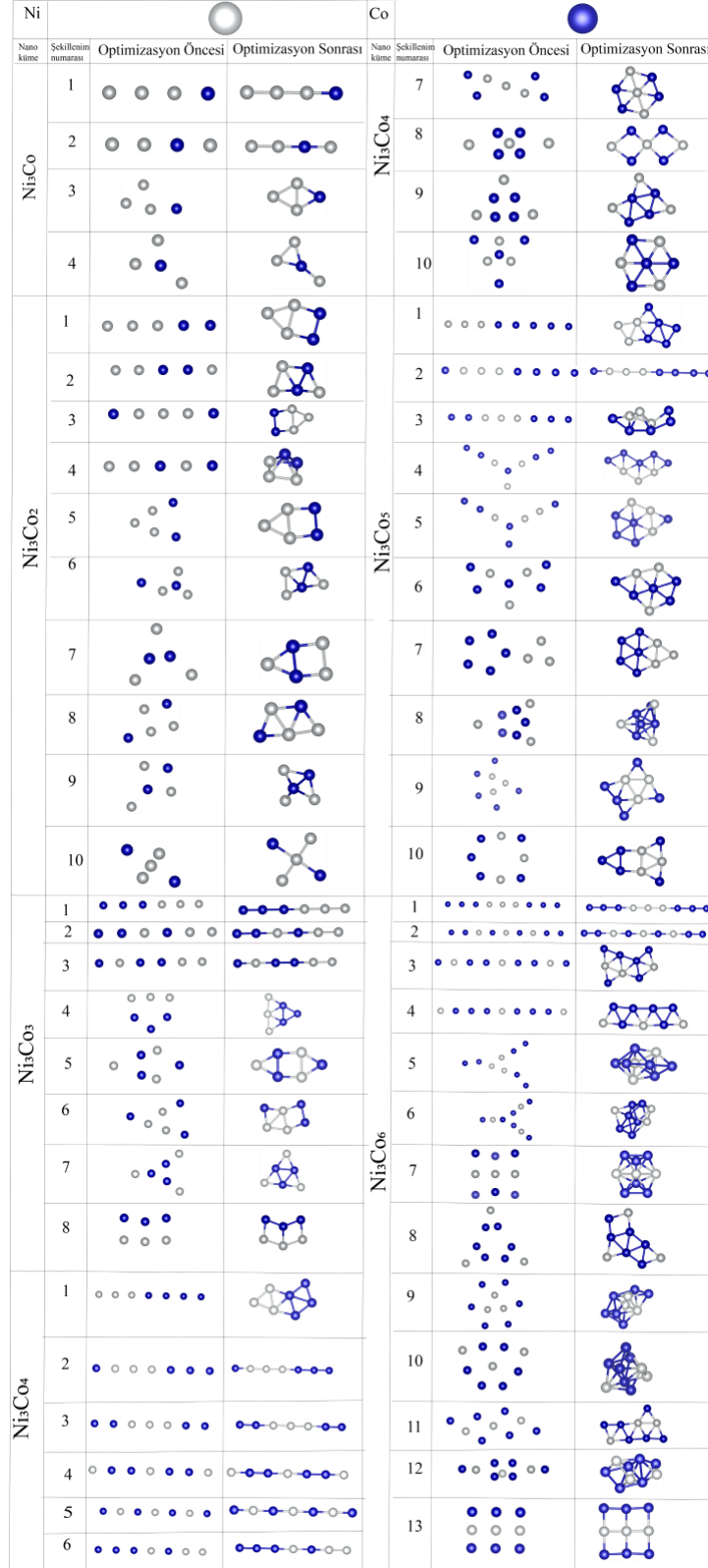
Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te Ni_xCo_y nano kümeleri için belirlenen ilk geometrik yapılar ile VASP paket programı kullanılarak yapılan optimizasyon hesaplamaları sonrasında elde edilen geometrik yapılara ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 1: NiCo_y (1 ≤ y ≤ 6) nano kümelerinin bu tez çalışmasında ele alınan tüm optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası geometrik yapıları.



Şekil 2: Ni_2Co_y ($1 \leq y \leq 6$) nano kümelerinin bu tez çalışmasında ele alınan tüm optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası geometrik yapıları.



Şekil 3: Ni_3Co_y ($1 \leq y \leq 6$) nano kümelerinin bu tez çalışmasında ele alınan tüm optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası geometrik yapıları.

Çizelge 1'de izole tek atom Ni, Co ve bunların ikisinin oluşturmuş olduğu dimer yapıya ait enerjiler, bağ uzunlukları ve toplam manyetik moment değerleri verilmiştir. İzole Nikel ve Kobalt atomları için elde edilen manyetik moment değerleri sırasıyla 2 ve 3 μB 'dir. Hesaplanan bu değerler Hund kuralına göre hesaplanan manyetik moment değerleri ile de uyumludur.

3.1. NiCo_y ($1 \leq y \leq 6$) nano kümelerinin geometrik yapıları ve en kararlı durumlarının manyetik özellikleri

Çizelge 1'de NiCo_y ($1 \leq n \leq 6$) nano kümeleri için yapılan VASP hesaplama sonuçları verilmiştir. NiCo₂ için 3 farklı, NiCo₃ için 7 farklı, NiCo₄ ve NiCo₅ için 10 farklı ve NiCo₆ için ise toplam 11 farklı başlangıç şekillenimi göz önüne alınmıştır. Çizelge 1'de toplam enerjisi ya da atomlar arası bağlanma enerjisi mutlak değer içerisinde en büyük olan nano küme enerjistik olarak en kararlı nano küme olarak belirlenmiş ve sarı renk ile vurgulanmıştır. Ni ve Co atomlarının birbiri ile bağlanmasıyla oluşan NiCo dimerin toplam manyetik moment değeri 3 μB 'dir. NiCo dimerin atom başına bağlanma enerjisi $-1,540$ eV ve atomlar arasındaki bağ uzunluğu da $2,071$ Å olarak hesaplanmıştır. Bader yüz analizi sonuçlarına göre kobalt atomundan Ni atomuna $0,060$ e⁻ yük transferi olmuştur. Literatürde NiCo ikili metalleri ve CO₂ indirgeme reaksiyonlarında ve süper kapasitör oluşturmada kullanılmaktadır ve elde edilen bu değerler literatürde elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar ile de uyumludur (Nwaji, 2024; Huang, 2019). NiCo₂ için belirlenen 3 farklı şekillenimden geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında Çizelge 1'de belirtilen 3 numaralı şekillenim olan üçgen yapı enerjistik olarak en kararlı nano küme olduğu tespit edilmiştir. Bu nano kümede Ni atomu Co atomlarından toplamda $0,094$ e⁻ almıştır ve oluşan Ni-Co bağ uzunluğu dimer NiCo bağ uzunluğuna göre çok küçük bir miktar artmasına ($2,120$ Å) rağmen atom başına düşen bağlanma enerjisi dimer NiCo ya göre yaklaşık %30 daha büyüktür.

Çizelge 1: Geometrik optimizasyonu yapılan NiCo_y nano kümelerinin toplam enerjisi, toplam manyetik momentleri ve atomlar arası ortalama bağ uzunlukları.

Nano Küme	Şekillenim Numarası	Toplam Enerji (eV)	Toplam Manyetik Moment (μB)	E _{bağ} (eV)	Ni-Co bağ uzunluğu (Å)	Ni-Ni bağ uzunluğu (Å)	Co-Co bağ uzunluğu (Å)
Ni		-0,61391961	2				
Co		-1,71098501	3				
NiCo		-5,40554926	3	-1,540	2,071		
NiCo ₂	1	-9,58743023	6	-1,850	2,143		

	2	-9,40877259	6	-1,791	2,118		
	3	-9,9693564	6	-1,978	2,120		
NiCo ₃	1	-13,19790015	9	-1,862	2,086		2,360
	2	-13,21559268	9	-1,867	2,222		2,039
	3	-15,25948869	9	-2,378	2,197		2,098
	4	-15,00398534	7	-2,314	2,192		2,283
	5	-15,31935606	7	-2,393	2,243		2,172
	6	-15,00414677	7	-2,314	2,351		2,282
	7	-15,32178466	7	-2,394	2,242		2,175
NiCo ₄	1	-17,68443533	10	-2,045	2,233		2,020
	2	-17,34669893	10	-1,977	2,085		2,219
	3	-17,51332136	10	-2,011	2,08		2,157
	4	-21,13952588	10	-2,736	2,308		2,241
	5	-21,11661519	10	-2,731	2,303		2,182
	6	-21,11653182	10	-2,731	2,303		2,183
	7	-20,77749572	10	-2,663	2,228		2,344
	8	-18,86066098	10	-2,280	2,094		2,064
	9	-21,13955456	10	-2,736	2,311		2,139
	10	-21,11700846	10	-2,731	2,252		2,218
NiCo ₅	1	-21,17868597	13	-2,001	2,115		2,096
	2	-20,52990415	13	-1,893	2,135		2,409
	3	-24,77631428	13	-2,601	2,296		2,127
	4	-25,11363016	11	-2,657	2,239		2,269
	5	-25,45090765	11	-2,713	2,376		2,132
	6	-25,79063841	11	-2,770	2,244		2,165
	7	-25,34646568	11	-2,696	2,284		2,24
	8	-25,33833881	11	-2,694	2,28		2,177
	9	-24,77581951	13	-2,601	2,213		2,126
	10	-24,42558436	-1,2097	-2,542	2,361		2,069
NiCo ₆	1	-29,45689892	14	-2,653	2,207		2,319
	2	-30,11033478	14	-2,747	2,215		2,135
	3	-25,2033957	15	-2,046	2,261		2,02
	4	-30,16084419	14	-2,754	2,296		2,588

	5	-29,98974383	14	-2,729	2,286		2,278
	6	-25,81961195	14	-2,134	2,299		2,115
	7	-29,85013948	14	-2,710	2,221		2,104
	8	-29,58082356	4	-2,671	2,265		2,12
	9	-29,5137717	4	-2,661	2,276		2,154
	10	-32,23294051	14	-3,050	2,34		2,253
	11	-29,45689892	14	-2,653	2,206		2,138
Ni ₂ Co	1	-8,39647704	5	-1,819	2,096		
	2	-8,17879953	5	-1,746	2,086	2,143	
	3	-8,80668767	3	-1,955	2,169	2,241	
Ni ₂ Co ₂	1	-11,98170172	7	-1,832	2,208	2,158	2,043
	2	-10,33967339	8	-1,422	2,097		
	3	-13,61683442	6	-2,241	2,177		
	4	-12,10058802	6	-1,862	2,109		2,039
	5	-13,97420899	8	-2,331	2,139	2,242	2,109
	6		8	1,162	2,175		
	7	-13,44250546	6	-2,198	2,279	2,16	2,025
	8	-13,90905016	6	-2,314	2,223	2,276	2,122
	9	-13,52624424	6	-2,219	2,226	2,29	
	10	-13,41444524	6	-2,191	2,275	2,179	2,032
Ni ₂ Co ₃	1	-19,07028964	9	-2,541	2,213	2,236	2,11
	2	-16,23527417	9	-1,974	2,072		2,215
	3	-18,86584272	9	-2,501	2,234	2,344	2,169
	4	-17,21081873	9	-2,170	2,11	2,4	
	5	-19,13882539	9	-2,555	2,157	2,251	2,172
	6	-19,34075362	9	-2,595	2,22		2,267
	7	-18,39070341	3	-2,405	2,207	2,479	
	8	-18,57560261	9	-2,442	2,179		2,239
Ni ₂ Co ₄	1	-25,4018289	12	-2,888	2,231		2,391
	2	-20,11891404	12	-2,007	2,126		2,391
	3	-25,40182894	12	-2,888	2,231	2,276	2,319
	4	-20,07265455	12	-2,000	2,228		2,043
	5	-26,2412625	12	-3,028	2,332		2,218
	6	-25,55370513	12	-2,913	2,268	2,295	2,253

	7	-25,01867256	10	-2,824	2,263	2,263	2,215
	8	-22,76555403	12	-2,448	2,097		2,176
Ni ₂ Co ₅	1	-3,7430995	13	0,62	2,28	2,217	2,161
	2	-24,06926168	13	-2,040	2,111		2,112
	3	-31,7899118	13	-3,143	2,267		2,206
	4	-31,31248514	13	-3,075	2,283	2,523	2,199
	5	-31,93244824	13	-3,164	2,32		2,325
	6	-31,67750711	13	-3,127	2,329	2,439	2,292
	7	-29,40557418	13	-2,803	2,295		2,226
	8	-27,12219	13	-2,477	2,241	2,382	2,213
	9	-29,05935209	11	-2,753	2,199	2,379	2,107
Ni ₂ Co ₆	1	-37,73071406	14	-3,279	2,309	3,142	2,256
	2	-37,36465799	14	-3,233	2,319		2,326
	3	-37,20781015	14	-3,214	2,271	2,352	2,278
	4	-28,09846032	16	-2,075	2,097		2,117
	5	-36,25170307	16	-3,094	2,391		2,31
	6	-37,45591797	14	-3,245	2,334	2,42	2,273
	7	-36,99839454	14	-3,188	2,33		2,196
	8	-37,21295838	14	-3,214	2,291	2,363	2,304
	9	-36,87790664	14	-3,173	2,443	2,533	2,232
	10	-37,74672937	14	-3,281	2,332		2,306
	11	-36,90273885	14	-3,176	2,296		2,393
Ni ₃ Co	1	-10,68053386	5	-1,781	2,071	2,135	
	2	-10,94723284	5	-1,848	2,103	2,133	
	3	-12,5048937	5	-2,238	2,207	2,208	
	4	-12,22682893	5	-2,168	2,079	2,255	
Ni ₃ Co ₂	1	-17,68215774	8	-1,374	2,16	2,226	2,104
	2	-18,02796722	8	-1,443	2,207	2,278	2,233
	3	-17,6825854	8	-1,374	2,158	2,221	2,104
	4	-18,37254867	8	-1,512	2,314	2,276	2,158
	5	-17,68281325	8	-1,374	2,16	2,227	2,104
	6	-18,02927067	8	-1,443	2,343	2,276	2,235
	7	-17,88353442	8	-1,414	2,227	2,255	2,19
	8	-17,54523839	8	-1,346	2,304	2,247	

	9	-15,0483506	8	-0,847	2,34		2,261
	10	-15,25803143	8	-0,889	2,38	2,132	
Ni ₃ Co ₃	1	-18,79167139	11	-0,429	2,185	2,124	2,05
	2	-18,97560845	11	-0,459	2,122	2,137	2,031
	3	-18,69309237	11	-0,412	2,081	2,147	2,151
	4	-23,26294706	9	-1,174	2,327	2,268	2,191
	5	-21,90526254	11	-0,948	2,191	2,309	2,148
	6	-22,35720681	9	-1,023	2,165	2,204	2,099
	7	-23,46464175	9	-1,207	2,238		2,28
	8	-22,65243839	9	-1,072	2,197	2,288	2,094
Ni ₃ Co ₄	1	-27,61398046	12	-0,855	2,297	2,334	2,108
	2	-22,77047401	12	-0,164	2,071	2,09	2,185
	3	-22,96676137	12	-0,192	2,19	2,195	2,031
	4	-22,89905358	12	-0,182	2,126		2,077
	5	-22,60333613	12	-0,140	2,101		
	6	-22,84078599	12	-0,174	2,183	2,132	2,184
	7	-27,7689085	10	-0,878	2,213		2,123
	8	-24,12455488	-0,9484	-0,357	2,362		
	9	-27,17774299	6	-0,793	2,222		2,419
	10	-27,23455979	0	-0,801	2,419		2,358
Ni ₃ Co ₅	1	-32,71132064	13	-0,710	2,196	2,425	2,216
	2	-26,73117798	15	0,037	2,077	2,199	2,087
	3	-29,61083293	13	-0,322	2,220	2,388	2,118
	4	-20,58670568	13	0,805	2,417	2,366	2,193
	5	-33,07224679	13	-0,755	2,323	2,353	2,225
	6	-32,55900101	9	-0,691	2,347	2,378	2,358
	7	-33,1409728	13	-0,764	2,3	2,312	2,242
	8	-35,84591377	13	-1,102	2,32		2,35
	9	-32,55819183	13	-0,691	2,377	2,395	2,137
	10	-31,81642407	13	-0,598	2,23	2,209	2,223
Ni ₃ Co ₆	1	-30,59880243	16	0,203	2,197	2,16	2,049
	2	-30,78182911	16	0,183	2,181		2,021
	4	-37,22299786	16	-0,532	2,348	2,415	2,111
	5	-36,74363166	16	-0,478	2,232		2,287

6	-41,10897193	16	-0,963	2,301	2,372	2,269
7	-40,66667339	16	-0,914	2,265	2,421	2,441
8	-40,99034118	14	-0,950	2,388	2,569	2,28
9	-37,78746314	14	-0,594	2,200	2,35	
10	-41,07680314	16	-0,960	2,293	2,489	2,178
11	-41,7316825	14	-1,033	2,337	2,33	2,246
12	-36,9463365	14	-0,501	2,38	2,387	2,176
13	-40,8582123	16	-0,936	2,339	2,365	2,189

NiCo₃ için belirlenen 7 farklı şekillenimden geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında Çizelge 1’de belirtilen 7 numaralı şekillenim olan paralelkenar yapı enerjistik olarak en kararlı nano küme olduğu tespit edilmiştir. Bu nano kümede Co atomları üçgen bir yapı oluşturmuş ve Ni atomu da bu üçgenin tabanının ortasına gelecek şekilde her iki Co atomuna bağlanmıştır. Ni atomuna Co atomlarından toplamda 0,252 e⁻’luk bir yük transferi olmuştur. Göz önünde bulundurulan şekillenimlerde Ni ve Co atomlarının bulunduğu konuma göre nano kümenin toplam manyetik moment değeri de 9 veya 7 μ_B ’lik değerler almıştır. Atom başına bağlanma enerjisi değerlerine göre en kararlı geometrik yapıdaki NiCo₃ nano kümesinin -2,394 eV/atom’luk bağlanma enerjisi değerine ve toplamda 7 μ_B ’lik manyetik moment değere sahip olduğu hesaplanmıştır. Bu nano yapıdaki ortalama Ni-Co ve Co-Co bağ uzunluğu değerleri sırasıyla 2,242 ve 2,175 Å olarak bulunmuştur. NiCo₄ için belirlenen 10 farklı şekillenimden geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında Çizelge 1’de belirtilen 4 numaralı şekillenimin en düşük bağlanma enerjisine (-2,736 eV/atom) sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nano kümede dört Co atomu birbirine bağlanarak düzlemde bir kare oluşturmuş ve Ni atomu da bu karenin merkezinde ve yukarıda konumlanarak aşağıda bulunan dört Co atomu ile bağ oluşturmuştur. Göz önünde bulundurulan tüm NiCo₄ nano kümelerinin toplamda 10 μ_B ’lik manyetik moment değere sahip olduğu hesaplanmıştır. Böylece NiCo₄ nano kümesinin düzlemde değil üç boyutlu yapısının daha kararlı olduğu tespit edilmiştir. Bader yüz analizi sonuçlarına göre Ni ve Co atomları arasında ihmal edilebilir miktarda yük transferi olduğu yapıdaki atomların kovalent bağ ile birbirlerine bağlandığı bulunmuştur. Bu nano yapıdaki ortalama Ni-Co ve Co-Co bağ uzunluğu değerleri sırasıyla 2,308 ve 2,241 Å’dur. NiCo₅ için belirlenen 10 farklı şekillenimden geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında Çizelge 1’de belirtilen 6 numaralı şekillenimin enerjistik olarak en kararlı nano kümeyi oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu nano kümede beş Co atomu ve bunlardan ikisine bağlı Ni atomu ile oluşan üçgen bir

yapı düzlemde olacak şekilde oluşmuştur. Ni ve Co atomlarının oluşturmuş oldukları nano kümeler 11 ve 13 μ_B 'lik toplam manyetik moment değerlerine sahiptir ve elde edilen en kararlı NiCo₅'in 11 μ_B 'lik manyetik moment değeri vardır. Elde edilen bu nano kümede atomlar birbirlerine -2,770 eV/atom'luk enerji ile bağlanmaktadır. Üçgenin köşesinde bulunan Ni atomuna üçgenin iç Co atomlarından toplamda 0,233 e⁻luk bir yük transferi olmuştur. Üçgenin diğer iki köşesinde bulunan Co atomlarının her birisi de iç Co atomlarından 0,12 e⁻ yük transfer etmişlerdir. Bu nano yapıdaki ortalama Ni-Co ve Co-Co bağ uzunluğu değerleri sırasıyla 2,244 ve 2,165 Å olarak bulunmuştur.

NiCo₆ için belirlenen 11 farklı şekillenimden geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında Çizelge 1'de belirtilen 10 numaralı şekillenimin enerjistik olarak en kararlı nano kümeyi oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu nano küme tıpkı NiCo₄ deki gibi düzlemde kalmayarak üç boyutlu bir yapı oluşturmuştur. Ni atomu dört Co atomu ile düzlemde kalırken, diğer iki Co atomu bunların üzerinde ve alttaki üçer atom ile üçlü bağ yapacak şekilde konumlanmışlardır. Bu nano yapıdaki ortalama Ni-Co ve Co-Co bağ uzunluğu değerleri sırasıyla 2,340 ve 2,253 Å olarak bulunmuştur. Nano kümenin toplam 14 μ_B 'lik manyetik moment değeri vardır ve atom başına düşen bağlanma enerjisi -3,050 eV/atom olarak hesaplanmıştır.

3.2. Ni₂Co_y (1 ≤ y ≤ 6) nano kümelerinin geometrik yapıları ve en kararlı durumlarının manyetik özellikleri

Bu kısımda nano küme içerisindeki Ni atom sayısı sabit iki olarak tutulurken, Co atom sayısı 1'den 6'ya kadar kademeli olarak artırılmış ve her bir Ni₂Co_y durumu için olası farklı atomik pozisyonlarda yapı

geometrik optimizasyona tabi tutulmuştur. Elde edilen toplam enerji ve atom başına bağlanma enerjisi hesaplamalarından enerjistik olarak en kararlı Ni₂Co_y nano kümesine karar verilmiştir.

Ni₂Co için belirlenen 3 farklı şekillenimden geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında Çizelge 1'de belirtilen 3 numaralı şekillenimin enerjistik olarak en kararlı nano kümeyi oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu nano küme, NiCo₂ nano kümesinde de olduğu gibi üç atomdan oluşan bir üçgen şekline sahiptir ve her bir Ni atomu Co atomundan 0,062 e⁻ yük almıştır. Ni ve Co atomlarının birbirlerine göre konumu nano kümenin toplam manyetik momentine de etki etmiştir ve incelenen Ni₂Co nano kümeleri 3 ve 5 μ_B 'lik toplam manyetik moment değerlerine sahiptir.

Bunlardan kararlı olan üçgen yapı $3 \mu_B$ 'lik toplam manyetik moment değerine sahiptir ki bu da doğrusal Ni_2Co zincirlerinin dışındaki atomlarda kalan paylaşılmamış elektronların kümenin toplam manyetik moment değerini artırdığını göstermektedir. Elde edilen bu nano kümede atomlar birbirlerine $-1,956$ eV/atom'luk enerji ile bağlanmaktadır ve bu enerji değeri $NiCo_2$ nano kümesindeki atom başına bağlanma enerjisi değerine ($-1,978$ eV/atom) oldukça yakındır. Bu nano yapıdaki ortalama Ni-Co ve Ni-Ni bağ uzunluğu değerleri sırasıyla $2,169$ ve $2,241$ Å olarak belirlenmiştir.

Ni_2Co_2 için 10 farklı şekillenim belirlenmiş ve her biri için ayrı ayrı geometrik optimizasyon hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar sonrasında Çizelge 1'de belirtilen 5 numaralı şekillenimin, enerjistik olarak en kararlı Ni_2Co_2 nano kümesini oluşturduğu tespit edilmiştir. Elde edilen Ni_2Co_2 nano kümesi, karşılıklı Co_2 ve Ni_2 dimerlerinin birleşmesinden oluşan dikdörtgen bir yapıdır. Bu yapıda, Co dimer bağ uzunluğu $2,109$ Å, Ni dimer bağ uzunluğu $2,242$ Å ve Ni-Co bağ uzunlukları da $2,139$ Å olarak hesaplanmıştır. Küme içerisinde bulunan Ni atomlarına Co atomlarından $0,600 e^-$ 'luk yük transferi gerçekleşmiştir. Göz önünde bulundurulan 10 farklı Ni_2Co_2 nano küme için 6, 7 ve $8 \mu_B$ 'lik toplam manyetik moment değere sahip yapı elde edilmiş ve enerjistik olarak en kararlı ($-2,331$ eV/atom bağlanma enerjisi) Ni_2Co_2 nano kümesinin $8 \mu_B$ 'lik manyetik moment değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Beş atomdan oluşan Ni_2Co_3 nano kümesi için başlangıçta 8 farklı şekillenim belirlenmiş ve geometrik optimizasyon hesaplamaları yapılmıştır. Bu şekillenimlerin görünümleri Şekil 2'de ve elde edilen enerji değerleri, toplam manyetik moment değerleri ile atomlar arasındaki bağ uzunlukları Çizelge 1'de verilmiştir. Yapılan hesaplamalar Ni_2Co_3 nano kümesi için 6 numaralı geometrik düzenin enerjistik olarak en kararlı olduğu ve atomların birbirlerine en sıkı şekilde bağlandıklarını ($-2,596$ eV/atom bağlanma enerjisi) göstermektedir. Bu yapıda Co atomları $Co-Co=2,267$ Å bağ uzunluğu ile üçgen oluştururken, Ni atomları bu üçgene üçgenin iki farklı kenarından $2,220$ Å bağ Ni-Co bağ uzunluğu ile bağlanmaktadır ve

nano küme $9 \mu_B$ 'lik manyetik moment değerine sahiptir. Bader yük analizi sonuçlarına göre yapı içerisindeki Ni atomlarının her birine Co atomlarından $0,195 e^-$ 'luk yük geçişi olmuştur.

Dokuz farklı başlangıç şekillenimi için geometrik optimizasyon hesaplamaları yapılan altı atomlu Ni_2Co_4 nano kümesi için enerjistik olarak en kararlı yapı Şekil 2'de gösterilen ve Çizelge 1'de özellikleri verilen 5 numaralı yapı olarak belirlenmiştir. Görüldüğü üzere Ni_2Co_4 nano kümesinde

Co atomları 2,218 Å kenara sahip bir kare yapı oluşturmuş ve Ni atomları da bu düzlemdeki karenin üst ve alt yüzeylerinden Co atomlarına 2,332 Å'luk bağ uzunluğu ile bağlanmışlardır. Bu nano küme için hesaplanan bağlanma enerjisi değeri atom başına -3,028 eV'tur.

Ni₂Co₅ için 9 farklı şekillenim belirlenmiş ve her biri için ayrı ayrı geometrik optimizasyon hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar sonrasında Çizelge 1'de ve Şekil 2'de belirtilen 5 numaralı şekillenimin, enerjistik olarak en kararlı Ni₂Co₅ nano kümesini oluşturduğu tespit edilmiştir. Elde edilen Ni₂Co₅ nano kümesi düzlemde kalmayıp üç boyutta geometrik bir yapı oluşturmuştur. Bu yapıda, Co-Co bağ uzunluğu 2,325 Å ve Ni-Co dimer bağ uzunluğu da 2,320 Å olarak hesaplanmıştır. Küme içerisinde bulunan Ni atomlarına Co atomlarından 0,150 e⁻ yük transferi gerçekleşmiştir. Göz önünde bulundurulan 9 farklı Ni₂Co₅ nano küme için 11 ve 13 μ_B'lik toplam manyetik moment değere sahip yapı elde edilmiş ve enerjistik olarak en kararlı (-3,164 eV/atom bağlanma enerjisi) Ni₂Co₅ nano kümesinin 13 μ_B'lik manyetik moment değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Ni₂Co₆ için toplamda 11 farklı başlangıç nano kümesi belirlenmiş ve geometrik optimizasyon hesaplamaları koşturtulmuştur. Hesaplamalar sonrasında Çizelge 1 ve Şekil 2'de belirtilen 10 numaralı şekillenimin en düşük enerjili duruma karşılı geldiği bulunmuştur. Elde edilen Ni₂Co₆ nano kümesinde atom başına bağlanma enerjisi -3,282 eV olarak bulunmuştur ve toplam 14 μ_B'lik manyetik moment değere sahip bu yapıda Ni-Co arası bağ uzunluğu 2,332 Å, Co-Co arası bağ uzunluğu da 2,306 Å olarak ölçülmüştür.

3.3. Ni₃Co_y (1 ≤ y ≤ 6) nano kümelerinin geometrik yapıları ve en kararlı durumlarının manyetik özellikleri

Nano küme içerisinde nikel sayısının üç olarak sabit tutulduğu ve kobalt sayısının birden altıya kadar artırılarak farklı başlangıç atomik pozisyonları için yapılan Ni₃Co_y nano kümelerine ait hesaplama sonuçları ve optimizasyon sonrası şekillenimler sırasıyla Çizelge 1'de ve Şekil 3'te verilmiştir.

Ni₃Co nano kümesi için yapılan geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında üç Ni ve bir Co atomundan oluşan paralelkenar yapının (Şekil 3) enerjistik olarak en kararlı yapı olduğu ve Co atomunun tam karşısında bulunan Ni atomunun 0,142 e⁻ yük aldığı bulunmuştur. Nano küme

toplamda 5 μ_B 'lik manyetik moment değere sahiptir ve atomlar birbirlerine $-2,238$ eV/atom'luk bir enerji ile bağlanmaktadır. Ni-Co arası bağ uzunluğu 2,207 Å, Ni-Ni arası bağ uzunluğu ise 2,208 Å olarak ölçülmüştür. Ni₃Co₂ nano kümesi için 10 farklı başlangıç şekillenimi belirlenmiştir ve yapılan geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında üç Ni ve bir Co atomundan oluşan kare yapı üzerine tutunan Co yapısından oluşan üç boyutlu yapının (Şekil 3) enerjistik olarak en kararlı yapı olduğu ve yapıdaki her bir Ni atomunun 0,106 e⁻ yük aldığı bulunmuştur. Nano küme toplamda 8 μ_B 'lik manyetik moment değere sahiptir ve atomlar birbirlerine $-1,512$ eV/atom'luk bir enerji ile bağlanmaktadır. Ni-Co arası bağ uzunluğu 2,314 Å, Ni-Ni arası bağ uzunluğu 2,276 Å ve Co-Co arası bağ uzunluğu 2,158 Å olarak ölçülmüştür.

Ni₃Co₃ nano kümesi için başlangıçta 8 farklı şekillenim belirlenmiştir. Yapılan geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında Çizelge 1'de ve Şekil 3'te gösterilen 7 numaralı şekillenimin taban durum olduğu belirlenmiştir. Bu yapı üç Co atomunun oluşturduğu üçgen yapının kenarlarından bağlanan Co atomlarının oluşturduğu düzlemde kalan üçgen bir yapı olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapı içerisindeki her bir Ni atomuna Co atomlarından 0,213 e⁻ yük transferi gerçekleşmiştir. Nano küme toplamda 9 μ_B 'lik manyetik moment değere sahiptir ve atomlar birbirlerine $-1,208$ eV/atom'luk bir enerji ile bağlanmaktadır. Ni-Co arası bağ uzunluğu 2,197 Å, Ni-Ni arası bağ uzunluğu ise 2,288 Å ve Co-Co arası bağ uzunluğu 2,094 Å olarak ölçülmüştür.

Ni₃Co₄ nano kümesi için yapılan geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında üç Ni atomunun zincir oluşturduğu ve bu zincir etrafında konumlanan dört Co atomu ile oluşan altıgen yapının (Şekil 3) enerjistik olarak en kararlı yapı olduğu ve altıgenin kenarlarında bulunan iki Ni atomunun her birinin 0,131 e⁻ yük aldığı, ortadaki Ni atomunun ise hiç yük alışverişi yapmadığı bulunmuştur. On farklı şekillenim için yapılan hesaplamalar sonrasında Ni₃Co₄ nano kümelerinin 6, 10 ve 12 μ_B 'lik toplam manyetik moment değerlerine sahip oldukları ve en kararlı yapının 10 μ_B 'lik manyetik momentli yapı olduğu bulunmuştur. Kararlı Ni₃Co₄ nano kümesinde atomların birbirlerine $-0,878$ eV/atom'luk bir enerji ile bağlandığı, Ni-Co arası bağ uzunluğunun 2,213 Å, Ni-Ni arası bağ uzunluğunun 2,350 Å ve Co-Co arası bağ uzunluğu 2,123 Å olarak hesaplanmıştır.

Ni₃Co₅ nano kümesi için 10 farklı başlangıç şekillenimi belirlenmiştir ve yapılan geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında Co atomlarının ortada kümeleştiği ve bu kümenin dışından da Ni atomlarının bağlanmış olduğu yapının (Şekil 3) enerjistik olarak en kararlı yapı olduğu bulunmuştur. Nano küme toplamda 13 μ_B 'lik manyetik moment değere sahiptir ve atomlar

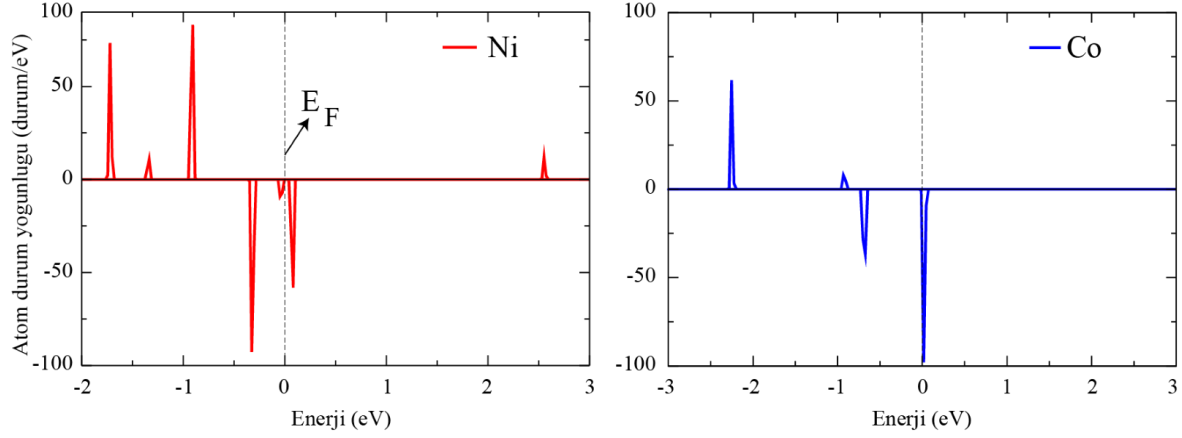
birbirlerine $-1,102$ eV/atom'luk bir enerji ile bağlanmaktadır. Ni-Co arası bağ uzunluğu $2,320$ Å ve Co-Co arası bağ uzunluğu $2,350$ Å olarak ölçülmüştür.

Ni_3Co_6 nano kümesi için başlangıçta 13 farklı şekillenim belirlenmiştir. Yapılan geometrik optimizasyon hesaplamaları sonrasında Çizelge 1 ve Şekil 3'te gösterilen 8 numaralı şekillenimin taban durum olduğu belirlenmiştir. Bu yapıda da Co atomları Ni_3Co_5 nano kümesindeki gibi ortada kümeleşmekte ve Ni atomları bu kümeye dışarıdan bağlanmaktadır. Yapıda bulunan her bir Ni atomuna Co atomlarından $0,150 e^-$ yük transferi gerçekleşmiştir. Nano küme toplamda $14 \mu B$ 'lik manyetik moment değere sahiptir ve atomlar birbirlerine $-1,013$ eV/atom'luk bir enerji ile bağlanmaktadır. Ni-Co arası bağ uzunluğu $2,337$ Å, Ni-Ni arası bağ uzunluğu ise $2,330$ Å ve Co-Co arası bağ uzunluğu $2,246$ Å olarak ölçülmüştür.

3.4. En kararlı Ni_xCo_y ($1 \leq x \leq 3$; $1 \leq y \leq 6$) nano kümelerinin elektronik özellikleri

Çizelge 2'de Ni, Co tek atomların, NiCo dimerinin ve enerjistik olarak kararlı bulunan Ni_xCo_y nano kümelerinin HOMO, LUMO enerji seviyeleri ve bu enerji seviyeleri arasındaki farklar spin-yukarı ve spin-aşağı durumlar için verilmiştir. Çizelgenin en son sütununda ise spin-yukarı ve spin-aşağı durumlar da göz önünde bulundurularak nano kümenin toplam HOMO-LUMO enerji seviyeleri farkı verilmiştir. Görüldüğü üzere bu tez çalışmasında ele alınan Ni_xCo_y nano kümelerinin hiçbirinde Fermi enerjisi HOMO ya da LUMO enerji seviyesi ile çakışmamaktadır. Yapılan standart PBE hesaplamalarında dahi HOMO-LUMO enerji boşluğunun oluştuğu bulunmuştur. Özellikle spin-yukarı durum için HOMO-LUMO enerji boşluğu spin-aşağı duruma kıyasla çok daha büyüktür. Bu tez çalışmasında yapılan hesaplamaların standart PBE yaklaşımı ile yapıldığı göz önünde bulundurulursa, hibrit fonksiyonlarında kullanıldığı HSE (Heyd-Scuseria-Ernzerhof) yaklaşımda bu farkın daha da fazla olacağı düşünülmektedir.

Şekil 4'te $20 \times 20 \times 20$ Å³'lük bir hacim içerisinde izole edilmiş Ni ve Co atomlarına ait durum yoğunluğu grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde izinli enerji değerlerine atomda bulunan orbitallerin katkıları durum yoğunluğu şiddeti şeklinde gösterilmektedir. Ni atomunun spin-yukarı durum için HOMO-LUMO enerji farkı $3,4678$ eV iken spin-aşağı durumda bu fark $0,1116$ eV olarak hesaplanmıştır. İzole Co atomunda HOMO-LUMO enerji farkları spin-yukarı durum için $4,0302$ eV iken spin-aşağı durumda $0,7013$ eV'tur.

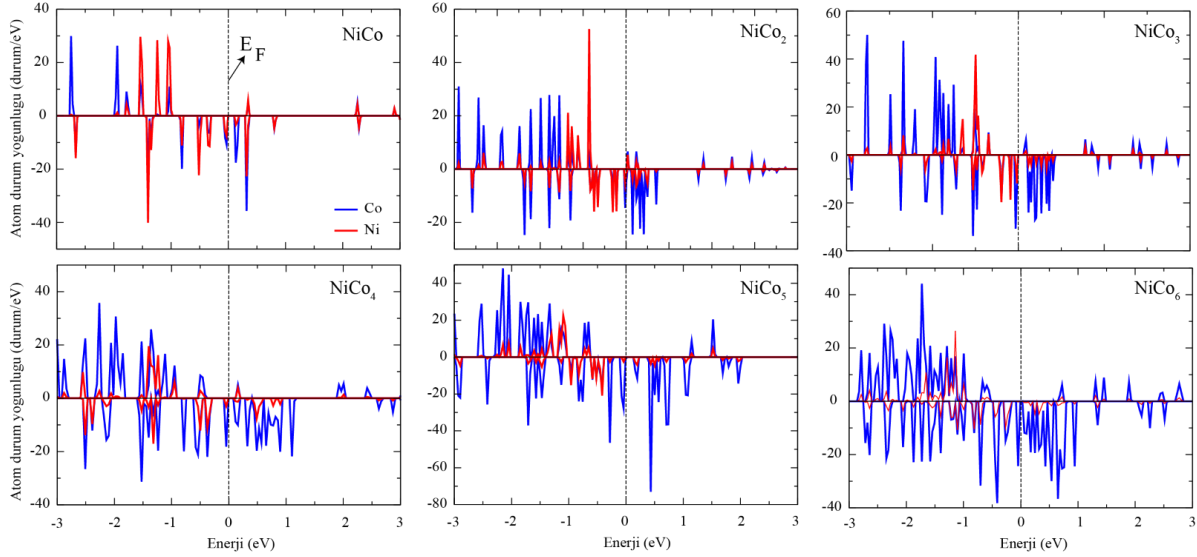


Şekil 4 : İzole Ni ve Co atomlarının durum yoğunluğu grafiği. Fermi enerjisi 0 eV enerji değerine kaydırılmıştır.

Çizelge 2: Geometrik optimizasyon sonrası enerjistik olarak en kararlı bulunan Ni_xCo_y yapılarının spin-yukarı ve spin-aşağı durumlarına ait HOMO, LUMO enerji değerleri ve bu enerji seviyeleri arasındaki farklar verilmiştir.

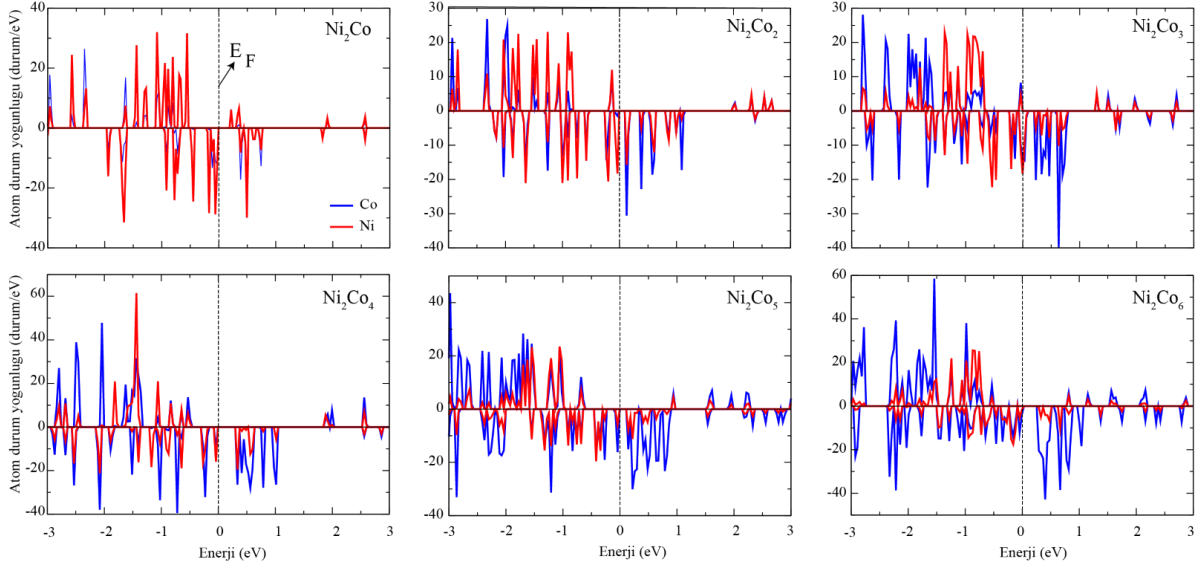
Nano Küme	Spin-yukarı			Spin-aşağı			Toplam
	HOMO (eV)	LUMO (eV)	HOMO-LUMO farkı (eV)	HOMO (eV)	LUMO (eV)	HOMO-LUMO farkı (eV)	HOMO-LUMO farkı (eV)
Ni	-4,4195	-0,9517	3,4678	-3,5430	-3,4314	0,1116	0,1116
Co	-5,2253	-1,1951	4,0302	-4,9919	-4,2907	0,7013	0,7013
NiCo	-4,5302	-3,1620	1,3681	-3,5514	-3,3662	0,1852	0,1852
NiCo ₂	-4,1715	-3,2788	0,8928	-3,3314	-3,1703	0,1611	0,0526
NiCo ₃	-4,4671	-3,6087	0,8583	-3,8164	-3,5311	0,2853	0,2077
NiCo ₄	-4,3084	-3,6981	0,6103	-3,9116	-3,7256	0,1861	0,1861
NiCo ₅	-4,6909	-2,8781	1,8127	-4,0673	-3,8490	0,2183	0,2183
NiCo ₆	-4,3798	-3,0941	1,2856	-3,8457	-3,7198	0,1259	0,1259
Ni ₂ Co	-3,8882	-3,1115	0,7768	-3,3729	-2,9364	0,4365	0,2614
Ni ₂ Co ₂	-4,5436	-2,3932	2,1504	-4,4534	-4,2786	0,1748	0,1748
Ni ₂ Co ₃	-3,9467	-2,6026	1,3441	-3,9169	-3,8694	0,0475	0,0475
Ni ₂ Co ₄	-4,5563	-2,1600	2,3964	-4,0843	-3,6989	0,3854	0,3854
Ni ₂ Co ₅	-4,4650	-2,8646	1,6003	-3,8507	-3,6495	0,2012	0,2012
Ni ₂ Co ₆	-4,3668	-3,0139	1,3529	-3,8617	-3,5284	0,3333	0,3333
Ni ₃ Co	-4,4950	-3,4037	1,0913	-4,1079	-3,8105	0,2974	0,2974
Ni ₃ Co ₂	-4,3656	-3,5914	0,7742	-3,9348	-3,7606	0,1743	0,1743
Ni ₃ Co ₃	-4,8489	-2,8859	1,9630	-4,0012	-3,9756	0,0256	0,0256
Ni ₃ Co ₄	-4,4330	-3,2793	1,1538	-3,7083	-3,6890	0,0193	0,0193
Ni ₃ Co ₅	-4,6909	-2,8781	1,8127	-4,0673	-3,8490	0,2183	0,2183
Ni ₃ Co ₆	-4,4375	-3,0371	1,4003	-3,7171	-3,5549	0,1622	0,1622

Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de sırasıyla NiCo_y, Ni₂Co_y ve Ni₂Co_y nano kümeleri için atom izdüşümlü durum yoğunluğu grafikleri spin-yukarı ve aşağı durumlar için ayrı ayrı verilmiştir.

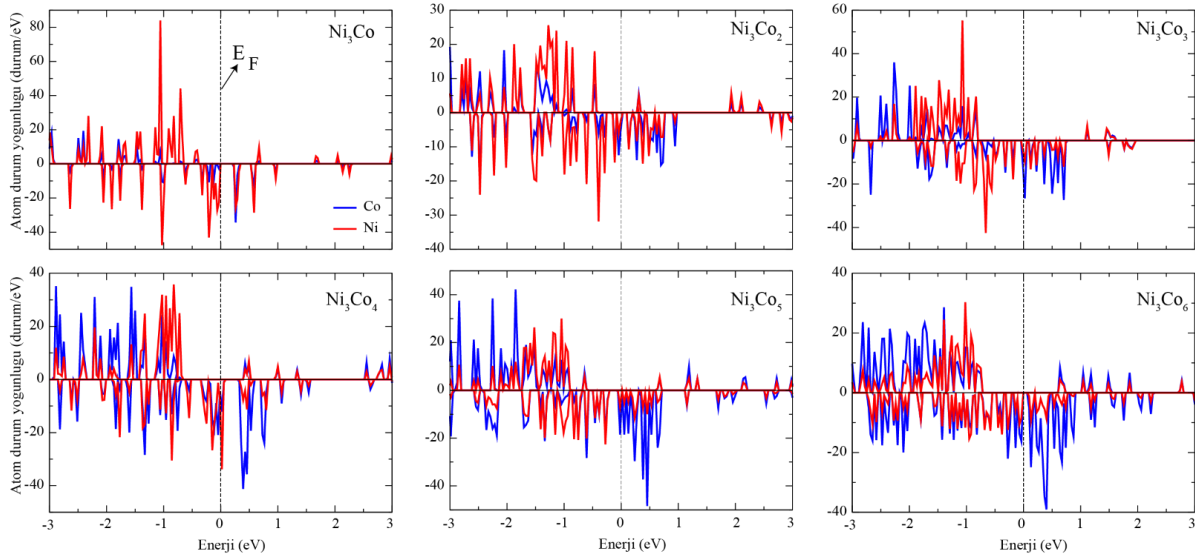


Şekil 5 : İzole NiCo_y (1 ≤ y ≤ 6) nano kümelerinin durum yoğunluğu grafiği. Kırmızı renk Ni atomunun, mavi renk Co atomlarının durum yoğunluğunu belirtmektedir. Fermi enerjisi 0 eV enerji değerine kaydırılmıştır.

NiCo_y nano kümelerinde y=1, 2 ve 3 için spin yukarı durumlarda HOMO ve LUMO enerji seviyelerine büyük katkının Ni atomlarından geldiği, y>3 durumlarında ise Co atomunun katkısının daha baskın olduğu görülmektedir. NiCo_y nano kümelerinde spin-aşağı durumlarda yine y=1,2 ve 3 için HOMO enerji seviyelerinde baskın katkı Ni atomlarından gelmekteyken LUMO enerji seviyelerinde Ni ve Co atomlarının orbital katkısı eşit derecede olmaktadır. Nano küme içerisindeki Co atom sayısı arttıkça ise (y>3 için) spin-aşağı durumlarda hem HOMO hem de LUMO enerji seviyelerine büyük katkı Co atomlarının orbitallerinden gelmektedir. Bu sonuçlar spin yukarı enerji seviyelerini ve HOMO-LUMO aralığını Ni atomunun, spin-aşağı enerji seviyelerini de Co atomlarının orbitallerinin belirlediğini göstermektedir.



Şekil 6 : İzole Ni₂Co_y (1 ≤ y ≤ 6) nano kümelerinin durum yoğunluğu grafiği. Kırmızı renk Ni atomunun, mavi renk Co atomlarının durum yoğunluğunu belirtmektedir. Fermi enerjisi 0 eV enerji değerine kaydırılmıştır.



Şekil 7 : İzole Ni₃Co_y (1 ≤ y ≤ 6) nano kümelerinin durum yoğunluğu grafiği. Kırmızı renk Ni atomunun, mavi renk Co atomlarının durum yoğunluğunu belirtmektedir. Fermi enerjisi 0 eV enerji değerine kaydırılmıştır.


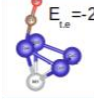


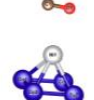
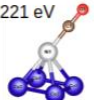
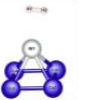

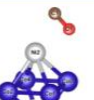

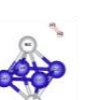

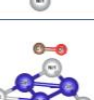
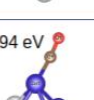


Nikel atomunun sayısının arttığı Ni₂Co_y nano kümelerine ait durum yoğunluğu grafikleri şekil 6 da verilmiştir. Nikel atomunun enerji seviyelerine olan orbital katkısı kobalt atomlarına kıyasla baskın bir şekilde artmıştır. Özellikle y=1 ve 2 için spin-yukarı durumlarda HOMO ve LUMO enerji seviyelerine Ni atomlarının katkısı daha fazladır. Nano küme içerisinde artan Co atom sayısı kendisini spin-aşağı durumlarda HOMO ve LUMO enerji seviyelerinde göstermektedir. Benzer

davranış Ni₃Co_y nano kümelerinde de görülmektedir. Kobalt atomuna ait orbitallerin spin-aşağı durumda LUMO ve daha yüksek olan işgal edilmemiş enerji seviyelerinde daha baskın olarak katkı verdiği, Ni atomu orbitallerinin ise HOMO ve daha düşük enerjili işgal edilmiş enerji seviyelerinde katkı verdiği bulunmuştur.

3.5. Ni_xCo_y Nano Kümelerinin CO ve H₂ Gaz Molekülleri ile Etkileşimi

Bu kısımda seçili Ni_xCo_y nano kümeleri ile CO ve H₂ gaz moleküllerinin etkileşimi incelenmiştir. Bu inceleme için ilk olarak izole CO ve H₂ gaz moleküllerinin enerjisi hesaplandı. Daha sonra NiCo₄, Ni₂Co₄ ve Ni₃Co₃ nano kümeleri ile olası tutunma enerjilerinin belirlenebilmesi için seçili gaz molekülleri nano kümelerin farklı bölgelerine yaklaşık 2Å mesafe olacak şekilde yerleştirildi ve geometrik optimizasyon hesaplaması yapıldı. Hesaplama metodu başlığı altında verilen E_{t.e.} eşitliği kullanılarak hesaplanan tutunma enerjilerinden mutlak değerce büyük olan E_{t.e.} değeri gaz molekülünün nano kümeyle o bölgeden daha güçlü tutunacağını belirtmektedir.

Şekil 8, CO ve H₂ moleküllerinin NiCo₄, Ni₂Co₄ ve Ni₃Co₃ nano kümeleri ile etkileşim öncesi ve geometrik optimizasyon sonrası oluşturmuş oldukları yapıları göstermektedir. Ayrıca, CO ve H₂ moleküllerinin NiCo₄, Ni₂Co₄ ve Ni₃Co₃ nano kümelerine tutunma enerjisi değerleri de şekil içerisinde gösterilmektedir. Elde edilen hesaplama sonuçlarına göre CO molekülü NiCo₄, Ni₂Co₄ ve Ni₃Co₃ nano kümeleri ile güçlü bir bağ oluşturmaktadır. CO molekülü nano yapılara nikel atomu üzerinden karbon atomunun bağlanması ile tutunmaktadır. Hidrojen molekülü yine nikel atomları üzerinden bağlanmaktadır ve elde edilen tutunma enerjisi değerleri Ni_xCo_y nano kümelerinin hidrojen depolamada kullanılabilir olduklarını göstermektedir.

	Optimizasyon Öncesi	Optimizasyon Sonrası	Optimizasyon Öncesi	Optimizasyon Sonrası
	CO		H_2	
$NiCo_4$		 $E_{1,e} = -2,084 \text{ eV}$		 $E_{1,e} = -0,080 \text{ eV}$
		 $E_{1,e} = -2,221 \text{ eV}$		 $E_{1,e} = -0,840 \text{ eV}$
Ni_2Co_4		 $E_{1,e} = -1,684 \text{ eV}$		 $E_{1,e} = -0,259 \text{ eV}$
Ni_3Co_3		 $E_{1,e} = -2,294 \text{ eV}$		 $E_{1,e} = -1,268 \text{ eV}$

Şekil 8: CO ve H_2 moleküllerinin $NiCo_4$, Ni_2Co_4 ve Ni_3Co_3 nano kümeleri ile optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası oluşan yapılar ve CO ve H_2 moleküllerinin $NiCo_4$, Ni_2Co_4 ve Ni_3Co_3 nano kümelerine tutunma enerjisi değerleri.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, Ni_xCo_y ($1 \leq x \leq 3$; $1 \leq y \leq 6$) nano kümelerinin olası geometrik yapıları oluşturularak bu nano yapılardan enerjistik olarak kararlı Ni_xCo_y nano kümelerinin bulunması ve bu nano kümelerin CO, H_2 vb gibi gaz molekülleri ile etkileşiminin incelenmesi yapılmıştır. Bu tez çalışmasında, ilk ilkeler metodu ve kuantum mekaniğine dayalı yoğunluk fonksiyoneli teorisi kullanılmış ve nano yapıların özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kobalt atomlarının nano küme içerisinde kendi aralarında kümeleşme eğiliminde olduğunu ve nikel atom sayısı arttıkça da nikel atomlarının oluşan bu kobalt kümesinin dışında yer aldığını göstermektedir. Ayrıca, oluşan enerjistik olarak en kararlı Ni_xCo_y nano kümelerin, nano yapı içerisindeki atom sayısı arttıkça düzlemde büyümenin devam etmediği ve üç boyutta kümeleşmenin olduğu elde edilmiştir. Nano küme içerisindeki Ni ve Co atomlarının bulunduğu konuma ve bu atomların birbirleri ile yapmış oldukları bağlanmaya göre nano kümenin sahip olduğu toplam manyetik moment değerinin değiştiği, fakat incelenen Ni_xCo_y nano kümelerin hiç birisinin manyetik olmayan bir düzende bulunmadığı elde edilmiştir. Böylece elde edilen bu manyetik nano kümelerin pek çok uygulamada kullanılabilir olacağı sonucuna varılmıştır.

Enerjistik kararlı nano kümelerin HOMO-LUMO enerji seviyeleri, bu enerji seviyelerine katkı veren atomların durum yoğunlukları ve Bader yük analizi ile küme içerisindeki atomlar arasındaki yük geçişleri incelenmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar Ni_xCo_y nano kümelerinin durum yoğunluğu grafiklerinde nikel atomunun özellikle spin-yukarı durumlar için HOMO ve LUMO enerji seviyelerinde baskın olduğunu, spin-aşağı durumlarda ise kobalt atomunun orbital katkısının daha fazla olduğunu söylemektedir. Bader yük analizi hesaplamalarından ise Ni_xCo_y nano kümelerinde kobalt atomlarından nikel atomlarına yük transferi olduğu elde edilmiştir.

Seçili Ni_xCo_y nano kümelerinden NiCo₄, Ni₂Co₄ ve Ni₃Co₃ yapıları etrafına CO ve H₂ gaz molekülleri yerleştirilmiş ve geometrik optimizasyon hesaplaması koşturulmuştur. Sonuçlar, CO molekülünün nano kümelere Ni atomu üzerinden güçlü kimyasal bağ ile bağlandığını ve bu bağlanmanın karbon atomları tarafından gerçekleştirildiğini göstermektedir. Nano yapılar ile H₂ molekülünün etkileşmesinde de küme içerisindeki Ni atomlarının etkin olduğu ve H₂ molekülünün NiCo₄, Ni₂Co₄ ve Ni₃Co₃ nano kümelerine görece güçlü bağlandığı ve Ni_xCo_y nano kümelerinin hidrojen depolamada kullanılabilir nano yapılar olduğu ortaya çıkartılmıştır. Özellikle Ni₃Co₃ nano kümesi ile etkileşime giren H₂ gaz molükülünün H atomlarına ayrıldığı ve düzlemsel Ni₃Co₃ nano kümesinin şeklini değiştirerek üç boyutlu hale getirdiği bulunmuştur. Bu çalışmada elde edilen veriler, tez önerisinde sunulan amaçlara ulaşıldığını ve sonuçların deneysel çalışmalara ışık tutacak nitelikte olduğunu ortaya koymaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: FEF-21028

YAZARLARIN KATKILARI

M.K.: Araştırma, formel analiz, kaynaklar, yöntem, orijinal taslak hazırlama.

M.F.A.: Araştırma, formel analiz, kaynaklar, şekillerin çizimi ve düzenleme.

I.I.A.: Araştırma, formel analiz, kaynaklar, şekillerin çizimi ve düzenleme, orijinal taslak hazırlama.

F.E.: Araştırma, kavramsallaştırma, doğrulama, yazılım, yazı - gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- Amorim, R. V. de, Batista, K. E. A., Nagurniak, G. R., Orenha, R. P., Parreira, R. L. T., & Piotrowski, M. J.. CO, NO, and SO Adsorption on Ni Nanoclusters: a DFT Investigation. *Dalton Transactions* (2020).
- Aslanzadeh, S. (2016). Transition metal doped ZnO nanoclusters for carbon monoxide detection: DFT studies. *Journal of molecular modeling*, 22(7), 160.
- Aysan, I. I., Gorkan, T., Ozdemir, I., Kadioglu, Y., Gökoğlu, G., & Aktürk, E. (2020). Electronic structure, cohesive and magnetic properties of iridium oxide clusters adsorbed on graphene. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 101, 107726.
- Blöchl, P. E. (1994). Projector augmented-wave method. *Physical review B*, 50(24), 17953.
- Chen, X., Sun, Z., Zhang, H., Onori, S. (2020). Effect of metal atoms on the electronic properties of metal oxide nanoclusters for use in drug delivery applications: a density functional theory study. *Molecular Physics*, 118(13), e1692150.
- Ersan, F., Akcay, A., Gökoğlu, G., & Aktürk, E. (2015). Interactions of h-AlN monolayer with platinum, oxygen, and their clusters. *Chemical Physics*, 455, 73-80.
- Garzón, I. L., Michaelian, K., Beltrán, M. R., Posada-Amarillas, A., Ordejón, P., Artacho, E., Soler, J. M. (1998). Lowest energy structures of gold nanoclusters. *Physical review letters*, 81(8), 1600.
- Grimme, S. (2006). Semiempirical GGA-type density functional constructed with a long-range dispersion correction. *Journal of computational chemistry*, 27(15), 1787-1799.
- Hanwell, M. D., Curtis, D. E., Lonie, D. C., Vandermeersch, T., Zurek, E., & Hutchison, G. R. (2012). Avogadro: an advanced semantic chemical editor, visualization, and analysis platform. *Journal of cheminformatics*, 4, 1-17.
- Hafner, J., & Kresse, G. (1997). The vienna ab-initio simulation program VASP: An efficient and versatile tool for studying the structural, dynamic, and electronic properties of materials. *In Properties of Complex Inorganic Solids (pp. 69-82)*. Boston, MA: Springer US.
- Henkelman, G., Arnaldsson, A., & Jónsson, H. (2006). A fast and robust algorithm for Bader decomposition of charge density. *Computational Materials Science*, 36(3), 354-360.
- Huang, Q., Liu, H., An, W., Wang, Y., Feng, Y., & Men, Y. (2019). Synergy of a metallic NiCo dimer anchored on a C₂N-graphene matrix promotes the electrochemical CO₂ reduction reaction. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(23), 19113-19121.
- Kadioglu, Y. (2021). Ultra small fluorine carbon nanoclusters by density functional theory. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 5(2), 162-172.
- Kadioglu, Y., Demirkıran, A., Yaraneri, H., & Aktürk, O. Ü. (2014). Investigation of NH₃ and H₂ adsorption on Pt_n (n= 2–15, 18, 22, 24) clusters by using density functional theory. *Journal of alloys and compounds*, 591, 188-200.

- Kadioğlu, Y., Gökoğlu, G., & Aktürk, O. Ü. (2017). Molecular adsorption properties of CO and H₂O on Au-, Cu-, and AuCu-doped MoS₂ monolayer. *Applied Surface Science*, 425, 246-253.
- Kresse, G., & Furthmüller, J. (1996). Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Physical review B*, 54(16), 11169.
- Monkhorst, H. J., & Pack, J. D. (1976). Special points for Brillouin-zone integrations. *Physical review B*, 13(12), 5188.
- Netskina, O. V., Tayban, E. S., Rogov, V. A., Ozerova, A. M., Mukha, S. A., Simagina, V. I., Komova, O. V. (2021). Solid-state NaBH₄ composites for hydrogen generation: Catalytic activity of nickel and cobalt catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(7), 5459-5471.
- Nwaji, N., Zewdie, G. M., Gwak, J., Kang, H., Tufa, L. T., Choi, Y., Lee, J. (2024). Dimeric NiCo single-atom anchored on ultrathin N-doped 2D molybdenum carbide boosted performance in solid-state supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 83, 110671.
- Perdew, J. P., Burke, K., & Ernzerhof, M. (1996). Generalized gradient approximation made simple. *Physical review letters*, 77(18), 3865.
- Rad A. S., Ayub K.. Ni adsorption on Al₁₂P₁₂ nano-cage: A DFT study. *Journal of Alloys and Compounds* 678 (2016) 317e324.
- Rad A. S., Aghaei S. M., Poralijan V., Peyravi M., Mirzaei M.. Application of pristine and Ni-decorated B₁₂P₁₂ nano-clusters as superior media for acetylene and ethylene adsorption: DFT calculations. *Computational and Theoretical Chemistry* 1109 (2017) 1–9.
- Ranjan, P., Dhail, S., Venigalla, S., Kumar, A., Ledwani, L., Chakraborty, T. (2015). A theoretical analysis of bi-metallic (Cu–Ag) nano alloy clusters invoking DFT based descriptors. *Materials Science-Poland*, 33(4), 719-724.
- Ranjan, P., Venigalla, S., Kumar, A., & Chakraborty, T. (2014). Theoretical Study of Bi-Metallic Ag M Au N; (M+ N= 2-8) Nano Alloy Clusters In Terms Of Dft Based Descriptors. *New Frontiers in Chemistry*, 23(2).
- Roothaan, C. C. J. (1960). Self-consistent field theory for open shells of electronic systems. *Reviews of modern physics*, 32(2), 179.
- Shamlouei, H. R., Nouri, A., Mohammadi, A., Tehrani, A. D. (2016). Influence of transition metal atoms doping on structural, electronic and nonlinear optical properties of Mg₁₂O₁₂ nanoclusters: A DFT study. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 77, 48-53.
- Shewchuk, J. R. (1994). An introduction to the conjugate gradient method without the agonizing pain.
- Vila, F., Rehr, J. J., Kas, J., Nuzzo, R. G., & Frenkel, A. I. (2008). Dynamic structure in supported Pt nanoclusters: real-time density functional theory and X-ray spectroscopy simulations. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 78(12), 121404.
- Wang Q., Lim K. H., Yang S., Yang Y., Chen Y.. Atomic carbon adsorption on Ni nanoclusters: a DFT study. *Theor Chem Acc* (2011) 128:17–24.
- Yang, J., Bao, C., Zhu, K., Yu, T., Li, F., Liu, J., Zou, Z. High catalytic activity and stability of nickel sulfide and cobalt sulfide hierarchical nanospheres on the counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Chemical Communications*, 50(37), (2014), 4824-4826.

Seasonal Effects of Abiotic Factors and Nutrient Sources on the Feeding Activity of the Harvester Ant Species *Messor semirufus* (André, 1883)

Sultan Ebru KAYA¹ , Yılmaz CAMLITEPE^{1*} 

¹Department of Biology, Faculty of Science, Trakya University, Edirne, Türkiye

Received: 23.11.2024, Accepted: 18.12.2024, Published: 30.12.2024

ABSTRACT

This study aims to investigate seasonal effects of abiotic factors and nutrient sources on the feeding activity of the harvester ant species *Messor semirufus* (André, 1883). Activation rhythms and feeding regimes were observed for *M. semirufus* workers in three seasons, spring, summer and autumn, for one year. Abiotic factor measurements were made every month and the recorded values were entered into follow-up tables. It was determined which plant seeds *M. semirufus* workers preferred from the plants naturally growing in the observed nest habitat. In addition, different food seeds that are not naturally found in the nest habitat of *M. semirufus* were placed near the nest and seed preferences among these were observed and noted. Activation of *M. semirufus* workers was at its maximum level when the soil temperature reached 30°C. Two plant families that *M. semirufus* prefers the most in the natural environment are the Poaceae (Grains) and Asteraceae (Daisy) seeds. On the other hand, in experimental studies on seed preferences, 12 types of seeds with different nutritional values, differing from the plants in the natural environment, were left around the *M. semirufus* nest. Of these, wheat, which contains 61% carbohydrates, was the most preferred seed by workers. The workers' second choice was flaxseed, which contains more oil. The later preferred seeds are oat, spinach seed, sesame, millet, chickpea seeds. Safflower, sunflower, rapeseed, hemp and broad bean are among the seeds that are not preferred.

Keywords: Harvester ants; Seasonal activity; Seed preference; Nutrient source; Abiotic factors.

Abiyotik Faktörlerin ve Besin Kaynaklarının Hasatçı Karınca *Messor semirufus* (André, 1883)'un Beslenme Aktivitesi Üzerindeki Mevsimsel Etkileri

ÖZ

Bu çalışmada abiyotik faktörlerin ve besin kaynaklarının bir hasatçı karınca türü olan *Messor semirufus* (André, 1883)'un beslenme aktivitesi üzerindeki mevsimsel etkileri incelenmiştir. Bir yıl boyunca *M. semirufus* için ilkbahar, yaz ve sonbahar aylarında olmak üzere 3 mevsim aktivasyon ritimleri ve beslenme rejimleri gözlemlenmiştir. Her ay abiyotik faktör ölçümleri yapılarak kaydedilen değerler takip çizelgelerine kaydedilmiştir. Gözlem yapılan yuva habitatında doğal olarak yetişen bitkilerden, *M. semirufus* türünün hangi bitki tohumlarını tercih ettiği saptanmıştır. Ayrıca, *M. semirufus* türünün yuva habitatında doğal olarak bulunmayan farklı besin tohumları da yuva yakınına konularak bunlar arasından tohum tercihleri gözlenerek not edilmiştir. *M. semirufus* işçilerinin toprak sıcaklığı 30°C'yi bulduğunda aktivasyonlarının maksimum düzeyde olduğu gözlenmiştir. *M. semirufus*'un doğal ortamda en çok tercih ettiği iki familya Poaceae (buğdaygiller) ve Asteraceae (papatyagiller) familyalarıdır. Tohum tercihlerine yönelik deneysel çalışmalarda, *M. semirufus* yuvası çevresine doğal ortamdaki bitkilerden ayrı, farklı besin değerlerinde 12

çeşit tohum bırakılmıştır. Bunlardan % 61 oranında karbonhidrat içeren buğday en çok tercih edilen olmuştur. İkinci sırada içeriği daha çok yağ olan keten tohumu olmuştur. Yulaf, ıspanak tohumu, susam, darı, nohut tohumları öncelikli türlerden sonra yuvaya taşınılan türlerdendir. Aspir, ayçiçeği, kolza, kenevir ve bakla ise tercih edilmeyen tohumlardandır.

Anahtar Kelimeler: Hasatçı karıncalar; Mevsimsel aktivite; Tohum tercihi; Besin kaynağı; Abiyotik faktörler.

1. INTRODUCTION

There are 168 valid taxa (134 species, 37 subspecies and 1 fossil species) belonging to the genus *Messor* of harvester ants, and they are distributed in the Palearctic, Afrotropical and Oriental regions (Bolton, 2023). The food source of the ant species grouped as harvester ants is the seeds they collect, so they play a significant role in seed dispersal (De Almeida et al., 2020), particularly in the open, arid and semi-arid areas that they are mainly distributed.

The spread of seeds in nature by harvester ants is called Myrmecochory. There is usually an elaiosome region on plant seeds that looks like a cover or sheath. The elaiosome is an oil-containing region that emits an odour or taste related to the content of the seed. Ants choose seeds by perceiving the nutrient content with the odour or taste they perceive from these regions. Myrmecophorous ants tear off the elaiosome, a soft, oily substance on the seed, and throw away the rest of the seed, making them successful seed dispersers. Although both harvester ants and Myrmecophorous ants have similar seed dispersal roles, the seed regions they feed on are different.

Despite having a wide range of choices in their diet, harvester ants discriminate among seeds to some extent. All other things being equal, there is a tendency to choose the plant with the most abundant seeds (Hahn & Maschwitz, 1985). In a study on the food selection and size of foraging workers of the harvester ant species *Messor bouvieri* (Willott et al., 2000; Silvestre et al., 2019), it was observed that the interaction between the ant and the seed depends on the availability of the seed and the size of the workers.

Ants generally continue to search for food throughout the year. Workers search for food especially in the mornings and at dusk, and are less active during the most humid and hot hours of the day. On the other hand, they are less active at low temperatures. In the summer months, they find food more often at night. This situation can continue in September and October. Ants have the ability to tolerate different temperatures during the day. Since ants are cold-blooded (ectothermic) creatures, temperature changes are important in their activities. For example, species with a high tolerance for heat generally show a diurnal lifestyle, whereas species with a low tolerance limit to heat exhibit a crepuscular - nocturnal lifestyle. Forests and wooded areas exhibit a heterogeneous structure throughout the day in terms of sunbathing and shade. Humid and open areas (meadows, areas with no trees or sparse trees) are more homogeneous and species that tolerate heat are more common in these areas.

According to functional activity changes, daily activity rhythms (circadian rhythm) can increase or decrease in various animals, plants and microorganisms to different degrees and at different times (Elwood & Mcluskey, 1963). Circadian rhythm, which is widely seen in living things, is an example of a biological clock mechanism. It is the regular occurrence of certain physiological events at 24-hour intervals even in the absence of an environmental stimulus such as sunlight. Communities are programmed to comply with

biological rhythms (Elwood & Mcluskey, 1963). Ant activity rhythms are generally adjusted according to environmental factors. Among the abiotic factors affecting activation; temperature (Sanders, 1972), humidity (Sharma et al., 2004), atmospheric pressure, general condition of the air, soil profile, soil moisture, and among the biotic factors, the most important one is vegetation (Sanders, 1972; Sudd & Franks, 1987; Sharma et al., 2004). Seasonal activation rhythms of ants are observed in three stages (Sanches et al., 2005): (1) Preparation for activation (pre – activation) (spring: February to April); (2) Activation (Summer season: April to September); and (3) Diapause (Autumn – Winter: October to February). In this study, we aimed to examine seasonal effects of abiotic factors and nutrient sources on the feeding activity of the harvester ants.

2. MATERIAL AND METHOD

Messor semirufus ants (**Figure 1**) build their nests in a wide variety of habitats such as agricultural lands, meadows, pastures, willow groves, poplar groves, and mixed forests. The nest of *M. semirufus* is a multi-entrance nest with an opening to the outside (**Figure 2**).



Figure 1: *Messor semirufus* workers (Photo: Kaya and Camlitepe, Edirne).



Figure 2: Multiple entry of *Messor semirufus* nest (Photo: Kaya and Camlitepe, Edirne).

Within the Balkan Campus of Trakya University (41.6373486, 26.6112102), activation rhythms and feeding regimes of a *M. semirufus* colony were observed in spring, summer and autumn throughout the year. Abiotic factors (ground temperature, air temperature, air humidity, general weather conditions) were measured every month and the effects of biotic factors such as vegetation were examined and the recorded values were entered into follow-up tables. The plant seeds *M. semirufus* workers preferred from the plants naturally growing in the observed nest habitat were recorded and identified. In addition, 12 different food seeds not naturally found in the *M. semirufus* nest habitat were placed near the nest and seed preferences among these were observed and recorded.

2.1. Monitoring of *M. semirufus* activation rhythm

The daily activation rhythms of the studied *M. semirufus* colony were recorded for 5 days a week (Monday - Tuesday - Wednesday - Thursday - Friday). Observations and measurements were made at the nest every 2 hours (07.00-09.00-11.00-13.00-15.00-17.00-19.00-21.00). Measurements and observations were made for 9 months in 3 seasons, namely spring: March, April, May; summer: June, July, August; and autumn: September, October, November, and the values were recorded in the relevant monitoring tables. The number of workers in activity was counted around the nest and at the nest entrance, within the area where *M. semirufus* dispersed during food collection. *M. semirufus* workers carrying food were also examined. How often *M. semirufus* collected food, how far from the nest they found the food, and how many worker ants brought the food to the nest were noted within the determined hours.

2.2. Seed preferences of *M. semirufus*

2.2.1. Order of preference of plant seeds collected from natural environment by *M. semirufus*

The first exits of *M. semirufus* workers from the nest were for the purpose of reconnaissance tour. First, it was observed which seed they preferred. The priorities of *M. semirufus* workers in seed preference and which seed they preferred more were recorded and compared. A ranking was made according to the order of priority in collecting and carrying seeds by workers to the nest. Seed varieties that *M. semirufus* workers did not prefer were also recorded. The number of paths created by workers during seed transportation was determined. The plants that *M. semirufus* workers preferred naturally in its habitat were observed by following the path columns they created. The plants that these seeds belonged to were identified.

2.2.2. Order of preference of offered seeds by *M. semirufus*

In the experiments conducted for the preference of different food seeds that are not naturally found in the nest habitat of *M. semirufus*. Wheat, flax, oat, safflower, chickpea, broad bean, sesame, millet, spinach seed, rapeseed, hemp, sunflower seeds were used. These seeds were placed around the determined nest, 1 m away from the nest entrance.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The observed *M. semirufus* workers actively started seed collection behaviour in April when the air temperature exceeded 17°C. In the spring, food collection behaviour started around 10:00 and continued until 18:00 in the evening. In July, when the summer temperatures were very effective, it was observed that approximately 1000 worker ants started searching for food and started collecting food at 08:00 in the morning. It was observed that they retreated to the nest at 11:00 when the temperature of the day increased significantly and did not come out until the coolness of the evening. This situation shows that *M. semirufus* workers avoid extreme heat even though it is active in the hot seasons of the year. In autumn, the food collection behaviour of *M. semirufus* workers, which routinely starts around 09:00, continues until 19:00 in the evening. This activation rhythm is consistent with other studies on harvester ants (Elwood & McClusley, 1963; Hölldobler, 1976; Hahn & Maschwitz, 1985; Retena & Cerda, 2000).

3.1. Differences in individual numbers and activation averages of *M. semirufus* according to seasons

Messor semirufus workers is not active on the soil during the winter months. The average number of workers in the spring season is around 90 (**Figure 3**), the average number of workers in the summer season is around 1200 (**Figure 4**) and the average number of workers in the autumn season is around 350 (**Figure 5**).

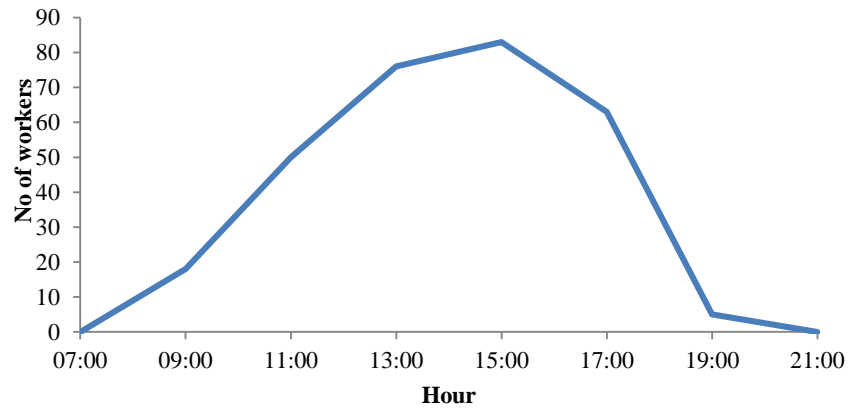


Figure 3: Average number of *M. semirufus* workers active outside the nest in spring.

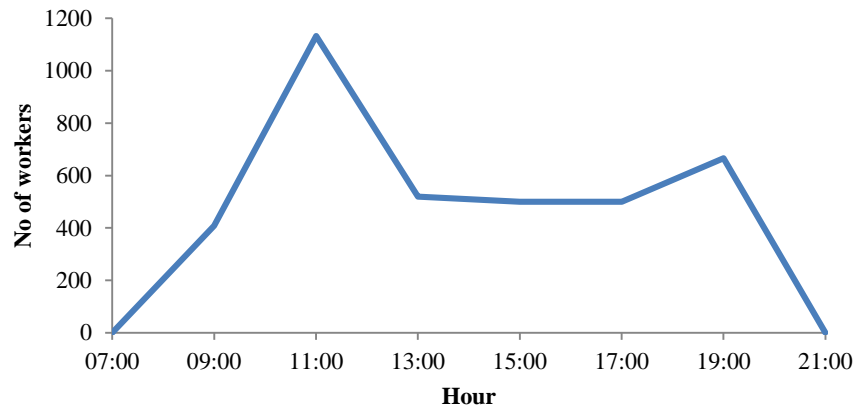


Figure 4: Average number of *M. semirufus* workers active outside the nest in summer.

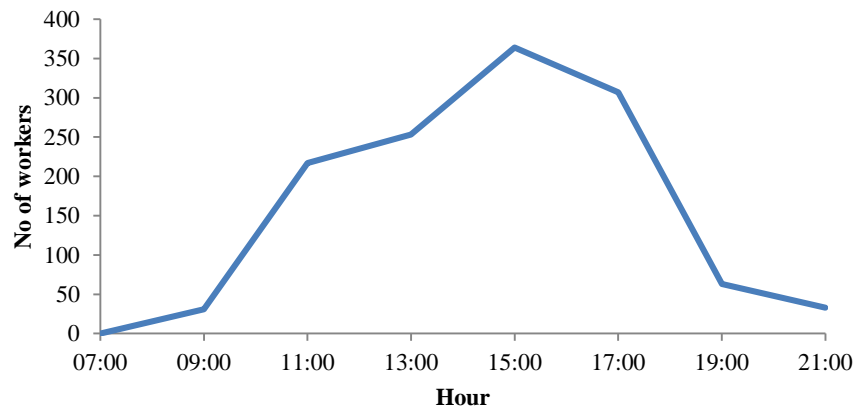


Figure 5: Average number of *M. semirufus* workers active outside the nest in autumn.

3.2. Differences in air humidity rate according to seasons

In the seasons when *M. semirufus* workers are active (spring, summer, autumn), the humidity rate in the air was 47.5% in spring (Figure 6), 45-47% in summer (Figure 7), and 48-52% in autumn (Figure 8). *M. semirufus* workers showed activity at these humidity values, which are close to the average.

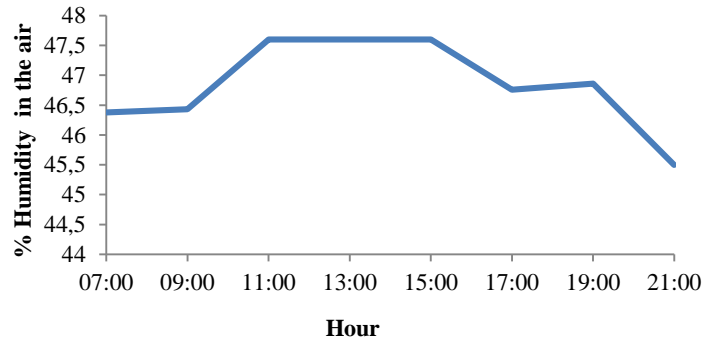


Figure 6: Average humidity in the air in spring.

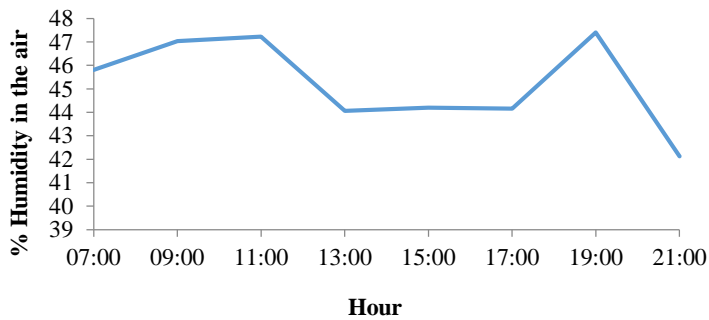


Figure 7: Average humidity in the air in summer.

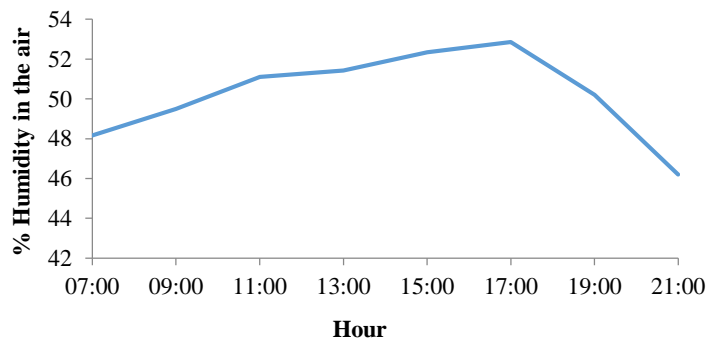


Figure 8: Average humidity in the air in autumn.

3.3. Differences in air temperature according to seasons

The average air temperatures in the seasons when *M. semirufus* workers are active are as follows: 15-20°C in spring (**Figure 9**), 35-40°C in summer (**Figure 10**), and 20°C in autumn (**Figure 11**). The number of workers counted was also highest in the summer season when the temperature was highest.

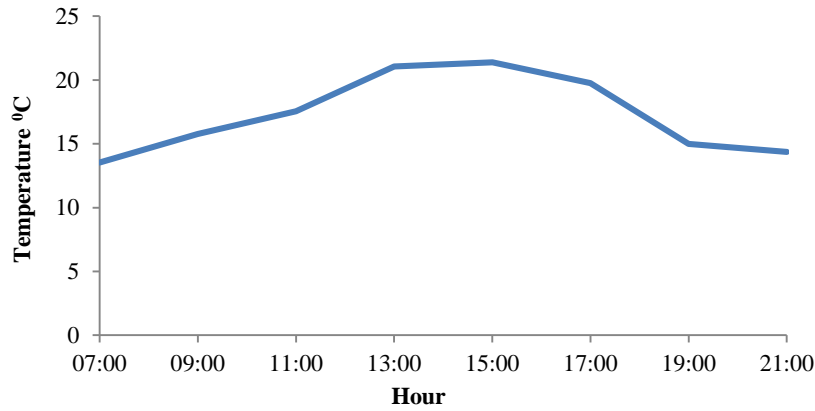


Figure 9: Average air temperature in spring.

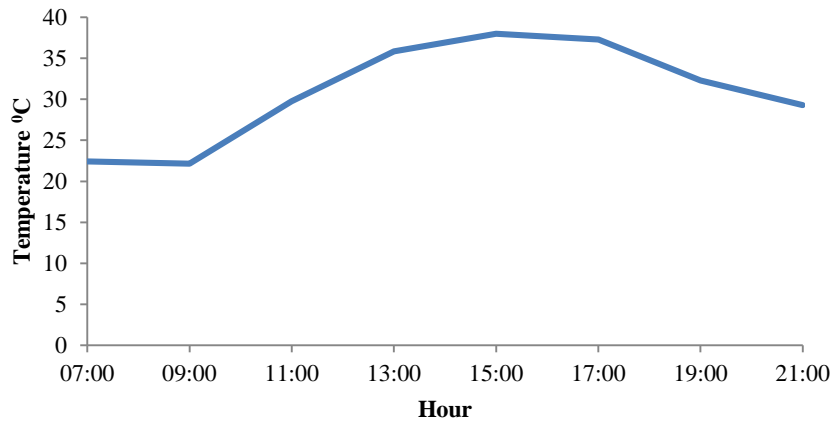


Figure 10: Average air temperature in summer.

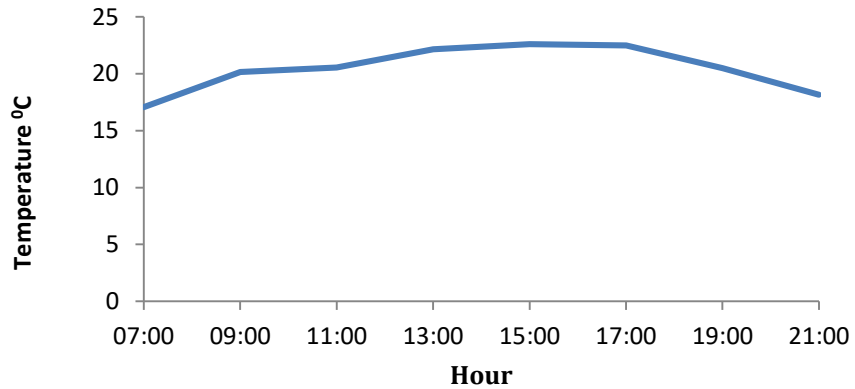


Figure 11: Average air temperature in autumn.

3.4. Soil temperature differences according to seasons

Soil warming is one of the important abiotic factors for ants. *Messor semirufus* workers examined are not active in conditions where the soil temperature is below 4°C. The average soil temperatures in the seasons when *M. semirufus* workers are active are as follows: between 12-14°C in spring (**Figure 12**), over 40°C in summer (**Figure 13**), and between 16-18°C in autumn (**Figure 14**). The summer season, when the soil temperature is above 40°C, is the period when *M. semirufus* workers are most active.

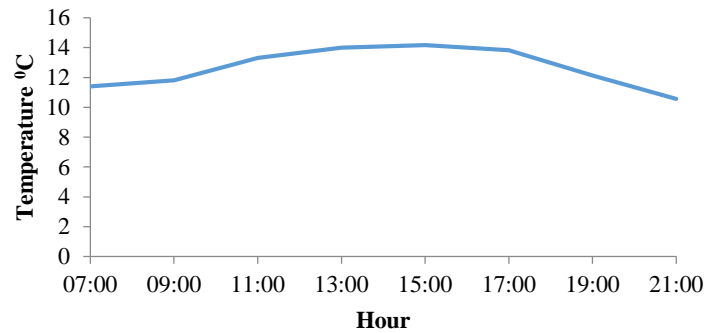


Figure 12: Average soil temperature in spring.

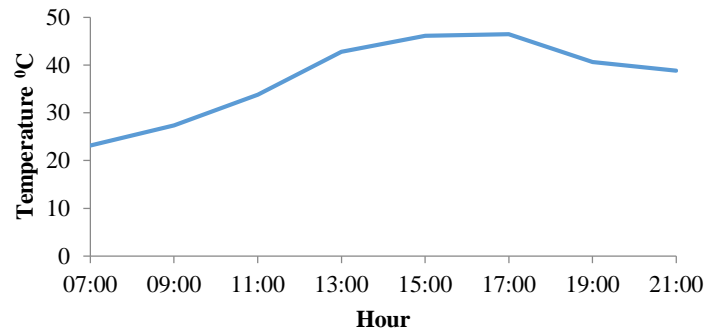


Figure 13: Average soil temperature in summer.

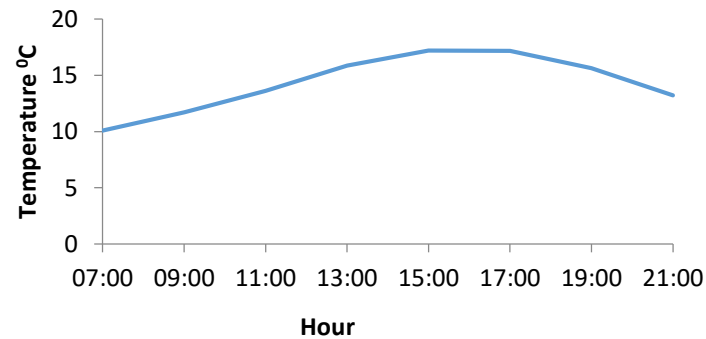


Figure 14: Average soil temperature in Autumn

3.5. Preference of *M. semirufus* workers for plant seeds collected from the natural environment

Five species from the Poaceae (grass) family were determined to be preferred by *M. semirufus* and these species are: *Seteria glauca*, *Cynodon dactylon*, *Cynodon dactylon villosus*, *Sorghum halepense* and *Poa trivialis*. *M. semirufus* workers also carried seeds from the Asteraceae family, which is the second most common in the environment. In the observed environment, the species belonging to the Asteraceae family were *Lactuca serriola*, *Conyza canadensis*, *Senecio aquaticus* and *Helminthotheca echioides*. Apart from the Asteraceae and Poaceae families, other plant species preferred by workers are *Polygonum aviculare* (Polygonaceae), *Anagallis arvensis* (Primulaceae), *Oxalis corniculata* (Oxalidaceae), *Euphorbia chamaesyce* (Euphorbiaceae) and *Portulaca oleracea* (Portulacaceae). During the observations, it was determined that the trails created by *M. semirufus* workers were divided into 4 branches at different distances. These trails were of different lengths: 3 m, 4 m, 6 m and 8.5 m. This shows that if there is more than one food in the habitat, *M. semirufus* tends to notice and collect all of them at the same time.

3.6. Offered seeds preferences of *M. semirufus*

On the days when *M. semirufus* was active, 12 different seed options were placed in equal amounts (each 200 gr.) 1 m away from the entrance of the observed nest. The plant seeds left were as follows: wheat, flax, oat, hemp, chickpea, broad bean, rapeseed, sesame, sunflower, millet, safflower and spinach seeds. In July, at around 07:00 in the morning, two minor workers went out to scan the area. They took one flax seed each and returned to the nest. It took them about half an hour to scan the area and return to their nests. At around 07:30, an average of 200 *M. semirufus* workers had tended to each seed. About half an hour later, at 08:00, 1000-1500 *M. semirufus* workers were mobilized to carry the seeds to the nest.

Among the *M. semirufus* colony members that collect seeds, minor workers predominate. Of the workers that create trails while collecting seeds, on average one in every 30 is a major worker. In an environment where an average of 1500 workers are actively collecting food, there are 50 major workers, while the others are minor workers. Major workers collected larger seeds such as oat, wheat, safflower, and spinach, which were larger than the others out of the 12 seeds presented (**Table 1**). Minor workers are quite rare among the workers that collect large seeds. The transportation of flaxseed, which is their primary preference, was done only by minor workers (**Table 2**). Workers who looked at all seeds during the first round of exploration soon abandoned sunflower seeds, hemp, broad beans, safflower and rapeseed and turned to other seeds.

The order of preference of the seeds offered by *Messor semirufus* is as follows (see **Table 1**):

(1) Wheat: Among the twelve seeds, their first priority was wheat seed. They finished carrying the 200 grams of seeds to the nest within 45 minutes. It can be said that wheat seed is their first choice because it has the shortest seed transportation time. Even if they continued to carry other seeds, they focused on carrying wheat first.

(2) Flaxseed: Their second choice was flax. Seeds with high oil content: Flax, sesame, sunflower and safflower. Flaxseed is the favourite among seeds with high oil content. It took about 60 minutes to transport flaxseed.

(3) Oat: It is the third most carried oat seed. It took them about 90 minutes to carry the oat seed to the nest.

(4) Spinach Seed: It is the seed they carry to their nest in the fourth place. The carrying activity continues after the wheat, flax and oats in the environment are finished. They were mostly carried by major workers. Carrying the spinach seed continued throughout *M. semirufus*'s one-day activities (**Table 1**).

(5) Sesame: This is the seed that can be ranked fifth. *It was M. semirufus'* second choice among seeds with high oil content. They collected half of the 200 g of sesame seeds offered within two days.

(6) Chickpea, Millet: They showed very little interest in chickpea and millet seeds. They rarely visited these seeds for two days. The number of seeds they collected from both seeds for two days was around 9-10. When millet seeds were first left, they tended to move more than chickpea seeds, but they abandoned millet seeds because they had difficulty carrying them. As a result, the number of seeds taken to the nest from these two seeds is very close to each other.

(7) Safflower, Sunflower: These are the seeds that workers showed very little interest. On the first day they were left, workers took 3-4 seeds from both seeds to the nest. No carrying behaviour was observed from these seeds on the other days.

(8) Rapeseed, Hemp, Broad Bean: There is no interest in these three seeds. Workers never carried them to the nest. Except for 5-6 workers who walked over them during the first exploration, they never visited these seeds again. Hemp, rapeseed and broad bean seeds were recorded as non-preferred seeds (**Table 1**).

When *M. semirufus* workers encountered the first seeds, they went back and forth between the nest and the food in a mixed manner. Within half an hour, the tendency towards their first three choices, wheat, flaxseed and oats, increased significantly and three paths were clearly formed. It was observed that very few workers went back and forth to the seeds that came after these three seeds, without any obvious path.

Table 1: Order of preference of offered seeds by *M. semirufus* workers.

Order of preference	Seeds name	Amount of seed dropped	Number of seeds collected	Time for collecting seeds (minutes-days)
1	Wheat	200 gr	All collected	45 minutes
2	Flaxseed	200 gr	All collected	60 minutes
3	Oat	200 gr	All collected .	90 minutes
4	Spinach	200 gr	All collected .	1 day
5	Sesame	200 gr	Half of it collected	2 days
6	Chickpea, Millet	200 gr (each)	9-10 pieces were collected	2 days
7	Safflower, Sunflower	200 gr (each)	3-4 pieces were collected	1 day
8	Rape, Hemp, Broad bean	200 gr (each)	No seeds were collected	-

Table 2: Seeds collected by worker size of *M. semirufus*.

<i>M. semirufus</i> worker size	Seed names
Seeds Collected by Major Workers	Oats, Spinach, Safflower, Wheat, Sunflower
Seeds Collected by Minor Workers	Wheat, Flaxseed, Chickpea, Millet, Sesame, Oat

4. CONCLUSION

The *M. semirufus* colony, which was monitored throughout the year, was determined to be active on the soil in spring, summer and autumn. In the observations, it was observed that *M. semirufus* spent the winter season and the first month of spring, namely December, January, February and March, underground. The observed *M. semirufus* workers chose a safe habitat to protect themselves from the extreme summer heat by building their nests in a secluded corner. Again, in the observations, the ants preferred sheltered places to protect themselves from abiotic factors, but it is thought that the main factor for building nests is food. The reason why the *Messor* genus is common in regions with grain fields in agricultural lands is the accessibility of food sources. In the observation made on the days when the average temperature in March was 15°C, it was observed that *Formica cunicularia*, another ant species which is neighbouring the *M. semirufus* nest, came out of the nest and showed activity on the soil (foraging, nest repair), while *M. semirufus* (generally valid for the *Messor* genus) workers had not yet come out of the nest and were not active in any way. This situation shows that the *Messor* genus is a more heat-loving species compared to the *Formica* genus. In fact, this situation confirms the statement that harvester ants are desert harvesters, which is expressed in many countries (De Vita, 1979; Brown et al., 1979a, b; Davidson et al., 1984).

In the year when the observations were initiated, the average temperature of March, which is the first month we started, was around 15°C. The observed *M. semirufus* workers started actively collecting seeds in April when the air temperature exceeded 17°C (see **Figure 9**). The food collecting behaviour started around 10:00 in the spring and continued until 18:00 in the evening (see **Figure 3**). In July, when the summer temperatures were very effective, it was observed that approximately 1000 worker ants went out to search for food and started collecting food at 08:00 in the morning (see **Figure 4**). It was observed that they retreated to the nest at 11:00 when the temperature of the day increased significantly and did not come out until the coolness of the evening. In summer, food searching and food carrying activity was observed for about one or two hours as of 19:00 in the evening. This shows that *M. semirufus* avoids extreme temperatures even though it is active in hot seasons throughout the year. In fact, it has been observed that on days when the air temperature exceeds 40°C, there is a period of about a week when they do not leave the nest during the day except for food gathering activities between 08:00 and 11:00 in the morning. In autumn, the food gathering behaviour of *M. semirufus* workers starts routinely around 09:00 and continues until around 19:00 in the evening. The time period when the most of the individuals are counted during this routine activation is between 11:00 and 17:00 (see **Figure 5**). In this study, it was observed that the activation of *M. semirufus* during the day varies according to the seasons. Our results support the study of Hunt (1974) who reported that there are differences in activation in ants during the day and depending on the seasons. In this work, it has been observed that *M. semirufus* workers tend to collect all seeds, whether they are in their natural habitat or experimentally added to the environment. During the seed collection process, *M. semirufus* workers are selective in their seed preferences. It has been observed that they tend to collect seeds that are present in their environment during the period when they are generally active. The reason why they collect seeds of plants in the Poaceae family more in spring and summer is that they can find the plant more frequently in these periods. Based on our observations, the fact that the most seeds from the Polygonaceae, Primulaceae, Oxalidaceae, Euphorbiaceae, Portulacaceae and Compositeae families are collected by *M. semirufus* workers in summer and autumn is due to the availability of the seeds of the plants in these seasons. Seed production by Asteraceae members in three seasons has ensured that they are preferred by *M. semirufus* workers throughout the three seasons.

The experiment in which seeds were left near the *M. semirufus* nest and seed selection was observed was carried out in spring, summer and autumn and workers collected the seeds they found ready in all three seasons. For instance, they preferred flaxseed, which is their primary preference, in summer and in the same way in autumn. It was revealed that rapeseed, hemp and broad bean seeds, which are not preferred seeds, were not preferred by the ants when the environment was low in nutrients. It was observed that workers carried the seeds they preferred as food to the nest regardless of the season (Nondillo et al., 2014).

The distances between the food found by the ants collecting seeds and the nest may be different. While some of the food they find is as close as 1 m to the nest mouth, some may be 10 meters away. It was observed that *M. semirufus* workers who set out to explore in search of food noticed the food near the nest entrance? within 10 minutes and took one seed and carried it to the nest. Later, it was determined that the other worker ants in the nest followed each other and headed towards the food and created a path between the nest and the food. During the study, the food that was farthest was 10 m away and it took them about half an hour to notice this food during the exploration tour. *Messor semirufus* workers can head towards more than one food at the same time and create more than one path tract (Hölldobler & Möglich, 1980). During the observations, it was observed that the number of paths formed according to the food availability changed; sometimes there was only one path, sometimes 2 or more paths were observed. It was also witnessed that the path traces formed by *M. semirufus* workers divided into up to 4 branches at different distances. These paths have different lengths: 3 m, 4 m, 6 m and 8.5 m. This shows that if there is more than one food in the habitat, *M. semirufus* tends to notice and collect all of them at the same time.

Among the 12 seeds offered to the *M. semirufus* colony, the workers' first choice was wheat seed. Workers, who also continued to carry other seeds, primarily carried wheat completely. This shows that *M. semirufus* prefers wheat as a food. Wheat seeds were an important food for *M. semirufus* throughout the study. Wheat has a carbohydrate value exceeding 65% in terms of nutritional content (Zeleny et al., 1971). In the context of the study, it was thought that the fact that wheat is a food with a high carbohydrate content provides an explanation for the priority preference of this seed by the ants. In addition, the food with the highest carbohydrate content in the environment was wheat seed. In fact, it was observed that ants preferred high-carbohydrate food to low-carbohydrate food (Nondillo et al., 2014). It was observed that *M. semirufus* workers turned to other seeds after the wheat seed was depleted. After the wheat seed was depleted in the environment, wheat was added to the environment again as soon as *M. semirufus* workers collected the other seeds. The addition of wheat was immediately noticed by the ants (within 1 minute) and the wheat seeds started to be carried from the environment again. This situation reinforces our idea that wheat is the primary food for *M. semirufus*. During this time, *M. semirufus* workers did not completely stop collecting other seeds other than wheat (especially flaxseed). When the wheat seed, which is the first choice of *M. semirufus*, was mixed with the rapeseed seeds that they had never collected and placed around the nest, it was observed that they preferred wheat seed from this pile and did not prefer rapeseed. Of these mixed seeds, rapeseed was the only one left. When a mixture of wheat, hemp and rapeseed was given, it was observed that the ants took the wheat and did not take the rapeseed and hemp from the environment, which shows that these ants can distinguish the food they use even if they are mixed. When all 12 seeds were given mixed, the ants preferred wheat seeds as usual.

The second choice of *M. semirufus* was flaxseed. Among the seeds with high oil content, flaxseed is the most preferred. In the observations, flaxseed, which is lighter than other seeds, has generally been preferred by minor workers in our study (see **Table 2**) which is consistent with Willott's work (Willott et al., 2000). In addition, spinach plant, which is frequently grown in Turkey, was chosen to observe whether these ants prefer the seeds of green vegetables. *Messor. semirufus* workers continued to carry spinach seeds after the wheat, flax and oat seeds in the environment were depleted, showing that the ants give more importance to carrying seeds, which is their first priority. Spinach seeds have not generally received much attention like wheat, but they are still among the seeds carried to the nest. This situation shows that they tend to collect and store other foods even if they are a food they like more in the environment. In the study of Aktaş et al. (1990), the seed stores of *M. semirufus* were investigated and plant seeds belonging to 6 plant families were found, proving that they want to store a wide variety of seeds. Spinach seeds were mostly carried by major workers because they were the larger seeds than other seeds in the environment. During the study, it was observed that large seeds were carried by major workers. In fact, similar results were reported by Willott et al. (2000) in harvester ants of the species *Messor bouvieri*.

When millet seeds were first dropped into the environment, they were a type of seed that had a high tendency to move but could not be carried to the nest very much. When this seed was first dropped, it was tried to be carried and dropped a lot. This situation occurred because the millet seed was round and smooth. Ants could carry very few seeds from among the millet seeds. They carried about 10 seeds during a day.

The grinding of chickpeas caused the elaisomal region to break down. The elaisomal part of the broad bean is in the shell on the grain. The peeling and grinding of the dried broad bean prevented it from being noticed by the ants. It is thought that the dispersion of the elaisomal region, where the ants perceive the content of the food, may have prevented *M. semirufus* workers from preferring chickpea and broad bean seeds. Safflower and sunflower seeds are also among the seeds that are preferred very little. Only 3-4 of them were carried in the environment and were not carried again. The fact that safflower and sunflower were shelled prevented them from being preferred.

Messor semirufus workers showed no interest in rapeseed and hemp seeds and never carried them to the nest. After these seeds were left, workers walked over them when they first noticed them. They took a few rapeseeds and left them back and never carried them to the nest. The oil of the rapeseed product contains erucic acid and glucosinolate, which are harmful to human health, and this seed is not preferred by the ants. Erucic acid above the specified value causes fattening of the heart muscles, and high levels of glucosinolate in the pulp of the rapeseed plant cause thyroid gland enlargement, gout inflammation and liver disorders in animals. Glucosinolates are water-soluble, anionic, non-volatile and heat-stable compounds (Artik & Yemiş, 2006). When plant tissue is broken or damaged by various processes (such as cutting, chopping or chewing), glucosinolates are hydrolysed by endogenous myrosinase naturally present in the tissue, and as

a result of this degradation, degradation products such as isothiocyanates, thiocyanates, nitriles, oxazolidine-2-thiones, hydroxynitriles, and epithionitriles are formed (Artik & Yemiş, 2006). The reason why hemp seeds are not preferred by *M. semirufus* workers is that the ants perceive the seed content. In a study conducted in Brazil, the preference of *Tenebrio molitor* (mealworm) and *Gryllus* (grasshopper) species, which were given to the ant species *Lasius micans* as food, for the *Gryllus* species, which has a high protein value, indicates that they perceive the nutrient content (Nondillo et al., 2014). If *M. semirufus* harvester ants did not perceive the content of the seeds, they would be expected to collect rapeseed, hemp, and broad bean seeds indiscriminately and take them to their nests. However, *M. semirufus* has been observed to hold rapeseed, hemp and broad bean seeds with their mandibles for a short time and then release them. This supports the view that ants perceive the content of the food when making their choice. Otherwise, they would be expected to collect rapeseed, hemp and broad bean seeds as they collect wheat seeds.

During these observations using seeds, on another day, *M. semirufus* workers were not given their first two choices, wheat and flax seeds, at all. Instead, they were given hemp, rapeseed, spinach, chickpea, broad bean, oat, sunflower, safflower, millet and sesame seeds. The workers carried some of the spinach and oat seeds but did not touch the other seeds. When their first two choices were not in the environment, they collected their third and fourth choices and did not carry the seeds that they had previously perceived to be.

The species whose seeds were preferred by *M. semirufus* from the Poaceae (wheat) family are: *Setaria glauca*, *Cynodon dactylon*, *Cynodon dactylon villosus*, *Sorghum halepense*, *Poa trivialis*. There were no plants from the Poaceae family other than these five species around the observed *M. semirufus* nest. *M. semirufus* workers collected seeds from plants belonging to the Poaceae family throughout the spring season. Seed collection behavior continued from the drier Poaceae family in the summer season.

M. semirufus workers also carried seeds from members of the Asteraceae family, which is the second most abundant in the environment. *Lactuca serriola*, *Conyza canadensis* and *Helminthotheca echioides* were naturally grown in the observed environment as Asteraceae members, and the ants carried seeds from all three species. The seeds of the Asteraceae family are in a volatile form and are pinnate and they are collected by *M. semirufus* workers in all three seasons (spring, summer, autumn), except winter. The Asteraceae and Poaceae families are the most abundant and preferred plants in the observed habitat.

Other preferred plants besides Asteraceae and Poaceae families are: *Polygonum aviculare* (Polygonaceae), *Anagallis arvensis* (Primulaceae), *Oxalis corniculata* (Oxalidaceae), *Euphorbia chamaesyce* (Euphorbiaceae), *Portulaca oleracea* (Portulacaceae), *Senecio aquaticus* (Compositae). These species are generally preferred by *M. semirufus* because they produce seeds in summer and autumn. In a study investigating the nest type and food stores of *M. semirufus* (Aktaç et al., 1990), the main seeds detected in

the food store belong to the families Ranunculaceae, Polygonaceae, Leguminosae, Boraginaceae, Rubiaceae and Graminae. According to our results and this study, the only family that is common among the preferred families is Polygonaceae. The reason why the families Ranunculaceae, Leguminosae, Boraginaceae, Rubiaceae and Graminae could not be detected in the food stores in the study conducted by Aktaç et al. (1990), may be due to the absence of these families in the habitat studied. There are also plants that *M. semirufus* does not prefer even though they are near the nest. These are *Mentha pulegium* (Lamiaceae), *Lotus corniculatus* (Fabaceae), *Trifolium repers* (Fabaceae). The reason why the Fabaceae and Lamiaceae families are not preferred may be that they do not have obvious seeds on the plant.

As a result, our findings revealed that *M. semirufus* is selective in seed preference while collecting seeds in the spring, summer and autumn seasons when it is active *M. semirufus* prefers seeds with high carbohydrate and protein values. *M. semirufus* collects seeds from the families Asteraceae, Poaceae, Polygonaceae, Primulaceae, Oxalidaceae, Euphorbiaceae, Portulacaceae and Compositae. The seeds they collect the most in nature are grasses and the data confirming this finding was obtained in our experimental study. Similar new studies that will reveal the similarities and differences in food preferences of species will undoubtedly make great contributions to the determination of the special strategies developed by species in food competition. These contributions will be of great importance in elucidating the feeding ecology of harvester ants, which play an important role in the ecosystem and play an active role in the distribution of seeds.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

ACKNOWLEDGEMENT

This study is a part of the master's thesis of the first author, which was carried out under the supervision of Prof. Dr. Yılmaz Çamlitepe and submitted to Trakya University, Institute of Natural and Applied Science.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

S.E.K: Methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, writing—original draft preparation.

Y.C.: Conceptualization, Methodology, validation, investigation, resources, writing—review and editing.

REFERENCES

- Aktaç, N., Çamlitepe, Y., & Dane, F. (1990). Hasatçı Karıncaların (*Messor oertzeni* ve *M. semirufus*) Yuva Yapıları ve Tohum Depoları Üzerine Bir Araştırma. *X.Ulusal Biyoloji Kongresi*, Cumhuriyet Univ, 18-20 Temmuz, Sivas.
- Artık, N., Yemiş, O. (2006). Glukosinolatlar ve İnsan Sağlığı Açısından Önemi. Türkiye 9. Gıda Kongresi 24-26 Mayıs 2006, Bolu. Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Müh., Dışkapı, Ankara.

- Bolton B. (2023). An online catalog of the ants of the world. <http://antcat.org> (Accessed 20 November 2025).
- Brown, J. H., Davidson, D. W., & Reichman, O. J. (1979a). An experimental study of competition between seed-eating desert rodents and ants. *American Zoologist*, 19(4): 1129-43.
- Brown, J. H., Reichman, O. J., & Davidson D. W. (1979b). Granivory in desert ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 10: 201-227.
- Davidson, D. W., Inouye, R. S., & Brown, J. H. (1984). Granivory in a desert ecosystem: experimental evidence for indirect facilitation of ants by rodents. *Ecology*, 65(6):1780-86.
- De Almeida T, Blight O, Mesléard F, Bulot A, Provost E., & Dutoit T (2020). Harvester ants as ecological engineers for Mediterranean grassland restoration: Impacts on soil and vegetation. *Biological Conservation* 245: 108547. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108547>.
- De Vita, J. (1979). Mechanisms of interference and foraging among colonies of the harvesting ant *Pogonomyrmex californicus* in the Mojave Desert. *Ecology*, 60(4): 729-737.
- Elwood S., Mcluskey E.S. (1963). Rhythms and Clocks in Harvester and Argentine Ants, *Physiol.Zool.*, 36, 273-292.
- Hahn, M., Maschwitz, U. (1985). Foraging strategies and recruitment behaviour in the European harvester ant *Messor rufitarsis*. *Oecologia*, 68(1): 45-51.
- Hölldobler, B. (1976). Recruitment behavior, home range orientation and territoriality in harvester ants, *Pogonomyrmex*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 1(1): 3-44.
- Hölldobler, B., Möglich, M. (1980). The foraging system of *Pheidole militicida* (Hymenoptera: Formicidae). *Insectes Sociaux*, 27 (3): 237-264.
- Hunt J.H. (1974). Temporal Activity Patterns in Two Competing Ant Species (Hymenoptera: Formicidae), *Journal of Entomology*, 81 237-242.
- Nondillo A, Ferrari L, Lerin S, Bueno Oc., & Bottona M (2014). Foraging activity and seasonal food preference of *Linepithema micans* (Hymenoptera: Formicidae), a species associated with the spread of *Eurhizococcus brasiliensis* (Hemiptera: Margarodidae). *J Econ Entomol*;107(4):1385-91.
- Retena J., Cerda X. (2000). Patterns of diversity and composition of Mediterranean ground ant communities tracking spatial and temporal variability in the thermal environment, *Oecologia*, 123, 436–444.
- Sanches A.M., Azcarate F.M., & Peco B. (2005). Effects of Harvester Ants on Seed Availability and Diaparsal of *Lavandula stoeschas* subsp. *Pedunculata* in Mediterranean Grassland- Scrubland Mosaic, *Plant Ecology*, 185, 49–56.
- Sanders C.J. (1972). Seasonal and Daily Activity Patterns of Carpenter Ants (*Camponotus* spp.) In Northwestern Ontario (Hymenoptera: Formicidae), *The Canadian Entomol.*, 104, 1681-1687.
- Sharma V.J., Lone S.R., Goel A., & Chandrashekar M.K. (2004). Circadian Consequences of social Organization in the ant species *Camponotus compressus*, *Naturwissenschaften*, 91, 386-390.
- Silvestre M, Aguilar A, Seoane J., & Azcárate FM. (2019). Responses of seed size, ant worker size, and seed removal rate to elevation in Mediterranean grasslands. *Oecologia*. 2019 Mar;189(3):781-793.
- Sudd J.H., Franks N.R. (1987). The Behavioural Ecology of Ants. *Blackie*. Glasgow, 3, 206- 216.
- Willott, S.J., S. G. Compton, L., & D. Incoll (2000). Foraging, Food Selection and Worker Size in the Seed Harvesting Ant *Messor bouvieri*. *Oecologia*, Vol. 125, No. 1, pp. 35-44
- Zeleny Y. (1971). Criteria Of Wheat Quality. In: Wheat Chemistry and Technology. Y. Pomeranz, ed. *Am. Assoc. Cereal Chem.*: StA.A.C.C. Incorporated St. Paul Minnesota, 821 S.

Sabit Kanatlı İHA'da Kanat Geometrisinin Aerodinamikteki Etkileri

Melih ALTAY^{1*}, Erol TÜRKEŞ¹

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye

Geliş: 21.10.2024, Kabul: 12.12.2024, Yayınlanma: 31.12.2024

ÖZ

Hava araçlarının tümünde tüketilen yakıt miktarını azaltmak, faydalı yükü arttırmak için gövdenin ve kanatların geometrisinde değişiklikler yapılmaktadır. Bu makale çalışmasında da sabit kanatlı İHA'lar ve kanatlarında C_L/C_D oranını arttırmak hedeflenmiştir. Üç farklı kanat modeli (NACA-0012, NACA-4415 ve SD-7037) ve yeni bir kanat olan ALTAY kanadı ön tasarımları ve aerodinamik analizleri XFLR5 programında analiz edildi. Kanatların XFLR5 ve ANSYS Fluent programındaki analizleri üç farklı Reynolds sayısında (50.000; 150.000 ve 250.000) ve beş farklı hücum açısındaki (-5° ; 0° ; 5° ; 10° ve 15°) ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. SOLIDWORKS öğrenci programında ALTAY ile SD-7037 kanatları üç boyutlu olarak tasarımları yapıp 3D yazıcıda üretilmiştir. SOLIDWORKS programında biri düz kanatlı diğeri ise dik trapez kanatlı iki adet İHA tasarlanıp, ANSYS Fluent programında Akış hızının (15,5 m/s) olduğu beş farklı hücum açısındaki (-5° ; 0° ; 5° ; 10° ve 15°) ortam şartlarında aerodinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında ALTAY kanadının SD-7037 kanadına göre daha verimli olduğu, dik trapez kanatlı İHA'nın da düz kanada göre daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sabit kanatlı İHA; Tasarım; Aerodinamik analizler; Katlamalı imalat.

Aerodynamic Effects of Wing Geometry on Fixed Wing UAV

ABSTRACT

In order to reduce the amount of fuel consumed in all aircraft and to increase the useful load, changes are made to the geometry of the fuselage and wings. In the article, it is aimed to increase the C_L/C_D ratio in fixed wing UAV's and their wings. Preliminary designs and aerodynamic analyzes of three different wing models (NACA-0012, NACA-4415 and SD-7037) and a new wing, the ALTAY wing, were analyzed in the aerodynamic analyzes were carried out in the ANSYS Fluent student program. The analysis of the wings in XFLR5 and ANSYS Fluent programs was carried out under three different Reynolds numbers (50.000; 150.000 and 250.000) and five different angles of attack (-5° ; 0° ; 5° ; 10° ve 15°). ALTAY and SD-7037 wings were designed three dimensions in the SOLIDWORKS student program and produced on a 3D printer. Two UAV's, one with straight wings and the other with a vertical trapezoidal channel, were designed in the SOLIDWORKS program, and they were designed in the ANSYS Fluent program and five different angles of attack (-5° ; 0° ; 5° ; 10° ve 15°) where the flow speed was (15,5 m/s) aerodynamic analyzes were carried out under ambient conditions. As a result of the analysis, it was concluded that the ALTAY wing is more efficient than the SD-7037 wing, and the vertical trapezoidal wing UAV is more efficient than the straight wing.

Keywords: Fixed wing UAV; Design; aerodynamic analysis; Additive manufacturing.

1. GİRİŞ

Hava araçlarında, rüzgâr türbinlerinde, arabalarda bu gibi mühendislik tasarımlarında oluşan geometriler, sistemi hareket ve verim konusunda önemli bir şekilde etkilemektedir. İHA'nın kullanım alanları gün geçtikçe daha da çok artmaktadır. İnsansız ilk uçaklar dünya tarihine savaşlar dolayısıyla girmiş olmasına rağmen çalışmalarda; Haritacılık, arama-kurtarma faaliyetleri, hava durumu izlenimi, yangın izleme, tarımsal uygulamalar gibi konularda da kullanılmaktadır (Kahveci ve Can, 2017).

İHA'nın askeri konular dışına sivil gündelik konulara çıkmasındaki en önemli faktörler arasında insansız hava araçlarına ihtiyaca uygun olacak şekilde entegre edilen sensörler ve uçuş kontrol cihazları yer almaktadır. Hava aracının ihtiyaca göre ve farklı alanlarda kullanılan İHA'nın yapacağı görev şartlarıyla faydalı yük tipleri meydana çıkartılarak İHA'nın genel yapısına entegre edilir (Villi ve Yakar, 2022).

İHA'nın sivil gündelik konularda kullanılmasının insan hayatına ve sağlığına faydalı olabilecek konuların başında iş sağlığı ve güvenliği konuları gelmektedir. İş sağlığı ve güvenliği konusu insanın çalışma hayatının olduğu her yerde karşılaşılabilecek bir konudur. İHA'nın müdahale edebileceği inşaat ve madencilik meslek dallarında dünya üzerinde gelişmiş ülkelerde iş sağlığı ve güvenliği kullanılır iken ülkemizde ise sadece kurumsal firmalarda kullanılmaya başlanmıştır (Bozkurt, 2022).

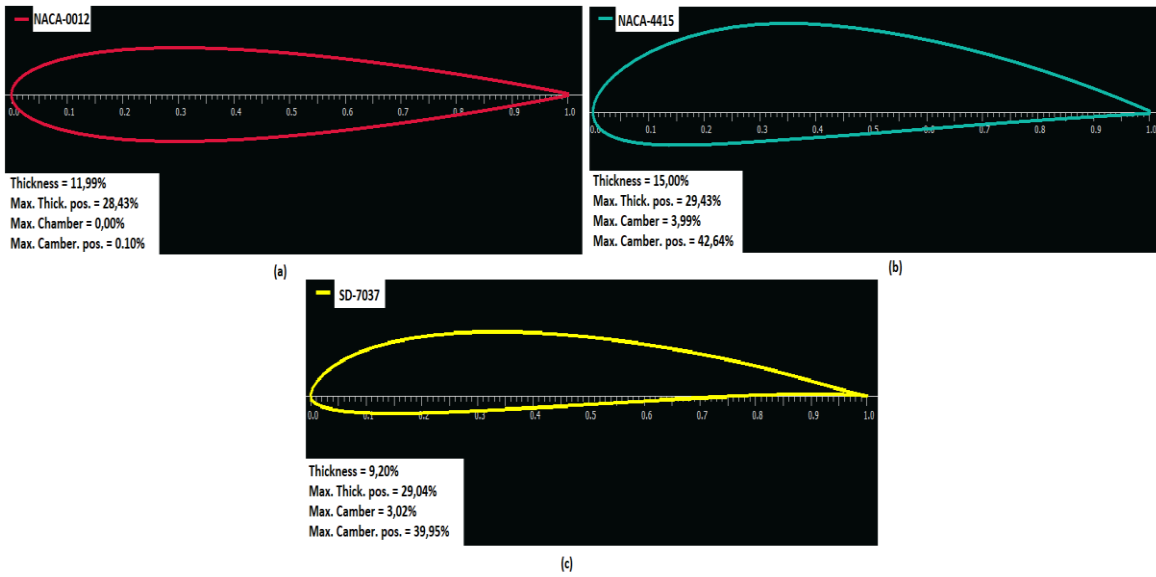
Bu çalışmada da kanatların ve gövdenin geometrisinde meydana gelebilecek değişimlerin hava aracı üzerinden elde edilen aerodinamik analizler ele alınmıştır (Altay, 2024). Hava araçları üzerindeki aerodinamik analizler konusunda bu çalışmada; her zaman arttırılmak için çabalanan kaldırma katsayısı (C_L) değerinin, her zaman azaltmak için çabalanan sürtünme katsayısı (C_D) değeri ile oranlanması sonucu elde edilecek sayıyı arttırmaktır. C_L ve C_D değerinin sınır şartları İHA'nın hava koşullarında irtifasını kaybettiği anlardır. Ön tasarım konusunda XFLR5 programında üç farklı kanat tipi (NACA-0012, NACA-4415 ve SD-7037), üç farklı Re sayısında (50.000; 150.000 ve 250.000) ve beş farklı hücum açısında (-5° ; 0° ; 5° ; 10° ve 15°) analizleri yapılmıştır. Elde edilen analizler sonucunda SD-7037 kanat geometrisi daha verimli kanat olarak tespit edilmiştir. SD-7037 kanat geometrisi üzerinde değişiklikler yaparak ALTAY kanadının ön tasarım aşaması gerçekleştirilmiştir. Ön tasarımın verimli olup çalışma kontrolü ilk olarak XFLR5 programında yapıldıktan sonra geniş kapsamlı olarak ANSYS Fluent öğrenci programında da gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada da SD-7037 ile ALTAY kanatları üç farklı Re sayısında (50.000; 150.000 ve 250.000) ve beş farklı hücum açısında (-5° ; 0° ; 5° ; 10° ve 15°) analizleri yapılmıştır. Kanat analizlerine ek olarak ALTAY-0020 D ve ALTAY-0020 T İHA'ları tasarlanıp akış hızının 15,5 m/s olduğu beş farklı hücum açısında da analizler gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Kanat Geometrisi

Bu çalışmada ele alınan en önemli parametre C_L/C_D oranının kanat geometrilerinde meydana gelecek değişimlerle artışını sağlayabilmektir. Kanat geometrisi üzerinde meydana gelecek akışı inceleyebilmek ve yorumlayabilmek için XFLR5 programında NACA-0012, NACA-4415 ve SD-7037 Şekil 1'de kanat kesitlerinin geometrileri gösterilmektedir.

XFLR5 programında İHA'ların geometrisi ve aerodinamik analizleri üzerine çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır (Kaynak, 2022; Uğur, 2019). NACA-0012 kanat profili geometrisinin kanat uçlarına flaplar (kanat üzerinde aerodinamiği kontrol etmeye yarayan ekipmanlar) eklenerek C_L/C_D oranının artırılması 15° hücum açısına kadar sağlanmıştır. 15° hücum açısından sonra kanatlar türbülansın dolaylı irtifasını kaybetmektedir (Genç, Özışık ve Kahraman, 2008). Bu sebeple bu çalışmada da maksimum hücum açısı 15° olarak seçilmiştir. Kanat geometrisi dışında ana kanat, kuyruk kanadı ve gövde konfigürasyonları İHA'nın tasarım metodolojisinde önemli yerlere sahiptir. Ana kanadın ortadan kanat, kuyruk kanadının V-kuyruk, gövdenin damla model olduğu konfigürasyon tipleri verimde en iyi değerlere sahiptir (Ünler, Dağ ve Öztürk, 2022).



Şekil 1: (a) NACA-0012 kanat profili, (b) NACA-4415 kanat profili, (c) SD-7037 kanat profili.

Kanat profillerinin geometrik olarak belirli bir eksen çizgisine göre kalınlık ve kamburluk oranları bulunmaktadır. Bu üç farklı kanat profilinin de kalınlık ve kamburluk oranları Çizelge 1'de gösterilmektedir. Çizelge 1'e göre üç farklı kanat içinde kalınlık olarak NACA-4415>NACA-0012>SD7037 ve kamburluk yüzdesi olarak NACA-4415>SD-7037>NACA-0012 olarak büyükten küçüğe

doğru sıralanmaktadır. Yapılan çalışmada NACA-4412 kanadı kuyruk kısmına doğru kalınlaştırılarak NACA-4412_1 ve NACA-4412_2 tasarlanmış ve kanat kalınlaşmasıyla C_L/C_D değerinde maksimum seviyenin yakalandığı hücum açısı gitgide düşüş göstermiştir (Göv, Doğru ve Korkmaz, 2019).

Çizelge 1: Kanat profilleri geometrileri.

Parametre oranları	NACA-0012	NACA-4415	SD-7037
Kalınlık oranı (%)	11,99	15	9,2
Maksimum kalınlık oranı (%)	28,43	29,43	29,04
Kamburluk oranı (%)	0	4	3,02
Maksimum kamburluk oranı (%)	0	39,94	39,95

Osborne Reynolds 1880'li yıllarda yaptığı çalışmalardan sonra Reynolds sayısını tespit etmiştir. Denklem 1'de belirtildiği gibi atalet kuvvetlerine ve Viskoz kuvvetlerine bağlıdır. Atalet kuvvetlerinde ρ -akışkanın yoğunluğu, V - akışkanın hızı, L_c - chord uzunluğunu (kanadın x eksenindeki uzunluğu) ve viskoz kuvvetlere de μ - akışkanın dinamik viskozitesini ifade etmektedir. Bu çalışmadaki analizlerde akışkan olarak kullanılan hava özellikleri $\rho = 1,225$ (kg/m^3), $\mu = 1,5111\text{E-}05$ ($\text{kg}/(\text{m}/\text{s})$) ve kanadın L_c değeri 0,2 (m)'dir. Hesaplanan sonuçlara göre Re 50.000 havanın hızı 3,1 (m/s), Re 150.000 havanın hızı 9,3 (m/s) ve Re 250.000'de havanın hızı 15,5 (m/s) olarak tespit edilmiştir. Hava araçlarında Re_{kr} (sınır bölgesindeki değer) 5000 olarak referans alınmaktadır. Reynolds değeri 5000'den küçükse laminar akış, büyükse türbülanslı akışa geçiş yapmaktadır (Çengel ve Cimbala, 2006).

$$Re = \frac{\rho \times V \times L_c}{\mu} \quad (1)$$

XFLR5 ön tasarım programında üç kanat içinde 50.000; 150.000 ve 250.000 ve -5° 'den 15° hücum açısına kadar analizleri sonuçları Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2'ye göre üç farklı Reynolds sayısı değerinde de SD-7037 kanat profili daha iyi C_L/C_D oranına sahiptir.

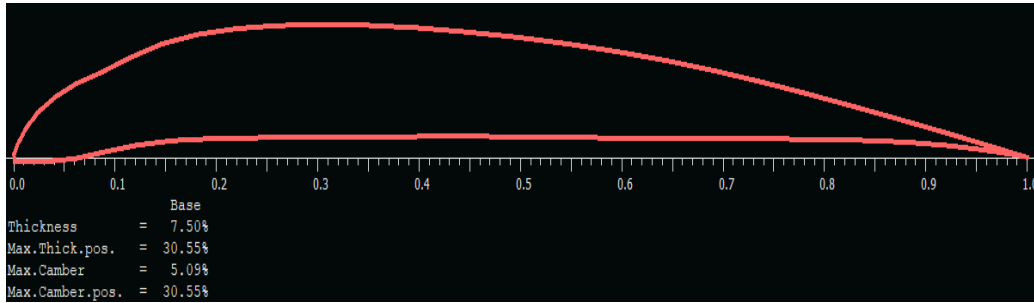


Şekil 2: XFLR5 programında kanatların üç farklı Reynolds sayısındaki C_L/C_D değerleri.

En iyi C_L/C_D oranına sahip olan SD-7037 kanadının geometrisinde değişiklikler yapılarak Şekil 3'te gösterilen ALTAY kanadı tasarlanmıştır.

Durmuş (2023) çalışmasında aynı gövde de 4 farklı kanat profilini (MH60, TL54, Eppler 339 ve TsAGI %12) XFLR5 programında analizleriyle C_L/C_D oranına ve moment değerlerini incelemiştir. En iyi C_L/C_D oranları iki kanat tipinde MH60'ta 5° ve TL54 ise 3° hücum açılarında elde edilmiştir.

Prieto ve diğerleri (2023) çalışmalarında NACA-4412 kanadını farklı kanat uçlarında (düz, trapez ve harmanlanmış) olarak OpenFOAM programında CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) ve XFLR5'te VLM (girdap kafes yöntemi) karşılaştırılmış ön tasarım çalışmalarında harmanlanmış kanadın daha verimli olduğu sonucu XFLR5 programı ile daha az maliyetli ve simülasyon süresi açısından daha avantajlı olduğu sonucuna varmışlardır.



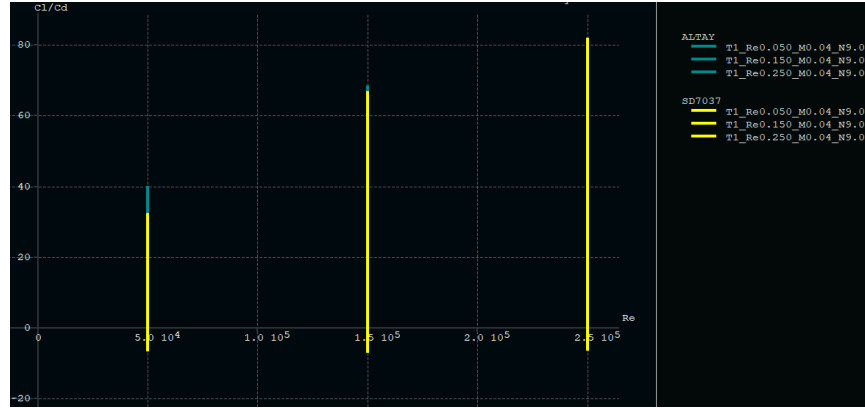
Şekil 3: ALTAY kanat profili.

ALTAY kanat profili SD-7037 kanat profili geometrik farklılıkları Çizelge 2'de belirtilmiştir. ALTAY kanadının geometrisi kalınlık olarak SD-7037 kanadına göre %1,70 incelmış ve % 2,07 kamburluğu artmıştır.

Çizelge 2: SD-7037 ve ALTAY kanat profilleri.

Parametre oranları	SD-7037	ALTAY
Kalınlık oranı (%)	9,20	7,50
Maksium kalınlık oranı (%)	29,04	30,55
Kamburluk oranı (%)	3,02	5,09
Maksimum kamburluk oranı (%)	39,95	30,55

ALTAY ve SD-7037 kanat profillerinin 50.000; 150.000 ve 250.000 Reynolds değerlerinde ve -5° 'den 15° hücum açısına kadar analizleri sonuçları Şekil 4'te gösterilmektedir. ALTAY kanat geometrisi Re 50.000 ve 150.000 değerlerinde aerodinamik verimliliği daha iyiyken 250.000 değerinde aerodinamik verimlilikleri benzerlik göstermektedir.



Şekil 4: ALTAY ve SD-7037 kanatlarının C_L/C_D değerleri.

Aytaç ve diğerleri (2023) çalışmalarında kanat geometrisinin de gerekli koşullarda gerekli kamburluğu ve düzlüğü sağlayabilmesi için İHA'lar da kanat geometrisinin şekil değiştirebilir olarak SOLIDWORKS programında tasarlayıp, 3D yazıcıda üreterek XFLR5 programındaki çalışmalarını rüzgâr tüneline de gerçekleştirmişlerdir. Kanadın kamburlaştıkça veriminin arttığı görülmüştür.

2.2 Ansys Fluent

XFLR5 analiz programında yeni bir kanat olan ALTAY tasarımı ve ön analizleri gerçekleştikten sonra XFLR5 programına göre daha iyi bir altyapı ve içeriğe sahip olan ANSYS Fluent analiz programında da ALTAY ve SD-7037 kanadının analizleri üç farklı Re sayısında 50.000; 150.000 ve 250.000 ve beş farklı hücum açısında -5° ; 0° ; 5° ; 10° ve 15° analizleri yapılmıştır. Analizlerin gerçekleştirilmesi için sınır koşulları oluşturulmuştur. Şekil 5'te rüzgâr tünelinin x ve y eksenlerindeki boyutları kanadın chord uzunluğunu (kanadın x eksenindeki uzunluğu) referans alınarak hesaplanmıştır. Kanal C tipi yapısıyla 110.000 ağ yapısından meydana gelmektedir. Kanadın chord uzunluğunun 12,5 katı olarak ölçüler belirlenmiştir. ALTAY kanadının chord uzunluğu 200 mm'dir.

R1; Rüzgâr tüneline akış girişi bölgesi 2.250 mm,

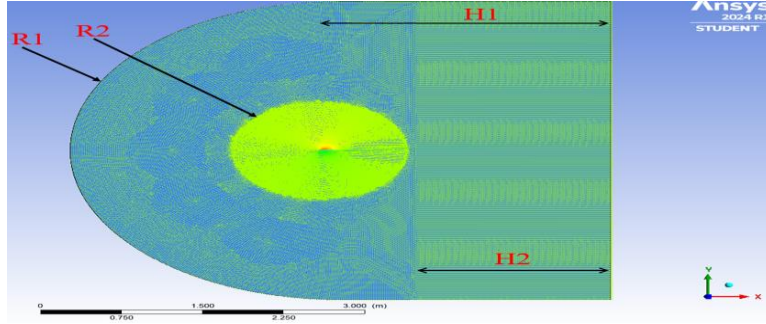
R2; Kanadın etrafında hassas mesh elde edebilmek için oluşturulan bölge 800 mm,

H1; Rüzgâr tüneline daireden sonra dikdörtgen geometrinin bölgesi 2.500 mm,

H2; Rüzgâr tünelinin akış çıkışı kısmında daha hassas mesh elde etmek için oluşturulan bölge 1.800 mm ölçülerindedir.

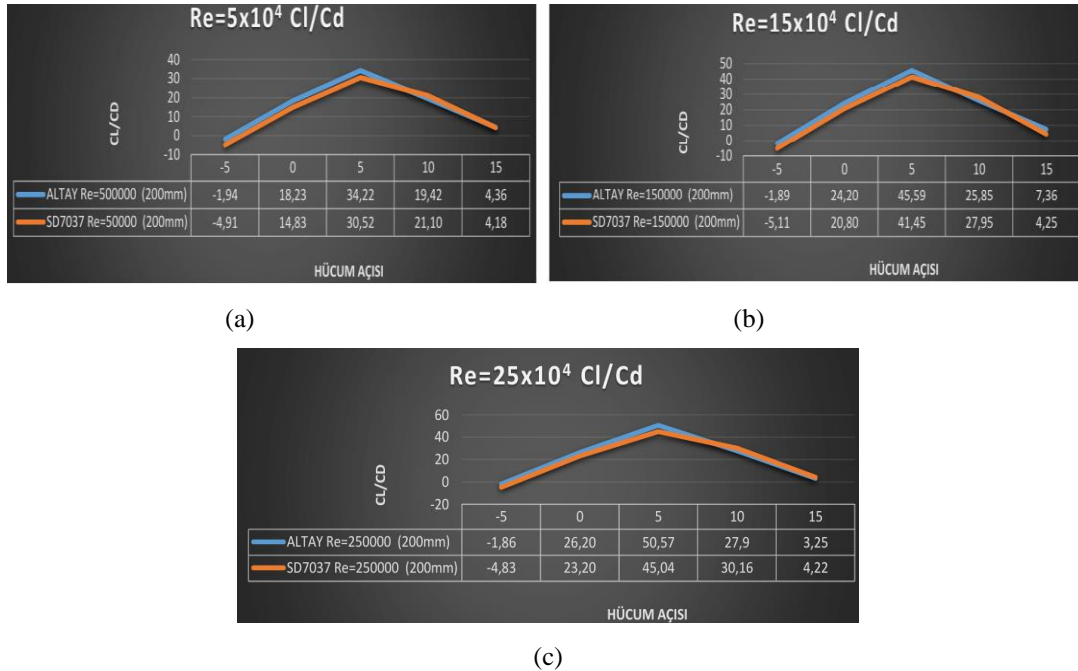
Bu sınır koşulları ölçülerine yani hava tüneline benzer olarak NACA-4415 ve NACA-0012 kanat profillerinin akış analizlerinde chord uzunluğunun 12,5 katı olacak şekilde C tipi ağ yapısıyla çalışılmış çalışmalarda vardır (Akdemir, 2021; Dilmaç, 2024). Diğer bir İHA ve kanat modeli çalışmasında NACA-4412 kanat geometrisi chord uzunluğunun 15 katı olacak şekilde C tipi ağ yapısıyla kanat eksenlerinde

yoğun mesh yapıları akış giriş ve çıkış bölümlerinde ise az yoğunlukta mesh, İHA modelini ise dikdörtgenel bir hava kanalı kullanmışlardır (Zhao ve diğerleri, 2019).



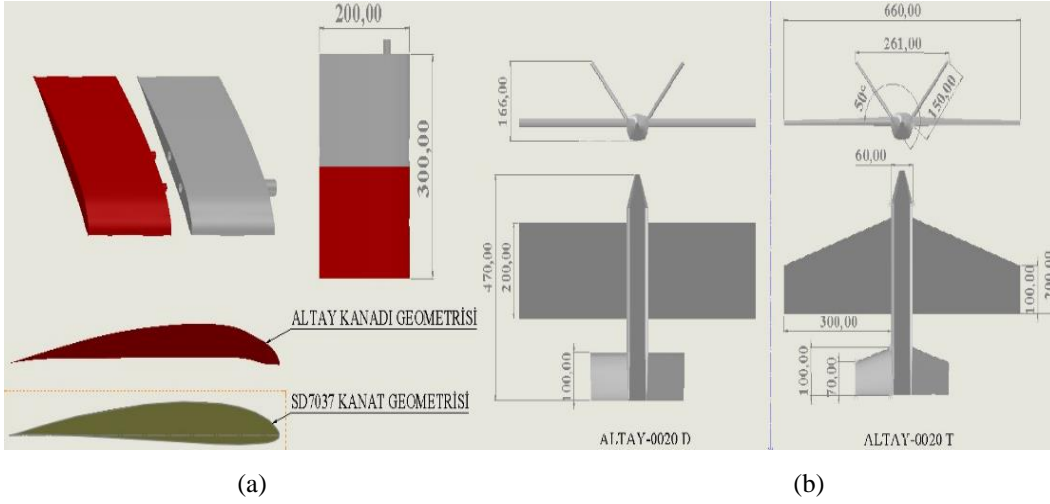
Şekil 5: Rüzgâr tünelinin yapısı ve gerçekleştirilen mesh ve ağları.

Yapılan çalışmada sınır koşulları olarak tünelin girişi, çıkışı ve kanat yüzeyi seçilmiştir. Şekil 5'te gösterildiği gibi oluşturulan üç ayrı bölgede de farklı mesh ölçüleri oluşturulmuştur. En yoğun mesh kanat etrafında, ikinci en yoğun mesh türbülansdan dolayı geri dönüşler meydana gelir diye tünel çıkışında, en az yoğun mesh tünel girişinde meydana getirilmiştir. Meshlerde bir adet kanat etrafında daha yoğun mesh için dairesel alan (body sizing), üç adet belirli bir kenarı parçalara bölme (edge sizing), bir adet belirlenmiş bir yüzeyde ağ oluşturmak (face meshing) ve bir adette yüzeyi katmanlı mesh (inflation) komutu uygulanmıştır. Şekil 6'da ALTAY ve SD-7037 kanat profillerinin üç farklı Re sayısında 50.000; 150.000 ve 250.000 ve beş farklı hücum açısında -5° ; 0° ; 5° ; 10° ve 15° analiz sonuçlarının eğrisel grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 6: (a) $Re=5 \times 10^4$ (b) $Re=15 \times 10^4$ (c) $Re=25 \times 10^4$ değerlerinde C_L/C_D değerleri.

Şekil 7'de ki çizimlerde ALTAY-0020 D ve ALTAY-0020 T İHA'larının ölçüleri gösterilmektedir. İHA'lara bu isimlerin verilmesinin sebebi ana kanatlar olan düz ve trapez kanatlardan kaynaklanmaktadır. Ana kanatlar ALTAY kanadı geometrisinde kuyruk kanatları ise SD-7037 kanat geometrisinde tasarlanmıştır. Katı modele dönüştürülen bütün tasarımlar malzeme olarak termoplastik polimer yapıda olan PLA (Polilaktik Asit) yapısındadır. SOLİDWORKS programından alınan kütle özelliklerine göre; ALTAY-0020 D İHA'sı 3,2 kg ve ALTAY-0020 T İHA'sı ise 2,5 kg ağırlığındadır.

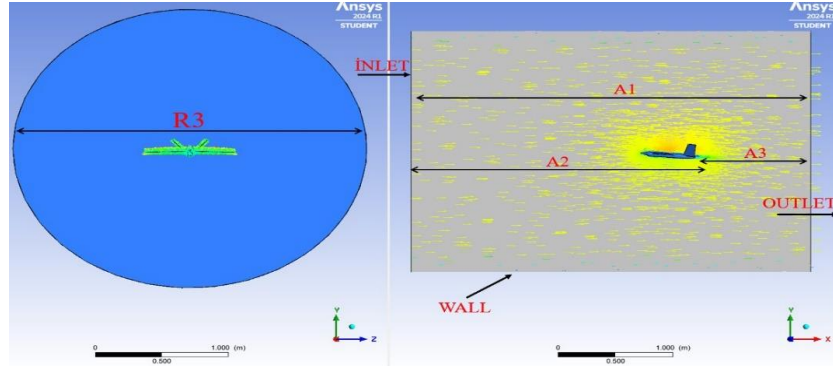


Şekil 7: (a) Altay ve Sd-7037 kanatları (b) Altay-0020 D ve Altay-0020 T İHA geometrileri

SOLİDWORKS öğrenci programında tasarlanan ALTAY-0020 D ile ALTAY-0020 T İHA'ları ilk olarak step formatında ANSYS programına yükleme yapılmıştır. Sonuçların ve analizlerin doğru olabilmesi için tasarımlar birçok parça montaj edilmiş şekilde değil de tek katı gövde olarak tasarlanmıştır. Analizler için İHA modelinin gövdesini çevreleyerek Enclosure komutu ile silindirik bir rüzgâr tüneli tasarlanmıştır. Tasarlanan rüzgâr tünelinin ölçüleri Şekil 8'de A1, A2, A3 ve R3 olarak verilmiştir. Bu isimlendirilen harflerin ölçüleri şu şekildedir; Silindir çapı R3 1.000 mm, silindirin baştan başa uzunluğu A1 3.000 mm, İHA'nın kuyruğundan silindir ucu (hava girişi) mesafesi A2 2.000 mm, İHA'nın kuyruğundan silindir ucu (hava çıkışı) A3 1.000 mm ölçülerinde tasarlanmıştır. Tünelin içine yerleştirilen İHA'lar Boolean komutuyla tasarlanan rüzgâr tüneli modelinden İHA'ların gövdesi çıkarılmıştır.

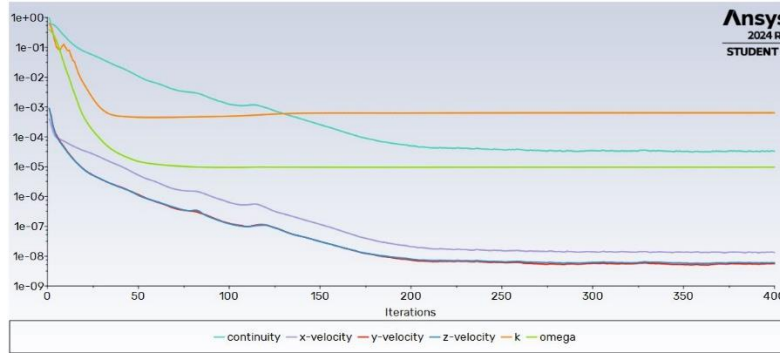
Sınır koşulları Şekil 8'de gösterildiği gibi tünelin bir tarafı giriş (inlet), diğer tarafı çıkış (outlet), tüneli boyu (wall), İHA gövdesi Altay-0020 D ve T olarak belirlenmiştir. Her iki İHA da tünel içinde 501.980 ağ yapısından meydana gelmektedir. Sonuç aşamasında viskoz model olarak k-omega SST modeli kullanılmıştır. Akışkan olarak kullanılan hava özellikleri $\rho = 1,225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, $\mu = 1,5111\text{E-}05 \text{ (kg/(m}\cdot\text{s))}$.

Bu araştırma makalesi gibi silindirik hava tüneline benzer çalışmalar deneysel ve bilgisayar destekli analiz programlarında modelleyerek yapılmaktadır (Zhou ve diğerleri, 2023; Aboelezz ve diğerleri, 2020).

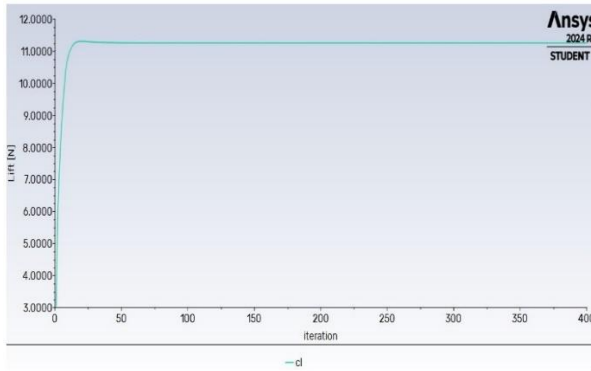


Şekil 8: Altay-0020 D ve Altay-0020 T İHA'larına Uygulanan Mesh yapısı.

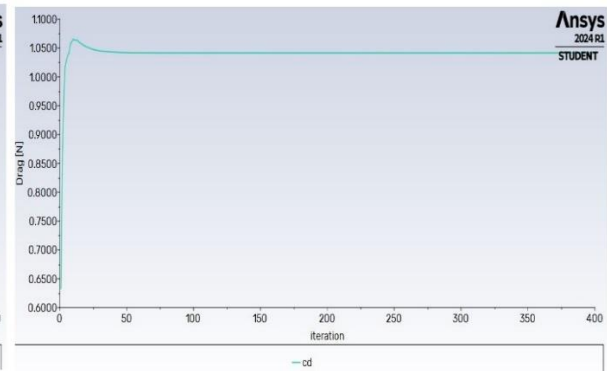
Şekil 8'de gösterilen rüzgâr tüneline 15,5 m/s hava hızında İHA'ların gövde ve kanatlarının üzerlerinde meydana gelen basınç ve hız değerlerinin en iyi sonuçlandığı 5° hücum açısındaki basınç ve hız bölgeleri Şekil 10'da gösterilmektedir. Oluşan basınç ve hız değerlerinden de gözüktüğü gibi en düşük basınçlar ana kanat (ALTAY) üzerinde oluşmaktadır. Trapez kanadın düşük basınç değerleri düz kanada göre kanat ucuna daha çok ilerlemiştir. Basınçları İHA'nın gövde ve kanatları üzerinden elde ederken, hız değerlerini ise İHA'nın tam ortasından bir adet yüzey atayarak bu yüzey üzerinden değerler elde edilmiştir.



(a)



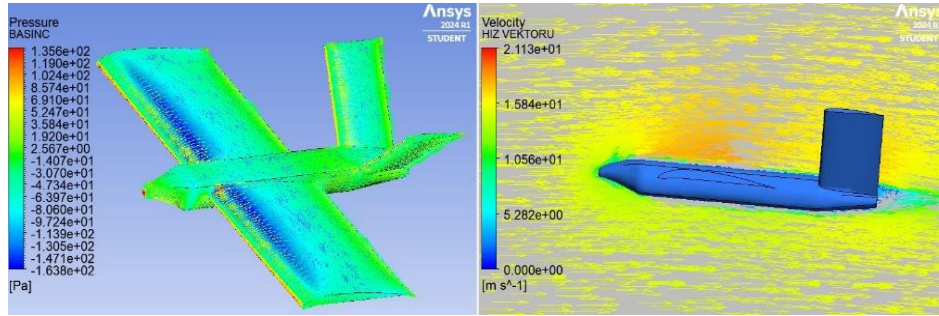
(b)



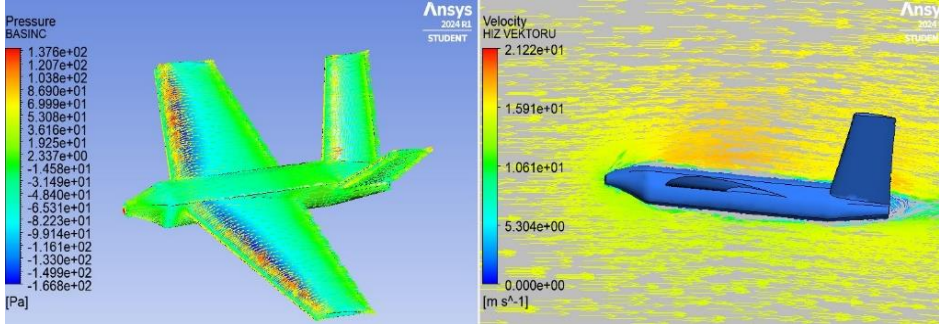
(c)

Şekil 9: (a) k-omega SST modeli iterasyon eğrisi, (b) kaldırma kuvveti eğrisi, (c) sürtünme kuvveti eğrisi.

Şekil 9'da ANSYS Fluent programında Şekil 8'de ki mesh yapısına k-omega SST modelinde 400 iterasyonla bu makale çalışmasında yapılmış bir analiz görülmektedir. ALTAY-0020 T İHA'sının 15,5 m/s hava hızında, 5° hücum açısındaki C_L değeri 11,261 (N), C_D değeri 1.0416 (N) sonuçları alınmıştır. C_L/C_D elde edilen değer Çizelge 3'te 5° hücum açısında gösterildiği gibi 10,8'dir. Diğer tüm analizler de gerekli sınır şartlarına göre bu şekilde hareket edilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 9'da İterasyon değeri yaklaşık olarak 200 değerlerindeki C_L ve C_D eğrileri kendini sonuç değerine sabitlemiştir. Şekil 9 (a)'da eğriler düzenli olarak aşağıya doğru iniş göstererek analizin sonucunun yakınsayarak ilerlediği gözlemlenmektedir. Eğrilerde aşağı-yukarı dalgalanmalar gibi kararsız davranışlarla bu çalışmalarda karşılaşılmaştır.



(a)



(b)

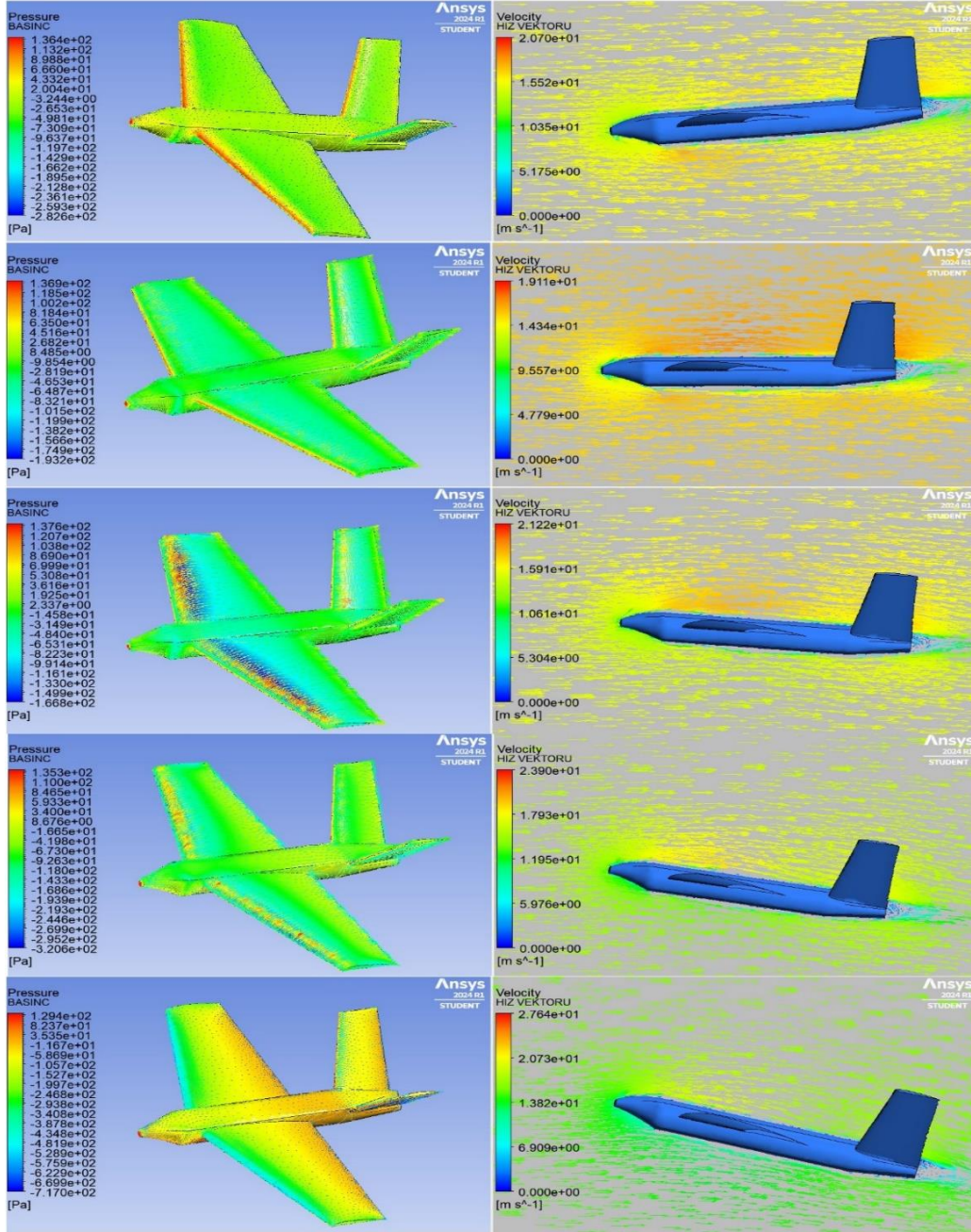
Şekil 10: (a) ALTAY-0020 D ve (b) ALTAY-0020 T İHA'larının 5° hücum açısında 15,5 m/s hava hızındaki basınç ve hız değerleri.

Çizelge 3'te ALTAY-0020 D ile ALTAY-0020 T İHA'larının 15,5 m/s hızındaki beş farklı açıdaki C_L/C_D değerleri eğrisel olarak gösterilmektedir. Bu çalışmada 15,5 m/s hız şartlarında yapılmasıyla en yüksek $Re = 250.000$ değerine uygun analizlerin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Düşük Reynolds sayılarında gerçekleştirilen benzer bir çalışmada da SD-7037 kanatlı sabit kanatlı İHA'nın ANSYS Fluent programında 10; 20; 30 ve 40 (m/s) hava hızlarında 0°; 2° ve 5° hücum açılarında bu makale çalışmada sonuçlanan Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterildiği gibi kanat ve gövde üst bölgesinde yüksek hız

düşük basınç aynı zamanda kanat ve gövde alt bölgesinde düşük hız ve yüksek basınç değerleri yer almakta ve en iyi C_L/C_D değerine 0° hücum açısında ulaşmışlardır (Ramanan, Krishnan ve Ranjan, 2021).

Şekil 10 ve Şekil 11'de İHA kanat ve gövdelerinde meydana gelen basınç ve hız dağılımları Bernoulli prensibine ele alarak alt bölgelerde düşük hız yüksek basınç ve üst bölgelerde yüksek hız düşük basınç göstererek yapılan bu makalenin çalışmasını doğrulamaktadır (Çengel ve Cimbala, 2006).



Şekil 11: ALTAY-0020-T İHA'sının -5° ; 0° ; 5° ; 10° ve 15° hücum açısında $15,5$ m/s hava hızında ki basınç ve hız değerleri.

3. SONUÇ

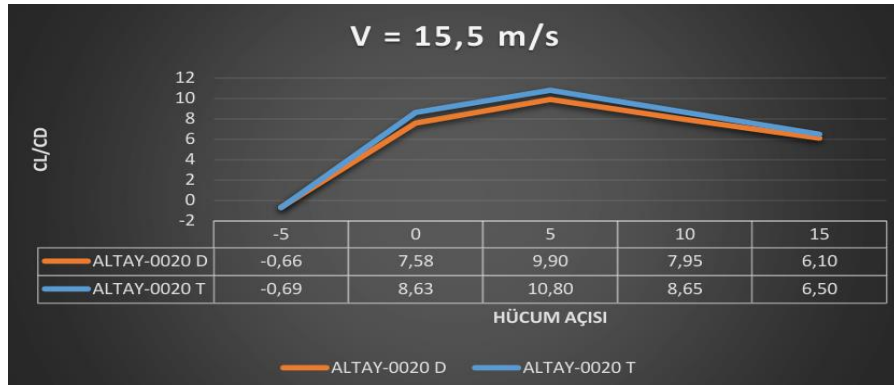
Yapılan çalışmalar düşük Reynolds sayılarında kanat geometrisinin değişiminin aerodinamik özelliklerden biri olan C_L/C_D sayısının üzerinde meydana gelen etkileri incelemek için üç kanat tipinin (NACA-0012, NACA-4415 ve SD-7037) XFLR5 programında üç farklı Re (5×10^4 , 15×10^4 ve 25×10^4) analizleri sonucu SD7037 kanadının bu çalışma koşullarında daha verimli olduğu tespit edilmiştir. XFLR5 programından elde edilen bu sonuçlara göre Re sayısı arttıkça SD-7037 kanadı ALTAY kanadına göre verimliliği daha fazla bir artış göstermekte ama ALTAY kanadı SD-7037 kanadına göre Re (5×10^4 , 15×10^4 ve 25×10^4) değerlerinde daha verimli olduğu tespit edilmiştir. ALTAY kanadı SD-7037 kanadına göre % 1,7 daha ince ve %2,07 oranında daha kambur bir özelliğe sahiptir.

ANSYS programında ALTAY ile SD-7037 kanatlarının Re (5×10^4 , 15×10^4 ve 25×10^4) sayılarında chord uzunluğunun 200 mm ölçülerinde (Bkz. Şekil 6)'da 5° ; 0° ; 5° ; ve 15° hücum açılarında ALTAY kanadının C_L/C_D değerinin SD-7037 kanadına göre daha iyi değerlerde olduğu, 10° hücum açısında ise SD-7037 kanadının daha iyi değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

XFLR5 ve ANSYS Fluent programlarında Re (5×10^4 , 15×10^4 ve 25×10^4) değerlerinde en iyi C_L/C_D sayısı 5° hücum açısında en verimli olduğu açıdır.

ANSYS Fluent programında ALTAY-0020 T İHA'sı ALTAY-0020 D'ye göre Çizelge 3'te gösterildiği gibi daha iyi sonuçlar vermektedir. Her iki İHA içinde C_L/C_D değerleri -5° hücum açısında negatif değerlerde, 5° hücum açısına kadar artış göstermekte ve 5° hücum açısından sonra 15° hücum açısına kadar düşüş göstermektedir.

Çizelge 3: ALTAY-0020 D ile ALTAY-0020 T İHA'larının 15,5 m/s hızındaki beş farklı açıdaki C_L/C_D değerleri.



Düşük Reynolds sayılarında yapılan diğer çalışmalarda da 0° ; 5° ; 10° ve 15° hücum açılarından elde edilen grafikler Çizelge 3'te ki elde edilen grafik ile benzerlik göstermektedir (Görgülü, Özgür ve Köse, 2021).

Kanatlar ve tasarlanan İHA'lar üzerinde 15° hücum açısında hava akışkanının yüzey üzerinden erken ayrılmalara bu sebeple dönen düzensiz akışkan yapıları (vorteks) ve türbülanslar oluşmaya başlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

M.A.: Kavramsallaştırma, üç boyutlu tasarım, aerodinamik analiz, yöntem, yazılım, doğrulama, formel analiz, araştırma, kaynaklar, yazı yazma- orijinal taslak hazırlama.

E.T.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar, yazı yazma- gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- Aboelezz, A., Hassanalian, M., Desoki, A., Elhadidi, B., & El-Bayoumi, G. (2019). Design, experimental investigation, and nonlinear flight dynamics with atmospheric disturbances of a fixed-wing micro air vehicle. *Aerospace Science and Technology*, 97, 105636. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105636>
- Akdemir A. (2021). *Biyomimetik tabanlı uçak kanadı tasarımı* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Altay, M. (2024). *Sabit kanatlı İHA'nın tasarımında kanat geometrisinin etkileri ve aerodinamik analizleri* (Yüksek Lisans Tezi), Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli.
- Aytaç F., Çelik Ü. & Gençoğlu M. (2023). *Küçük İHA'lar İçin 3D Baskılı Şekil Değiştirebilir Kanat Tasarımı ve Testleri*. Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, 35(2), 847-853, 2023.
- Bozkurt A. (2022). *İnsansız hava araçlarının iş sağlığı ve güvenliği alanında kullanılmasının önemi ve muhtemel avantajları*. Yüksek lisans tezi.
- Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M. (2006). *Akışkanlar Mekaniği: Temeller ve Uygulamalar*. McGraw-Hill Bilim/Mühendislik/Matematik.
- Dilmaç E. (2019). *Naca-4415 rüzgâr türbini kanat profilinde firar kenarı etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Durmuş S. (2023). *Aerodynamic Performance Comparison of Airfoils In Flying Wings UAV*. International Journal of Innovative Engineering Applications vol. 7, issue 1 (2023). <https://dergipark.org.tr/ijiea>
- Gör, İ., Doğru, H. M., & Korkmaz Ü. (2019). Uçuş esnasında değiştirilebilir kanat profili kullanılarak NACA 4412'nin aerodinamik performansının artırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34:2 (2019) 1109-1125. DOI: 10.17341/gazimmfd.460536.
- Görgülü, Y. F., Özgür, M. A., & Köse, R. (2021). NACA 0009 profilli bir kanadın düşük bir Reynolds sayısında had analizi. *Politeknik Dergisi*, 24(3), 1237-1242. <https://doi.org/10.2339/politeknik.877391>
- Kahveci M. ve Can N. (2017). *İnsansız Hava Araçları: Tarihçesi, Tanımı, Dünyada Ve Türkiye'deki Yasal Durumu*", *Selçuklu Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 511-535.
- Kaynak B. (2022). *Sabit kanatlı insansız hava aracında kanat geometri optimizasyonunun performansa etkisi*. Yüksek lisans tezi.
- Prieto, M., Escarti-Guillem, M. S., & Hoyas, S. (2023). Aerodynamic optimization of a VTOL drone using winglets. *Results in Engineering*, 17, 100855. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100855>

- Ramanan, G., Krishnan, P. R., & Ranjan, H. (2021). An aerodynamic performance study and analysis of SD7037 fixed wing UAV airfoil. *Materials Today Proceedings*, 47, 2547–2552.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.051>
- Uğur M. (2019). *İnsansız hava araçlarında rüzgâr enerjisi yolu ile enerji verimliliğinin arttırılması*. Yüksek lisans tezi.
- Ünler T., Dağ T., & Öztürk M. (2022). Sabit Kanatlı Bir İnsansız Hava Aracının Konsept Tasarımı. 3rd *International Conference On Applied Engineering And Natural Sciences*, ICAES 2022, Konya, Türkiye.
- Villi O. ve Yakar M. (2017). İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri, *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2022: 4(2); 73-100.
- Zhao, A., Zou, H., Jin, H., & Wen, D. (2019). Structural design and verification of an innovative whole adaptive variable camber wing. *Aerospace Science and Technology*, 89, 11–18.
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.02.032>
- Zhou, W., Ma, P., Wei, B., Gao, Y., & Sun, Z. (2023). Experimental study on aerodynamic characteristics of fixed-wing UAV air docking. *Aerospace Science and Technology*, 137, 108257.
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108257>

A Digital Twin-Based Study of Material Behaviour in the Rolling Process

Kadir GÖK ^{1*}, Cemal ESEN ²

¹Department of Biomedical Engineering, Engineering and Architecture Faculty, Izmir Bakircay University, Izmir, Turkey

²Natural Sciences Institute, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Manisa Celal Bayar University, Manisa, Turkey

Received: 04.11.2024, Accepted: 9.12.2024, Published: 31.12.2024

ABSTRACT

The study proposes the development of a digital twin model for the rolling process. This virtual representation allows for the investigation of how various rolling parameters influence the quality of the final product. By employing finite element analysis (FEA), the model can simulate the rolling process under different conditions.

Specifically, the study focuses only workpiece material which includes aluminum alloy (Al2024) for digital twin scenario. Through simulations, critical parameters like the Z-force exerted on the workpiece can be determined and compared. This enables researchers to evaluate different scenarios and identify optimal rolling conditions without the need for costly physical experiments.

In this way, optimal rolling conditions can be determined without the need for costly physical experiments, and production processes can be improved. It can be said that the digital twin model is an important tool for more efficient and productive production in the rolling industry. In particular, digital twin models supported by FEA offer a groundbreaking approach to production by simulating the complexities of rolling processes in detail. Thus, production processes can be optimized, product quality can be increased, costs can be reduced, and more sustainable production can be achieved. The digital twin is becoming an indispensable tool for more efficient and productive production in the rolling industry.

Keywords: Rolling; Friction coefficient; Roller Diameter; Finite element analysis; Digital twin.

Haddelenme Sürecinde Malzeme Davranışının Dijital İkiz Temelli İncelenmesi

ÖZ

Çalışma, haddeleme süreci için bir dijital ikiz modelinin geliştirilmesini önermektedir. Bu sanal temsil, çeşitli haddeleme parametrelerinin son ürünün kalitesini nasıl etkilediğini incelemeye olanak tanır. Sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılarak model, farklı koşullar altında haddeleme sürecini simüle edebilir.

Özellikle çalışma, dijital ikiz senaryosu için alüminyum alaşımı (Al2024) içeren yalnızca iş parçası malzemesine odaklanmaktadır. Simülasyonlar yoluyla, iş parçasına etki eden Z-kuvveti gibi kritik parametreler belirlenebilir ve karşılaştırılabilir. Bu, araştırmacıların farklı senaryoları değerlendirmelerine ve pahalı fiziksel deneylere gerek kalmadan optimum haddeleme koşullarını belirlemelerine olanak tanır.

Bu sayede, pahalı fiziksel deneylere gerek kalmadan, optimum haddeleme koşulları belirlenebilecek ve üretim süreçleri iyileştirilebilecektir. Dijital ikiz modelinin, haddeleme endüstrisinde daha etkin ve verimli üretim için önemli bir araç olduğu söylenebilir. Özellikle, SEA ile desteklenen dijital ikiz modelleri, haddeleme süreçlerindeki karmaşıklığı detaylandırılmış bir şekilde simüle ederek, üretimde çığır açıcı bir

yaklaşım sunmaktadır. Böylece, üretim süreçleri optimize edilerek, ürün kalitesi artırılabilir, maliyetler düşürülebilir ve daha sürdürülebilir bir üretim gerçekleştirilebilir. Dijital ikiz, haddeleme endüstrisinde daha etkin ve verimli üretim için vazgeçilmez bir araç haline gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Haddeleme; Sürtünme katsayısı; Hadde çapı; Sonlu elemanlar analizi; Dijital ikiz.

1. INTRODUCTION

Rolling can be defined as the sizing or forming of the workpiece by the effect of the compression by passing between at least two rollers rotating in opposite directions around their axes. Rolling is one of the most important plastic forming methods. The plastic forming process can be defined as the production without a mass or chemical change of products (Çapan, 2010; Kayalı, 1995). During rolling, the rollers rotate at the same speed and opposite direction to each other. The workpiece is shaped to the desired geometry as it passes through the rollers. The rolling process is classified into two groups as cold and hot rolling. If the rolling process performs above the recrystallization temperature of the workpiece, it is called hot rolling. If the rolling process performs below the recrystallization temperature of the workpiece, it is called cold rolling. In hot rolling, large deformations of the workpiece occur. The main purpose is to form the workpiece. In cold rolling, the purpose is to shape the workpiece as well as to increase strength by the strain hardening of the workpiece during the process and to give the final forming of the product. The surface quality and dimensional tolerance values of the products produced by cold rolling are very high (Groover, 2010). In order to produce the final product of desired quality after the rolling process, rolling parameters should be determined in the best way. These parameters are the friction coefficient, the structure of the workpiece, the diameters of the rollers, the rolling speed, the rolling temperature, and they are among the most important factors determining product quality. All of these parameters are generally designed from prior experience. However, since rolling systems are costly systems, the smallest error in the design of rolling systems leads to serious cost loss. It is very important to know or predict in advance how these parameters affect the rolling system.

Computer aided finite element analyses (FEA) and computational fluid dynamics (CFD) were used to solve mechanical properties of processes, simulations of COVID-19 and other infections and optimal configuration of implant materials (Gök et al., 2014; Gök, 2015; 2021a; 2021b; Gök & Gök, 2024; Gök, Gök & Kışioğlu, 2019; Gök et al. 2019; Gök, Selçuk & Gök, 20121; Pirhan, Gök & Gök, 2020).

This study proposes the development of a digital twin model to simulate the rolling process. By leveraging FEA, the model can accurately predict the behaviour of the work piece under various rolling conditions. Key parameters such as friction coefficient can be systematically varied to assess their impact on the final product quality. Specifically, the study focuses only on commonly (Gök et al., 2014; Gök, 2015; 2021a; 2021b; Gök & Gök, 2024, Gök et al., 2019a; Gök et al., 2019b; Gök et al., 2021; Pirhan et al., 2020) used work piece material which includes aluminium alloy (Al2024), Through simulations, critical parameters like the Z-force exerted on the workpiece can be calculated and compared. This allows for the identification of optimal rolling conditions without the need for costly physical experiments. By employing a digital twin approach, researchers can significantly reduce time and cost associated with traditional experimental methods while gaining valuable insights into the rolling process.

2. ROLLING PROCESS

Rolling, which is one of the mass forming methods, is a process of plastic forming which is defined as resizing or forming the workpiece by passing between two rollers, which rotate in opposite direction to each other and which are called rollers. Figure 1 is a schematic representation of the rolling process.

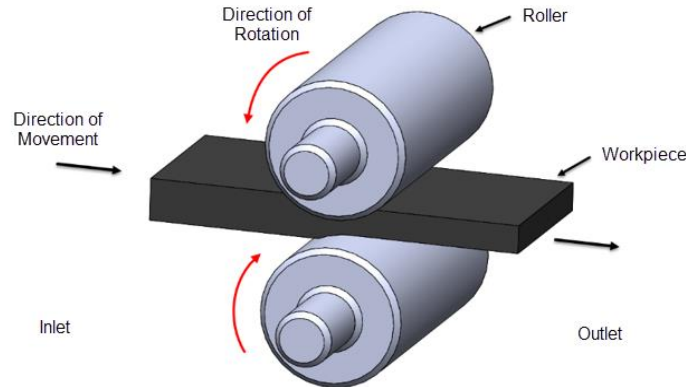


Figure 1: Schematic representation of the rolling process

2.1 Forces in Rolling Process

During the rolling process, two different fundamental forces act on the workpiece. As shown in Figure 2, these forces are the radial force (P_r) and the tangential friction force (F_s). P_r can be defined as rolling force or compression force. F_s is defined as the frictional force that occurs along the arc in which the workpiece and the roller contact. The force F_s is critical for the start of the rolling process. F_s can be calculated by multiplying P_r and friction coefficient (μ) in Eq. 1. When the horizontal components of the forces P_r and F_s shown in Figure 2 are examined, three different situations arise. These situations are explained by equations (2), (3) and (4).

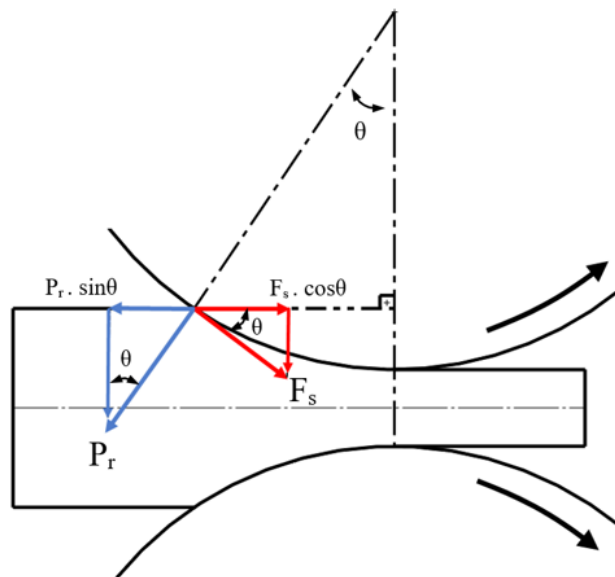


Figure 2: Forces during the rolling process

$$F_s = N \cdot \mu \quad (1)$$

$$F_s \cdot \cos\theta > P_r \cdot \sin\theta \text{ ise } \mu > \tan\theta \quad (2)$$

$$F_s \cdot \cos\theta = P_r \cdot \sin\theta \text{ ise } \mu = \tan\theta \quad (3)$$

$$F_s \cdot \cos\theta < P_r \cdot \sin\theta \text{ ise } \mu < \tan\theta \quad (4)$$

When the equations and Fig. 2 are examined, the condition in Eq. (2) is required to start the rolling process. In other cases, the workpiece cannot be pulled between the rollers. The workpiece is pushed back from the rollers and the rolling process cannot start due to insufficient friction force (Çapan, 2010; Esen, 2019; Groover, 2010; Kayalı, 1995).

3. MATERIALS AND METHODS

In this study, the different rolling parameters were analyzed and it was aimed to find optimum rolling parameters and to investigate how these parameters affect the rolling process by using FEA. The process parameters were given in Table 1. During the analysis, the thickness of the workpiece with dimensions of 500 x 230 was reduced from 25.4mm to 20.3mm by cold rolling method. The rolling system was modeled in Solidworks in three dimensions. As a finite element program, Simufact Forming program, which is powerful especially in the field of plastic forming, was used (Figure 3).

Table 1: Process parameters

Friction coefficient	Material Types	Roller Diameters
0,1	Al2024	610mm
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		
0,6		
0,7		
0,8		
0,9		
1		

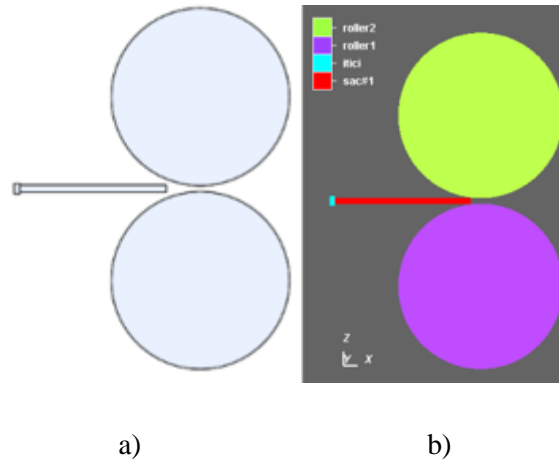


Figure 3: a) 3D modeling of rolling system b) Finite element model

4. NUMERICAL ANALYSIS

Numerical analyzes were performed using FEA and the results were examined according to friction coefficient, material type and roller diameter. In the Simufact Forming program, the vertical component of the rolling force shown in Figure 4 was compared. The vertical component of the rolling force is called the Z Force.

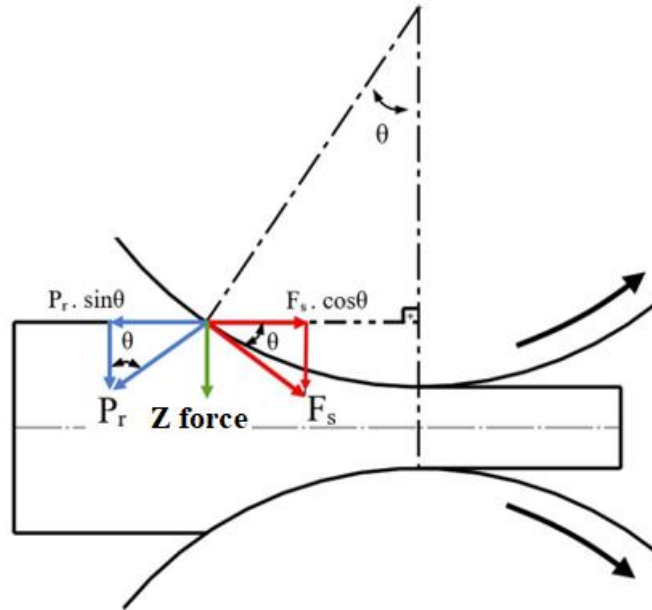


Figure 4: Representation of Z Force

4.1. Effect of Friction, Material, and Roller Diameter on the Rolling Process

A digital twin model was utilized to investigate the influence of the friction coefficient on the rolling process. Simulations were conducted for the Al2024 material with varying friction coefficients (0.1-1.0). Results indicated that increasing the friction coefficient generally leads to higher Z-force. These findings

align with previous studies and provide valuable insights for optimizing rolling processes and material selection (Figure5). When the numerical analyzes made for three different materials according to the friction coefficients are examined, it is seen that as the value of the friction coefficient increases, the force Z is increased. Gunasekera et al. (1998) have shown that the results are in this direction. In addition to these results, it was found that μ value does not affect Z Force after a certain value. When the graphs are examined, the optimum value of the friction coefficient can be taken as 0.3.

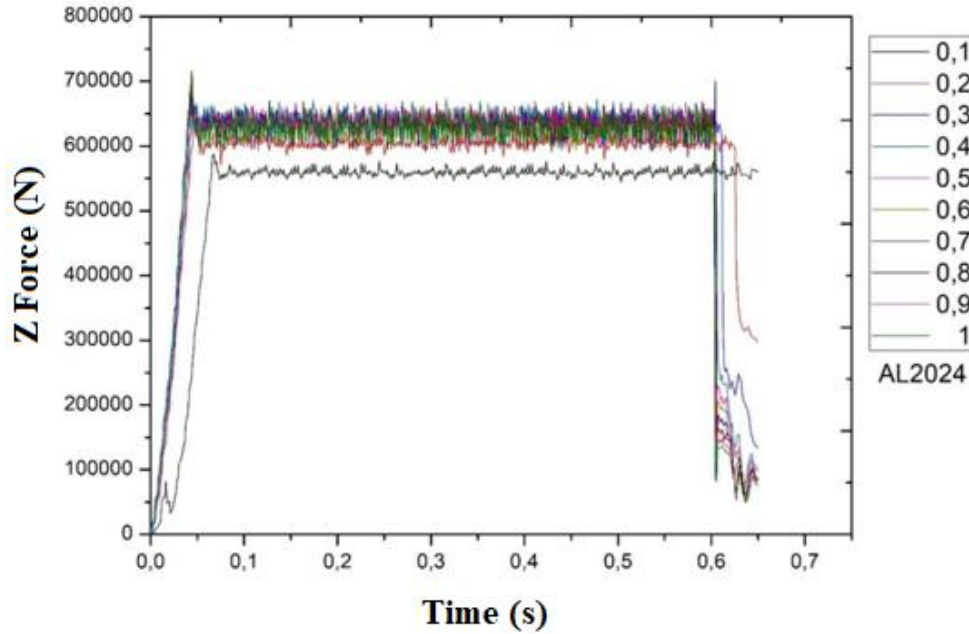


Figure 5: Z Force variation at different friction coefficients for AL2024

4.2. Proposal of a digital twin model for Rolling process

A digital twin is a virtual replica of a real-world entity, such as a product, system, or process. This digital counterpart enables various applications, including simulation, integration, testing, monitoring, and maintenance. Originally conceived as a cornerstone for Product Lifecycle Management, digital twin technology is now poised to revolutionize precision medicine by facilitating personalized diagnoses and treatments (Grieves, 2002; T. Sun, He, & Li, 2023). Figure 6 illustrates a practical application of digital twin technology. On the other study presented a method to improve manufacturing quality by using a digital thread to analyze product data and adjust production steps accordingly (Liu, et al., 2023). Another paper aimed to improve the performance of hot rolling process control systems by using a digital twin to analyze system performance, identify issues, and optimize controller parameters (Sun, et al., 2024). Another paper aimed to reduce vibration in a continuous rolling mill by using a digital twin to optimize process parameters and improve real-time data accuracy (Hu et al., 2024). The paper aimed to improve the quality and efficiency

of roll forming processes by developing a digital twin model and a product-oriented feature data management framework to analyze complex data and optimize process parameters (Ren et al., 2024).

Digital twin technology offers significant potential to optimize key parameters in rolling processes, such as friction coefficient, temperature, speed, and pressure, enhancing both efficiency and product quality. By simulating these parameters, the digital twin helps understand complex deformation mechanisms; for instance, increasing the friction coefficient raises the Z-force on the workpiece, but this force eventually saturates. Through virtual testing, digital twins reduce energy consumption, improve surface quality, and minimize material waste. Thus, digital twin technology is crucial for creating more sustainable and high-quality rolling processes.

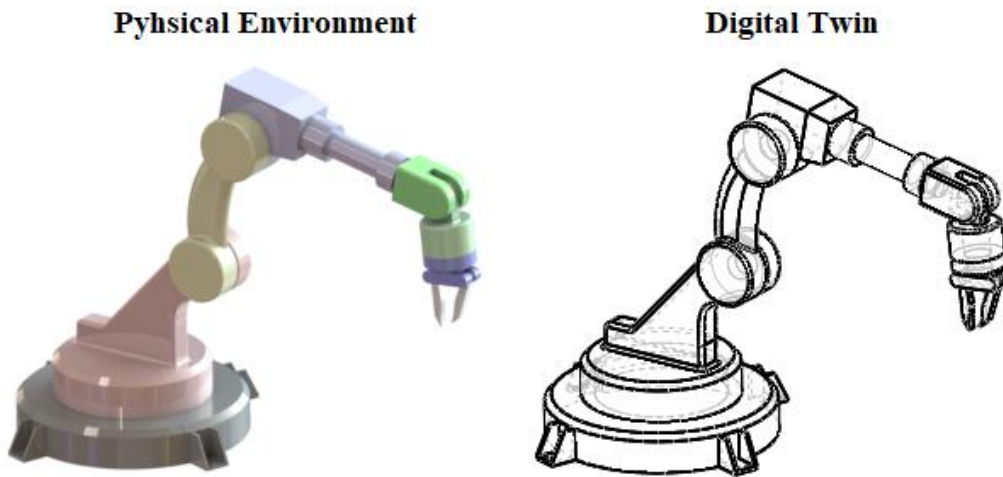


Figure 6: Application of digital twin technology

Results indicated that increasing the friction coefficient generally leads to higher Z-force, aligning with previous studies. However, the model also revealed a saturation point, beyond which further increases in the friction coefficient did not significantly affect the Z-force. Importantly, the digital twin model can be used to predict the induced stresses and strains within the material, allowing for analysis of potential fatigue and wear. By optimizing the friction coefficient, it is possible to minimize these effects and extend the lifespan of the rolling mill components. The model's ability to simulate real-world conditions and predict the impact of process parameters makes it a valuable tool for improving the efficiency and durability of rolling processes.

5. CONCLUSION

This study investigates the influence of key rolling parameters, such as the friction coefficient on the deformation behavior of the workpiece during the rolling process. A digital twin model, supported by FEA, was employed to simulate the complex deformation mechanisms and predict the resulting stress and strain

distributions within the workpiece. The study found that as the friction coefficient increases, the Z-force exerted on the workpiece also increases, but beyond a certain critical friction coefficient value, the Z-force tends to saturate. The optimal friction coefficient range was determined to be between 0.2 and 0.4 for all materials considered. The digital twin model proved valuable in optimizing the rolling process, reducing energy consumption, and improving product quality by simulating various scenarios. This study provides valuable insights for developing more efficient and sustainable rolling processes for a wide range of materials.

Digital twin technology shows great promise for future manufacturing by enabling detailed simulations that optimize production parameters. This study demonstrates how digital twins can reduce energy consumption, improve material efficiency, and enhance product quality by analyzing the effects of friction on deformation in the rolling process. With capabilities to simulate and validate complex mechanisms, digital twins are set to become essential tools, supporting more efficient, sustainable, and innovative manufacturing methods.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The authors declare that there are no conflicts of interest related to this work.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

K.G.: Methodology, investigation, writing—review and editing.

C. E.: Finite element analysis, original draft preparation, resources.

REFERENCES

- Çapan, L. (2010). *Metallere plastik şekil verme: Çağlayan Kitabevi*.
- Esen, C. (2019). *Optimization of rolling parameters by finite element analysis*. (MsC Master Thesis). Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- Gök, A., Inal, S., Taşpınar, F., Gülbandılar, E., & Gök, K. (2014). Fatigue behaviors of different materials for schanz screws in femoral fracture model using finite element analysis. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 8(May-June 2014), 576-580.
- Gök, K. (2015). Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations. *Measurement*, 75, 57-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.034>
- Gök, K. (2021a). Investigation of the use of silicone pads to reduce the effects on the human face of classical face masks used to prevent from COVID-19 and other infections. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 235(5), 1742-1747. doi:10.1177/09544089211019581
- Gök, K. (2021b). Investigation Using Finite Element Analysis of Effect on Crater Geometry of Different Abrasive Types in Abrasive Water Jet Machining. *Surface Review and Letters*, 28(07), 2150060. doi:10.1142/s0218625x21500608

- Gök, K., & Gök, A. (2024). The Biomechanical Performance of Implant Screws with Different Biomaterials in Orthopedic Bone Fixation Procedures. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. doi:10.1007/s12666-024-03371-3
- Gök, K., Gök, A., & Kişioğlu, Y. (2019a). Computer Aided Finite Element Simulation of the Developed Driller System for Bone Drilling Process in Orthopedic Surgery. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 18(04), 583-594. doi:10.1142/s0219686719500318
- Gök, K., Inal, S., Urtekin, L., & Gök, A. (2019b). Biomechanical performance using finite element analysis of different screw materials in the parallel screw fixation of Salter–Harris Type 4 fractures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(3), 143. doi:10.1007/s40430-019-1640-z
- Gök, K., Selçuk, A. B., & Gök, A. (2021). Computer-Aided Simulation Using Finite Element Analysis of Protect Against to Coronavirus (COVID-19) of Custom-Made New Mask Design. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. doi:10.1007/s12666-021-02227-4
- Grieves, M. (2002). *SME Management Forum Completing the Cycle: Using PLM Information in the Sales and Service Functions*.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*: John Wiley & Sons.
- Gunasekera, J. S., Jia, Z., Malas, J. C., & Rabelo, L. (1998). Development of a neural network model for a cold rolling process. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 11(5), 597-603. doi:[https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(98\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(98)00025-6)
- Hu, Y., Zhang, Y., Ma, X., Du, X., Wang, W., & Zhang, H. (2024). Virtual commissioning and process parameter optimization of rolling mill based on digital twin. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(1), 705-716. doi:10.1007/s00170-023-12718-x
- Kayalı, S. (1995). *Plastik şekil verme ilke ve uygulamaları: problemleri ve çözümleri*: Bilim Teknik ve Yayınevi.
- Liu, S., Lu, Y., Shen, X., & Bao, J. (2023). A digital thread-driven distributed collaboration mechanism between digital twin manufacturing units. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 145-159. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.014>
- Pirhan, Y., Gök, K., & Gök, A. (2020). Comparison of two different bowel anastomosis types using finite volume method. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 23(8), 323-331. doi:10.1080/10255842.2020.1722809
- Ren, Y., Dong, J., He, J., Zhang, D., Wu, K., Xiong, Z., . . . Liu, S. (2024). A novel six-dimensional digital twin model for data management and its application in roll forming. *Advanced Engineering Informatics*, 61, 102555. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102555>
- Sun, J., Chen, S., Ding, C., Peng, W., & Zhang, D. (2024). Application of digital twin for industrial process control: A case study of gauge-looper-tension optimized control in strip hot rolling [version 1; peer review: 1 not approved]. *Digital Twin*, 4(10). doi:10.12688/digitaltwin.17971.1
- Sun, T., He, X., & Li, Z. (2023). Digital twin in healthcare: Recent updates and challenges. *Digit Health*, 9(20552076221149651), Jan-Dec.

Sürdürülebilir Binalar İçin Güneşlenme Süresinin 3B Modellenmesi ve Simülasyonu Üzerine Bir Araştırma

Ahmet USLU^{1*}, Abtullah TUĞCU²

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Türkiye

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Türkiye

Geliş: 15.10.2024, Kabul: 4.11.2024, Yayınlanma: 31.12.2024

ÖZ

Güneşlenme süresi, insan sağlığı, tarım, çevre, ekosistem, iklim değişikliği, mimarlık ve güneş enerjisi alanındaki sürdürülebilirlik çalışmalarını için önemli bir meteorolojik parametredir. Bu parametre, kentsel binaların güneş enerjisi potansiyelinin analizi için değerli bir veri kaynağıdır. Üç boyutlu (3B) sanal bina modelleri, kentsel planlama sürecinde güneş enerjisi çalışmalarını destekleyerek daha doğru ve görsel olarak net simülasyonlar sağlarlar. Bu çalışmada, Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi'nin 3B sanal modeli kullanılarak, kış ve yaz gündönümü (21 Aralık ve 21 Haziran) tarihleri ile ekinoks (21 Mart ve 23 Eylül) tarihlerinde binanın çatı ve cephe yüzeylerindeki güneşlenme süresinin mekânsal-zamansal analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı içerisinde, en uzun güneşlenme süresinin yaz gündönümünde, en kısa güneşlenme süresinin kış gündönümünde gerçekleştiği, ilkbahar ve sonbahar ekinokslarında benzer güneş ışığı koşullarının yaşandığı tespit edilmiştir. Çalışma, kamu binalarının önemli bir bileşeni olan hastanelerde gelecekteki enerji tasarrufu tasarımlarına rehberlik etmek için gelişmiş 3B simülasyon araçlarını kullanarak sürdürülebilir kentsel planlama ve çevre koruma gibi daha geniş hedeflere katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir bina; 3B modelleme; Güneşlenme süresi; Mekânsal-zamansal dağılım

A Study on 3D Modeling and Simulation of Sunshine Duration for Sustainable Buildings

ABSTRACT

Sunshine duration is an important meteorological parameter for sustainability studies in the fields of human health, agriculture, environment, ecosystem, climate change, architecture and solar energy. This parameter is a valuable data source for the analysis of the solar energy potential of urban buildings. Three-dimensional (3D) virtual building models provide more accurate and visually clear simulations by supporting solar energy studies in the urban planning process. In this study, a spatio-temporal analysis of the insolation time on the roof and facade surfaces of the building on the winter and summer solstice dates (December 21 and June 21) and the equinox dates (March 21 and September 23) was performed using a 3D virtual model of Tavşanlı Physical Therapy and Rehabilitation Hospital. Within the study area, it was determined that the longest insolation period occurred during the summer solstice, the shortest insolation period occurred during the winter solstice, and similar sunlight conditions were experienced during the spring and autumn equinoxes. The study contributes to broader goals such as sustainable urban planning and environmental protection by using advanced 3D simulation tools to guide future energy-saving designs in hospitals, a key component of public buildings.

Keywords: Sustainable building; 3D modeling; Sunshine duration; Spatiotemporal distribution

1. GİRİŞ

Güneşlenme süresi, belirli bir süre boyunca güneş ışığının yüzeye ilettiği toplam enerjiyi ölçen temel bir göstergedir (Almorox & Hontoria, 2004). Dünya Meteoroloji Örgütü'ne göre, belirli bir periyottaki güneşlenme süresi, doğrudan güneş radyasyonunun 120 W/m^2 'yi aştığı zaman olarak tanımlanmaktadır (Mohandes & Rehman, 2013). Küresel ısınmayı ve enerji krizini hafifletmek için güneş enerjisi kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanılması büyük önem taşımaktadır (Matzarakis & Katsoulis, 2006). Bu bağlamda güneşlenme süresi, güneş radyasyonunun tahmini (Gassar & Cha, 2020; Ismail & Al, 2022; Uçkan & Khudhur, 2022; Thapar, 2023; Pashiardis, Pelengaris & Kalogirou, 2023; Vernet & Fabregat, 2023; Teyabeen, Elhatmi, Essnid & Mohamed, 2024; Yüzer & Bozkurt, 2024;), halk sağlığı (Jaworeck & Kriwy, 2021; Fu & Wang, 2023; Kaur, Kok, Jamil & Sebayang, 2024) ve tarım (Guo, Dai, Liu, Wu, Liu & Liu, 2020; Song & Jin, 2020) odaklı araştırmalar için önemli bir meteorolojik unsur olarak kabul edilir.

Sürdürülebilir binalar, birincil enerji kullanımını azaltmak ve yerinde yenilenebilir enerji üretmek için güneş enerjisi stratejilerini kullanmalıdır. Binaların enerji performansına ilişkin 210/31/EU sayılı Avrupa direktifi, tüm yeni binaların neredeyse sıfır enerjili binalar (nZEB) olmasını, yani yerel kaynaklı yenilenebilir enerjinin artan katkısıyla yüksek enerji performansı sergilemesini gerektirmektedir (Czachura, Kanters, Gentile, & Wall, 2022). Kentsel ortamlarda yeterli güneş enerjisi erişimi, nZEB'e ulaşmada etkili olan enerji verimliliği stratejilerini destekler (Bucking, Zmeureanu & Athienitis, 2014). Güneş ışığı ısıtma, soğutma, aydınlatma ve yerinde enerji üretimi gibi bina performansının temel yönlerini etkiler (Kanters & Wall, 2014). Üç boyutlu (3B) şehir modelleri, 3B mekandaki güneş ışığı potansiyelinin değerlendirilmesini destekleyerek daha doğru ve görsel olarak net simülasyonlar sağlar (Kolečanský, Hofierka, Boglarský & Šupinský, 2021).

Literatürdeki önceki çalışmalar, güneşlenme süresinin ölçülmesi (Rocha, Fernandes, Santos, Diniz, & Junior, 2020; Zhou, Quan, Wang, Li, Li, & Zhao, 2021; Owczarek & Malinowska, 2023), güneşlenme süresinin tahmin edilmesi (Mohandes & Rehman, 2013; Kaba, Kandırmaz & Avcı, 2017), güneşlenme süresinin mekânsal ve zamansal değişimlerinin modellenmesi (Ahmadi & Ahmadi, 2019; Bartoszek, Matuszko & Węglarczyk, 2021; Tang, Zhu, Wei, Zhao, Wu & Tian, 2022; Li, Xia, Jiang, Xu, Wen & Xu, 2024), yerleşim alanlarında güneşlenme süresinin 3B analizi (Du, Ning & Yan, 2020; Huang, Li, & Zhuang, 2021; Özdemir & Çakmak, 2024) ve kentsel yapı tasarımında güneşlenme süresinin optimizasyonu (Karagüler & Sterler, 2022; Chen, You, Shu & Huang, 2024; Li, Peng, Xu & Li, 2024) üzerine odaklanmıştır.

Literatür incelendiğinde, önceki araştırmalarda, dünya çapında bina sektörünün enerji tüketimini azaltmak için kapsamlı araştırmalar yürütülmüştür. Ancak, araştırmaların çoğu ticari ve konut binalarına odaklanırken, bu binalara nazaran genellikle daha yüksek enerji tüketimini içeren kamu binaları yeterli ilgiyi

görmemiştir. Kamu binalarının önemli bir bileşeni olan hastanelerde enerji tüketimi, karmaşık bina fonksiyonları, teşhis ve tedavi için kullanılan elektrikli ekipmanların çokluğu ve uzun çalışma saatleri nedeniyle yoğundur. Hastanelerin enerji tüketiminin diğer kamu binalarının 1,6 - 2,0 katı olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle, küresel ısınmaya uyum sağlamak ve 2030 yılına kadar karbon emisyonu zirvesine ve 2060 yılına kadar karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunmak için hastanelerdeki enerji tüketimini azaltmak oldukça önemlidir (Shi, Yan, Li & Li, 2021).

Bu çalışmada, bir sağlık tesisinin 3B sanal modeline dayalı olarak çatı ve cephe yüzeylerindeki güneşlenme süresinin modellenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Sketchup yazılımı ile Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi'nin mimari projesi üzerinden 3B modeli oluşturulmuş ve ardından 3B model Autodesk Forma yazılımına aktarılarak bina zarfındaki her noktanın aldığı güneşlenme süresinin, kış ve yaz gündönümleri (21 Aralık ve 21 Haziran) ile ekinoks tarihlerindeki (21 Mart ve 23 Eylül) mekânsal dağılımlarının simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma, bir mahalle veya bina ölçeğinde güneş enerjisi projesi planlama, fizibilite çalışmaları yürütme ve 3B uygulamalar geliştirme üzerinde çalışan araştırmacılara ulaşmayı hedeflemekte, 3B güneş ışığı potansiyeli değerlendirmesi için referans oluşturabilecek entegre bir yaklaşım sunmaktadır. Bununla birlikte çalışma, hastanelerde gelecekteki enerji tasarrufu tasarımlarına rehberlik etmek için gelişmiş simülasyon araçlarını kullanarak sürdürülebilir kentsel planlama ve çevre koruma gibi daha geniş hedeflere katkıda bulunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmada çalışma alanı olarak Kütahya ili Tavşanlı ilçesinde yer alan Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi belirlenmiştir. 18 Ağustos 2021 tarihinde hizmete açılan hastane, 15.672 m² parsel alanı içinde 3.855 m² taban alanına, 16.510 m² kapalı alana ve 110 araçlık açık otopark alanına sahiptir. Hastanede; 57 tane hasta odası, 75 tane hasta yatağı, rehabilitasyon ve egzersiz alanları, 2 tanesi büyük 4 tanesi küçük tedavi havuzları, 18 tane elektroterapi cihazı, kısa dalga radar, ESWT, CPM, Laser cihazı, Parafin banyosu, Whirpool, Gradyan banyosu, 4 kap Galvani, Hot pack, Cold pack ve TENS'ler bulunmaktadır. Hastane, rehabilitasyon alanlarında çark, merdivenler, parmak merdiven, rampalar, aktif trombolin, ergonomik bisikletler ile hizmet vermektedir. Ayrıca hastanenin içerisinde kronik ruhsal hastalıkları bulunan hastalara yönelik, psikososyal destek hizmetlerinin verildiği, takiplerinin ve tedavilerinin yapıldığı Toplum Ruh Sağlığı Merkezi de bulunmaktadır (Trhastane, 2024). Şekil 1'de çalışma alanının coğrafi konumu gösterilmektedir.



Şekil 1: Çalışma alanının coğrafi konumu.

Tavşanlı'nın yıllık güneşlenme süresi 2584 saat, yıllık güneş ışıınım değeri 1464 kWh/m²-yıl, günlük ortalama güneşlenme süresi 7,08 saat ve günlük ortalama ışıınım değeri 4,01 kWh/m²-gün'dür (EİGM, 2024). Bu veriler dikkate alındığında Tavşanlı ilçesi, güneş enerjisi alanında yatırım yapmaya uygundur (Tuğcu, 2023).

2.2. Çalışmanın Materyalleri

Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi'nin 3B modelinin oluşturulmasında SketchUp yazılımı, kış - yaz gündönümleri (21 Aralık ve 21 Haziran) ile ekinoks tarihlerindeki (21 Mart ve 23 Eylül) güneş yörüngesi diyagramının 3B gösterimi için Dr. Andrew Marsh tarafından geliştirilen 3B güneş yörüngesi yazılımı (3DSP) kullanılmıştır. 3B yapı modeli zarfındaki her noktanın aldığı güneşlenme süresinin 21 Aralık, 21 Haziran, 21 Mart ve 23 Eylül tarihlerindeki mekânsal dağılımlarının simülasyonu Autodesk Forma yazılımında gerçekleştirilmiştir.

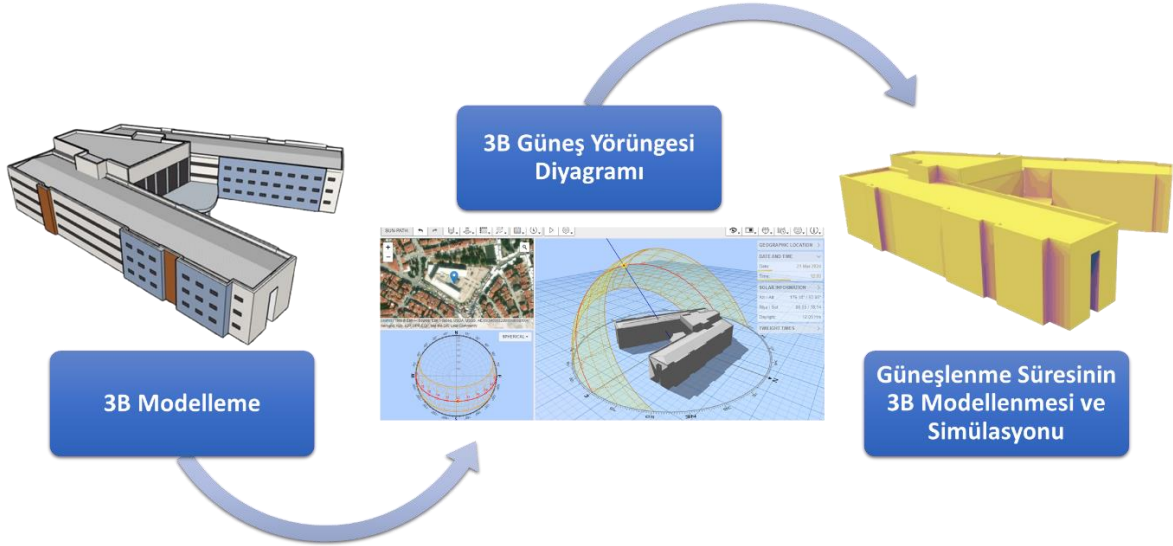
Trimble Navigation şirketine ait olan SketchUp, mimari tasarım, iç mekân, mobilya, peyzaj, endüstri ürünleri, film ve oyun tasarımı için kullanılan 3B modelleme yazılımıdır. Kullanıcı dostu olması, 3B

çizimler oluşturmak için mükemmel arayüze sahip en etkili yazılımlardan biri olması, çeşitli analizler için güçlü araçlara ve eklenti havuzuna sahip olması, veri alımı ve veri aktarımı bakımından diğer yazılımlarla uyumlu olması avantajıyla çalışma alanının 3B modellenmesinde SketchUp yazılımı tercih edilmiştir.

Autodesk Forma, daha sürdürülebilir bir yapılaşmış çevre için güneşlenme süresi analizi, gün ışığı potansiyeli analizi, rüzgâr analizi, mikro iklim analizi, gömülü karbon analizi, gürültü analizi ve güneş enerjisi analizi uygulamaları için kullanılan yapay zekâ destekli araçlar sunan bir bulut yazılımıdır. Kullanımının kolay olması, güçlü analiz araçları ile ilgili uygulamalar için hızlı sonuçlar sunmasından dolayı çalışma alanının güneşlenme süresinin modellenmesinde Autodesk Forma tercih edilmiştir.

2.3. Çalışmanın Yöntemi

Çalışma, Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi'nin 3B modellenmesi, kış - yaz gündönümleri (21 Aralık ve 21 Haziran) ile ekinoks tarihlerindeki (21 Mart ve 23 Eylül) 3B güneş yörüngesi diyagramının gösterimi, 3B yapı modeli zarfındaki her noktanın aldığı güneşlenme süresinin 21 Aralık, 21 Haziran, 21 Mart ve 23 Eylül tarihlerindeki mekânsal dağılımlarının simülasyonu aşamalarını içermektedir. Şekil 2'de çalışmada uygulanan yöntemin iş adımları görülmektedir.



Şekil 2: Çalışmanın yöntemi.

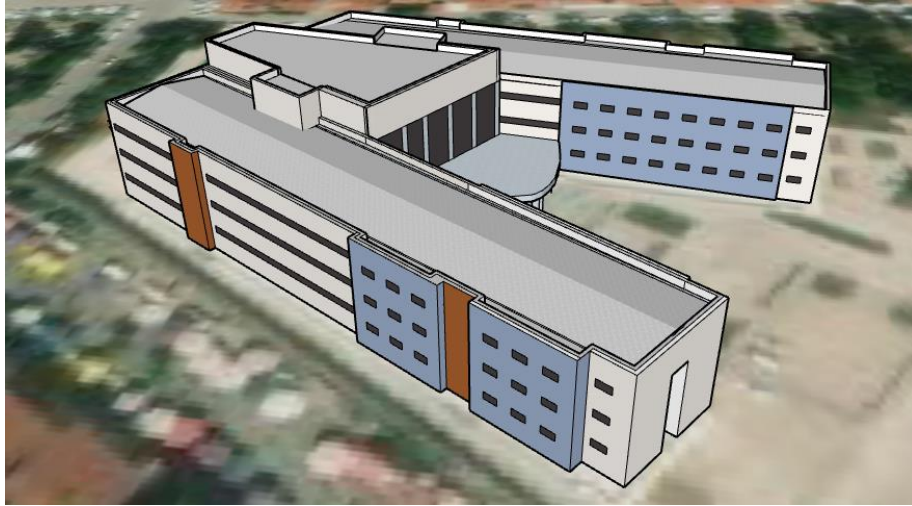
Yöntemin 3B model oluşturma aşamasında, Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi'nin 3B modeli, mimari projesinden faydalanılarak SketchUp yazılımında, LoD-3 ayrıntı düzeyinde oluşturulmuştur. 3B model, SketchUp'ın Geolocation işlevi kullanılarak coğrafi olarak konumlandırılmıştır. Hastanenin 3B modeline gerçekçi görünüm kazandırmak ve görselliğini arttırmak amacıyla renklendirme ve doku kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi'nin 3B modeli 3B güneş yörüngesi diyagramının gösterimi ve güneşlenme süresinin analizi

uygulamalarında kullanılmak üzere “.obj” uzantılı model dosyası olarak kaydedilmiştir. Güneş yörüngesi diyagramı oluşturma aşamasında, hastanenin 3B modeli Dr. Andrew Marsh tarafından geliştirilen 3B güneş yörüngesi yazılımına (3DSP) aktarılmış ve çalışma alanının, kış - yaz gündönümü tarihleri ile ekinoks tarihlerinde, saat 12:00’deki güneş yükseklik açıları ve gölgelenme durumu analiz edilmiştir. Son aşamada, Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi’nin 3B modeli Autodesk Forma yazılımına aktarılarak bina zarfındaki her noktanın aldığı güneşlenme süresinin, kış ve yaz gündönümleri ile ekinoks tarihlerindeki mekânsal dağılımlarının simülasyonu gerçekleştirilmiştir. En düşük güneşlenme süresine (0 – 1 saat) karşılık değerler mavi renk ile en yüksek (9 saat ve üzeri) güneşlenme süresine karşılık değerler ise sarı renk ile gösterilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. 3B model oluşturma

Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi’nin, yüzey dokuları uygulanmış LoD-3 ayrıntı düzeyine sahip 3B modeli Şekil 3’te gösterilmektedir. Hastanenin dikey cepheleri kuzeye, güneye, doğuya ve batıya bakmaktadır. Yüzeylerin toplam alanı 12.750,13 m² olup, bunun 8.858,55m²'sini (%69,5) dikey cepheler ve 3.892,28 m²'sini (%30,5)'sini çatılar oluşturmaktadır.

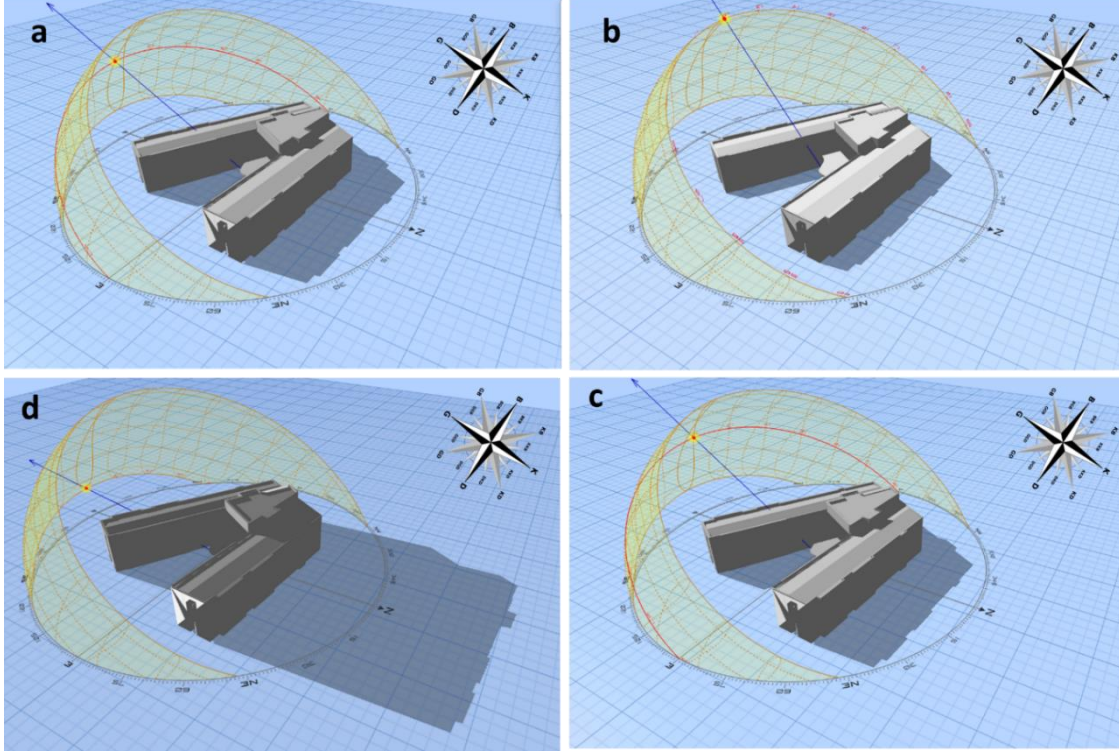


Şekil 3: Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi’nin, yüzey dokuları uygulanmış LoD-3 ayrıntı düzeyine sahip 3B modeli.

3.2. 3B güneş yörüngesi diyagramının gösterimi

Güneş yörüngesi diyagramı, güneşin belirli bir tarih ve zaman noktasında gökyüzündeki konumunu göstermektedir. Bu diyagram, yıllık bir döngü için azimutun güneş yüksekliğine göre derece cinsinden karşılaştırmasını içermektedir. Çalışma alanına ilişkin olarak, kış - yaz gündönümü tarihleri (21 Aralık ve 21 Haziran) ile ekinoks tarihlerinde (21 Mart ve 23 Eylül) saat 12:00’da çizilen güneş diyagramında güneşin

doğuşundan batışına kadar geçen zaman dilimlerine göre güneşin yaptığı güneş yükseklik açıları Şekil 4'te görülmektedir. Tavşanlı için ilgili tarihlerdeki saat 12:00'ye ait güneş yörüngesi diyagramına ilişkin bilgiler Çizelge 1'de gösterilmektedir.



Şekil 4: Çalışma alanının 3B güneş yörüngesi diyagramı (a) 21 Mart; b) 21 Haziran; c) 23 Eylül; d) 21 Aralık).

Çizelge 1: Çalışma alanı için kış - yaz gündönümü tarihleri ile ekinoks tarihlerinde saat 12:00'ye ait güneş yörüngesi diyagramına ilişkin bilgiler.

Tarih	Azimut Açısı	Yükseklik Açısı	Güneşin Doğuşu	Günbatımı	Güneş Işığı
21 Mart	176,18°	50,45°	07:03	19:15	12 sa 12 dk
21 Haziran	176,91°	73,87°	05:34	20:33	14 sa 58 dk
23 Eylül	-177,74°	51,34°	06:48	19:00	12 sa 11 dk
21 Aralık	-179,90°	27,05°	08:18	17:41	9 sa 23 dk

3B güneş yörüngesi analizi, güneşin doğuşundan batışına kadar izlediği yolu ve gölgelemenin yapı üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Çalışma alanının 3B güneş yörüngesi analizi sonuçları incelendiğinde;

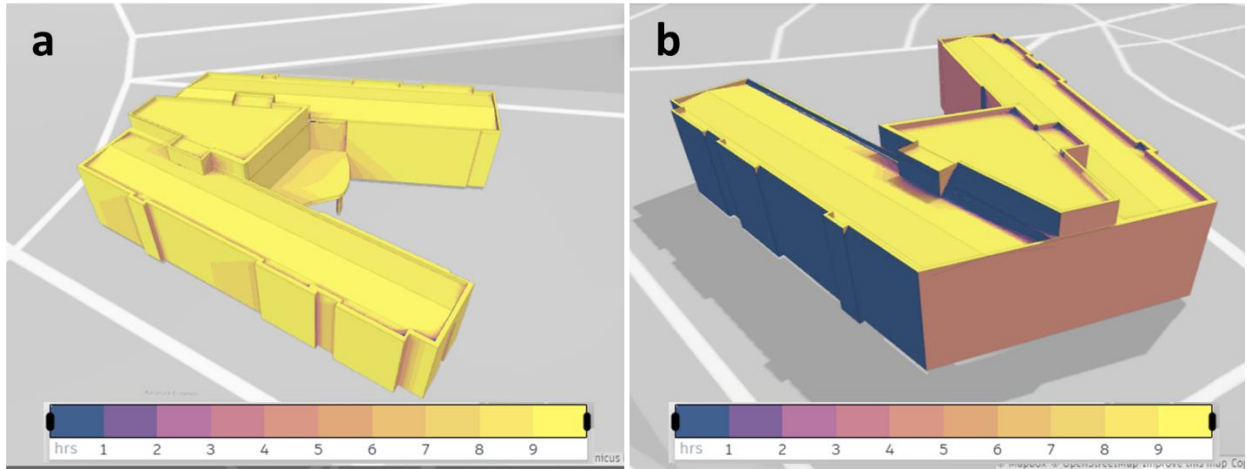
- Güneş yükseklik açılarının 21 Mart'ta 50,45°, 21 Haziran'da 73,87°, 23 Eylül'de 51,34° ve 21 Aralık'ta 27,05° olduğu,
- Ortalama güneş ışığı saatlerinin 21 Mart'ta 12 sa 12 dk, 21 Haziran'da 14 sa 58 dk, 23 Eylül'de 12 sa 11 dk ve 21 Aralık'ta 9 sa 23 dk olduğu,

- Gölgelemenin dikey cepheleri daha önemli ölçüde etkilediği, binanın dikey cephelerinde ortaya çıkan, güneş ışığı dağılımındaki mekânsal heterojenliğin, binanın ve cephe bileşenlerinin kendi kendine gölgelemesinden kaynaklandığı

gözlemlenmiştir.

3.3. Güneşlenme süresinin 3B modellenmesi ve simülasyon

Çalışma alanının 3B modelinde yapılan simülasyon analizi, güneşlenme süresinin istatistiksel değerlerini ortaya çıkarmıştır. Şekil 5'te 21 Mart tarihinde güneşlenme süresinin mekânsal dağılımlarının simülasyonu, Çizelge 2'de ise güneşlenme süresinin analizine ilişkin istatistiksel değerler gösterilmektedir.



Şekil 5: 21 Mart'ta güneşlenme süresinin mekânsal dağılımı (a) güneybatı; b) kuzey doğu)

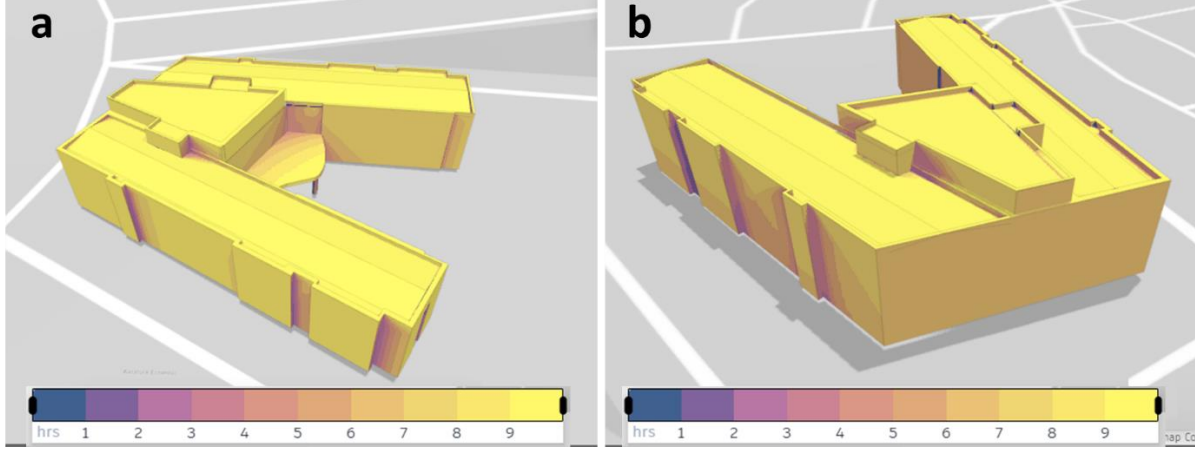
Şekil 5 ve Çizelge 2 incelendiğinde, 21 Mart tarihinde; Binanın çatı yüzeylerinin 11 – 12 saat aralığında, güneye bakan cephelerin 8 – 9 saat aralığında, batıya bakan cephelerin 4 – 5 saat aralığında, doğuya bakan cephelerin 6 – 7 saat aralığında ve kuzeye bakan cephelerin 0 – 1 saat aralığında güneş ışığı aldığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 2: 21 Mart'ta güneşlenme süresinin analizine ilişkin istatistiksel değerler.

Güneşlenme süresi (saat)	Yüzey alanı (m ²)	Yüzey alanının yüzdesel dağılımı (%)
0 - 1	2264	17
1 - 2	214	2
2 - 3	1216	9
3 - 4	189	1
4 - 5	1245	10
5 - 6	271	2
6 - 7	541	4
7 - 8	972	8

8 - 9	706	5
9+	5396	42

Şekil 6’da 21 Haziran tarihinde güneşlenme süresinin mekânsal dağılımlarının simülasyonu, Çizelge 3’te ise güneşlenme süresinin analizine ilişkin istatistiksel değerler gösterilmektedir.



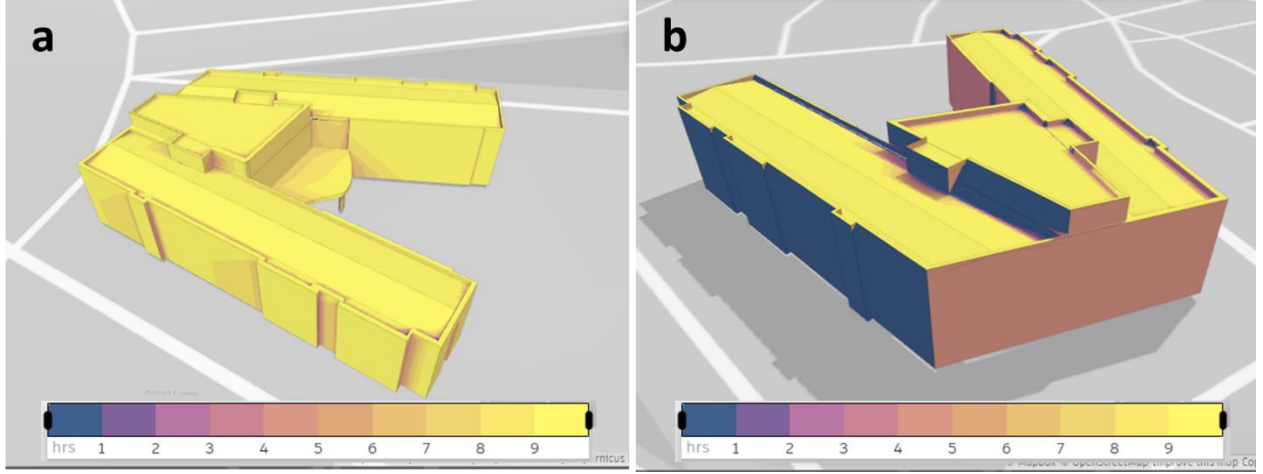
Şekil 6: 21 Haziran’da güneşlenme süresinin mekânsal dağılımı (a) güneybatı; b) kuzey doğu)

Çizelge 3: 21 Haziran’da güneşlenme süresinin analizine ilişkin istatistiksel değerler.

Güneşlenme süresi (saat)	Yüzey alanı (m ²)	Yüzey alanının yüzdesel dağılımı (%)
0 - 1	458	4
1 - 2	115	1
2 - 3	241	2
3 - 4	425	3
4 - 5	384	3
5 - 6	1580	12
6 - 7	1861	14
7 - 8	2124	16
8 - 9	2088	16
9+	3788	29

Şekil 6 ve Çizelge 3 incelendiğinde, yılın en büyük güneş yükselme açısına ve en uzun güneş ışınımı süresine sahip günü olan 21 Haziran tarihinde; Yapının çatı yüzeylerinin 14 – 15 saat aralığında, güneye bakan cephelerin 8 – 9 saat aralığında, batıya bakan cephelerin 7 – 8 saat aralığında, doğuya ve kuzeye bakan cephelerin 6 – 7 saat aralığında güneş ışığı aldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 7’de 23 Eylül tarihinde güneşlenme süresinin mekânsal dağılımlarının simülasyonu, Çizelge 4’te ise güneşlenme süresinin analizine ilişkin istatistiksel değerler gösterilmektedir.



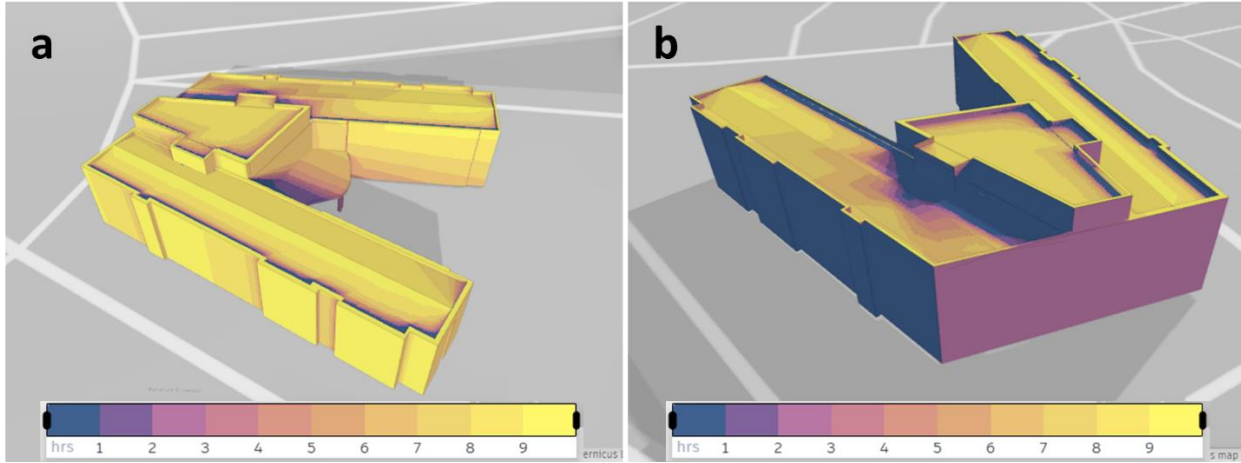
Şekil 7: 23 Eylül'de güneşlenme süresinin mekânsal dağılımı (a) güneybatı; b) kuzey doğu)

Çizelge 4: 23 Eylül'de güneşlenme süresinin analizine ilişkin istatistiksel değerler.

Güneşlenme süresi (saat)	Yüzey alanı (m ²)	Yüzey alanının yüzdesel dağılımı (%)
0 - 1	2260	17
1 - 2	197	2
2 - 3	402	3
3 - 4	1016	8
4 - 5	1247	10
5 - 6	265	2
6 - 7	545	4
7 - 8	964	7
8 - 9	705	5
9+	5413	42

Şekil 7 ve Çizelge 4 incelendiğinde, 23 Eylül tarihinde; Yapının çatı yüzeylerinin 11 – 12 saat aralığında, güneşe bakan cephelerin 8 – 9 saat aralığında, batıya bakan cephelerin 4 – 5 saat aralığında, doğuya bakan cephelerin 6 – 7 saat aralığında ve kuzeye bakan cephelerin 0 – 1 saat aralığında güneş ışığı aldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 8'de 21 Aralık tarihinde güneşlenme süresinin mekânsal dağılımlarının simülasyonu, Çizelge 5'te ise güneşlenme süresinin analizine ilişkin istatistiksel değerler gösterilmektedir.



Şekil 8: 21 Aralık'ta güneşlenme süresinin mekânsal dağılımı (a) güneybatı; b) kuzey doğu)

Çizelge 5: 21 Aralık'ta güneşlenme süresinin analizine ilişkin istatistiksel veriler.

Güneşlenme süresi (saat)	Yüzey alanı (m ²)	Yüzey alanının yüzdesel dağılımı (%)
0 - 1	4053	31
1 - 2	259	2
2 - 3	1199	9
3 - 4	180	1
4 - 5	571	4
5 - 6	362	3
6 - 7	1261	10
7 - 8	1058	8
8 - 9	2303	18
9+	1769	14

Şekil 8 ve Çizelge 5 incelendiğinde, yılın en küçük güneş yükselme açısına ve en kısa güneş ışınımı süresine sahip günü olan 21 Aralık tarihinde; Yapının çatı yüzeylerinin 8 – 9 saat aralığında, güneye bakan cephelerin 9 – 10 saat aralığında, batıya bakan cephelerin 4 – 5 saat aralığında ve kuzeye bakan cephelerin 2 – 3 saat aralığında güneş ışığı aldığı gözlemlenmiştir.

Kış ve yaz gündönümleri (21 Aralık ve 21 Haziran) ile ekinoks tarihlerindeki (21 Mart ve 23 Eylül) mekânsal dağılımlarının simülasyonu genel olarak değerlendirildiğinde; Çalışma alanı içerisinde en uzun güneşlenme süresinin yaz gündönümünde, en kısa güneşlenme süresinin kış gündönümünde gerçekleştiği, ilkbahar ve sonbahar ekinokslarında benzer güneş ışığı koşullarının yaşandığı tespit edilmiştir. Yapının güneye bakan dikey cephelerinde ve çatı yüzeylerinde gözlemlenen, güneşlenme süresi dağılımındaki mekânsal heterojenlik, cephe bileşenlerinin kendi kendine gölgelemesinden kaynaklanmıştır. Çatı yüzeyleri ve güneye bakan dikey cepheler, diğer cephelere kıyasla daha az miktarda gölge alanı ve daha fazla süre güneş ışığı topladıkları için binanın bu yüzeyleri güneş ışınımı enerjisini kullanmada daha yüksek potansiyel

göstermiştir. Mevcut bulgular ile güneşlenme süresinin analizini içeren önceki çalışmaların bulguları arasında tutarlılık bulunmaktadır (Li vd., 2024; Chen vd., 2024).

Kentler, dünyanın enerji tüketiminin üçte ikisinden fazlasını oluşturduğu ve sera gazı emisyonlarının %70'inden fazlasını ürettiği için sürdürülebilir kentsel tasarım son derece önemli hale gelmiştir (Moriarty & Wang, 2014). Bununla birlikte kentlerde konut binalarının artan yoğunluğu ve yüksekliği, dış mekanlarda yetersiz güneş ışığına maruz kalma konusundaki endişeleri artırmıştır (Li vd., 2024). Dünya çapında birçok ülke ve bölgenin yerleşim yerlerinde güneş ışığı saatleri için asgari gereksinimler bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde çoğu eyalette kış gündönümünde konutlar için ulusal asgari güneş ışığı saati standardının günde en az 1–2 saat, Avustralya'da 2 saat, İngiltere ve Rusya'da 3 saat, Çin'de 2 saat ve Japonya'da 3 saat olması zorunlu kılınmıştır (Chen vd., 2024). Ülkemizde konutlar için ulusal asgari güneş ışığı saati standardı bulunmamaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilir kentsel ve mimari tasarımı desteklemek için zorunlu ulusal güneş ışığı politikası oluşturulmalıdır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Tavşanlı Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Hastanesi'nin 3B sanal modeline dayalı olarak kış ve yaz gündönümü (21 Aralık ve 21 Haziran) tarihleri ile ekinoks (21 Mart ve 23 Eylül) tarihlerinde çatı ve cephe yüzeylerindeki güneşlenme süresinin analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bulguları ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Çalışma alanı içerisinde en uzun güneşlenme süresi yaz gündönümünde, en kısa güneşlenme süresi kış gündönümünde gerçekleşmiştir. İlkbahar ve sonbahar ekinokslarında benzer güneş ışığı koşulları yaşanmıştır.
- İlkbahar ve Sonbahar Ekinokslarında; Hastanenin çatı yüzeyleri 11 – 12 saat, güneye bakan cepheleri 8 – 9 saat, batıya bakan cepheleri 4 – 5 saat, doğuya bakan cepheleri 6 – 7 saat ve kuzeye bakan cepheleri 0 – 1 saat aralığında güneş ışığı almıştır.
- Yaz gündönümünde; Hastanenin çatı yüzeyleri 14 – 15 saat, güneye bakan cepheleri 8 – 9 saat, batıya bakan cepheleri 7 – 8 saat, doğuya ve kuzeye bakan cepheleri 6 – 7 saat güneş ışığı almıştır.
- Kış gündönümünde; Hastanenin çatı yüzeyleri 8 – 9 saat, güneye bakan cepheleri 9 – 10 saat, batıya bakan cepheleri 4 – 5 saat, doğuya ve kuzeye bakan cepheleri 2 – 3 saat güneş ışığı almıştır.
- Hastanenin dikey cephelerinde gözlemlenen, güneş ışığı dağılımındaki mekânsal heterojenlik, cephe bileşenlerinin kendi kendine gölgelemesinden kaynaklanmaktadır.

- Hastanenin çatı yüzeyleri ve güneye bakan dikey cepheler, diğer cephelere kıyasla daha az miktarda gölge alanı ve daha fazla süre güneş ışığı topladıkları için hastanenin bu yüzeyleri güneş ışınımı enerjisini kullanmada daha yüksek potansiyel göstermiştir.

Çalışma, kamu binalarının önemli bir bileşeni olan hastanelerde gelecekteki enerji tasarrufu tasarımlarına rehberlik etmek için gelişmiş 3B simülasyon araçlarını kullanarak sürdürülebilir kentsel planlama, çevre koruma ve enerji verimliliği gibi hedeflere katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmada sunulan metodolojik yaklaşımı, mimarlara, mühendislere, şehir plancılarına bir projenin erken tasarım aşamalarında bilinçli kararlar almaları için kılavuzluk sağlamak, teknik kararlara yardımcı olmak ve kentsel gölgelemenin güneş potansiyeli üzerindeki etkisini sınırlamak için farklı kentsel bağlamlarda kullanılabilir. Ayrıca, mevcut kentsel alanlarda Fotovoltaik (PV) sistem kurulum kararlarını optimize etmek için kullanılabilir. Bu çalışmada, hastanenin etrafındaki binaların 3B modeli araştırmaya dahil edilmemiştir. Bu durum çalışmanın sınırlılığı olarak gözükmektedir. Sokakların genişliği, binaların yoğunluğu, binaların yüksekliği, ağaçların yüksekliği vb. gibi kentsel yerleşimin özellikleri, bina zarfının güneşlenme süresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, gelecekteki çalışmalar mahalle bağlamını içermelidir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

A.U.: Araştırma, yöntem, orijinal taslak hazırlama, yazı yazma, kaynaklar, gözden geçirme ve düzenleme.

A.T.: Araştırma, yöntem, orijinal taslak hazırlama, doğrulama, gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- Ahmadi, H., & Ahmadi, F. (2019). Evaluation of sunshine duration and temporal-spatial distribution based on geostatistical methods in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1589-1602.
- Almorox, J. Y., & Hontoria, C. J. E. C. (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1529-1535.
- Bartoszek, K., Matuszko, D., & Węglarczyk, S. (2021). Trends in sunshine duration in Poland (1971–2018). *international Journal of Climatology*, 41(1), 73-91.
- Bucking, S., Zmeureanu, R., & Athienitis, A. (2014). A methodology for identifying the influence of design variations on building energy performance. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(6), 411-426.
- Czachura, A., Kanters, J., Gentile, N., & Wall, M. (2022). Solar performance metrics in urban planning: A review and taxonomy. *Buildings*, 12(4), 393.
- Chen, K., You, S., Shu, M., & Huang, Y. (2024). Urban life and sunshine: Equitable sunlight resource allocation among different consumer groups?. *Energy and Buildings*, 311, 114177.

- Du, K., Ning, J., & Yan, L. (2020). How long is the sun duration in a street canyon?—Analysis of the view factors of street canyons. *Building and environment*, 172, 106680.
- EİGM, (2024). Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Kütahya İli Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/43.aspx>, (Son erişim tarihi: 21.09.2024).
- Fu, Y., & Wang, W. (2023). Association between provincial sunshine duration and mortality rates in China: Panel data study. *Heliyon*, 9(5).
- Gassar, A. A. A., & Cha, S. H. (2020). Energy prediction techniques for large-scale buildings towards a sustainable built environment: A review. *Energy and Buildings*, 224, 110238.
- Guo, C., Dai, H., Liu, X., Wu, Y., Liu, X., & Liu, Y. (2020). Impacts of climate change mitigation on agriculture water use: A provincial analysis in China. *Geography and Sustainability*, 1(3), 189-199.
- Huang, X., Li, C., & Zhuang, Z. (2021). Analysis of height-to-width ratio of commercial streets with arcades based on sunshine hours and street orientation. *Applied Sciences*, 11(4), 1706.
- Ismail, K. H., & Al, A. (2022). Prediction of global solar radiation from sunrise duration using regression functions. *Kuwait Journal of Science*, 49(3).
- Jaworeck, S., & Kriwy, P. (2021). It's Sunny, Be Healthy? An international comparison of the influence of sun exposure and latitude lines on self-rated health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4101.
- Kaba, K., Kandırmaz, H. M., & Avcı, M. (2017). Estimation of daily sunshine duration using support vector machines. *International Journal of Green Energy*, 14(4), 430-441.
- Kanters, J., & Wall, M. (2014). The impact of urban design decisions on net zero energy solar buildings in Sweden. *Urban, Planning and Transport Research*, 2(1), 312-332.
- Karagüler, S., & Sterler, B. (2022). Positioning Of Buildings According To The Optimal Benefit From The Sun In The Sustainable Design Of Housing Areas. *JENAS Journal of Environmental and Natural Studies*, 4(2), 157-173.
- Kaur, S., Kok, E. Y., Jamil, N. A., & Sebayang, S. K. (2024). Exploring the relationship between sunlight exposure, psychological health, and gestational weight gain: a prospective observational study. *BMC Public Health*, 24(1), 122.
- Kolečanský, Š., Hofierka, J., Bogřanský, J., & Šupinský, J. (2021). Comparing 2D and 3D solar radiation modeling in urban areas. *Energies*, 14(24), 8364.
- Matzarakis, A. P., & Katsoulis, V. D. (2006). Sunshine duration hours over the Greek region. *Theoretical and Applied Climatology*, 83, 107-120.
- Li, J., Xia, H., Jiang, J., Xu, W., Wen, D., & Xu, J. (2024). Spatiotemporal changes in sunshine duration and its influential factors in Chongqing, China from 1961 to 2020. *Journal of Mountain Science*, 21(6), 2005-2024.
- Li, Z., Peng, C., Xu, Q., & Li, X. (2024). Sunlight Optimization in Residential Area Design: Introducing sOSA-A Comprehensive Indicator for Swift Assessment of Outdoor Sunshine Exposure. *Building and Environment*, 111755.
- Mohandes, M. A., & Rehman, S. (2013). Estimation of sunshine duration in Saudi Arabia. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(3).
- Moriarty, P., & Wang, S. J. (2014). Low-carbon cities: Lifestyle changes are necessary. *Energy Procedia*, 61, 2289-2292.
- Owczarek, M., & Malinowska, M. (2023). Manual and automatic measurements of Sunshine Duration in Cassubian Lakeland (northern Poland). *Atmosphere*, 14(2), 244.
- Özdemir, H., & Çakmak, B. Y. (2024). The Impact Of Sun Hour And Sky View Factor On Hospital Buildings Design: A Parametric Design Analysis In Konya, Turkey. *Journal Of Engineering Science And Technology*, 19(5), 1600-1616.
- Pashiardis, S., Pelengarıs, A., & Kalogirou, S. A. (2023). Geographical Distribution of Global Radiation and Sunshine Duration over the Island of Cyprus. *Applied Sciences*, 13(9), 5422.

- Rocha, Á. B. D., Fernandes, E. D. M., Santos, C. A. D., Diniz, J. M., & Junior, W. F. (2020). Development and validation of an autonomous system for measurement of sunshine duration. *Sensors*, 20(16), 4606.
- Shi, Y., Yan, Z., Li, C., & Li, C. (2021). Energy consumption and building layouts of public hospital buildings: A survey of 30 buildings in the cold region of China. *Sustainable cities and Society*, 74, 103247.
- Song, L., & Jin, J. (2020). Effects of sunshine hours and daily maximum temperature declines and cultivar replacements on maize growth and yields. *Agronomy*, 10(12), 1862.
- Tang, C., Zhu, Y., Wei, Y., Zhao, F., Wu, X., & Tian, X. (2022). Spatiotemporal characteristics and influencing factors of sunshine duration in China from 1970 to 2019. *Atmosphere*, 13(12), 2015.
- Thapar, V. (2023). A revisit to solar radiation estimations using sunshine duration: analysis of impact of these estimations on energy yield of a PV generating system. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(3), 8356-8380.
- Teyabeen, A. A., Elhatmi, N. B., Essnid, A. A., & Mohamed, F. (2024). Estimation of monthly global solar radiation over twelve major cities of Libya. *Energy and Built Environment*, 5(1), 46-57.
- TRH, (2024). <https://www.trhastane.com/tavsanli-fizik-tedavi-ve-rehabilitasyon-hastanesi-659.html/>, Erişim Tarihi: 22.09.2024.
- Tuğcu, A. (2023). PVSYST Simülasyon Aracı Kullanılarak Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Yerleşkesi Şebeke Bağlantılı Güneş Enerjisi Santralinin Tasarımı ve Ekonomik Analizi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 397-417.
- Uçkan, İ., & Khudhur, K. M. (2022). Improving of global solar radiation forecast by comparing other meteorological parameter models with sunshine duration models. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 37867-37881.
- Vernet, A., & Fabregat, A. (2023). Evaluation of empirical daily solar radiation models for the Northeast Coast of the Iberian Peninsula. *Energies*, 16(6), 2560.
- Yüzer, E. O., & Bozkurt, A. (2024). Comparison of Regional Empirical Models Based on Sunshine Duration for Determining Solar Radiation. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 14(1), 82-92.
- Zhou, H., Quan, W., Wang, Z., Li, X., Li, Y., & Zhao, H. (2021). Comparison of sunshine duration measurements between a Jordan sunshine recorder and three automatic sensors at Shangdianzi GAW station. *Journal of Meteorological Research*, 35, 716-728.
- 3DSP, (2024). PD: 3D Sun-Path <https://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>, Erişim Tarihi: 27.09.2024.