

ISSN 1012-2354



ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ

ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

*Erciyes University
Journal of
the
Institute
of
Science and Technology*

Cilt (Vol.): 38

Sayı (No): 3



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Sultan TAŞCI, Erciyes Üniversitesi

İmtiyaz Sahibi

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Baş Editör

Prof.Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN, Erciyes Üniversitesi

Editörler

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. M. Gökhan HALICI, Erciyes Üniversitesi

Düzenleme Editörleri

Hüseyin ÖZKAYA

Ali Yankı TEKOL

Editörler Kurulu

Prof.Dr. Mehmet AKKURT, Erciyes Üniversitesi, akkurt@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Musa SARI, Gazi Üniversitesi, msari@gazi.edu.tr

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, orhanb@omu.edu.tr

Prof. Dr. Hasan KÜÇÜKBAY, İnönü Üniversitesi, hasan.kucukbay@inonu.edu.tr

Prof. Dr. Kamil KOÇ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, kamil.koc@cbu.edu.tr

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, The American University of the Middle East, tuncay.candan@aum.edu.kw

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi, karaboga@erciyes.edu.tr

Prof.Dr. M. Tamer ŞENEL, Erciyes Üniversitesi, senel@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Doğan IŞIK, Erciyes Üniversitesi, dogani@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Burak UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, burak.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Niğmet UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, nigmet.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Murat GÖKÇEK, Ömer Halisdemir Üniversitesi, mgokcek@ohu.edu.tr



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Yayın Danışma Kurulu

Prof. Dr. Ülkü YETİŞ, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Filiz B. DİLEK, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülçin BÜYÜKÖZKAN, Galatasaray Üniversitesi

Prof. Dr. Ceyda OĞUZ, Koç Üniversitesi

Prof. Dr. Yaman BARLAS, Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Levent KANDİLLER, Yaşar Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN, İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Cevriye Temel GENCER, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ, Maltepe Üniversitesi

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Prof. Dr. Li TONGXING, Linyi University

Prof. Dr. Panos M. PARDALOS, University of Florida

Prof. Dr. José Machado Minho, University

Prof. Dr. Petraq PAPAJORGJË, University of New York Tirana

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Recai KILIÇ, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ
Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology



ISSN: 1012-2354

Cilt 38, Sayı 3, Hakem Kurulu

Prof. Dr. Ahmet Bedri ÖZER, Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Atilla AKPINAR, Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet CANDAN, Eskişehir Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mine TURAN, Dumlupınar Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY, Karabük Üniversitesi

Prof. Dr. Özcan GELİŞGEN, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Prof. Dr. Şaban GÜVENÇ, Bursa Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. Yasin KIŞIOĞLU, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet DERVİŞOĞLU, Atatürk Üniversitesi

Doç. Dr. Akif KUTLU, İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ali BOZER, Eskişehir Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bertan BEYLERGİL, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi

Doç. Dr. Celal ÖZTÜRK, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Derya SÜRGİT, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Doç. Dr. Esmâ YAZ GÖKÇE, İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Gaye KAYA, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. Hüseyin KAHRAMAN, İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. İlyas İNCİ, Çankırı Karatekin Üniversitesi

Doç. Dr. İnci AKKAYA ORALHAN, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Murat AY, Yozgat Bozok Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa Tuğfan BİLKAN, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Doç. Dr. Nehir TOKGÖZ, Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Seyhan ORAN, Bursa Uludağ Üniversitesi

Doç. Dr. Şahin SÖNMEZ, Malatya Turgut Özal Üniversitesi

Doç. Dr. Şehnaz Şule Kaplan BEKAROĞLU, Süleyman Demirel Üniversitesi

Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ, Harran Üniversitesi

Doç. Dr. Vildan ATEŞ, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Doç. Dr. Yılmaz DELİCE, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK, Bartın Üniversitesi

Doç. Dr. Zeki ORALHAN, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah AKKAYA, Ahi Evran Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GANI, Kayseri Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Nusret TOPRAK, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Alperen TÜRKAY, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Aslı ÇALIŞ BOYACI, Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Banu ULU, Kayseri Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Bilge TURP GÖLBAŞI, İstanbul Gelişim Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir SEYYARER, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Elif ALTINTAŞ KAHRİMAN, Haliç Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Elif ÖZBEY, Malatya Turgut Özal Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Erdal BAŞARAN, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Esra AKGÜL, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gazi Bilal YILDIZ, Hitit Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gülhan GÜLER, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hamdi MURATÇOBANOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan ULUS, Selçuk Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ÇİLSALAR, Yozgat Bozok Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KUTLU, Adıyaman Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kâmil VARINCA, Adıyaman Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Merve MOCAN, Gebze Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat PEKER, Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat TÖREN, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mücahit ÇALIŞAN, Bingöl Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Rahmi BAKI, Aksaray Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan DEMİR, Kayseri Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Salim ÇINAR, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Senem Teksoy BAŞARAN, İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Serhan İLKENTAPAR, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Vahdettin DEMİR, Kto Karatay Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Vekil SARI, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Öğr. Gör. Dr. İbrahim Ethem SAÇU, Erciyes Üniversitesi

Arş. Gör. Kadir KAYA, Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Arş. Gör. Kemal ARSLAN, Adana Alparslan Türkeş Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi

Arş. Gör. Salih HİMMETOĞLU, Kayseri Üniversitesi

Arş. Gör. Zühra KARACA, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Savaş KARAAHMETOĞLU, TC Milli Eğitim Bakanlığı

Safiye Nida ZENGİN, Yeditepe Üniversitesi

Cilt: 38 Sayı: 3

Aralık 2022

İçindekiler

Sayfalar	Makaleler	Türü
426-433	Comparative Life Cycle Assessment of the Environmental Impacts of Precast Concrete and Brick Walls	Araştırma Makalesi
434-445	Spatio-temporal Object Features for Wildfire Detection in Dark Videos	Araştırma Makalesi
446-457	Integrating Waterfall Methodology and Object Oriented Approach within a Decision Support System Development Life Cycle Design	Araştırma Makalesi
458-475	DNA Barcoding of Some Lichenized Fungi from James Ross Island (Antarctic Peninsula, Antarctica)	Araştırma Makalesi
476-482	Dağınık Yapıdaki Kampüslerde Otomatik Araç Geçiş Sistemi İçin Bir Hibrit Veri Merkezi Modeli	Araştırma Makalesi
483-499	The Investigation of Performances of Different Proportional-Derivative Control Based Fuzzy Membership Functions in Balancing the Inverted Pendulum (IP) on Cart	Araştırma Makalesi
500-507	Covering-based Generalized Intuitionistic Fuzzy-Rough Set Models for A Selecting HVAC System	Araştırma Makalesi
508-518	iSeg-WNet: Volumetric Segmentation of Infant Brain MRI Images	Araştırma Makalesi
519-524	On The Projective Planes In Projective Space PG(4,4)	Araştırma Makalesi
525-535	Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanın FPAA tabanlı gerçekleştirimi	Araştırma Makalesi
536-548	Design and Manufacturing of a New Rail-Type Irrigation System for Modern Seedling Greenhouses	Araştırma Makalesi
549-556	Elektrikli Araçların Şarj Yöntemleri ve Şarj İstasyon Tipleri	Araştırma Makalesi
557-567	Rekombinant Escherichia coli hMT1 Suşunun Nikel ve Alüminyuma Karşı Minimum İnhibisyon Konsantrasyonlarının Belirlenmesi	Araştırma Makalesi
568-579	Rüzgâr Yapısı Gösteren Kuazarların Fotometrik İncelenmesi-II: Parlaklık Değişim Genliği ve Rüzgâr Parametreleri Arasındaki İlişkiler	Araştırma Makalesi
580-601	Investigation of Risk Perception of Employees Using Clustering Analysis: A Case Study of Iron-Steel Industry	Araştırma Makalesi
602-619	U Biçimli İki Farklı Tip Metalik Sönümleyicinin Eksenel Kuvvet Altında Yapısal Davranışı ve İki Yeni Metalik Sönümleyici Tasarımı	Araştırma Makalesi
620-627	Bi Katkılamanın Al-B İkili Alaşımının Hidrojen Üretim Performansına Etkisinin İncelenmesi	Araştırma Makalesi
628-641	Correction and Compensation of Thermally-Induced Errors in CNC Milling via Integrated CAD / CAM and Finite Element Analysis for AL 7075(T6)	Araştırma Makalesi
642-656	Halloysit Nanotüp (HNT) Destekli Polipropilen (PP) Nanokompozitlerin Karakterizasyonu	Araştırma Makalesi
657-675	Investigation Of Lake Water Level Forecasting Performances Of Subband Decomposition Techniques	Araştırma Makalesi
676-684	Numerical permeability tensor characterization of fibrous reinforcement through 1D flow analysis using particle swarm optimization	Araştırma Makalesi

Comparative Life Cycle Assessment of the Environmental Impacts of Precast Concrete and Brick Walls

Sedat Gülçimen^{1*}, Niğmet Uzal¹

¹ Abdullah Gul University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, KAYSERİ

(Alınış / Received: 08.11.2022, Kabul / Accepted: 11.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Life Cycle Assessment,
Precast Concrete Wall,
Brick Wall,
Environmental Performance,
Sustainability

Abstract: There is an increasing interest in assessing the environmental impacts of construction materials and their components in recent years. By considering these environmental impacts, the selection of suitable construction materials and technology is crucial for satisfying user needs and minimizing environmental impacts. The aim of this study is to compare the environmental impacts of precast concrete wall and brick wall production with cradle to gate approach by using Life Cycle Assessment (LCA) approach. In this study, LCA was applied based on ISO 14040 and 14044 by using SimaPro 9.2 software. CML-IA baseline method and Ecoinvent 3.7 database was used for the life cycle impact assessment. The obtained results revealed that brick wall has better environmental performance than precast concrete wall in all impact categories except abiotic depletion and marine aquatic ecotoxicity. The global warming potential of the precast concrete and brick wall per m² were calculated as 2.35E+02 kg CO₂ eq. and 2.10E+02 kg CO₂ eq, respectively.

Prefabrik Beton Duvar ve Tuğla Duvarın Çevresel Etkilerinin Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Anahtar Kelimeler

Yaşam Döngüsü
Değerlendirmesi,
Prefabrik Beton Duvar,
Tuğla Duvar,
Çevresel Performans,
Sürdürülebilirlik

Öz: Son yıllarda, yapı malzemelerinin ve bileşenlerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesine artan bir ilgi vardır. Bu çevresel etkiler göz önünde bulundurularak, kullanıcı ihtiyaçlarının karşılanması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi için uygun yapı malzemelerinin ve teknolojisinin seçimi çok önemlidir. Bu çalışmanın amacı, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) metodolojisini kullanarak beşikten kapıya yaklaşımıyla prekast beton duvar ve tuğla duvar üretiminin çevresel etkilerini karşılaştırmaktır. Bu çalışmada, ISO 14040 ve 14044 standartlarına göre SimaPro 9.2 yazılımı kullanılarak YDD uygulanmıştır. Yaşam döngüsü etki değerlendirilmesi için CML-IA baseline yöntemi ve Ecoinvent veri tabanı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, abiyotik tükenme ve deniz suyu ekotoksitesisi hariç tüm etki kategorilerinde tuğla duvarın prekast beton duvardan daha iyi çevresel performansa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Prekast beton ve tuğla duvarın m² başına küresel ısınma potansiyeli sırasıyla 2.35E+02 kg CO₂ eq. ve 2.10E+02 kg CO₂ eq. olarak hesaplanmıştır.

*Corresponding Author, email: sedat.gulcimen@agu.edu.tr

1. Introduction

In construction sector, the selection of the most suitable construction materials and technology is crucial for fulfilling user needs. Material selection can also influence the social consequences and environmental impacts of a project. As an alternative to the traditional in situ concrete construction, new construction technologies and techniques such as precast concrete wall panels have evolved in recent years. This, along with other alternatives, has helped raise consciousness among industry and academia about the importance of taking environmental factors into account when selecting a structure's layout. In recent years, there has been an increase in the number of initiatives made to construct sustainable concrete buildings [1]. Greenhouse gas (GHG) emissions are a fundamental metric for assessing the severity of climate change and the environmental impacts of building projects. The building sector accounts for around 40% of overall energy consumption and up to 30% of annual GHG emissions. The United Nations Environment Programme (UNEP) predicted that in the next 20 years, GHG emissions will more than double due to the rapid growth of urbanization and the inefficiency of the current building stock unless mitigation measures are taken [2]. Cement, steel reinforcement, and concrete are well-known inputs in the construction of both traditionally reinforced and precast concrete panels. Because of this, the evaluation of the embodied carbon in these construction materials can have a considerable impact on the evaluation of the environmental impact that these structures have [1]. Additionally, used construction techniques affect GHG emissions throughout the construction phase [2].

Prefabrication is a manufacturing method that assembles numerous materials at a specialized facility to make a component part of the final installation. Prefabrication is the first stage of industrialization in the building industry, followed by mechanization, automation, robotics, and reproduction [3]. Compared to typical cast-in-place construction, prefabrication provides increased quality control, enhanced site safety, less material waste, better architectural appearance, and a reduction in construction time and labor demand [4]. Despite the benefits that prefabricated construction offers, the adoption of precast concrete technologies in Turkey remains low compared to the many European countries. The market share of precast concrete systems may be affected by a number of variables, including labor costs, climate, and the relative costs of alternative construction methods. Total prefabricated concrete production in Turkey in 2021 was 1,886,826 m³, increased from 1,703,980 m³ in 2020, as reported by the Turkish Precast Concrete Association [5].

The life cycle assessment (LCA) is a well-known and rigorous methodology for determining the overall impact that construction materials have on the environment. As more studies were conducted to determine environmental impacts of various products and processes, LCA emerged as a reliable tool [6]. In recent decades, research on LCA has become increasingly focused on many aspects of construction materials. In literature, the LCA was used to conduct an analysis on the materials concrete, steel, glass, aluminum alloy, natural stone, and ceramics, which are all commonly used in the construction industry [7-24]. For instance, Kua and Kamath (2014) studied on determining the environmental impacts of replacing concrete with brick in Singapore. They utilized both contributory and attributional LCA with several alternative scenarios to compare and find alternative solutions to reduce environmental impacts of concrete and bricks. According to their LCA analysis, the potential reduction in global warming potential from using bricks instead of concrete is minimal [11]. Ozkan et. al. (2016) applied LCA and life cycle cost (LCC) analysis for magnesia spinel brick production. According to their findings, the manufacture of raw materials and the firing process in the production of magnesia spinel bricks had a number of negative environmental effects and were expensive. The firing process accounts for 68.6% of the total influence on global warming potential [10].

Numerous studies also employ LCAs for design or technology selection in an effort to reduce the environmental impact of prefabricated buildings. The biggest contributors to the energy footprint and carbon footprint of prefabricated buildings are determined to be concrete and steel [25]. Faludi et al. (2012) reveal that 11% to 14% of total GHG emissions can be decreased by substituting 25% of the cement in concrete with fly ash [26]. Bonamente and Cotana (2015) used LCA to quantify carbon and energy footprint of prefabricated industrial structures with a cradle-to-grave approach involving all phases from raw material production through in-situ assembly. Four buildings were analyzed and they found that the energy footprint and the carbon footprint are proportionate to one another, with the proportional factor being 0.222 kg CO₂eq/kWh with an accuracy of 0.5% or better [27]. Besides studies on material or technology selection, Wang and Sinha (2021) focused on effects of different prefabricated rates on construction activities. Using a reference building that was 26% prefabricated, they compared nine different scenarios where the percentage of prefabrication varied from 6% to 96% utilizing LCA. As the rate of prefabrication rises, their findings indicate that the water footprint reduces but the total energy footprint and carbon footprint rise [24].

This study aims to define and compare of environmental impacts of precast concrete and brick wall production with the implementation of LCA approach. In literature, there are studies on the LCA of precast concrete and brick

products, but no studies comparing the LCA of producing precast concrete and brick walls in Turkey. Thus, this study will assist civil engineers, architects, as well as researchers in making more environmental friendly material selections.

2. Material and Method

In this study, environmental performance of precast concrete and brick wall production were comparatively assessed using LCA methodology. According to ISO 14040 and 14044 [28, 29], LCA consists of four main phases: (i) goal and scope definition, (ii) life cycle inventory (LCI), (iii) life cycle impact assessment (LCIA), (iv) interpretation as described below.

2.1. Goal and scope

The main goal of this study was to define and compare the environmental impacts of precast concrete and brick wall production using LCA methodology. In this study, functional unit was chosen as 1 m² wall production. The LCAs of these two alternative wall production materials and techniques were calculated by using SimaPro 9.2. The system boundaries of this study based on cradle to gate approach and cover the stages from raw material extraction to wall production as indicated in Figure 1. The use and end of life stages were not included in the system boundaries.

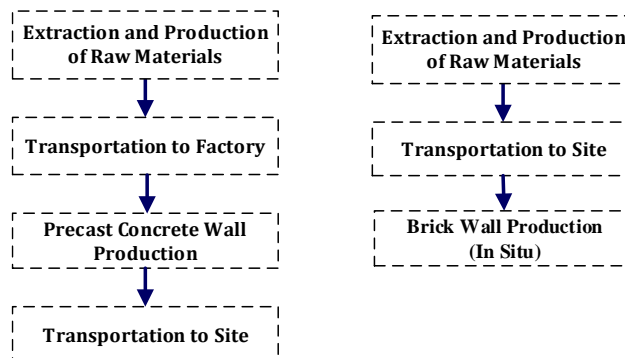


Figure 1. System boundaries of precast concrete and brick wall production

2.2. Life cycle inventory

Primary data concerning the amount of raw materials (cement, aggregate, crushed stone, reinforced steel bar, polystyrene, admixture), energy consumption (electricity and natural gas), and water use were gathered from a local company in Turkey. The secondary data for production raw materials and transport data were collected from Ecoinvent 3.7 database [30] which is available in SimaPro 9.2 software [31].

2.3. Life cycle impact assessment

The CML-IA baseline method was used for calculation of life cycle impact assessments (LCIA) for precast concrete and brick wall production. This method has a problem-oriented (midpoint) approach and created by the University of Leiden in Holland [32]. It shows how a product or system affects the environment based on certain impact categories. The impact categories that are considered in this method are as follows: abiotic depletion (AD)-kg Sb eq, abiotic depletion on fossil fuels (AD-FF)-MJ, global warming potential (GWP)-kg CO₂ eq, ozone layer depletion (ODP)-kg CFC-11 eq, human toxicity (HT)-kg 1,4-DB eq, fresh water aquatic ecotoxicity (FWAE)-kg 1,4-DB eq, marine aquatic ecotoxicity (MAE)-kg 1,4-DB eq, terrestrial ecotoxicity (TE)-kg 1,4-DB eq, photochemical oxidation (PCO)-kg C₂H₄ eq, acidification potential (AP)-kg SO₂ eq, and eutrophication potential (EP)-kg PO₄ eq. Average values from all across the world and in Europe are used to characterization. SimaPro 9.2 global and European database values were utilized to characterize the environmental impacts of the selected products.

3. Results

The environmental impacts of precast concrete and brick wall by considering the cradle-to-gate approach were calculated with the CML-IA baseline method; the results are shown in Table 1. The LCIA consists of 11 environmental impact categories (AD, AD-FF GWP, ODP, HT, FWAE, MAE, TE, PCO, AP, and EP) to assess and compare the environmental performance of these two type wall production materials and techniques. The value of the AD was calculated as 1.23E-04 kg Sb eq for the brick wall, while AD for precast concrete wall accounted as

1.05E-04 kg Sb eq. The main contributor raw material on AD was lime for brick wall, cement for precast concrete wall. As another significant impact category for construction materials, GWP, was calculated to be 2.10E+02 kg CO₂ eq. for the brick wall, while it was 2.35E+02 kg CO₂ eq. for the precast concrete wall (Table 1).

Table 1. Impact category values for precast concrete and brick wall per m² of wall production (CML-IA baseline method)

Impact category	Unit	Brick Wall	Precast Concrete Wall
AD	kg Sb eq	1.23E-04	1.05E-04
AD-FF	MJ	2.58E+03	2.95E+03
GWP	kg CO ₂ eq	2.10E+02	2.35E+02
ODP	kg CFC-11 eq	2.94E-05	3.49E-05
HT	kg 1,4-DB eq	5.41E+01	8.24E+01
FWAE	kg 1,4-DB eq	8.81E+00	5.07E+01
MAE	kg 1,4-DB eq	9.66E+04	8.10E+04
TE	kg 1,4-DB eq	1.52E-01	2.06E-01
PCO	kg C ₂ H ₄ eq	2.68E-02	3.14E-02
AP	kg SO ₂ eq	6.69E-01	7.93E-01
EP	kg PO ₄ eq	1.44E-01	1.96E-01

The LCA was performed to compare the environmental performance of the production of precast concrete and brick walls. The LCA analysis consists of eleven impact categories calculated using the CML-IA baseline approach, and Figure 2 presents the comparison results. Except for AD and MAE, all impact category values for brick wall production were lower than those for precast concrete wall production. The greatest difference was observed in the category of FWAE impact, where a brick wall has 83% less impact than a precast concrete wall. Lime, an calcium-containing inorganic substance, is used in the manufacturing of mortar for brick walls, which is the fundamental cause of the distinction. The GWP impact category showed the smallest difference, with a brick wall having 11% less of an effect than a precast concrete wall. Reinforced steel bars used in precast concrete walls and the transportation of prefabricated walls from factory to construction site are the primary contributors to this difference.

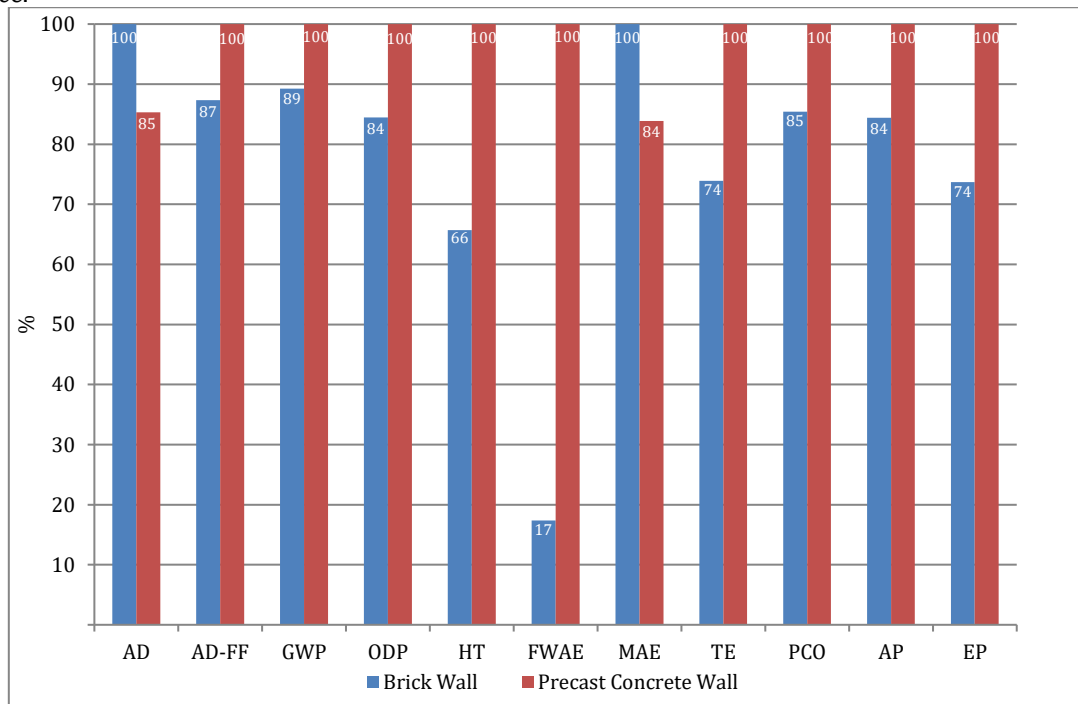


Figure 2. The comparison of environmental impacts of precast concrete and brick wall based on CML-IA baseline method: CML-IA baseline V3.06/EU25/Characterization (AD: abiotic depletion, AD-FF: abiotic depletion on fossil fuels, GWP: global warming potential, ODP: ozone layer depletion, HT: human toxicity, FWAE: fresh water aquatic ecotoxicity, MAE: marine aquatic ecotoxicity, TE: terrestrial ecotoxicity, PCO: photochemical oxidation, AP: acidification potential, EP: eutrophication potential)

For FWAE impact category, which the greatest difference was observed in the comparison results, network diagram indicates the hotspots of the environmental impacts of precast wall production (Figure 3). The diagram shows that reinforced steel bars used in precast concrete walls are the main contributors with 83.8% of the total environmental impacts and cement follows with 6.1%.

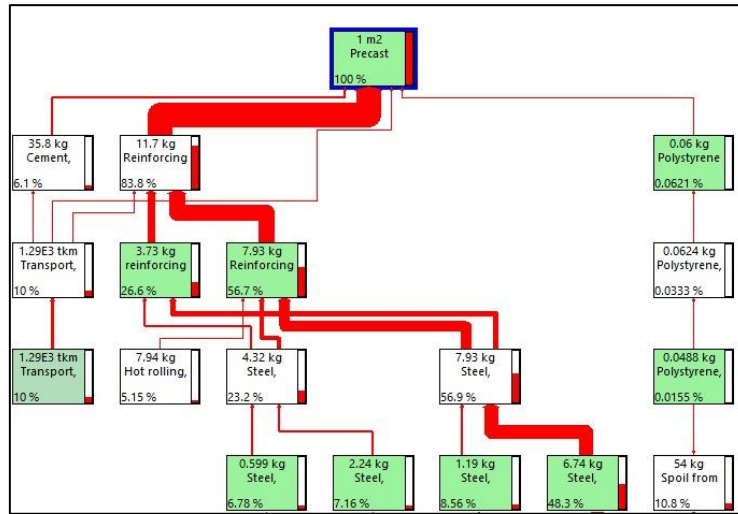


Figure 3. Network diagram of precast concrete wall production

Additionally, the network diagram outlines the level of contribution of used components in brick wall production for the FWAE impact category as indicated in Figure 4. The graphic reveals that 65.5% of the total environmental impacts come from bricks used in wall production, with cement coming in second at 25.5%. Beside, Figure 4 shows that 47.6% of the impacts of bricks (65.5%) are caused by transporting bricks from the production to the site.

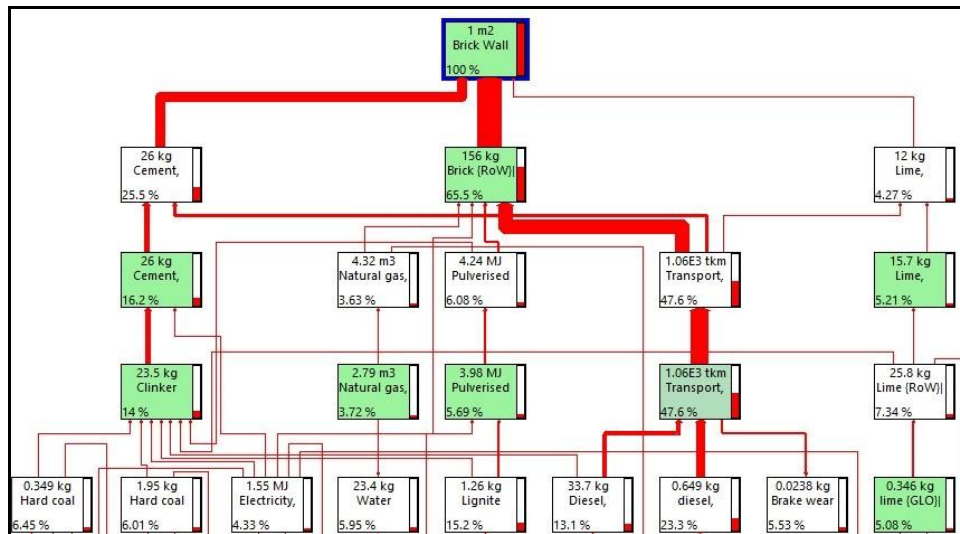


Figure 4. Network diagram of brick wall production

The obtained results were also coherent with the literature on construction materials of concrete and bricks. The environmental effects of switching from concrete to brick in Singapore were investigated by Kua and Kamath (2014). To assess and compare the environmental impacts of concrete and bricks, they used both contributory and attributional LCA with multiple possible scenarios to identify potential alternatives and identify potential solutions. They found that switching to bricks from concrete will have a minimal impact on global warming [11]. Besides, Wen et. et al. (2015) compared industrialized building systems (IBS), referred to as offsite construction in the British construction industry, with conventional cast in situ for residential apartment structures in Iskandar Malaysia using LCA during the assembly phase to determine life cycle effect assessment and hotspots for materials and construction stage. According to their findings, precast concrete has the greatest embodied energy and GWP of any IBS construction material, at 30.11% and 57.62%, respectively. This is due to the high quantity of concrete and steel reinforcements in precast concrete used in the construction of floor, ceiling, and wall panels [25]. Similarly, Omar et. al (2014) explained that the embodied carbon of concrete materials in the IBS system is greater since the wall system supports a heavier load bearing on the wall structures [1]. This research's findings align with those of other studies that have looked at the environmental implications of precast concrete and brick. Given

this comparison, it is clear that, from the perspective of environmental impact, brick wall production is preferable to precast concrete wall production.

4. Discussion and Conclusion

The LCA approach was used to determine the environmental effects of precast concrete and brick wall manufacturing. Although the LCA of precast concrete and brick products have both been studied, there are no studies comparing the LCA of producing precast concrete walls and brick walls in Turkey. The findings revealed that brick wall manufacturing is better in nine of the eleven environmental impacts studied, while precast concrete wall production is better in the two environmental impact categories of AD and MAE. When comparing the manufacture of precast concrete and brick walls, significant differences in the range of 11-83% were detected, especially in the FWAE, HT, TE, and EP impact categories. This means that making walls out of bricks is better for the environment than making walls out of precast concrete.

Additionally, the production of precast concrete and brick wall have different experimental procedures which affect their environmental performance as well. Precast concrete wall production requires fabrication processes in which energy consumption is higher than in-situ brick wall production. This causes negative environmental impacts, especially on impact category of AD-FF which refers to measure of use of mineral and resources, due to fossil-based electricity and fuel consumption. The negative effects on the environment caused by the manufacturing of walls can be mitigated by the use of renewable energy sources and the decrease of energy consumption through the adoption of innovative production techniques.

A sensitivity analysis was performed to support the findings. According to the results, the cement and lime used in the production of precast concrete and brick walls have various detrimental environmental effects, respectively. Using "what-if" scenarios, a sensitivity analysis was conducted to examine the impact of potential variations on the LCA results. In two what-if scenarios, sensitivity analysis were conducted: (1) cement reduction in precast concrete wall production; and (2) lime reduction in brick wall production. Reducing the amount of cement by 10% has an effect on all environmental impact categories, particularly AD (6%), resulting in a 1-6% decrease in these impact categories. In addition, a 10% reduction in the amount of lime has an effect on all environmental impact categories, particularly AD (5%), and results in a 1-5% reduction in these impact categories. Consequently, sensitivity study show that cement and lime have significant environmental impacts on the AD impact category.

The outcomes of this research will assist civil engineers, architects, and researchers in selecting sustainable materials. These results showed that the selection of construction materials and technologies can reduce the environmental impacts by selecting the green alternatives according to LCIA methods. To take a holistic perspective, future LCA studies can include the entire process of wall and building production. In addition, other alternative construction materials and technologies can be added to the comparison.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge ALFA Prefabrike company and Eng. Can Argin for providing support in acquiring the inventory data for this research.

References

- [1] Omar, W.M.S.W., Doh, J.H., Panuwatwanich, K., Miller, D. 2014. Assessment of the embodied carbon in precast concrete wall panels using a hybrid life cycle assessment approach in Malaysia. *Sustainable Cities and Society*, 10, 101-111.
- [2] Mao, C., Shen, Q.P., Shen, L.Y., Tang, L.Y.N. 2013. Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects. *Energy and Buildings*, 66, 165-176.
- [3] Richard, R.B. 2005. Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. *Automation in Construction*, 14(4), 442-451.
- [4] Dong, Y.H., Jaillon, L., Poon, C.S. 2016. Life Cycle Assessment of Precast and Cast-in-Situ Construction. *Expanding Boundaries: Systems Thinking in the Built Environment*, 426-429.
- [5] Turkish Precast Concrete Association. 2021. Sektör Raporu. <https://www.prefab.org.tr/icerik1bc6.html?yayinlar/sector-raporu&tr>. (Access date: 07.11.2022).

- [6] Giama, E., Papadopoulos, A.M. 2015. Assessment tools for the environmental evaluation of concrete, plaster and brick elements production. *Journal of Cleaner Production*, 99, 75-85.
- [7] Almeida, M.I., Dias, A.C., Demertzi, M., Arroja, L. 2015. Contribution to the development of product category rules for ceramic bricks. *Journal of Cleaner Production*, 92, 206-215.
- [8] Han, B.L., Wang, R.S., Yao, L., Liu, H.X., Wang, Z.G. 2015. Life cycle assessment of ceramic facade material and its comparative analysis with three other common facade materials. *Journal of Cleaner Production*, 99, 86-93.
- [9] Ersan, Y.C., Gulcimen, S., Imis, T.N., Saygin, O., Uzal, N. 2022. Life cycle assessment of lightweight concrete containing recycled plastics and fly ash. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(7), 2722-2735.
- [10] Ozkan, A., Gunkaya, Z., Tok, G., Karacasulu, L., Metesoy, M., Banar, M., Kara, A. 2016. Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis of Magnesia Spinel Brick Production. *Sustainability*, 8(7).
- [11] Kua, H.W., Kamath, S. 2014. An attributional and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks. *Journal of Cleaner Production*, 81, 190-200.
- [12] Landi, F.F.D., Fabiani, C., Ubertini, F., Pisello, A.L. 2022. Life cycle assessment of a novel fired smart clay brick monitoring system for masonry buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50.
- [13] Yilmaz, E., Aykanat, B., Comak, B. 2022. Environmental life cycle assessment of rockwool filled aluminum sandwich facade panels in Turkey. *Journal of Building Engineering*, 50.
- [14] Beudon, C., Oudjene, M., Djedid, A., Annan, C.D., Fafard, M. 2022. Life Cycle Assessment of an Innovative Hybrid Highway Bridge Made of an Aluminum Deck and Glulam Timber Beams. *Buildings*, 12(10).
- [15] Hottle, T., Hawkins, T.R., Chiquelin, C., Lange, B., Young, B., Sun, P.P., Elgowainy, A., Wang, M.C. 2022. Environmental life-cycle assessment of concrete produced in the United States. *Journal of Cleaner Production*, 363.
- [16] Mocharla, I.R., Selvam, R., Govindaraj, V., Muthu, M. 2022. Performance and life-cycle assessment of high-volume fly ash concrete mixes containing steel slag sand. *Construction and Building Materials*, 341.
- [17] Ali, B., El Ouni, M.H., Kurda, R. 2022. Life cycle assessment (LCA) of precast concrete blocks utilizing ground granulated blast furnace slag. *Environmental Science and Pollution Research*.
- [18] Nikbin, I.M., Dezhampanah, S., Charkhtab, S., Mehdipour, S., Shahvareh, I., Ebrahimi, M., Pournasir, A., Pourghorban, H. 2022. Life cycle assessment and mechanical properties of high strength steel fiber reinforced concrete containing waste PET bottle. *Construction and Building Materials*, 337.
- [19] Roy, K., Dani, A.A., Ichhpuni, H., Fang, Z.Y., Lim, J.B.P. 2022. Improving Sustainability of Steel Roofs: Life Cycle Assessment of a Case Study Roof. *Applied Sciences-Basel*, 12(12).
- [20] Balasbaneh, A.T., Ramli, M.Z. 2020. A comparative life cycle assessment (LCA) of concrete and steel-prefabricated prefinished volumetric construction structures in Malaysia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(34), 43186-43201.
- [21] Nicoletti, G.M., Notarnicola, B., Tassielli, G. 2002. Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles. *Journal of Cleaner Production*, 10(3), 283-296.
- [22] Traverso, M., Rizzo, G., Finkbeiner, M. 2010. Environmental performance of building materials: life cycle assessment of a typical Sicilian marble. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(1), 104-114.
- [23] Li, X.J., Xie, W.J., Jim, C.Y., Feng, F. 2021. Holistic LCA evaluation of the carbon footprint of prefabricated concrete stairs. *Journal of Cleaner Production*, 329.
- [24] Wang, S.Z., Sinha, R. 2021. Life Cycle Assessment of Different Prefabricated Rates for Building Construction. *Buildings*, 11(11).
- [25] Wen, T.J., Siong, H.C., Noor, Z.Z. 2015. Assessment of embodied energy and global warming potential of building construction using life cycle analysis approach: Case studies of residential buildings in Iskandar Malaysia. *Energy and Buildings*, 93, 295-302.
- [26] Faludi, J., Lepech, M.D., Loisos, G. 2012. Using Life Cycle Assessment Methods to Guide Architectural Decision-Making for Sustainable Prefabricated Modular Buildings. *Journal of Green Building*, 7(3), 151-170.

- [27] Bonamente, E., Cotana, F. 2015. Carbon and Energy Footprints of Prefabricated Industrial Buildings: A Systematic Life Cycle Assessment Analysis. *Energies*, 8(11), 12685-12701.
- [28] ISO. 2006. 14040:2006 Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Framework.
- [29] ISO. 2006. 14044: 2006 Environmental Management Life Cycle Assessment Requirements and Guidelines.
- [30] Ecoinvent Centre. 2022. Ecoinvent Data v3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <https://ecoinvent.org/>. (Access date: 05.11.2022).
- [31] Pre Consultants,. 2016. SimaPro Software. <https://simapro.com/> (Access date: 05.11.2022).
- [32] University of Leiden. 2016. CML-IA Characterisation Factors. <https://www.universiteitleiden.nl/en/science/environmental-sciences/tools-and-data> (Access date: 05.11.2022)

Spatio-temporal Object Features for Wildfire Detection in Dark Videos

Ahmet Kerim Agirman ^{*1}, Kasim Tasdemir ²

^{*1} Abdullah Gül Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği, KAYSERİ
² Abdullah Gül Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 05.07.2022, Kabul / Accepted: 26.08.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Video based fire detection,
SVM,
majority voting,
Random Forest,
AdaBoostM1,
IBk

Abstract: In this paper, a wildfire detection algorithm from dark videos is proposed. Unlike the daytime wildfires, in the dark videos, neither the fire nor its surrounding has visually clearly perceptible texture. Its unique visual characteristics make it challenging to extract descriptive object features. This paper addresses the challenging problem by tracking the glowing objects in the darkness and extracting features based on the spatio-temporal behavior of them. It is experimentally shown that the proposed features are descriptive enough to classify wildfires with over 90% accuracy even there exists deceptive light sources such as city lights, flashlights, car headlights and reflections in the scene. Moreover, we investigate several conventional machine learning algorithms such as ensemble and kernel-based methods on the same spatio-temporal feature set. Comprehensive empirical test results demonstrate that the most accurate detection is obtained when the spatio-temporal feature set is classified using Random Forest.

Karanlık Videolarda Orman Yangını Tespitine Yönelik Uzaysal- Zamansal Nesne Öznitelikleri

Anahtar Kelimeler

Video tabanlı yangın tespiti,
SVM,
Çoğunluk Oylaması,
Rastgele Orman,
Adaboost,
IBk

Öz: Bu makalede, karanlık videolardan orman yangınının tespitine yönelik bir yöntem önerilmiştir. Gündüz orman yangınlarından farklı olarak, karanlık videolarda yangının kendisi de çevresi de görsel olarak açıkça algılanabilir bir desene sahip değildir. Karanlık videolardaki yangının bunun gibi kendine özgü görsel özellikleri, tanımlayıcı nesne öznitelikleri çıkarmayı zorlaştırmaktadır. Bu makale, karanlıkta parlayan nesnelere takip edip, uzaysal-zamansal davranışlarına dayalı öznitelikleri çıkararak bu zorlayıcı duruma çözüm üretmektedir. Önerilen özniteliklerin, videoda şehir ışıkları, el fenerleri, araba farları ve olay yerindeki yansımalar gibi aldatıcı ışık kaynakları olsa bile, orman yangınlarını %90'ın üzerinde doğrulukla sınıflandırmak için yeterince temsil edici olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca, aynı uzaysal-zamansal öznitelik kümesinde topluluk ve çekirdek tabanlı sınıflandırma yöntemleri gibi çeşitli geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları da karşılaştırma amacıyla denenmiştir. Kapsamlı deneysel test sonuçları, en yüksek tespit doğruluğunun, önerilen uzaysal-zamansal öznitelik kümesinin Rastgele Orman sınıflandırma yöntemi elde edildiğini göstermektedir.

*Corresponding Author, email: ahmet.k.agirman@gmail.com

1. Introduction

From 1988 to date, 72.360 forest fire incidents are reported [1]. As a result of these disasters, in Turkey, around 300.000 hectares of forest are lost. While 5.8 hectares per fire forest area is destroyed before the last five years period, this rate dropped to 2.4 hectares per fire in the last five years. Clearly, besides enhancements on firefighting techniques and development of related technology, this progress is due to efficient surveillance techniques and timely reports. Since December 2016, 23% of reported forest fires and 47 % of city fires in Istanbul occurred at no

daylight conditions [1-3]. Beginning from 1900s, watch towers have been an important part of fire detection across the world. However, due to human factors, fire announcement process didn't work properly all the time which increased forest loses especially at rural areas. For this reason, computer vision based automatic fire detection methods have been an important part of the forestry departments due to the fact that they don't require any human deployment to the risky areas and they support visual information via remote monitoring systems.

In order to overcome fire detection problem from video surveillance systems, various techniques have been proposed [8-20]. Front runner techniques include detection of fire, smoke or both depending on spatial and temporal features of objects and colors in a video and using different spectral or physical range cameras [16]. After processing video sequences, those techniques decide if a pixel, frame, sequence, or the whole video contain a fire.

However, very limited number of these works considered the fire detection in dark videos. Recent works shows evidence of semi or full daytime fires. Tasdemir's work at [22] proposes a method on distant night fire detection. Since the fire event is assumed to be at far distance, fire is considered as a slow-moving object. Even though this approach is fine for distant fires, it may not be correct for short or mid-range ones. In this paper, we propose a fire detection method that is able to detect wildfires from dark videos while overcoming false alarm sources, such as city lights, car headlights, streetlights, etc. This work extends the approach introduced in [23] with comprehensive comparisons with other machine learning methods and improves it by making structural additions.

Contribution of this paper can be counted as three folds:

1. A spatio-temporal feature extraction method including object tracking in dark video is proposed,
2. Comprehensive comparison of ensemble and kernel-based classification methods on wildfire detection in dark videos are demonstrated,
3. A final wildfire detection method which is robust against common source of false alarm sources in dark videos such as city lights or car headlights is proposed.

The organization of the paper is as follows: the proposed fire detection method is explained in Section II. It follows with the experimental setup section, Section III, then Section IV demonstrates the test and comparison results. The findings are discussed and concluded in Section V.

2. Material and Method

2.1. Extraction of Foreground Objects in Dark Videos

One challenging part of working on light emitting objects on the dark videos is they have limited visual features to be tracked or make any in depth visual analysis. For that reason, instead of visual cues of the object, we target to investigate its temporal behavior. However, we need to track an object throughout the video despite of the challenge. Light-emitting objects appear, disappear, flicker, move and even intersect with others or unmerge from the others in the video. All these cases are handled by the proposed object extraction and tracking algorithm.

Contrary to daytime counterparts, night-time videos contain very limited color information. They are very akin to digital binary images. Thus, without any color processing, each frame is first converted to a black & white image with a threshold of τ_0 by using Otsu's method [24]. As a result, the dark pixels are represented by 0 and bright ones by 1. Binary blobs in each frame are detected with 8 connectivity adjacency rule. This eliminated disconnected or isolated foreground pixels. Moreover, blobs having fewer pixels than τ_0 are discarded to reduce number of blobs considered as noise. The reason 8 connectivity is used instead of 4 is the nature of a fire which has a very fragmented structure, thus, when 4 connectivity is used there will be many small blobs belonging to same fire flame which makes analysis difficult.

Let $b_{n,k}$ be k 'th fire candidate blob of n 'th video frame and o_m be m 'th object in the whole video. While in one frame o_m can be represented by k 'th blob, $b_{n,k}$, in the succeeding frame it can be represented by $k+1$ 'th blob, $b_{n+1,k+1}$. Then a tagging procedure should be implemented for each blob in each frame to uniquely index each object across the video with an ID. A tag will have a lifetime; a tag is born, lives for a while, and then dies as the object disappears from the video. Basically, light blobs not only appear and disappear from the video, but they also move, intersect or unmerge. For that reason, we need to have an algorithm to track these light emitting objects. If the subsequent frames have intersecting blobs, then it is considered that they are the same objects and so tagged with the same ID. In other words, if tagging function, $b_{n,k} \rightarrow o_m$, is known, tagging procedure is performed as follows:

$$b_{n+1,i} \rightarrow \begin{cases} o_m & , b_{n,k} \cap b_{n+1,k} \neq \emptyset \\ o_{m+1} & , otherwise \end{cases} \quad (1)$$

The equation indicates that if two object in consecutive frames are spatially intersecting, they are the same objects and they need to have the same ID. Initially, blobs in the first frame also tagged with their arbitrarily initialized blob numbers. However, this approach has some difficulties. For example, if both $b_{n,k}$ and $b_{n,k+1}$ intersect with $b_{n+1,i}$, are those all the same objects? Another difficulty is if both $b_{n+1,i}$ and $b_{n+1,i+1}$ intersect with $b_{n,k}$, which objects are to be as separate? In Figure 1, both difficulties given above are represented. Assume the first frame $n=1$ contains seven blobs drawn in black circles and the second frame $n=2$ contains eight blobs drawn in red circles. Blobs in the first frame take their blob numbers as ID tags, i.e., $b_{1,1}$ gets tag 1, $b_{1,2}$ gets tag 2, etc. Now consider $b_{1,1}$ and $b_{2,4}$ intersect most, then $b_{2,4}$ gets the tag ID: 1. Next, $b_{1,2}$ intersects with $b_{2,2}$ most, thus $b_{2,1}$ dies, $b_{2,2}$ pairs with $b_{1,2}$ and gets the tag ID 2. Third, $b_{1,3}$ intersects with $b_{2,2}$ most, and thus both $b_{2,3}$ and $b_{2,5}$ die, $b_{2,2}$ pairs with $b_{1,3}$ and gets the tag 3. Fourth, $b_{1,4}$ intersects only with $b_{2,6}$ and $b_{2,6}$ gets the tag 4. Fifth, $b_{1,5}$ intersects only with $b_{2,6}$ and $b_{2,6}$ this time gets the tag 5. In similar way $b_{2,7}$ gets the tag 7, $b_{1,6}$ intersects with no one and dies. $b_{2,8}$ intersects with no one and is born by getting a new tag 8. This operation made the second difficulty apparent: $b_{2,2}$ and $b_{2,6}$ have two distinct tags transferred to them. This conflict is resolved in a similar way: $b_{2,2}$ intersects with $b_{1,3}$ more than $b_{1,2}$ does. Thus, it gets the tag 3 and $b_{1,2}$ dies; $b_{2,6}$ intersects with $b_{1,4}$ most, gets the tag 4, and $b_{1,5}$ dies. In summary, tags 2, 5, and 6 dies, tags 1, 3, and 4 survives, tag 8 is newly born, however $b_{2,3}$ and $b_{2,5}$ are stillbirths.

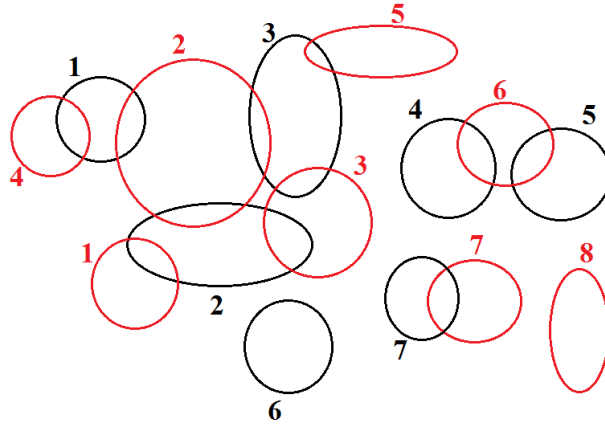


Figure 1. The figure shows possible scenarios that might come up during glowing object tracking in a dark video. Black and red circles indicate the foreground object location in the n th and the next frame, i.e. $(n+1)$ 'th frame. Since the flame has limited visual cues, their spatio-temporal locations are used to track the objects throughout the video.

2.2 Spatio-temporal Feature Extraction

In order to capture the temporal behavior of the flickering flame, the features are extracted from a number of video sequences. Size of the temporal window is a tradeoff between detection time of fire alarm and its accuracy. In order to extract features from same number of frames, a tag that is not apparent along a full window is discarded from computations.

Features of a full-window tag are extracted from change in various motion variables of the tagged object. Thirty features are derived from these 6 variables which can be listed as: pixel area of the object in frame, 2D position of the mass center of the object, height, width and area of smallest bounding box (BB) of the object.

By using these variables, we can realize distinctive characteristics of a night fire that are flickering and motion behavior. The variables are followed along a window and various features are extracted as explained presently.

While an object's variance of pixel area is large along a window, it is small for moving vehicles and fixed sources such as street, city, or house lights since area of such non-fire light sources does not change suddenly along a video. However, due to flickering motion of a fire, the area will change rapidly. Similarly, variance of height and width of BB will usually be large for fire objects and small for others. It is for this reason, mean and variance of height and width of a BB as well as their first and second order derivatives will be distinctive between fire and non-fire objects.

Let ψ_n be value of a variable at n 'th frame in a window with N number of frames. For many of these variables, mean and variance is computed as follows, respectively:

$$\mu_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \psi_n \quad (2)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N |\psi_n - \mu_0|^2 \quad (3)$$

Mean and variance of first and second order derivative of some variables are computed as in Eq. (4-7), respectively.

$$\mu_1 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=2}^N (\psi_n - \psi_{n-1}) \quad (4)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{n=2}^N |(\psi_n - \psi_{n-1}) - \mu_1|^2 \quad (5)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{N-2} \sum_{n=3}^N (\psi_n + \psi_{n-2}) \quad (6)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{N-3} \sum_{n=3}^N |(\psi_n + \psi_{n-2}) - \mu_2|^2 \quad (7)$$

For a fire object, variance of center of mass (CoM) is higher in vertical axis than in lateral axis. For a car moving horizontally, variance of CoM of headlights in vertical axis is very small. In the same manner, variance of CoM of fixed light sources in both axis is very small. These are the reasons we used variance of CoM as a feature.

Here, it is important to note that horizontal and vertical location of CoM is not considered as features since a fire can take place anywhere in the video. Otherwise, the system can be trained for a specific location that fire is expected to start. That's why position free features (i.e., mean and variance of first and second order derivatives) are used. In Table 1, variables and features are summarized.

If a feature belongs to a greater interval than other features, impact of small-bounded ones may be reduced. Normalization is the solution to avoid such a problem. Min-max normalization has the ability to preserve relation between elements of a feature vector, thus it is chosen. Let $\delta_{i,j}$ be value of j 'th feature at sample i . Then, min-max normalization is defined as

$$\bar{\delta}_{i,j} = \frac{\delta_{i,j} - \min \delta_{i,j}}{\max \delta_{i,j} - \min \delta_{i,j}} \quad (8)$$

Table 1. Extraction of Features from Variables.

	Feature		Feature 1 st Der		Feature 2 nd Der	
	Mean	Var	Mean	Var	Mean	Var
Pixel Area	x	x	x	x		
CoM x axis			x	x	x	x
CoM y axis			x	x	x	x
BB width	x	x	x	x	x	x
BB height	x	x	x	x	x	x
BB area	x	x	x	x	x	x

In real-time applications, video stream may be continuous. Therefore, after adding a new window, normalization should be implemented throughout up-to-date data.

2.3 Training

In this work, as a base classifier, Support Vector Machines (SVM) is used. Besides SVM, majority voting, Random Forests, AdaBoostM1, and IBk classifiers used and their performance compared to SVM. First a classifier model is

constructed and then the model predicts class of any test instance it is supplied. Here, we used LIBSVM library with radial based function (RBF) kernel since our data set has a nonlinear classification characteristic.

In order to get most accurate classification, best $c \in I^+$ cost and $\gamma \in I^+$ impact range parameters should be found. If $c_2 > c_1 > 0$ and $\gamma_2 > \gamma_1 > 0$ are predetermined intervals, then optimization requires a $[c_1, c_2] \times [\gamma_1, \gamma_2]$ size grid search for the best (c^*, γ^*) pair [25]. In our tests, an accelerating intervention to optimization saved time and gave a better (c^*, γ^*) pair compared to pairs obtained when not intervened. The intervention is simple: after at least ten trials, if the last five trials produce a mean absolute deviation of accuracy no greater than 1.5, halt the search and use current pair as (c^*, γ^*) .

Classes of instances in training set is determined by a professional for fire objects as 1 and for non-fire objects -1. With (c^*, γ^*) pair, a model is constructed in SVM and class of all instances from a distinct test set is predicted from the set $\{-1, 1\}$. Accuracy and elements of confusion matrix (i.e., true positive rate, false negative rate, true negative rate, and false positive rate) are used as performance measures.

While SVM gives good results of predictions, majority voting (MV) improves these results significantly. In a test set, MV is implemented between distribution of fire or non-fire classification of an object tag. Then, class of the object is redetermined according to result of MV.

3. Setup of Experiments

Experiments implemented on a video dataset curated by the authors. Sketch of place that fire videos are recorded given in Figure 2. The maximum distance a camera can see in the night is 1km and distance between fires and cameras changes from 30m to 100m. Besides fires, in 360° sight of the cameras there are a series of streetlights, both bright and dark roads, city lights, tower lights flashing on and off, moving vehicle headlights in low- or high-density traffic, short distance house and streetlights.



Figure 2. Dataset videos are intentionally taken from a place where possible negative light sources appear in the scene such as city lights or car lights. Location of test fires (stars), cameras (arrows) and sight of the scene is shown in red circle. The maximum distance of the sight from cameras is around 1 km. The road section (blue circle) generated challenging fire-like vehicle headlights during the fire recordings.

Four different cameras are used recording fires usually in 640x480 resolution: Casio Exilim EX-Z350, Nikon D3200, Samsung S850, and Samsung WB100. In total 15 night fires are recorded. In Table 2, some characteristics of the videos are tabulated. A montage of the videos are given in the Figure 3.

The global image threshold is experimentally determined to be $\tau_0 = 0.5$, thus objects with low luminance and noise can be eliminated. Furthermore, objects having pixels fewer than $\tau_1 = 16$ also discarded even fire objects since an event size lower than 16 pixels is not considered significant. Remaining fire candidates are labelled as 1, and other objects are labelled as -1. An object is decided to be fire if only the object represents a flame object. Some very close reflections of a flame object, mostly on the ground, also behave exactly as the flame object; however, these objects are considered as not-fire.

Analysis implemented in MATLAB® environment for window sizes of 5, 10, 20, 50, 100, and 200 pixels. SVM parameter optimization intervals are experimentally determined to be $c_1 = 5$, $c_2 = 9$, $\gamma_1 = 4$, $\gamma_2 = 8$.

Table 2. Properties of the samples in the video dataset.

Video	Duration	# of frames	# of negative samples	# of positive samples
1	9:41	17439	99	178
2	16:09	29091	265	148
3	21:23	38518	27	307
4	29:00	52231	17	671
5	04:00	6009	505	175
6	11:04	16608	2044	471
7	12:46	19158	530	405
8	20:00	30003	6	1343
9	12:05	21746	81	1508
10	14:14	25608	89	1608
11	18:10	32688	1208	927
12	20:00	35977	266	1876
13	08:34	15435	2681	1113
14	13:17	23913	7758	1839
15	03:25	6145	222	624

**Figure 3.** Representative images of the dataset videos indicated in Section 3. The videos include both fire and not-fire frames.

When a video is chosen for test, remaining ones are used for training (leave-one-out). For a total number of 90 experiments, average training and test set sizes are 7437 and 5058 instances, respectively. It should be noted that number of instances in a training set is limited to a maximum 10,000 while no restriction applied to test sets. Average distribution of fire and not-fire instances over 6 windows are tabulated in Table 3 and number of instances per window size is given in Table 4.

Table 3. Distribution of Not-Fire classes among the videos.

Video	Average #of negative objects (%)	Video	Average #of negative objects (%)
1	56.31	9	0.09
2	66.86	10	0.40
3	63.89	11	10.35
4	62.20	12	01.36
5	03.34	13	92.54
6	08.89	14	91.23
7	08.10	15	18.32
8	0.08	-	-

Table 4. Number of instances among windows.

Window size	# of instances
5	280.381
10	102.588
20	44.584
50	16.243
100	7.758
200	3.723

Some fires were able to reach up to *3m* height under low wind conditions. In videos 1, 2, 3, and 4, a very deceptive streetlight is apparent. From video 9 to 15, very deceptive city lights combined with semi-intense traffic are apparent. Besides these not-fire objects, a torch is also used to create false objects (Figure 4, video 3).

4. Experimental Results

In this section, performance of our method evaluated and experimental results are analyzed. The measures we use for evaluation are accuracy, true positive rate which implies state of "true alarm", and false negative rate which implies state of "false alarm". Other measures can be false negative rate or "missed alarm" and true negative rate or "true silent".

4.1 SVM Results

Selected performance measurements of the proposed method are shown in Table 5. When proposed features are used for a night fire, SVM is able to classify new instances correctly with an accuracy of usually over 90%. Implementing MV after SVM classification boosts accuracy rates usually over 95%. True Positive Rate (TPR) values are over 94% on average, however in some videos True Negative Rate (TNR) values are low due to reasons given below.

Table 5. Accuracy, TPR and TNR measurements on the videos. SVM and SVM+MV methods are compared.

Video	SVM (Accuracy)	SVM+MV (Accuracy)	SVM (TPR)	SVM (TNR)
1	0.90	0.97	0.91	0.89
2	0.88	0.99	0.78	0.92
3	0.96	0.99	0.92	0.98
4	0.98	0.99	0.97	0.99
5	0.84	0.84	0.84	0.69
6	0.92	0.95	0.95	0.45
7	0.93	0.93	0.99	0.30
8	0.98	0.99	0.97	0.00
9	0.95	0.98	0.95	0.22
10	0.96	0.99	0.97	0.15
11	0.92	0.93	0.99	0.19
12	0.97	0.99	0.97	0.52
13	0.98	0.99	0.99	0.97
14	0.97	0.99	0.99	0.97
15	0.81	0.81	0.99	0.02

In videos 5 and 6, the false alarm generating frame region is a sharp turn which is part of the road in the scene (Blue circle in Figure 2). This part of the road extends from front to back on the scene, which makes vehicles move not quite linearly. Since traffic is semi-intense or intense during the recording time, vehicles slowed down, and

overhead lights clustered to form fire-like moving objects. In Figure 4, on top, a sample frame is shown. Even though tag 11 is a not-fire object, it is detected as fire and boxed.

In videos 7, 8, 10, 12, and 15, reflections at not-fire regions on the ground up to half or one meter close to fire origin and intense luminance on objects very close to fire cause an error. In Figure 4, on middle, tag 30 is a fire objects that is predicted as fire, however though tag 172 is a reflection and not a fire, it is classified as fire. Notice that, since these types of errors appear when a fire is the case, they do not really cause a false alarm.

In videos 9 and 11, a moving torch initially turns to the camera and then turns quickly back which makes the illuminated area first grow and then suddenly shrink, eventually causes an error. In Figure 4, on bottom, both tags 1873 and 1975 predicted as fire while tag 1975 is a not-fire object.



Figure 4. Examples of false detections are shown. TOP: The fire on the left (Object tag: #1) is correctly detected. However, flashlights of the cars passing by (Object tag: #11) are falsely labeled as fire object. MIDDLE: Fire (Object tag: #30) is correctly detected while its reflection (Object tag: #172) is also falsely detected, BOTTOM: (Object tag: #1975) is a correctly detected fire. (Object tag: #1873) is a flashlight and it is a false detection.

Window size also has an effect on accuracy. When window size increases, more evidence per window is collected for decision process which allows better predictions. For pre-processing, which includes tagging procedure, more computation is required. However, for SVM runs, less computation is the case. When window size decreases less evidence per window is collected, less pre-processing computation and more SVM computation is required. Table 5 shows performance measures for two windows: $N=5$ and $N=200$. When $N=5$, average accuracy is 89.47% and when $N=200$, accuracy also increases to an average of 96.63%. An increase in window size also decreases false alarm rates. For example, in Figure 4 and video 1, the street, the house, and a torch light are predicted as fire objects, When window size is 200, at the beginning of the video house lights very short time, the torch never and due to move of the camera at the end of the video the streetlight very short time are predicted as fire. Even though this encourages us to use longer windows (preferably with high fps cameras) due to heavy work of pre-process, alarm response time will eventually decrease. In Table 6, NaN corresponds to existence of no not-fire objects in the video. In videos 11 and 15, TNR value is 0 due to misclassification of intense luminance of a vehicle standing very close to fire (Figure 4).

Table 6. Investigation of effect of window size on the classification accuracy. Window sizes $N=5$ and $N=200$ are used in the tests.

Video	SVM (Accuracy)		SVM (TPR)		SVM (TNR)	
	N=5	N=200	N=5	N=200	N=5	N=200
1	88.28	91.09	0.96	0.87	0.81	0.93
2	82.98	91.32	0.77	0.80	0.85	0.96
3	92.25	98.00	0.88	0.94	0.94	1.00
4	97.43	98.78	0.95	0.97	0.98	0.99
5	79.03	91.89	0.79	0.91	0.78	NaN
6	86.61	100.0	0.93	1.00	0.61	-
7	88.03	100.0	0.99	1.00	0.12	1.00
8	95.87	99.20	0.95	0.99	0.00	NaN
9	89.59	100.0	0.89	1.00	0.43	NaN
10	94.90	98.04	0.95	0.98	0.17	NaN
11	87.68	98.47	0.99	1.00	0.36	0.00
12	95.10	98.78	0.96	0.98	0.51	NaN

13	95.66	99.34	0.94	0.98	0.95	0.99
14	94.61	99.54	0.98	1.00	0.94	0.99
15	73.95	85.00	0.96	1.00	0.01	0.00

Apart from errors explained above, the proposed method successfully does not classify street or city lights, headlights of vehicles and many other not-fire objects.

4. 2. Comparisons with the other classification methods

SVM is a standard tool for image classification problems. However, there exist some other tools performs equally, some even better. In this section, we implement Random Forests (RF), AdaBoostM1 (AB), IBk and J48 machine learning tools on our data. Performance measures are the same as we used for SVM at previous section. The platform used for implementation is Weka data mining software by The University of Waikato. Default parameter set up is used for the tests. Contrary to SVM experiments, training data is not limited and full training set is used for building a model (see Table 4). In addition to SVM, 360 more tests are implemented, one test per video per window size, and per machine learning tool.

Accuracy results are given in Table 7, In the table, except videos 11 and 15, RF showed the best performance among other tools. Second best performance belongs to SVM. AB showed best performance for video 15 and IBk for video 11. Videos 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12,13, and 14 show a robust performance under any machine learning tool while videos 1, 2, 5, 9, 15 shows unstable performance. Performance of these methods is summarized in Figure 5. In Table 8, TNR values are tabulated. On average, IBk gives lowest average false alarm rate of 32.01% and SVM gives the highest average rate of 44.75%. Most robust videos in terms of TNR value are videos 3, 4, 13, and 14. After all, all these analysis shows us in terms of fire catch RF performs best, however in terms of false alarm avoidance IBk performs best.

Table 7. Comparison of the accuracies of SVM, Random Forest (RF) AdaBoostM1 (AB), IBk

Video	SVM	RF	AB	IBk
1	90.0	94.4	83.9	91.5
2	88.0	94.0	83.1	89.6
3	96.0	98.6	92.8	94.0
4	98.0	98.4	95.0	95.6
5	84.0	88.3	72.8	78.4
6	92.0	92.6	86.3	87.6
7	93.0	95.1	92.8	93.8
8	98.0	98.8	95.5	94.4
9	95.0	97.2	85.4	86.5
10	96.0	98.9	96.8	94.0
11	92.0	93.8	93.6	94.0
12	97.0	98.6	95.6	93.1
13	98.0	99.3	98.1	97.8
14	97.0	98.3	97.3	97.2
15	81.0	84.6	88.0	79.3

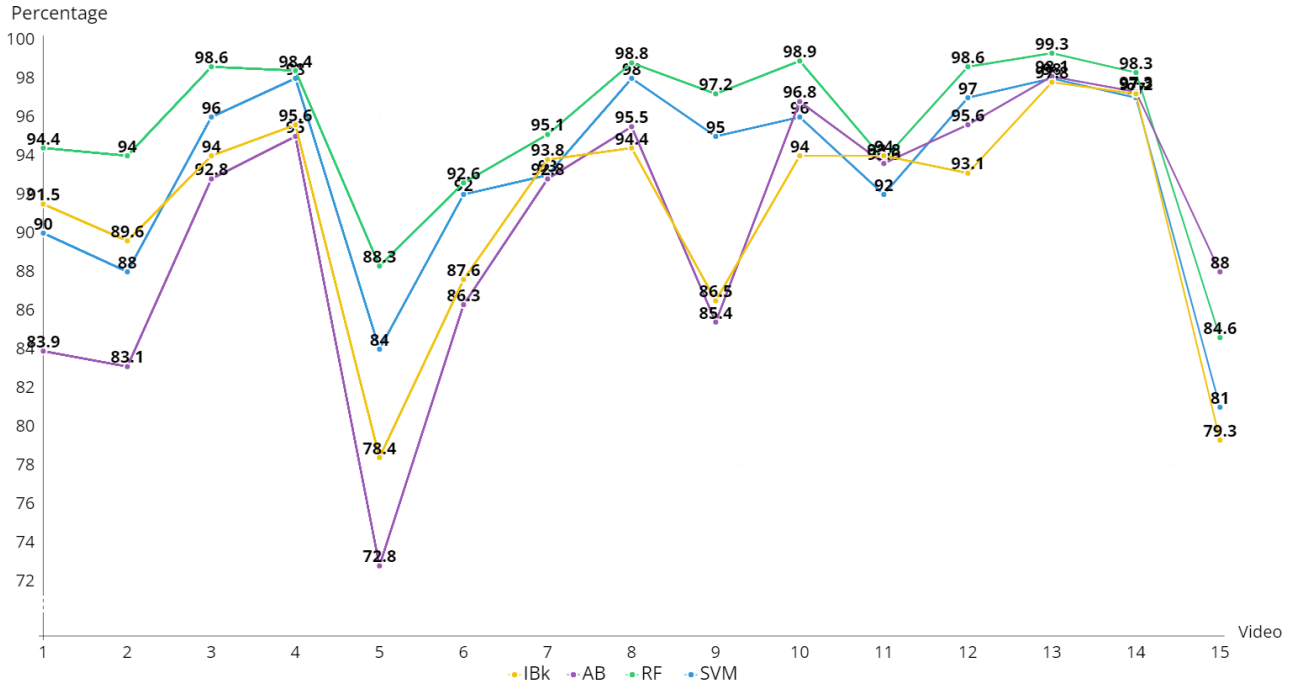


Figure 5. Comparison of the accuracies of SVM, Random Forest (RF) AdaBoostM1 (AB), and IBk given in the Table 7.

Table 8. Comparison of TNR of SVM, Random Forest (RF) AdaBoostM1 (AB), IBk

Video	SVM	RF	AB	IBk
1	10.40	08.38	17.20	09.00
2	07.70	05.55	21.26	03.90
3	01.90	00.76	07.58	01.50
4	01.10	01.12	04.29	01.30
5	30.80	13.31	15.77	18.86
6	54.50	53.91	51.19	58.10
7	69.90	68.90	84.50	78.00
8	100.0	83.30	100.0	00.00
9	77.20	54.70	80.00	29.70
10	85.30	89.20	93.90	85.52
11	80.20	57.12	60.80	48.60
12	47.70	04.84	56.60	44.20
13	02.00	00.72	01.70	01.90
14	02.80	01.86	02.83	02.90
15	99.80	68.90	37.72	96.70

5. Discussion and Conclusion

In this paper, a video-based wildfire detection method for under-illuminated environments is proposed. The experimental results show that temporal behavior of the flickering flame in a dark video has a distinct characteristic, and it is well suited for flame and fire detection in low light conditions. This temporal behavior of the fire allows us to extract descriptive spatio-temporal features from a fire video even the visual texture of the objects in the dark video are not visible. The proposed object features are taking advantage of temporal flickering motion of a night fire. The classification method can distinguish the deceptive false alarm sources such as city and streetlights, vehicle headlights and flickering reflections.

It is experimentally verified that the fire detection accuracy of the proposed method is over 90% on the average. The method is tested with various hyper-parameters such as temporal window size. It is shown that when the temporal window size is increased to include 200 consecutive frames, over 95% accuracy on average was obtained.

The proposed object features are tested with various classification methods such as SVM, Random Forests, AdaBoostM1, and IBk. The comprehensive comparison shows that Random Forests classification attains the

highest accuracy on the extracted features. It is also shown that the detection accuracy of IBk is comparable to the most accurate model. Moreover, among all tested machine learning algorithms, IBk gives the smallest false alarm rate, 32.01%, while SVM gives the highest. Therefore, when the reduction of the false alarm rate is more critical, IBk can be employed. The method is fundamentally applied to fires that are not far away. The method is based on temporal features of the fire object, which are derived from fires videos that are captured low to mid-range distances. It should be expected that flickering and other temporal behavior of a far distance fire should have differing features than that of a low to mid-range fire. Therefore, future research efforts can extend the method for detection of fire at far distance.

References

- [1] DGF, "2021 Forestry Statistics", *Turkish Directorate General of Forestry*, Ankara, 2021.
- [2] DGF, (2017, Jan 29), *State of Forest Fires* [Online]. Available: <https://www.ogm.gov.tr/Lists/GuncelOrmanYanginlari/>.
- [3] Istanbul Fire Department, "2011-2016 Statistics," *Istanbul Municipality*, Istanbul, 2011.
- [4] B. U. Toreyin, Y. Dedeoglu, and A. E. Cetin, "Flame detection in video using hidden Markov models", *IEEE Int. Conf. Image Process.*, vol. 2, no. October-2005, p. II-1230-3, 2005.
- [5] Y. Dedeoglu, B. U. Toreyin, U. Gudukbay, and A. E. Cetin, "Real-time fire and flame detection in video", *ICASSP, IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. - Proc.*, vol. II, pp. 669672, 2005.
- [6] B. U. Toreyin, Y. Dedeoglu, and A. E. Cetin, "Contour based smoke detection in video using wavelets", *Eur. Signal Process. Conf.*, no. EUSIPCO, pp. 610, 2006.
- [7] Y. Dedeoglu, B. U. Toreyin, U. Gudukbay, and A. E. Cetin, "Real-time fire and flame detection in video", *ICASSP, IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. - Proc.*, vol. II, pp. 669672, 2005.
- [8] B. U. Toreyin and A. E. Cetin, "Online Detection of Fire in Video", *2007 IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, pp. 15, 2007.
- [9] B. U. Toreyin and A. E. Cetin, "Computer vision based forest fire detection", *2008 IEEE 16th Signal Process. Commun. Appl. Conf.*, p. 6800, 2008.
- [10] K. Dimitropoulos, K. Köse, N. Grammalidis, and A. E. Çetin, 'Fire detection and 3D fire propagation estimation for the protection of cultural heritage areas', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 38, no. 8, pp. 620–625, 2010.
- [11] O. Gunay, A. E. Cetin, and B. U. Töreyn, "Online adaptive decision fusion framework based on projections onto convex sets with application to wildfire detection in video," *Optical Engineering*, vol. 50, no. 7, p. 077202, 2011.
- [12] Y. H. Habiboglu, O. Gunay, and A. E. Cetin, "Real-time wildfire detection using correlation descriptors," in *2011 19th European Signal Processing Conference*, 2011, pp. 894–898.
- [13] O. Gunay, B. U. Toreyin, K. Kose, and A. E. Cetin, "Entropy-functional-based online adaptive decision fusion framework with application to wildfire detection in video," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 21, no. 5, pp. 2853–2865, 2012.
- [14] Y. H. Habiboğlu, O. Günay, and A. E. Çetin, "Covariance matrix-based fire and flame detection method in video," *Machine Vision and Applications*, vol. 23, no. 6, pp. 1103–1113, 2012.
- [15] F. Erden et al., "Wavelet based flickering flame detector using differential PIR sensors," *Fire Safety Journal*, vol. 53, pp. 13–18, 2012.
- [16] S. G. Kong, D. Jin, S. Li, and H. Kim, "Fast fire flame detection in surveillance video using logistic regression and temporal smoothing," *Fire Safety Journal*, vol. 79, pp. 37–43, 2016.
- [17] S. Verstockt et al., "A multi-modal video analysis approach for car park fire detection," *Fire safety journal*, vol.

57, pp. 44–57, 2013.

[18] K. Dimitropoulos et al., “Flame detection for video-based early fire warning for the protection of cultural heritage,” *Euro-Mediterranean Conference*, 2012, pp. 378–387.

[19] T. Toulouse, L. Rossi, T. Celik, and M. Akhloufi, “Automatic fire pixel detection using image processing: a comparative analysis of rule-based and machine learning-based methods,” *Signal, Image and Video Processing*, vol. 10, no. 4, pp. 647–654, 2016.

[20] K. Dimitropoulos, P. Barmpoutis, and N. Grammalidis, “Spatio-temporal flame modeling and dynamic texture analysis for automatic video-based fire detection,” *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*, vol. 25, no. 2, pp. 339–351, 2014.

[21] A. E. Çetin et al., “Video fire detection–review,” *Digital Signal Processing*, vol. 23, no. 6, pp. 1827–1843, 2013.

[22] K. Tasdemir, O. Gunay, B. U. Toreyin, and A. E. Cetin, “Video based fire detection at night,” in *2009 IEEE 17th Signal Processing and Communications Applications Conference*, 2009, pp. 720–723.

[23] A. K. Agirman and K. Taşdemir, “Short to mid-range night fire detection,” in *2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2017, pp. 1–4.

[24] N. Otsu, “A threshold selection method from gray-level histograms,” *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979.

[25] C.-C. Chang and C.-J. Lin, “LIBSVM: a library for support vector machines,” *ACM transactions on intelligent systems and technology (TIST)*, vol. 2, no. 3, pp. 1–27, 2011.

[26] Y. Wan, Y. Chen, and K. Li, “Identification and spatiotemporal distribution analysis of global biomass burning based on Suomi-NPP VIIRS Nightfire data,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 359, p. 131959, 2022.

[27] A. Bouguettaya, H. Zarzour, A. M. Taberkit, and A. Kechida, “A review on early wildfire detection from unmanned aerial vehicles using deep learning-based computer vision algorithms,” *Signal Processing*, vol. 190, p. 108309, 2022.

Integrating Waterfall Methodology and Object Oriented Approach within a Decision Support System Development Life Cycle Design

Zühre AYDIN 

Energy Market Regulatory Authority, Energy Transition Department, Turkey

(Alınış / Received: 19.04.2022, Kabul / Accepted: 25.08.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

decision support systems,
object oriented programming
approach,
software development life
cycle design,
waterfall methodology

Abstract: This paper studies on design strategies and requirements of object-oriented programming approach within waterfall methodology, for developing a decision support system in a human resources system. The study proposes an integrated waterfall methodology and Object-Oriented Programming approach that is implemented during development phases. The aim of the decision support system is to help decision makers in the recruitment process and to propose a new integrated methodology for developers and managers. The application is a web-based system that supports structured decision making and provides information for company operations and decision making processes.

Bir Karar Destek Sistemi Geliştirme Yaşam Döngüsü Tasarımı Kapsamında Şelale Metodolojisi ve Nesneye Yönelik Yaklaşım

Keywords

karar destek sistemleri,
nesne yönelimli
programlama yaklaşımı,
yazılım geliştirme yaşam
döngüsü tasarımı,
şelale metodolojisi

Öz: Bu makale, bir insan kaynakları sisteminde karar destek sistemi geliştirmek için nesne yönelimli programlama içerisinde şelale metodolojisi yaklaşımının tasarım stratejileri ve gereksinimleri üzerinedir. Çalışma, geliştirme aşamalarında uygulanan bütünlük bir şelale metodolojisi ve nesne yönelimli programlama yaklaşımı önermektedir. Karar destek sisteminin amacı, karar vericilere işe alım sürecinde yardımcı olmak, geliştiriciler ve yöneticiler için yeni bir bütünlük metodoloji önermektir. Uygulama, yapılandırılmış karar vermeyi destekleyen, şirket operasyonları ve karar verme süreçleri için bilgi sağlayan web tabanlı bir sistemdir.

*Corresponding Author, email: zaydin@epdk.org.tr

1. Introduction

One of the big disputes about Decision Support System (DSS) implementations is that these software development's analysis and design phases take a substantial amount of time. Project plans and designing software architectures take much time of planning even with a large team. In addition to that project teams should choose an appropriate software development language and life cycle management methodology for better and adaptable software.

Object oriented software development provides many advantages for developing modular integrated processes. Object Oriented Programming (OOP) includes the actions of real or imagined objects. OOP languages, for instance C#, contains mixed designs within components like procedural designs and can be implemented for modelling at various levels of software model [1]. OOP based on data rather than facilities of integrated modules that include whole information to trigger data structures such as attributes and methods [2]. OOP is popular and it has many advantages again procedural-oriented software programming. Object oriented designs are reusable since there is no need to build some facilities repeatedly. It is flexible and can avoid redundancy in the code. It can increase extensibility factor of classes and can develop secure programmable code. Functions, with number of processes, share the global data, transfer data and focus on systematical design from beginning to ending [3]. All of these factors provide decreasing time and investment during software developing.

OOP is the best choice in project planning of DSS developments, because of OOP software developing objectives such as security, polymorphism, inheritance, design benefits, extensibility, flexibility, reusability, data redundancy, code maintenance and easy troubleshooting.

In a Human Resources System (HRS) DSS life cycle management there should be definition of purpose of expected software, process analysis, project planning, database and software design, database and software development, security and end user testing, deployment, feedbacks and maintenance phases. According to these phases, the Waterfall life cycle management methodology was chosen in this study, since this methodology is a linear sequential life cycle model. It has a linear sequence in which the next step depends on the efficient completion of the previous one. Especially completion of requirements analysis and system design that are prepared carefully and meticulously are important phases. The programmers have to consider project phases when they plan to develop a DSS sequentially in development of the project that aims to help decision makers in the recruitment process and to propose a new integrated methodology for developers and managers as a web-based decision support system.

The study continues with literature review in section 2, research method with the proposed software design, logic and architecture subsections, implemented life cycle phases and waterfall methodology of the proposed DSS in section 3, implemented and proposed software life cycle with integration of Waterfall methodology and OOP approach in section 4 and conclusion in section 5.

1.1. Decision Support System

DSS helps decision makers to determine and solve semistructured and unstructured problems within data, models and knowledge. Decision making processes were firstly revealed by Carnegie Institute of Technology and was applied as a programming by Massachusetts Institute of Technology (MIT) in the 1960s. In the 1980s, detailed research of DSS was studied from single-user DSS to organizational DSS, group DSS and executive Information Systems (IS). Gorry et al. [4] developed DSS as an interactive software system that provided easy access to information for decision makers. In the 1990s, DSS improved through online analytical processing and data warehousing [5].

DSS could support decisions of the organization's operations for future strategies. DSS can be applied in different management information systems, such as diagnostic in healthcare, supply chain management, educational applications, human resource systems.

The selection of a DSS is dependent on objective of the DSS problem, organization structure, problem structure (semistructured and unstructured), decision makers' experience and organization expectancy. Hence complexity and structure of the problem is very important in DSS development.

1.2. Design Strategies and Requirements in Decision Support Systems' Software Architecture

From early 1960s, to now, many DSS design strategies, requirement analysis and development methodologies in the context of software architecture have been developed. Sprague et al. [6,21] stated DSS framework components such as; data and model base, dialog generation and software management. The purpose of this research is to evaluate the most appropriate methodology for a DSS within HRS structure. Modern DSS designs and modern procedural languages reduce time for decision making, reduce unnecessary project investments, provide necessary information, present effectiveness in organizational processes and competitive advantages. Development methodologies of DSSs are decision driven, process driven, data driven and system driven methodologies and they specify sequence of facilities of DSSs.

In the context of project management and software architecture, main strategies and requirements of DSS phases are; identification of objectives, cost benefit analysis, risk assessment, initial project complexity, planning of scope planning, project schedule, resource planning (software platform, hardware, project team, investments), risk management planning, control change management, analysis of business needs and analysis of requirements for database and model design, execution of functional, nonfunctional or unit tests, implementation, feedbacks and maintenance.

In design strategies choosing a software platform is very important. OOP languages depend on unified design and its systematic procedural diagrams involve classes, use cases, development, communication and sequence diagrams, and these advantages provide dealing with complexity of the objects [7].

When OOP design is applied to DSS systems, it can provide easy to maintain and secure code development since its design strategy is based on classes, objects and in place facilities which are structural functional decomposition of DSS. The summary of the software goals and requirements an, advantages of a DSS through modern procedural languages which depend on OOP concepts are presented as in Figure 1.

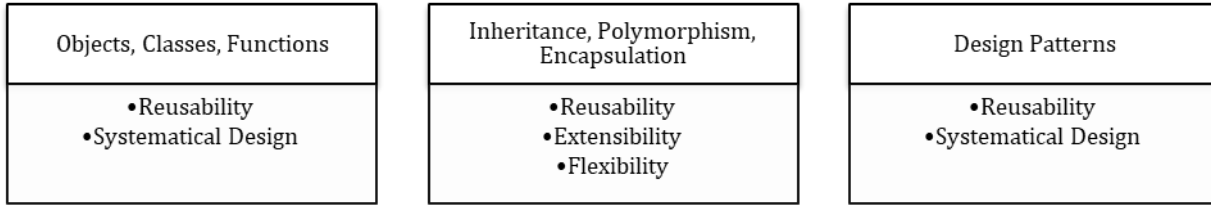


Figure 1. A DSS software requirements through OOP context.

According to the Figure 1, systematical design with objects and classes use attributes and functions to code given data. Inheritance provides using the same code blocks just by changing the definition of related variables. Reusability of attributes and methods ensures feasibility and easy coding. Polymorphism represents many different types of variables in only one code and binds the objects at various positions with various functions.

1.3. Waterfall Methodology

DSS success relies on selecting a software development life cycle approach that is most suitable for defined DSS objectives and related project phases. DSS project management and development are complex and have detailed facilities that requires detailed analysis of integrated modules, experience on analysis, development and testing phases, systematical system design, such as accurate database and programing designs.

The effects of change requests due to requirement imperfections on the outputs of software projects are essential for sequential developing in Waterfall methodology [8]. Since system requirement analysis and design are most essential part of a DSS project software life cycle management, Waterfall methodology was chosen in this paper for sequential phases.

The Waterfall methodology was presented by Royce [9] to fill the gap in sequential software project management and is widely implemented in projects. The sequential phases of the methodology are; requirement analysis, system design, coding, testing and debugging, deployment and maintenance as illustrated in Figure 2.

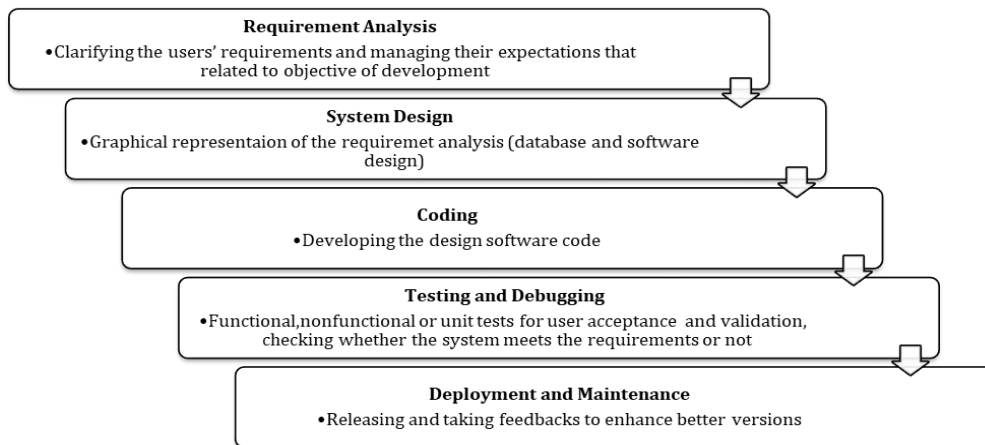


Figure 2. Life cycle phases of Waterfall methodology [9]

Objectives of an organizational HRS DSS is designed in a stable context generally. This design strategy provides choosing Waterfall methodology because of its is easy implementation and manage, clear documentation of needed requirements, review processes of each phase, sequential design of phases. The disadvantage of the methodology is that, when starting to the software development it is difficult to change the requirements, so it

should be fixed at the beginning. On the other hand, fixing the requirements at starting can be an advantage for clear and easy Development [16].

2. Literature Review

To help the human resource decision makers of an organization, Luk et al. [10] stated using of automated processes with web services that can rise the efficiency and accuracy of choosing appropriate employers for the organizational needs. Power et al. [11] researched model driven DSSs to make better decisions. They developed model driven DSS framework through using decision support, operational research and simulation technologies. Detienne [12] studied on design strategies on Object Oriented Programming within procedural and OOP languages. Veronica [13] stated that, DSS success relates with developers' competence on the development tools and processes and relates with determining a development approach that is suitable for the DSS problem. The purpose of the paper is to overview the DSS project life cycle methods through DSS developments. Study used waterfall methodology for system development life cycle within main stages such as; problem definition, analysis, design, programming and implementation. Samad [14] studied on human resource Decision Support System that includes recruitment process. According to research selecting potential employees through qualities such as education and qualification, is necessary for reducing time and effort in decision making. Chack et al. [15] studied on main tools that comprise integrated Human Resource DSS and they developed a multi agent DSS that is divided into strategic, tactical and operational management layers. Soesanto et al. [16] proposed a web based DSS which supports decisions in the scope of machinery and laboratory and it uses waterfall methodology. Subhan et al. [17] presented a detailed analysis of agile software development methodology by studying on requirements and design factors of different developments. Ramanathan et al. [18] determined the projects implemented by different studies to present ideas for automated intelligent DSS problems that decision makers face with in Human Resource Management (HRM) projects; and how these problems impact Software Project Management (SPM) outputs. Urdhwareshe [3] presented benefits, importance and impacts of OOP on software development that based on reusability, extensibility and flexibility. This study also explains the importance of OOP and independent factor model through; object, class, inheritance and polymorphism. Soleman [19] tried to create a DSS by Analytic Hierarchy Process (AHP) in weighting and by Profile Matching (PM) in ranking for an employee selection system. This system aims to save time and money by this automization and uses three testing methods for validation. Martins et al. [20] proposed a DSS that evaluates business ideas competing projects by using C# and AHP to serialize projects. This study provides AHP method to simplify the assessment process of competing.

The purpose of the paper is to overview the DSS project life cycle methods through DSS developments. This study used waterfall methodology for system development life cycle within main stages such as; problem definition, analysis, design, programming and implementation. Contribution to the literature will be with a developed DSS that implements Waterfall methodology and OOP approach and with a proposed methodology that integrates implemented approach.

3. Research Method

3.1. Development Objectives, Analysis and Software System Design

This study presents the logical design of a DSS software that is implemented for a company or an institution to choose confidently the Expert Staff Recruitment (ESR) DSS for designated projects. Company can use decision support system by recording the information of the applicants into the database and can create software employee team of the specified projects that need to be developed in order to make the budget and document transactions in electronic environment. The project development language is C # .NET development environment and the database platform is MySQL. The proposed DSS is a web-based application and aims to rank qualified personnel in a final report, according to candidates' total scores. Candidates' registrations are entered during application process.

The development objectives of the system are;

- Computer-aided decision making for the company projects
- Supporting managers in planning and control
- Creating a successful application in the field of human resources
- Providing secure and fast access by adding the information of applicants to the database

- Achieving reliable results electronically by ensuring that the information added to the database is passed through a scoring system
- Implementing OOP concepts through OOP goals
- Following waterfall software project life cycle phases for serial and easy going
- Integrating OOP approach with Waterfall methodology

In system design; user qualifications of system user are determined as making the data entry of the candidates, organizing the data and performing the necessary reporting. In the development process; things to do before development are devised as analyzing of software requirements, processes, algorithms, database design, software design and preparing the design documents.

In the context of admin user requirements; secure logging into the system with username and password should be included. Admin user should have has the permissions such as; adding, editing, deleting, updating, selecting, viewing all the candidates' information. Finally expert candidates can be determined as a result of the system's guidance and decision makers can use the personnel recruitment decision support system and can make decisions neutrally and fairly as system users.

Use case diagram is used to model the processes of ESR DSS from the point of view of system user. In the analysis and design phase of a DSS Development, good modeling prevents future conflicts, so that UML is necessary for object oriented programming languages. UML breaks down our defined objectives into parts, and creates connections between these parts. The requirements are mapped into the UML use case diagram as in Figure 3.

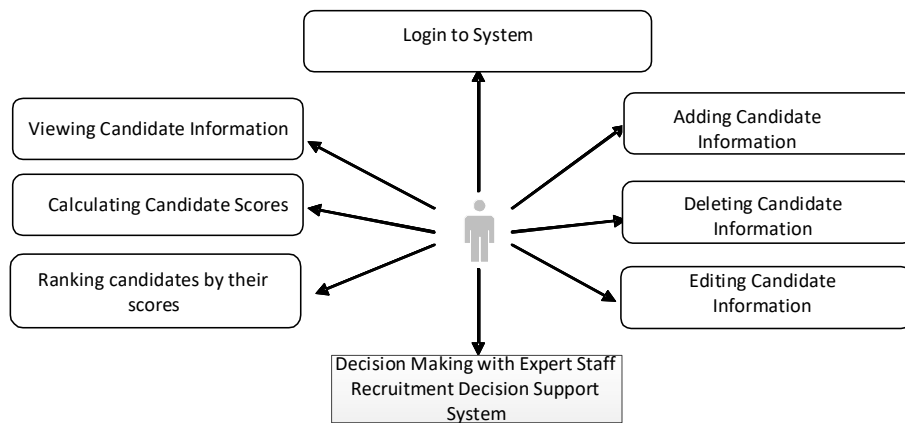


Figure 3. UML use case diagram of ESR DSS

3.2. Logic and Workflow of the ESR DSS

In related ESR DSS, decision maker can calculate scores of the project candidates/applicants whose qualifications determined by the company through candidates' education, experience, previous project area. In addition, decision maker can record applicants' information in a score table as a final ranking report. The registration of these processes are visualized in Figure 4 as activity diagram.

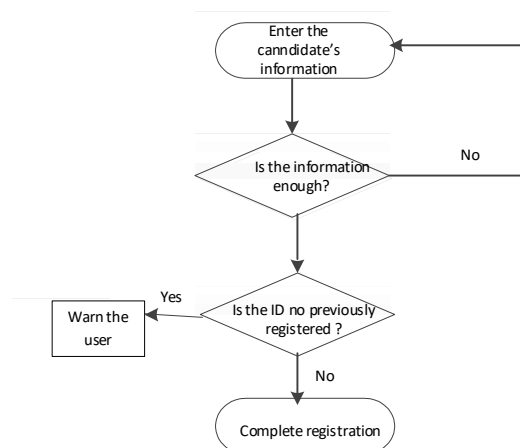


Figure 4. Activity diagram of registration process of ESR DSS

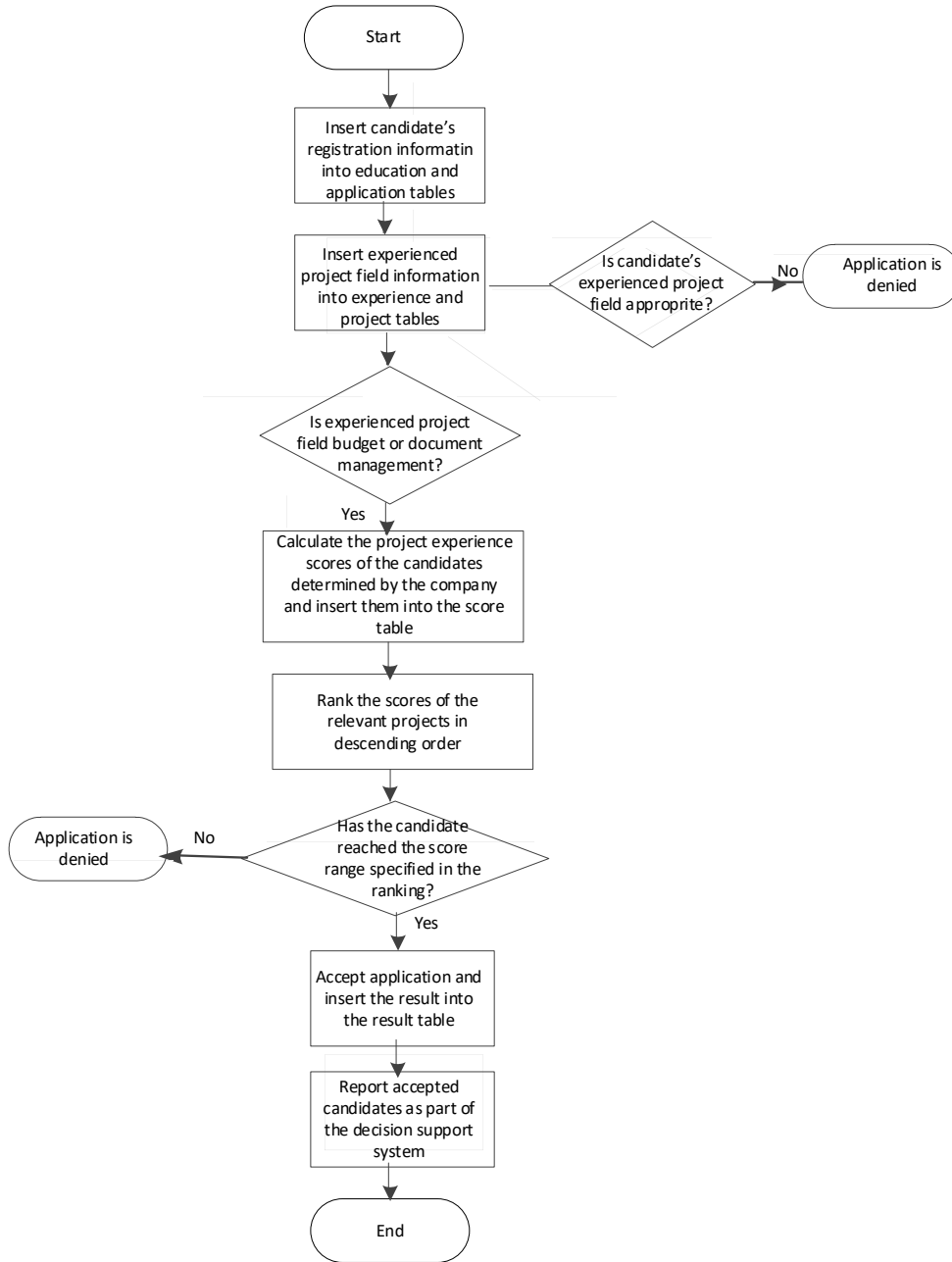


Figure 5. Flowchart of proposed ESR DSS

In Figure 5 logic and workflow of the proposed ESR DSS is shown by a flowchart.

The database actor design consists of key users, end users, candidates and decision makers who will benefit from the reports of the decision support system. The first records of the database were made by the authorized user by entering the information of the candidates who completed their applications of the previous application of a solution partner company. The finalization of the system reports was ensured by the feedback of the decision makers.

In study's database design and requirements process relational MySQL database platform is used. In this environment, enforcing relationships, determining each table's primary key, including a common field in related tables, using appropriate data types, including indexes during developing, avoiding data redundancy and standardizing variables, schemas and objects naming are carried out. Through these features, the database tables of ESR DSS are shown below.

Database tables:**DBTable1_Candidate Application Table:**

- *Table ID Number*
- *Candidate identification number*
- *Candidate name and surname*
- *Education Table ID number*
- *Project Area Table ID number*
- *Experience Chart ID number*
- *Results Table ID number*

DBTable 2_Project Field Table:

- *Table ID Number*
- *Project name*
- *Project Score (is determined by company)*

DBTable 3_Education Table:

- *Table ID Number*
- *Education Name*
- *Education Score (is determined by company)*

DBTable 5_Experience Table:

- *Table ID Number*
- *Experience Name*

DBTable 6_Score Table:

- *Table ID Number*
- *Application ID number*
- *Total Score*

DBTable 7_Results Table:

- *Table ID Number*
- *Result (Information on whether the candidate has been accepted)*

ESR DSS security requirements should provide system and information security with username control, password policies, ports, database authorization, permissions, roles, schemas security in database and secure code development.

As privacy requirements; system does not allow unauthorized users to access the screens of different modules'. As computer resource requirements; the software requirements are configured by C# programming language and MySQL database platform. As a design and implementation constraints of the development; user interaction with the system is provided by authorized users. In addition, every user interface will have a standard screen view and will differ according to its functionality. In staff requirements; staff is expected to have a basic knowledge of computer use in order to use the ESR DSS application. In system test requirements phase; after the system development phase is completed, functional system accuracy tests are made.

In terms of development design, inheritance and encapsulation in OOP provided heritage case in classes that have more than one function and these functions are used in other pages and classes. For capsulation case; ESR DSS defines public variable to access global variable that is created in outer class. Sometimes developers may need to use these variables even though they don't want to change their values. In this case, there is no need to encapsulate the variable. So, developer need to define this variable as private and remove write permission of this variable with a read only property.

Authorized user enters all the the required applicants information such as; identity no, name, surname, telephone no, e-mail, education, experience, project field into the application interface. User can search, edit and update previous records from application interface. In application check interface user can query for recorded candidates and can query candidates according to their ranked scores.

Total score of a candidate is calculated from education scores and project scores of related tables and these scores are determined by company. The addition of education and project scores are inserted into total score field.

Total scores of score table results determine the information whether the candidate has been accepted or not in the results table.

Application results interface includes both “query for candidate” button and “report” button. “Report” button provides ESR DSS objective that want to show decision on candidates according to their total score and want to choose best candidate for planned budget project and document project resource management. Figure 6 shows application result interface and ESR DSS’s aimed result report.

ID	Identity No	Name Surname	Education_ID	ProjectField_ID	Experience_ID	Experience_Year	Total_Score	Decision
1	12457896631	Daniel Worth	1	1	1	5	4	Denied
2	45243234478	Cliff Dan	2	2	2	4	7	Denied
3	56456548787	John Smith	2	2	3	4	16	Pending
4	78785473823	Jane Doe	1	2	2	5	14	Denied
5	78785445112	Nick Cave	1	2	3	5	12	Denied
6	78785324939	Daniel Dan	1	2	3	5	12	Denied
7	11989855666	Ridge Doe	3	2	2	9	19	Budget Project-ACCEPTED
8	11985083475	Cindy Smith	3	2	2	9	19	Budget Project-ACCEPTED
9	79840874866	Brooke Doe	3	2	2	7	17	Document Management Project-ACCEPTED
10	89840909798	Julie Cave	3	2	2	7	20	Budget Project-ACCEPTED
11	98854676576	Julia John	3	2	2	7	20	Budget Project-ACCEPTED
12	10984508704	Mike Penn	3	2	2	7	20	Budget Project-ACCEPTED
13	14909245887	Marta Mile	3	2	2	7	20	Budget Project-ACCEPTED
14	15524136544	Merie Can	3	2	2	7	20	Budget Project-ACCEPTED
15	7980988865	Martin Rude	3	3	3	3	17	Document Management Project-ACCEPTED
16	78394085765	Amanda Can	1	3	2	1	10	Denied
17	89234567987	Jonh Mile	2	2	2	8	19	Budget Project-ACCEPTED

Figure 6. Interfaces and running principles of the ESR DSS-Application results interface and DSS’s aimed result report.

3.3. Implemented Software Architecture Framework

A personnel recruitment system is very important for a company’s HRS DSS. This is an essential decision for a company in which the organizational development fosters. A long term and necessary success of an organization depends on its capacity to assess personnels’ experience in recruitment process. A HRS DSS development has more strategic aspect and it is the key of qualified personnel of the organization.

A DSS software architecture is a set of software components, their relationships with connectors and features of both components and connectors [23].

While preparing a DSS software, layers can be created according to intended use of the software or it can be run on a single layer. Data layer, information layer, knowledge layer and presentation layer can be stated within the concept of software layers. Data layer is the first step that is used to bring and manage distributed data and meta information from the database system. Business layer enable data that is organized and controlled in accordance with our business. In detail, it is a set of business logic, a group of domain specific components and connectors that give valuable information for decision making and it includes components and connectors. Presentation layer has interfaces that receive the meta information that is processed in the previous layers and it also uses the web for a web based DSS [23,24,25,26].

In this paper, a multi layered software achitecture is planned in ESR DSS. The hierarchical software design consists of data access, business, application, security and presentation layers. These layers are devised through OOP design and concepts. They are used to share OOP components to make most effective use of code.

In our ESR DSS OOP software architecture; data layer designs database tables, variables and relations through analysis and requirements, in addition it includes sql queries, functions, views and stored procedures. Data access layer includes data access components and service gateways that configures security roles for providing multiple databases access to application. Business layer provides value added information from database to aggregate data into information by business logic for reporting on decision making process. Application level security layer links the credentials to active directory, manages authentication for user accounts on domain, in summary ensures security and access to application. In big DSS systems security layer should include logging and security credentials should be encrypted and stored in database. In conclusion; presentation layer presents user interface to provide communication between the user and the DSS. This layer includes forms, reports, user and application controls, master pages, scripts, configuration files, presentation logic.

This study, implements a hierarchical structure of ESR DSS processes. Figure 7 presents the multi layered software architecture of web-based ESR DSS as implemented software architecture.

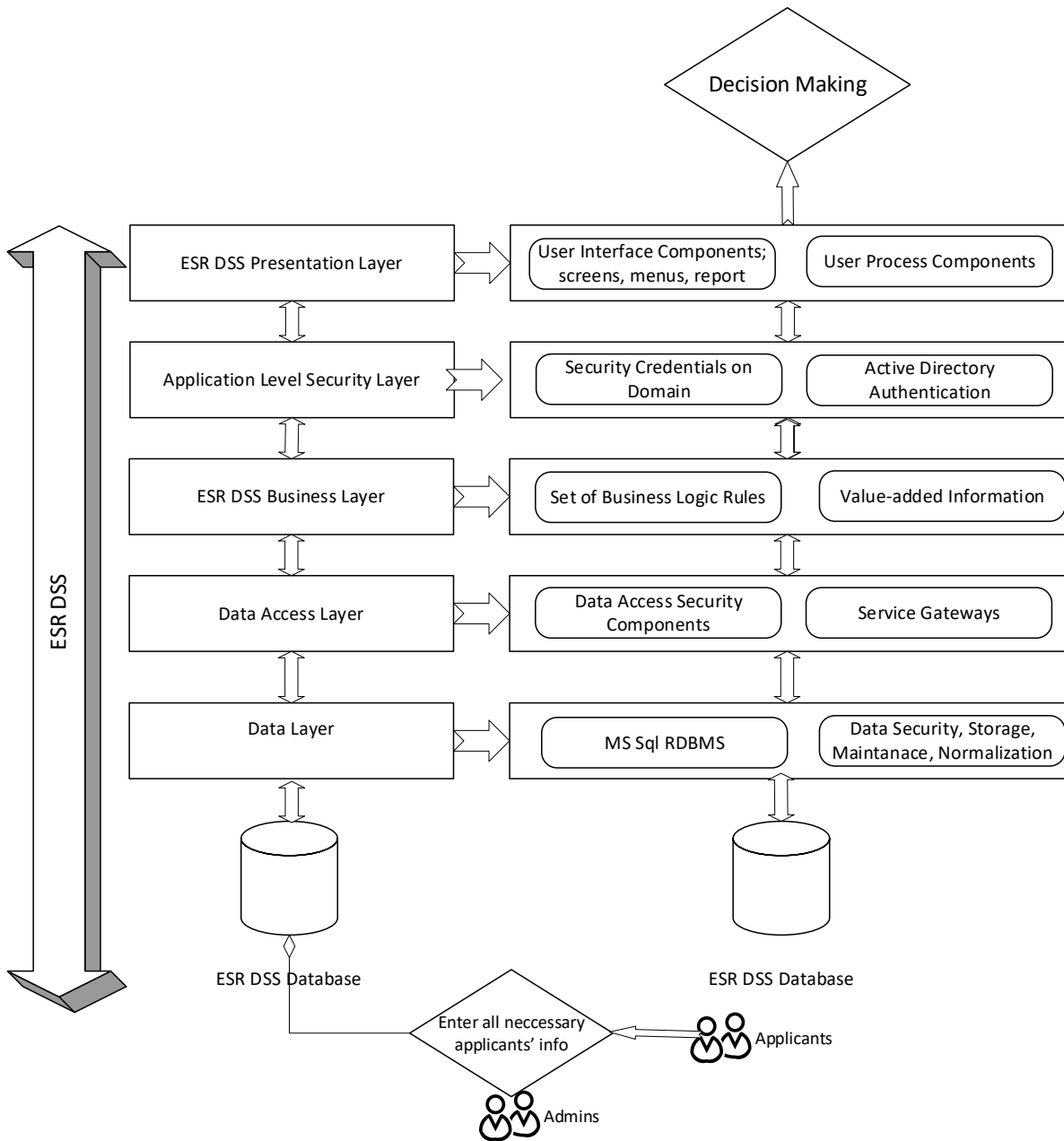


Figure 7: Implemented and proposed layered ESR DSS Framework

In designing the software the study tried to apply waterfall methodology for easy going and easy arrangement by a sequential project life cycle management and implemented OOP concepts.

4. The Implemented and Proposed Software ESR DSS Life Cycle with Integration of Waterfall Methodology and OOP Approach

During the development, implementation of waterfall methodology was done by requirement analysis, system design, coding, testing and debugging, deployment and maintenance life cycle project management phases.

These phases are implemented through ESR DSS objectives that try to provide easy and accurate decision making on a recruitment decision and assignment and evaluation of candidates for determined projects of company.

In development process; software developers must identify what they are going to develop. Structured analysis and design techniques are mentioned in section 3 with activity diagram, use case diagram, flowchart and relational database table components. To overcome the different understanding levels of objectives between

stakeholders, system requirements should be written down as a requirement document and in the literature this document known as Software Requirements Specification (SRS) document [21]. SRS contains both functional and nonfunctional requirements, such as; what the application does and what the end user wants. In this study's concept, requirements gathered from stakeholders should be written in a SRS document for preventing conflicts and saving time between developers and stakeholders. This document also decreases project costs since it provides agreement and time saving.

SRS helps fast and easy going system design, coding, testing and debugging, deployment and maintenance facilities.

OOP software design is a visualization of SRS that consists of application architecture, detailed software design, implementations of all customers' specifications, relationships between different components of system such as database and software relationships. In previous sections, study explained how ESR DSS software design is planned through user requirements, software requirements, processes, algorithm, database design and OOP approach software design. This phase allows developers to provide the accuracy of the all system since it is a communicator between SRS document and implementation.

In HRS DSS projects, design of database is an essential part of system design phase and development phase which includes instance mapping, data and schemas. In the database concepts of the OOP approach provides, efficiency for reusability of its application layers and transferring the existing data to planned database schema.

Functional, non-functional, unit tests should be made for user acceptance and validation, to see whether the system meet the requirements or not. System should be user friendly, easy to use and should has user application permissions. The deployment and maintenance phase should consist of taking feedbacks to enhance better versions and requirements. For example, there should be verification of ID number and project types can be determined by the end user on application interface.

In this perspective; study wants to present an integrated waterfall methodology and OOP approach that is used during ESR DSS project life cycle management.

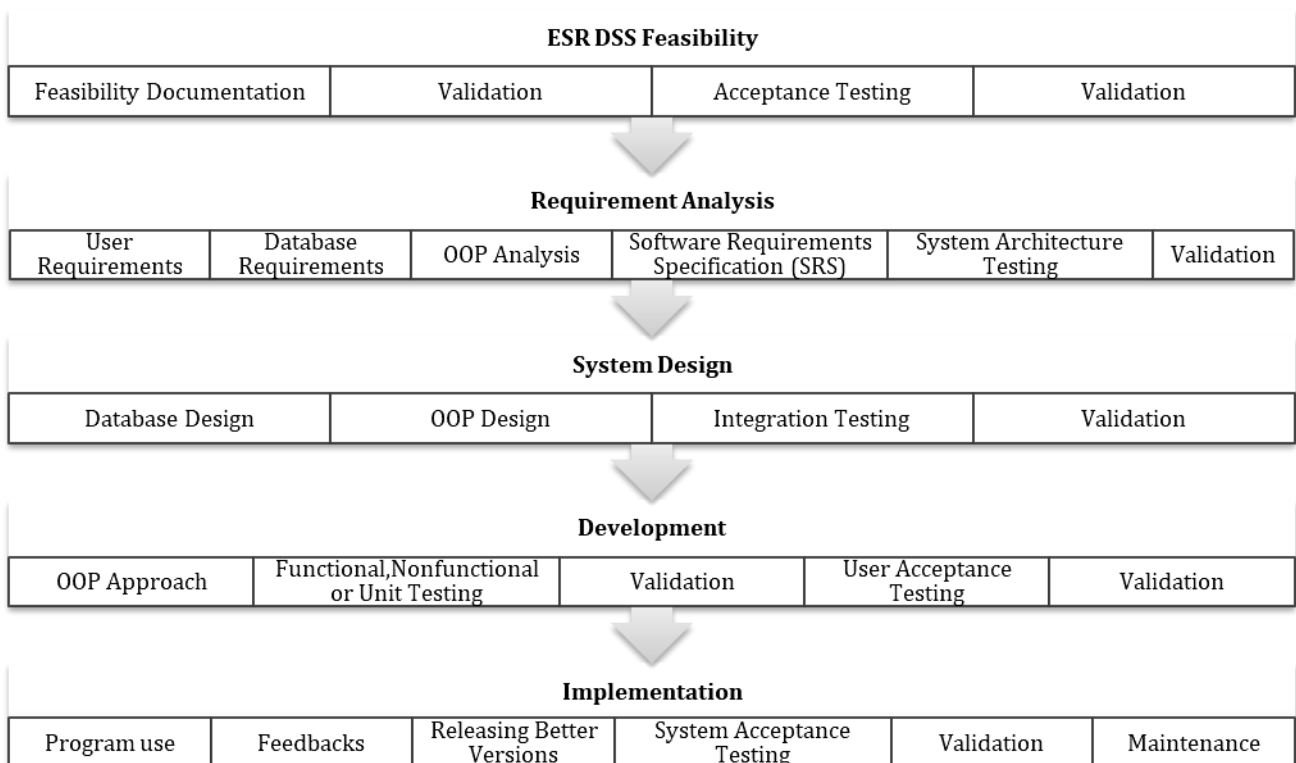


Figure 8: Proposed ESR DSS software life cycle with integration of Waterfall methodology and OOP approach

The software development project life cycle management framework of our study is presented in Figure 8 within OOP design strategies and Waterfall methodology. This framework integrates a hierarchical life cycle with related OOP analysis, design and approach, documentation phases, testing phases before validations. This

framework will help gaining necessary testing, reducing project time and cost, implementing a hierarchical life cycle management and releasing better versions.

5. Conclusion

The quality of a DSS depends on appropriate project life cycle methodology, accurately specified requirements, objectives, software architectural design within OOP concepts and developer's competence through expected implementation. This study discussed and introduced an accurate and hierarchical DSS software life cycle framework to assist in the development of web based HRS DSSs. The intention of this research is to propose a DSS that provides necessary information and guidance to human resource systems' decision makers to be more neutral and fair in their recruitment process evaluation and to make true decision at present and in the future for their software project team.

The study tried to show importance of the development phases of a specified DSS project. The proposed system helps to solve human resource DSS problems by reducing project time and cost and assisting the managers in decision making. In addition, sequential project phases help to be consistent in development as in waterfall methodology due to it provides consistency with specified requirements analysis and system design at the beginning. The proposed multi-layered ESR DSS framework of the study divides each layer into two components in the context of security, value-added information and authentication within the decision support system. With the multi-layered structure, functional and adaptable architecture is aimed in line with the needs of the system and the users. The proposed ESR DSS software life cycle with integration of Waterfall methodology and OOP approach provides gaining necessary testing, reducing project time and cost, implementing hierarchical life cycle management and releasing better versions.

In the future, it is intended to try DSS with other project life cycle methodologies and develop new modules in a HRS DSS.

References

- [1] Acock, B. Reddy, V.R. ,1997. "Designing an object-oriented structure for crop models", *Ecological Modeling*, 94:33-44.
- [2] Lousky, D. K., 2013. "Decision Support System for Human Resource Management of the Organization", 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post Harvest Industry , Espoo, Finland.
- [3] Urdwareshe, A.,2016. "Object-Oriented Programming and its Concepts" *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 26 ,No.1,1-6.
- [4] Gory, G.A., Morton, M.S.S. ,1989. "A Framework for Management Information Systems", *Sloan Management Review*, 49-61.
- [5] Shim, J., Warkentin, M., Courtney, J., Power, D., Sharda, R., Carlsson, C., 2002. "Past, present and future of decision Support technology", *Decision Support Systems* 33, 111- 126.
- [6] Sprague, H.R., Carlson, E.D., 1982. "Building Effective Decision Support Systems", Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- [7] Munassar, N. M., Govardhan, A., 2011. "Comparison between traditional approach and object oriented approach in software engineering development", *International Journal of the Advanced Computer Science and Applications*, Volume 2 Issue 6, 70-76.
- [8] Vohra, P. , Singh, A., 2013. "A Contrast and Comparison of Modern Software Process Models", *International Conference on Advances in Management and Technology*, Patiala, Hindistan, 23-27.
- [9] Royce, W.W. ,1970. "Managing the Development of Large Software Systems: Concepts and Techniques", *Proceedings of the 9th International Conference on Software Engineering*, 26, 328-338.
- [10] Luk, G. H., Chiu, D.K., 2006. "Web service based human resource recruitment by using matchmaking decision support" *EDOCW'06, Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops*, 1-8.
- [11] Power, R. R., Sharda, R., 2007. "Model-driven decision support systems: Concepts and research directions", *Decision Support Systems* 43, 1044 - 1061.
- [12] Detienne, F., 2007. "Design Strategies and Knowledge in Object-Oriented Programming: Effects of Experience", *Human-Computer Interaction* 10, 129 - 170.
- [13] Veronica, R. R., 2007. "Decision Support Systems Development", *Journal of the Faculty of Economics*, steconomice.uoradea.ro.
- [14] Samad, D.,2012. "A Decision Support System that Provides an Automated Short Listing of Potential Employees in Recruitment and Hiring of any Organization ", www.academia.edu.

- [15] Chack, M., Linker, R., Teitel, M., 2013. "Development of an Object-Oriented Version of TOMGRO for a Web-based Decision Support System", *International Journal of Management Research and Business Strategy*, Vol. 2, No.3.
- [16] Soesanto, R. P., Kurniawati, A., Ambarsari, N., 2014. "Human Resource Decision Support System Design in Maintenance Department of xxl Company Using Waterfall Method", *Proceeding 7 th International Seminar on Industrial Engineering and Management*.
- [17] Subhan, Z., Bhatti, A.T., 2015. "Requirements Analysis and Design in the Context of Various Software Development Approaches" *International Journal for Research in Applied Science & Engineering*, Vol. 3 , Issue 6.
- [18] Ramanathan, K., 2016. "Intelligent Decision Support Systems - A Tool for Human Resource Allocation in Information Technology Projects" *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 7 (5) , 2356-2364.
- [19] Soleman, S., 2019. "Decision Support System for Employee Candidate Selection Using AHP and PM Methods", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 10, No.11, 220-231.
- [20] Martins, D. Assis, R., Coelho, R., Almeida, F., 2019. "Decision Support System for Business Ideas Competitions", *Journal of Information Systems Engineering & Management*, 4(3), em0093.
- [21] Braude, E. J., Bernstein, M. E., 2010. "Software Engineering: Modern Approaches: An Object-Oriented Perspective", New York, Wiley&Sons, Inc., 2nd Edition.
- [22] Sprague, H.R., Watson, J.H., 1993. "Decision Support Systems. Putting theory into practice", Prentice Hall International, Inc., New Jersey.
- [23] R. Allen, D. Garlan, 1997. A formal basis for architectural connection, *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology* 6 -3.
- [24] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlissides, 1995. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*, AddisonWesley, Reading, MA, ISBN: 0-201-63361-2.
- [25] M. Shaw, R. Deline, D.V. Klein, T.L. Ross, D.M. Young, G. Zelesnik, 1996. Abstractions for software architecture and tools to support them, *IEEE Transactions on Software Engineering* 21- 4.
- [26] S. Goddard, S. Zhang, W. Waltman, D. Lytle, S. Anthony, 2002. A software architecture for distributed geospatial decision support system, *Proc. of 2002 National Conference for Digital Government Research*, pp. 45 - 52.

DNA Barcoding of Some Lichenized Fungi from James Ross Island (Antarctic Peninsula, Antarctica)

Merve Kahraman Yiğit^{*1}, Mithat Güllü¹, Mehmet Gökhan Halıcı¹

^{*1} Erciyes University, Faculty of Science, Biology, KAYSERİ

(Alınış / Received: 27.07.2022, Kabul / Accepted: 21.09.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Antarctica
Biodiversity
DNA barcoding
James Ross Island
Lichenized fungi
nrITS

Abstract: Due to the harsh environmental conditions in Antarctica, the life of living organisms is very limited. Lichenized fungi, which can survive in harsh environmental conditions, form the dominant vegetation of Antarctica. Studies on the biodiversity of lichenized fungi in Antarctica have been conducted for many years based on anatomical and morphological observations. However, with the use of DNA barcoding methods, these studies have been accelerating in recent years and new species are being discovered day to day. On the other hand, DNA barcoding of known species from the past is also done and anatomical/morphological diagnoses are confirmed. In this study, *Catillaria contristans* (Nyl.) Zahlbr., *Gyalidea antarctica* Øvstedal & Vězda, *Physconia muscigena* (Ach.) Poelt, *Rhizocarpon geminatum* Körb., *Steinera intricata* (Øvstedal) Ertz and *Xanthocarpia tominii* (Savicz) Frödén, Arup & Söchting species based on nrITS DNA barcoding were performed. In addition, detailed descriptions of the species are also included in the study.

James Ross Adası (Antarktika Yarımadası, Antarktika)'ndan Bazı Likenleşmiş Mantarların DNA Barkodlaması

Anahtar Kelimeler

Antarktika
Biyçeşitlilik
DNA barkodlama
James Ross Adası
Likenleşmiş Mantar
nrITS

Öz: Antarktika'da zorlu çevresel koşullar nedeniyle canlıların yaşamı oldukça sınırlanmıştır. Zorlu çevresel koşullarda hayatta kalabilen likenleşmiş mantarlar Antarktika'nın baskın vejetasyonunu oluşturmaktadır. Antarktika'da likenleşmiş mantarların biyçeşitliliği ile ilgili çalışmalar anatomik ve morfolojik gözlemlere dayalı olarak uzun yıllardır devam etmektedir. Ancak DNA barkodlama yöntemlerinin kullanılmasıyla son yıllarda bu çalışmalar hız kazanmaktadır ve her geçen gün yeni türler keşfedilmektedir. Öte yandan geçmişten bu yana bilinen türlerin DNA barkodlamaları da yapılmakta ve anatomik/morfolojik teşhislerin doğrulanmaktadır. Bu bağlamda bu çalışmada James Ross Adası (Antarktika Yarımadası, Antarktika)'ndan daha önce rapor edilen likenleşmiş mantar türlerinden *Catillaria contristans* (Nyl.) Zahlbr., *Gyalidea antarctica* Øvstedal & Vězda, *Physconia muscigena* (Ach.) Poelt, *Rhizocarpon geminatum* Körb., *Steinera intricata* (Øvstedal) Ertz ve *Xanthocarpia tominii* (Savicz) Frödén, Arup & Söchting türlerinin nrITS'e dayalı DNA barkodlamaları yapılmıştır. Ayrıca çalışmada türlere ait detaylı deskripsiyonlara da yer verilmiştir.

*Corresponding Author, email: amervekahramann@gmail.com

1. Introduction

The dominant organisms of the Antarctic terrestrial vegetation are lichenised fungi. It constitutes the largest macroorganism group in terms of the number of species [1]. Studies on lichenized fungi in Antarctica have been going on for about 2 centuries. Today, with DNA-based research, the number of lichenized fungi known from Antarctica is nearly 500 [2].

James Ross Island, located in the north-east tip of Antarctic Peninsula "(64° 15' S, 57° 45' W)" is known as one of the most lichen-rich islands in Antarctica, with more than 140 species of lichenized fungi reported. As usually the anatomical and morphological characters were used in identification of lichenized fungi species on James Ross Island; it is thought that the lichens of the island should be examined by molecular methods to accurately [3]. For several years some researchers studied the island's lichenized fungi biodiversity; identified and/or reported new species from the island [3-15]. DNA barcoding plays an important role in making these identifications especially in the last years.

In this study, it is aimed to perform DNA barcoding of some previously known and reported species from James Ross Island. For this purpose, *Catillaria contristans* (Nyl.) Zahlbr., *Gyalidea antarctica* Øvstedal & Vězda, *Physconia muscigena* (Ach.) Poelt, *Rhizocarpon geminatum* Körb, *Steinera intricata* (Øvstedal) Ertz and *Xanthocarpia tominii* (Savicz) Frödén, Arup & Søchting are identified in species level based on nrITS phylogeny.

2. Material and Method

2.1. Materials and morphological observation

Samples of lichenized fungi were collected by the third author from James Ross Island (Antarctic Peninsula). Collected specimens are deposited in "Erciyes University Herbarium (ERCH-Kayseri, Turkey)". The specimens were identified by using standard microscope methods. Sections were taken in Lugol's solution, potassium hydroxide (K) and water. However, measurements were made only from sections in water. The measurements are written in as "(smallest value) mean minus standard deviation-mean-mean plus standard deviation-(largest value)" format by calculating mean, standard deviation, maximum and minimum values. "n" was the total number of measurements for all samples of that species.

2.2. Isolation, DNA extraction, amplification, and sequencing

An average of five to six apothecia were taken for DNA isolation and a commercial DNA isolation kit ("DNeasy Plant Mini Kit; Qiagen") was used for DNA isolation. The isolation was carried out according to the instructions prepared by the manufacturer in the kit. "Internal transcribed spacer region (ITS1-5.8S-ITS2 rDNA)" genes were used for PCR amplification. Each sample was prepared for a total of 50 µl of standard reaction. Optimum amplification conditions were obtained with 25 µl of 2 × Taq PCR MasterMix in each tube with 2 µl of the primers ITS1F and ITS4, 2 µl of DNA extracts and 19 µl of distilled water [16-17]. The thermal cycling conditions are as follows: an initial denaturation step of "95°C for 5min", followed by "35 cycles of 95°C for 45sec" (denaturation), "54°C for 45sec" (annealing), and "72°C for 60sec" (extension) followed by a final extension period of "72°C for 10min". Sequence analyzes of lichen samples from which PCR products were obtained were performed by BM Labosis Laboratory (Ankara, Turkey).

2.3. Phylogenetic analyses

ITS sequences of all species were aligned and optimized manually using ClustalW in BioEdit V7.2.6.1 for preparing the phylogenetic trees. In MEGA XI, only parsimony-informative regions were used for analysis. Indeterminate regions were excluded from the alignment. [18-19].

1000 bootstrap replications were performed by bootstrap analysis for the estimation of confidence levels of the clades. Phylogenetic relationships and support values were investigated using maximum likelihood (ML) bootstrapping, as implemented in MEGA XI. Kimura two-parameter model was used for the analysis of the ML method. Genbank numbers of used sequences in phylogenetic trees within this study are given in Appendix Table 1 (Appendix 1).

3. Results

3.1. *Catillaria contristans* (Nyl.) Zahlbr.

Thallus crustose, as clumps of warty granulose squamules, chalky white. Apothecia lecidein, plane or convex, angular, black, weakly whitish pruinose, clustered or dispersed as single ones, (0.2-)-0.3-(-0.6) mm (n=10). Epithemium bluish-black, 50 µm. Hymenium hyaline sometimes with a blackish tinge, 80-90 µm. Hypothecium hyaline and 45-50 µm. Asci 8-spored. Ascospores hyaline, one-septate, ellipsoid or narrowly ellipsoid, sometimes slightly curved, (9-)-9,6-10,6-11,5(-12) × (3,5-)-4,5-(-5) µm (n=20) and ascospores l/w ratio: (2-)-2,4-(-3) µm (n=20). Paraphyses are not branched, adnate, tips capitate with blackish pigment and 3-7 µm diam. Pycnidium was not observed (Figure 1). Thallus and medulla K-, C-, KC-, Pd-, KI-

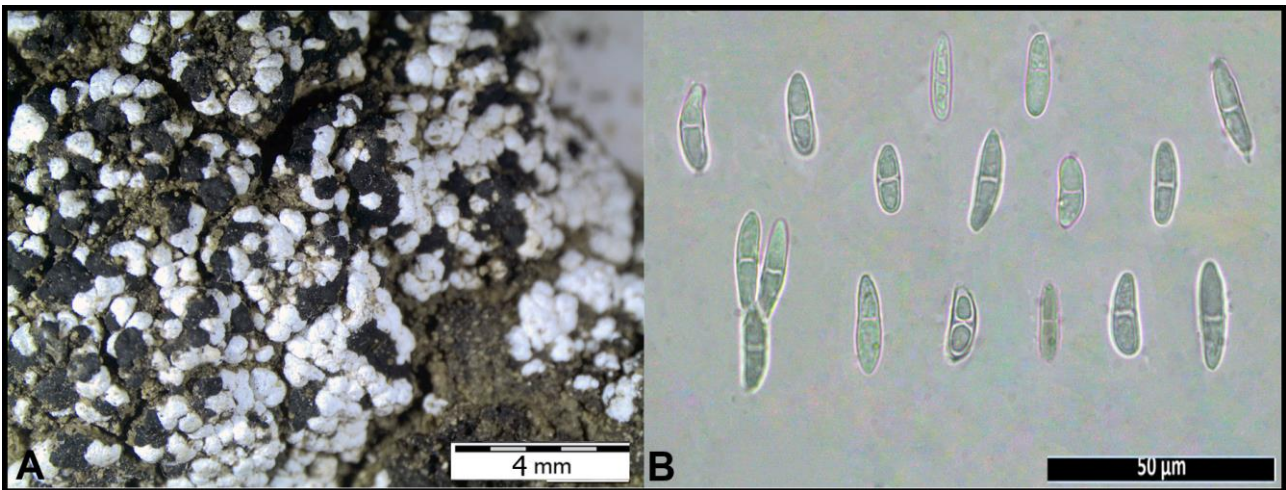


Figure 1. *Catillaria contristans*, A. Habitus, B. Ascospores.

For the phylogenetic analysis of the species *C. contristans*, a total of 16 *ITS* rDNA sequences were analyzed. In the BLASTn search, the final alignment of the *ITS* sequence of *Catillaria contristans* contained 550 bp after trimming. Altogether, 273 nucleotides were found to be conserved sites (C), and 270 nucleotides were found to be variable sites (V) in the *ITS* gene region. *Bryobilimbia diapensiae* (Th. Fr.) Fryday, Printzen & S. Ekman is used as an outgroup which is a member of the genus *Bryobilimbia* Fryday, Printzen & S. Ekman, phylogenetically related to the genus *Catillaria* A. Massal [20] (Figure 2).

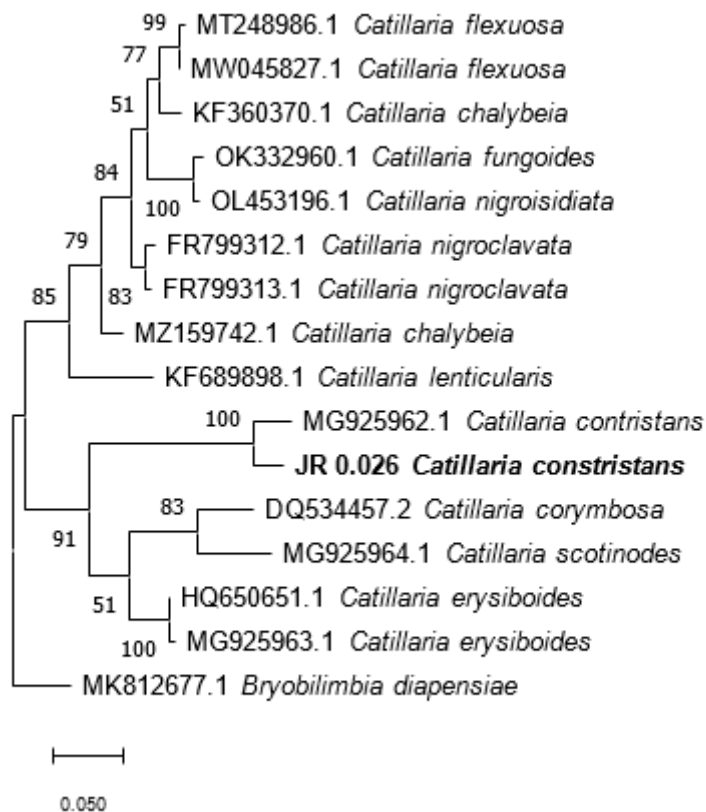


Figure 2. ML phylogeny based on *ITS* gene region of *Catillaria contristans*.

C. contristans grows on gravelly soil and terricolous crustose lichens in stony fellfield [21]. It can grow over bryophytes (*Andreaea* spp.) on sheltered, vertical rock face with no calcareous influence [22], and also it has been

reported from plant debris on rock or bryophytes in acid habitats, in higher mountains or on the ground [23]. In James Ross Island, it grows on soil near streams at low altitudes.

It is a bipolar species [21]. It has been reported from Tasmania [21], Australia (24), New Zealand, North America (22), Poland (23), Germany (25), Scotland (26), Panarctic (27), England (28), Ireland (29), Iceland (30), USA (31), France (32), North Norway (33), British Isles (26), Greenland (34) and Antarctica.

In Antarctica; it has been reported from Antarctic Peninsula, South Shetland and Orkney Islands [21, 35], King George Island [36, 37], Singy Island (38). *C. contristans* is a new record for James Ross Island.

Specimen examined: "Antarctica, Antarctic Peninsula, James Ross Island, Solorina Valley 63° 52' 39.0" S, 57° 46' 51.6" W, alt. 2 m., on soil, 26 January 2017, Leg. M. G. Halıcı (JR 0.026)".

3.2. *Gyalidea antarctica* Øvstedal & Vězda

Thallus granulate, mostly not conspicuous. Apothecia dispersed in various parts of the substrate, immersed to the thallus, 0.2–0.25 mm diam. Mature apothecia porous, honey-brown. Epihymenium light yellowish brown, 25–30 µm. Hymenium honey brown, 75–110 µm, Hypothecium hyaline, 30–40 µm. Asci 8-spored, 80–91 × 28–36 µm. Ascospores wide ellipsoid, simple, hyaline, with many oil droplets, (16–)16.5–21.5–27.5(–28) × (11–)11.5–13.5–15.5(–16) µm (n=10). Ascospores l/w ratio: (1.14–)1.25–1.6–1.95(–2) µm. Paraphyses are branched, slender, 1–1.5 µm. Pycnidium was not observed (Figure 3). All spot tests are negative.

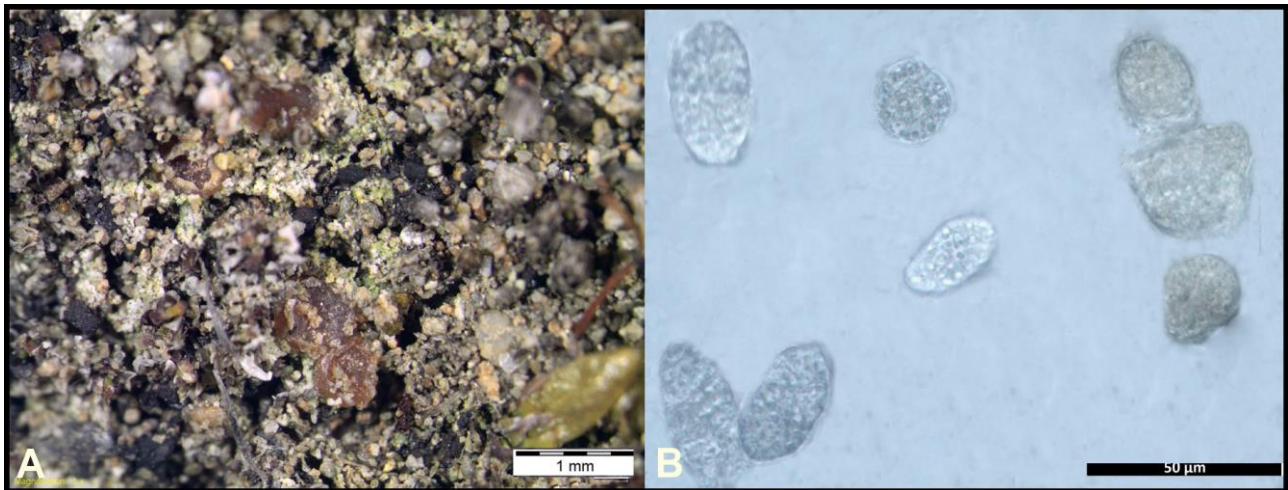


Figure 3. *Gyalidea antarctica*, A. Habitus, B. Ascospores.

For the phylogenetic analysis of the species *G. antarctica*, a total of 4 *ITS* rDNA sequences were analyzed. In the BLASTn search, the final alignment of the *ITS* sequence of *G. antarctica* contained 512 bp after trimming. Altogether, 200 nucleotides were found to be conserved sites (C), and 304 nucleotides were found to be variable sites (V) in *ITS* gene region. *G. antarctica* is classified in the family Gomphillaceae. There are 23 genera and about 450 species in this family but in GenBANK there is only two other *ITS* data from family members (*Gyalidea fritzei* (Stein) Vězda and *Gyalidea* aff. *lecidopsis* var. *eucarpa* (Servít) Vězda). Therefore, *Diploschistes scruposus* (Schreb.) Norman, belonging to the family Thelotremataceae which is phylogenetically closely related to the family Gomphillaceae [39] was used as an outgroup (Figure 4).

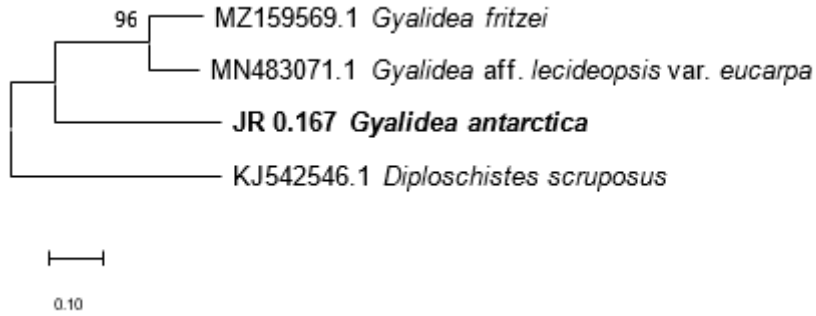


Figure 4. ML phylogeny based on *ITS* gene region of *Gyalidea antarctica*

It is an Antarctic endemic species and it has only been reported from James Ross Island so far and it grows at an altitude of 10-35 m on moist *Bryum pseudotriquetrum* located on the banks of the stream [21].

Specimen examined: "Antarctica, Antarctic Peninsula, James Ross Island, Long Term Research Spot 7-8, 63° 48' 03" S, 57° 52' 50" W, alt. 3 m., on moss, 24 January 2017, Leg. M. G. Halıcı (JR 0.167)".

3.3. *Physconia muscigena* (Ach.) Poelt

Thallus foliose, up to 4 cm diam, upper surface grey and margins has purple tinge. Whitish pruinose patches are present. Lobes regular or irregular, 1–2 mm broad and 2–4 mm long. Margins of the lobes sometimes upturned. Vegetative propagules not present. Lower surface whitish brown or white and black rhizines present. Apothecia and pycnidia not observed (Figure 5). All spot tests are negative.

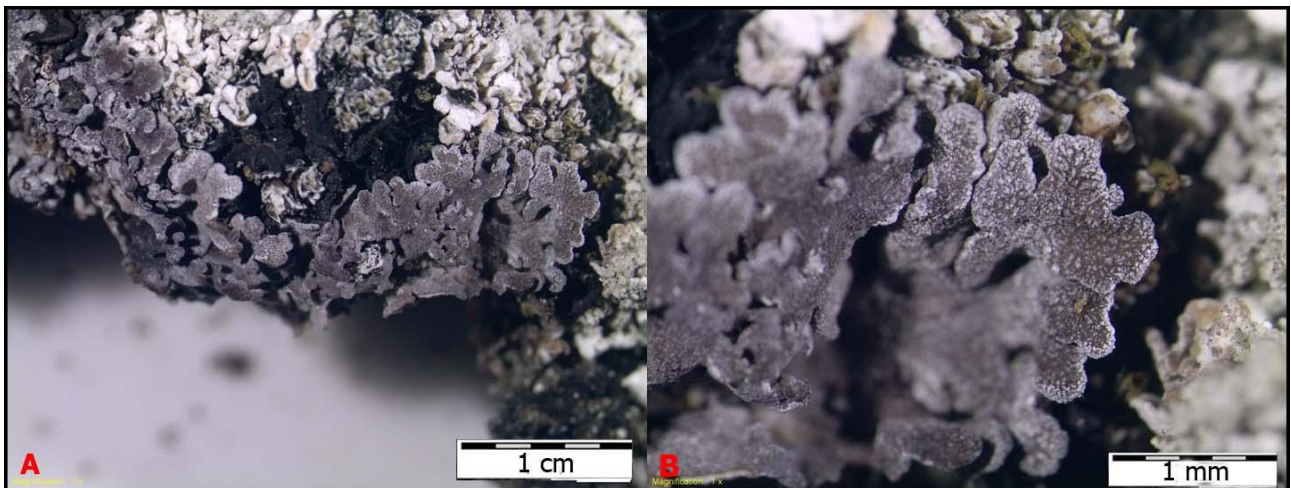


Figure 5. *Physconia muscigena*, A. Thallus, B. Lobes.

For the phylogenetic analysis of the species *P. muscigena*, a total of 44 *ITS* rDNA sequences were analyzed. In the BLASTn search, the final alignment of the *ITS* sequence of *P. muscigena* contained 544 bp after trimming. Altogether, 343 nucleotides were found to be conserved sites (C), and 149 nucleotides were found to be variable sites (V) in *ITS* gene region. *Anaptychia ciliaris* (L.) Körb. ex A. Massal, a species belonging to the same family with *P. muscigena* [40] was used as an outgroup (Figure 6).

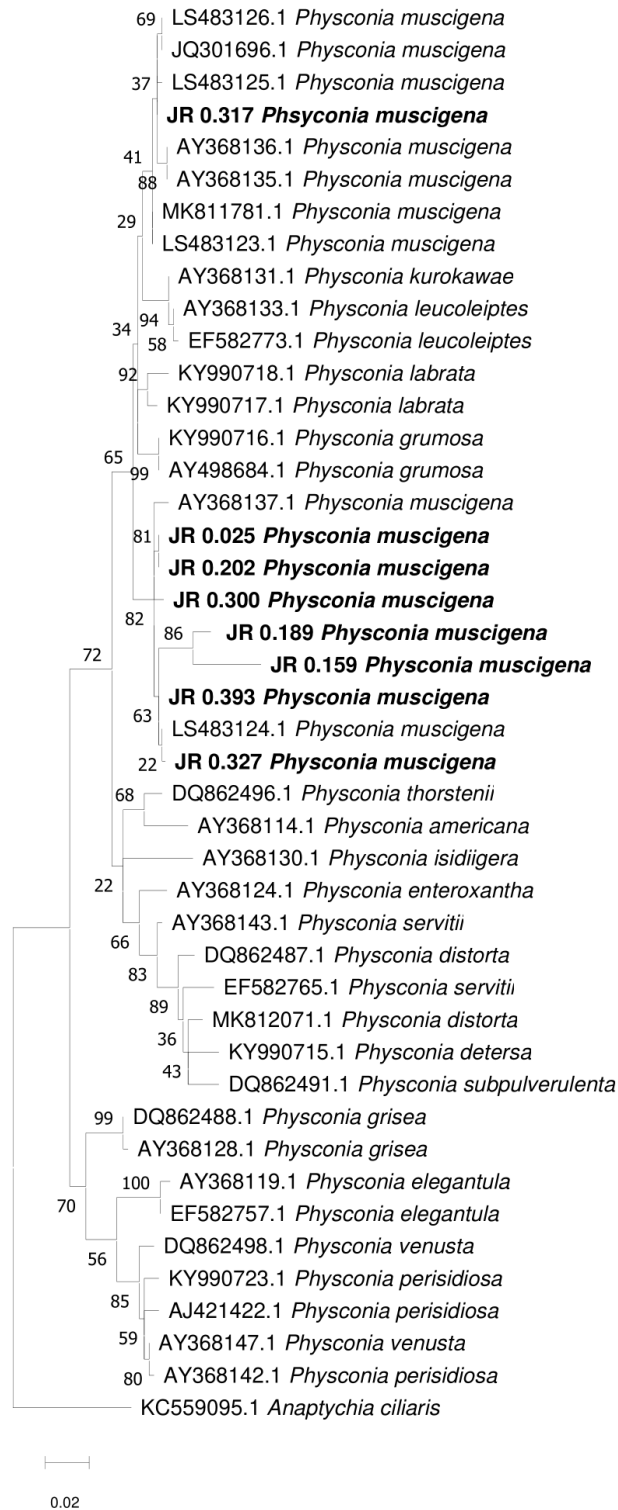


Figure 6. ML phylogeny based on *ITS* gene region of *Physconia muscigena*

P. muscigena is a bipolar cosmopolite species and has a wide distribution in the world. In Antarctica it has been known from, South Shetland Islands (King George Island), South Orkney Islands [21], James Ross Island (41), Cape Lion (42), King George Island (43), Dronning Maud Land (44), Alexander Island, Cockburn Island (45), South Shetland Island (46), Half Moon Island (47) on soil or mosses.

Specimens examined: "Antarctica, Antarctic Peninsula, James Ross Island: Berry Hill Point, 63° 48' 42.0" S, 57° 50' 5,4" W, alt. 300 m., on soil (JR 0.025); Neck of Lachman, 63° 47' 22.5" S, 57° 48' 12" W, alt. 36 m., on moss (JR

0.089); Lachman Bay, 63° 47' 22.5" S, 57° 48' 12" W, alt. 36 m., on soil (JR 0.159, JR 0.202); SE Tip of Johnson Mesa, 63° 49' 46.2" S, 57° 54' 21.6" W, alt. 292 m., on soil (JR 0.300); Panoramic Pass, 63° 48' 56" S, 57° 50' 36" W, alt. 220 m., on soil (JR 0.317); Berry Hill Mesa, 63° 48' 42.0", 57° 50' 5.4" W, alt. 345 m., on moss (JR 0.327); Puchau, 63° 48' 24.9" S, 57° 50' 27.6" W, alt. 142 m., on soil (JR 0.397); Leg. M. G. Halıcı."

3.4. *Rhizocarpon geminatum* Körb.

Thallus crustose, well developed, areolate verrucose, blackish dark brown. Areoles convex and swollen, circular, dispersed through thallus. Apothecia black, immersed between areoles, (0.1-)0.15-0.2-0.35(-0.5) mm (n=90). Epithemium dark brown to black, (10-)21-35-49(-70) μ m (n=25). Hymenium hyaline, (40-)78-107-136(-170) μ m (n=25). Hypothecium dark brown, (10-)32.5-67.5-102.5(-130) μ m (n=25). Asci 2-spored, (42-)56.5-76.5-96.5(-113) \times (10-)17-27-37(-54) μ m (n=25). Ascospores greenish to dark brown, ellipsoid, muriform, (23-)37-48-59(-90) \times (11-)18-24-30(-40) μ m (n=85). Ascospores l/w ratio: (1.17-)1.49-2.1-2.71(-4.82) μ m (n=85). Paraphyses are simple, branched or not branched, tips are slightly enlarged, (2-)2.5-3-3.5(-4) μ m (n=30). Pycnidium not observed (Figure 7). All spot tests are negative.

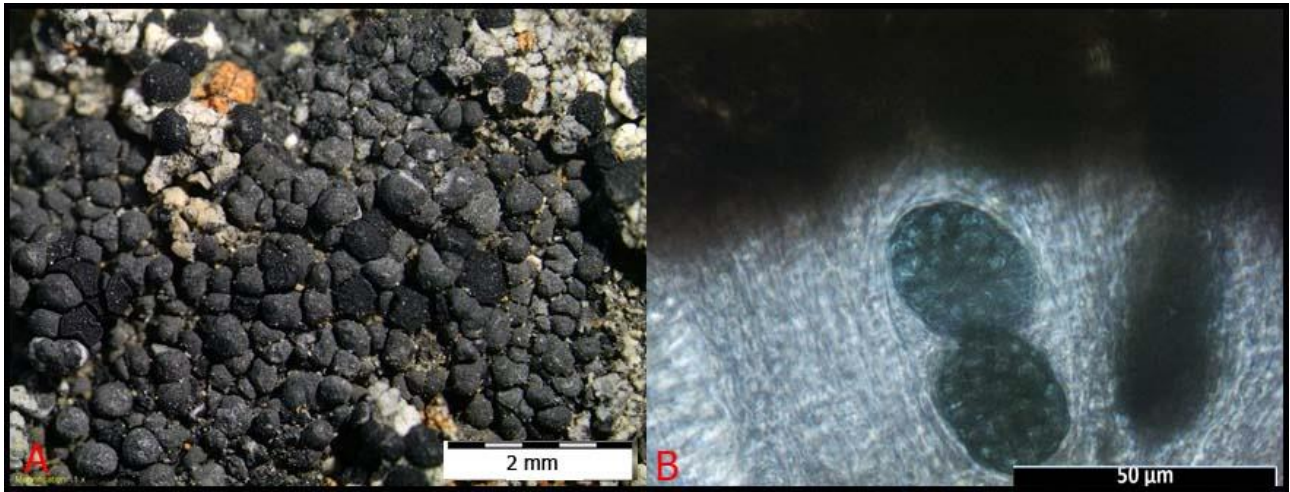


Figure 7. *Rhizocarpon geminatum*, A. Thallus and apothecia, B. Ascus and ascospores

For the phylogenetic analysis of the species *R. geminatum*, a total of 26 *ITS* rDNA sequences were analyzed. In the BLASTn search, the final alignment of the *ITS* sequence of *R. geminatum* contained 652 bp after trimming. Altogether, 301 nucleotides were found to be conserved sites (C), and 257 nucleotides were found to be variable sites (V) in *ITS* gene region. *Catolechia wahlenbergii* (Ach.) Flot., a species belonging to the same family with *R. geminatum* [48] was used as an outgroup (Figure 8).

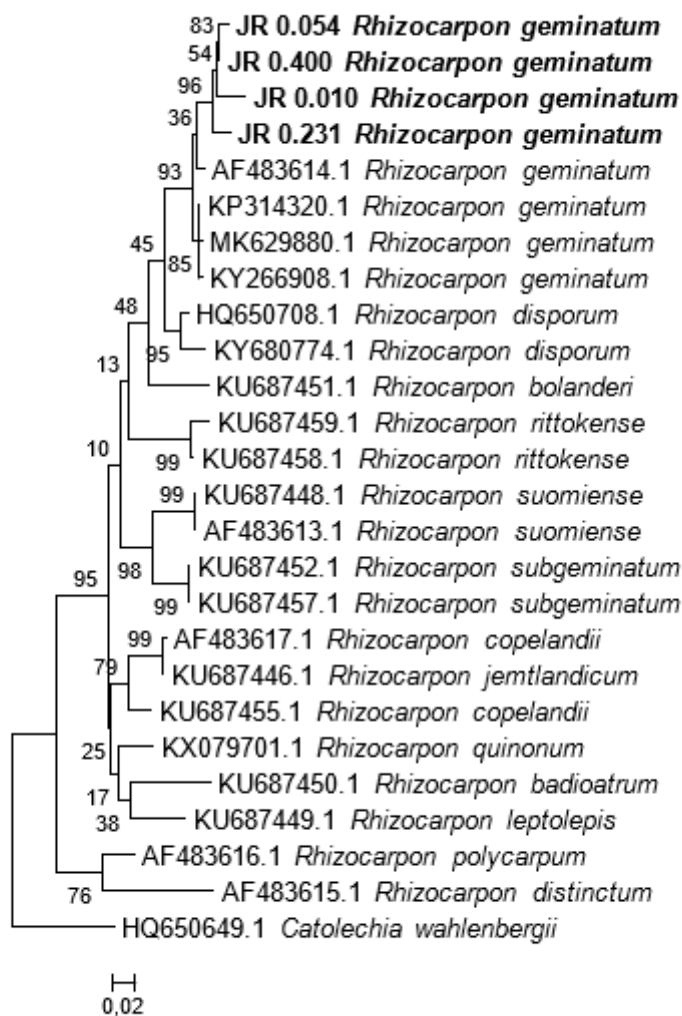


Figure 8. ML phylogeny based on *ITS* gene region of *Rhizocarpon geminatum*

R. geminatum is a bipolar cosmopolite species. It has been reported from Europe, North America, Antarctica [21], Australia (49), Turkey (50), Northern Hemisphere (51). In Antarctica; it has been reported from James Ross Island, South Shetland Islands, Argentina Island [21], King George Island (52), Livingstone Island (53) Botany-Bay (54), Redcastle Ridge, Cape King, Gondwana, Finger Point (55), Victoria Land (56), Terra Nova Bay (57), Schirmacher Oasis- Larsemann Hill (58) , Cape Lion (42), Ross Sea Region (59).

Specimens examined: “Antarctica, Antarctic Peninsula, James Ross Island: British Navy Point, on rock (JR 0.010); Peters Collection, on rock (JR 0.054); Solorina Valley 63° 52' 39.0" S, 57° 46' 51.6" W, alt. 2 m., on rock (JR 0.231, JR 0.400); Leg. M. G. Halıcı.”

3.5. *Steinera intricata* (Øvstedal) Ertz

Thallus brown, foliose, 3 cm wide, straight and circular, lobate. Lobes terete, branched, 1–2 cm diam and 0.5–1 cm length. Cortex of lobes up to 7 µm thick, composed of densely conglutinated isodiametric cells. Medulla dense and full of photobiont. Photobiont cyanobacteria. Isidia present. Apothecia not observed (Figure 11). All spot tests are negative.

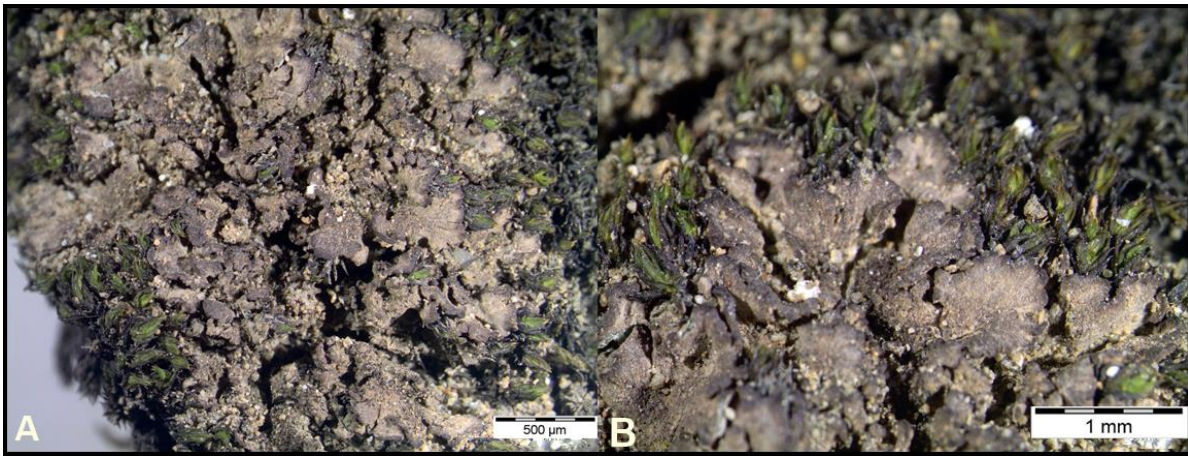


Figure 9. *Steineria intricata*, A. Thallus, B. Lobes.

For the phylogenetic analysis of the species *S. intricata*, a total of 19 *ITS* rDNA sequences were analyzed. In the BLASTn search, the final alignment of the *ITS* sequence of *S. intricata* contained 494 bp after trimming. Altogether, 338 nucleotides were found to be conserved sites (C), and 147 nucleotides were found to be variable sites (V) in *ITS* gene region. *Gregorella humida* (Kullh.) Lumbsch, a species belonging to the same family with *S. intricata* [60] was used as an outgroup (Figure 10).

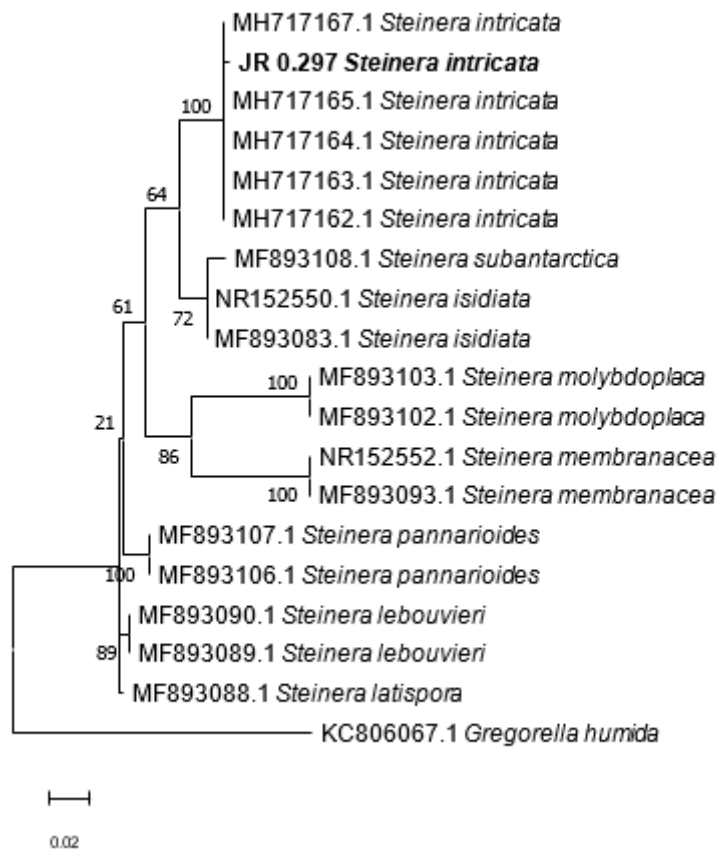


Figure 10. ML phylogeny based on *ITS* gene region of *Steineria intricata*

S. intricata occurs on mosses and rocks [21]. It has been reported from South Shetland Islands, James Ross Island, Charcot Island, Southern South America (Terra del Fuego)[61]. In James Ross Island, it was collected on mosses in high altitudes.

Specimen examined: "Antarctica, Antarctic Peninsula, James Ross Island, SE Tip of Johnson Mesa, 63° 49' 46.2" S, 57° 54' 21.6" W, alt. 292 m., on moss (JR 0.297), Leg. M. G. Halıcı".

3.6. *Xanthocarpia tominii* (Savicz) Frödén, Arup & Söchting

Thallus crustose, squamulose, yellow-orange. Soredia present. Especially the margins of the thallus are covered with dense soralia. Soralia are lighter yellow than thallus, almost lemon yellow. Apothecia was not observed (Figure 11). Thallus and soralia K+ purple.

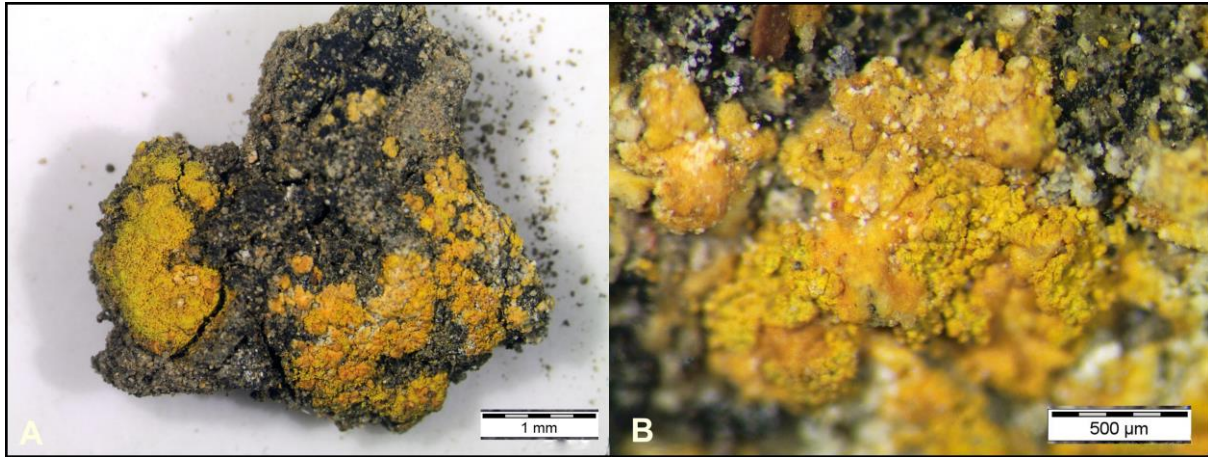


Figure 11. *Xanthocarpia tominii*, A. Thallus, B. Soralia.

For the phylogenetic analysis of the species *X. tominii*, a total of 26 *ITS* rDNA sequences were analyzed. In the BLASTn search, the final alignment of the *ITS* sequence of *X. tominii* contained 588 bp after trimming. Altogether, 353 nucleotides were found to be conserved sites (C), and 158 nucleotides were found to be variable sites (V) in *ITS* gene region. *Calogaya saxicola* (Hoffm.) Vondrák, a species belonging to the same family with *X. tominii* [62] was used as an outgroup (Figure 12).

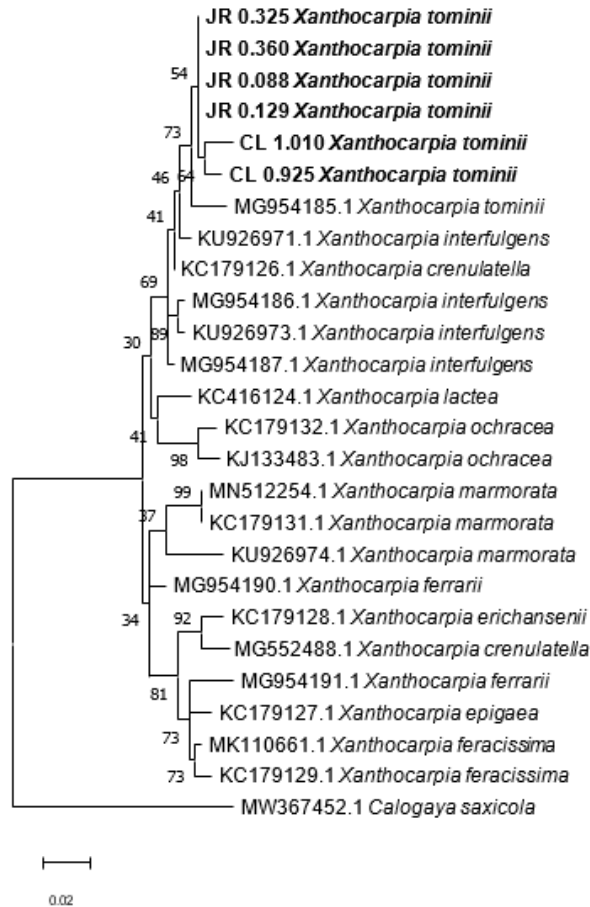


Figure 12. ML phylogeny based on *ITS* gene region of *Xanthocarpia tominii*.

X. tominii is a species that develops widely on calcareous and non-calcareous soils and plant residues (63). It has been known from North America, Greenland, Norway, Austria, Ukraine, Central Asia, Peru and Antarctica [21]. In Antarctica, it has been reported from Victoria Land (63), Utsteinen Nunatak (60) and Enderbyland (64). It is a new record for James Ross Island.

Specimens examined: "Antarctica, Antarctic Peninsula, James Ross Island: Neck of Lachman, 63° 47' 22.5" S, 57° 48' 12" W, alt. 36 m., on soil (JR 0.088); Dirty Valley 63° 48' 38.1" S, 57° 51' 36" W, alt. 92 m., on soil (JR 0.129); Panoramic Pass 63° 48' 56" S, 57° 50' 36" W, alt. 220 m., on soil (JR 0.325, JR 0.360), Leg. M. G. Halıcı."

4. Discussion and Conclusion

In this study, we performed DNA barcoding of some previously known and reported species from James Ross Island. For this purpose, we studied *Catillaria contristans* (Nyl.) Zahlbr., *Gyalidea antarctica* Øvstedal & Vězda, *Physconia muscigena* (Ach.) Poelt, *Rhizocarpon geminatum* Körb., *Steinera intricata* (Øvstedal) Ertz and *Xanthocarpia tominii* (Savicz) Frödén, Arup & Söchting species based on nrITS phylogeny.

According to ITS phylogeny (Figure 2), it is clear that JR 0.026 belongs to *C. contristans*. It matches 100% with the species data from Genbank. Phylogenetically *C. contristans* is closely related to *Catillaria corymbosa* (Hue) I.M. Lamb. *C. corymbosa* has fruticose thallus, while *C. contristans* has crustose thallus. *C. contristans* is anatomically and morphologically similar to *Bilimbia lobulata* (Sommerf.) Hafellner & Coppins. Two species differ from each other by ascus types. *C. contristans* has *Catillaria*-type ascus, while *B. lobulata* has *Biatoria*-type ascus [21].

G. antarctica is classified under the genus *Gyalidea* in the family Gomphillaceae. There are 23 genera in the Gomphillaceae family. These 23 genera contain about 450 species [indexfungorum.org]. However, GenBank does have only two ITS data for family species (*G. fritzei* and *G. aff. lecideopsis* var. *eucarpa*). These two data were used for phylogenetic tree. It is very clear in the phylogenetic tree (in Figure 4) that the species is *G. antarctica*, as well as with its anatomical and morphological features. Its data was uploaded to GenBank within this publication for the first time.

According to ITS phylogeny (Figure 6), all eight JR specimens (JR 0.025, JR 0.089, JR 0.159, JR 0.202, JR 0.300, JR 0.317, JR 0.327, and JR 0.393) clearly match with *P. muscigena*. *P. muscigena* is anatomically and morphologically similar to *Physconia distorta* (With.) J.R. Laundon. It is quite similar in that it does not contain isidia and soredia in two species and *P. muscigena* differs from *P. distorta* with irregular and ascending lobes [21].

According to ITS phylogeny (Figure 8), all four JR specimens (JR 0.010, JR 0.054, JR 0.231 and JR 0.400) clearly match with *R. geminatum*. *R. geminatum* is similar to *Rhizocarpon disporum* (Nägeli ex Hepp) Müll. Arg. both phylogenetically and morphologically. While there is one ascospore in the ascus in *R. disporum*, there are two ascospores in *R. geminatum* [21].

According to ITS phylogeny (Figure 10), it is clear that JR 0.297 belongs to *S. intricata*. It matches 100% with the species data from Genbank. *S. intricata* is anatomically and morphologically similar to *Steinera isidiata* Ertz & R.S. Poulsen. Both specimens are isidiate. But *S. isidiata* has a thallus which is usually well visible lobed margin and it is endemic to Crozet and Kerguelen islands. *S. intricata* has a thallus with ramified lobes and it has distribution around Antarctic Peninsula and surrounding islands [60]. On the other hand, when there is no apothecium development in Antarctic material, it can be thought that isidia development has not started yet when the sample is young and it can be confused with a sorediate species, *Massalongia carnososa* (Dicks.) Körb. [21]. However, the ITS region data clearly shows that the species is *S. intricata*. Molecularly, it is seen that *Steinera subantarctica* (Øvstedal) Ertz and *S. isidiata* are in the same clade in the ITS tree and these species are closely related to *S. intricata*. In *S. subantarctica* species it has 5–7 septate ascospores; *S. intricata* predominantly has three septate ascospores [60]. This comparison could not be made because there was no ascospore development in this sample.

According to ITS phylogeny (Figure 12), all four specimens (JR 0.088, JR 0.129, JR 0.325 and JR 0.360) clearly match with *X. tominii*. Phylogenetically, the closest species to this species is *Xanthocarpia interfulgens* (Nyl.) Frödén, Arup & Söchting. It is distinguished morphologically by the absence of vegetative diaspores. On the other hand, it is extremely difficult to distinguish phenotypically from the other sorediate species *Xanthocarpia erichanseni* (S.Y. Kondr., A. Thell, Kärnefelt & Elix) Frödén, Arup & Söchting in the same genus [62].

As a result of this study, the specimens belonging to *Catillaria contristans*, *Gyalidea antarctica*, *Physconia muscigena*, *Rhizocarpon geminatum*, *Steinera intricata* and *Xanthocarpia tominii* were studied, nrITS DNA barcoding were performed on these specimens and descriptions along with photographs were given for each

species. With this study, the lichen biodiversity studies of James Ross Island have been taken one step further and it is thought that it will shed light on future studies in this area by providing molecular data.

Acknowledgment

The third author thanks Erciyes University for their financial support to conduct the field work on James Ross Island, Antarctica, and ITU Polrec for their support. The first author is thankful for the infrastructure and facilities of J.G. Mendel station. This work was financially supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey-TÜBİTAK (Project Number 118Z587) and TÜBA (Turkish Academy of Sciences).

References

- [1] Kappen, L. 2000. Some aspects of the great success of lichens in Antarctica. *Antarctic Science*, 12(3), 314-324.
- [2] Cao, S., Zhang, J., Zheng, H., Liu, C., Zhou, Q. 2015. Photosynthetic performance in Antarctic lichens with different growth forms reflect the diversity of lichenized algal adaptation to microhabitats. *Polish Polar Research*, (2), 175-188.
- [3] Halıcı, M. G., Barták, M., Güllü, M. 2018. Identification of some lichenised fungi from James Ross Island (Antarctic Peninsula) using nr/ITS markers. *New Zealand journal of botany*, 56(3), 276-290.
- [4] Halıcı, M. G., Güllü, M., Barták, M. 2017. First record of a common endolithic lichenized fungus species *Catenarina desolata* Søchting, Søgaard Elvebakk. from James Ross Island (Antarctic Peninsula). *Czech Polar Reports*, 7(1), 11-17.
- [5] Halıcı, M. G., Osmanoğlu, O. M., Kahraman, M. 2020. A new record of lichenized fungus species for Antarctica: *Peltigera castanea* Goward, Goffinet Mişl. *Czech Polar Reports Journal*, 10(1), 50-58.
- [6] Halıcı, M. G., Kahraman, M., Scur, M. C., & Kitaura, M. J. 2021. *Leptogium pirireisii*, a new species of lichenized Ascomycota (Collemales) from James Ross Island in Antarctica. *New Zealand Journal of Botany*, 1-9.
- [7] Halıcı, M. G., Güllü, M., Yiğit, M. K., & Barták, M. 2022a. Three new records of lichenised fungi for Antarctica. *Polar Record*, 58.
- [8] Halıcı, M. G., Möller, E., Timdal, E., Yiğit, M. K., & Bölükbaşı, E. 2022b. *Rhizocarpon ozsoyae* sp. nova (Rhizocarpaceae, lichenized Ascomycetes) from James Ross Island (Antarctic Peninsula). *Herzogia*, 35(1), 105-114.
- [9] Halıcı, M. G., Fryday, A., Kahraman Yiğit, M. & Avcı, F. N. 2022c. An acid deficient population of *Lambiella psephota* from Antarctica and a new combination in the genus from Campbell Island with a world-wide key to the genus. *Biological Diversity and Conservation*, 15(1), 1-9.
- [10] Halıcı, M. G., Barták, M. 2019. *Sphaerellothecium reticulatum* (Zopf) Etayo, a new lichenicolous fungus for Antarctica. *Czech Polar Reports*, 9(1), 13-19.
- [11] Halıcı, M. G., Kahraman, M. 2021. Antarktika Karasal Vegetasyonunun En Baskın Elemanları: Likenleşmiş Mantarlar ve İklim Değişikliğinin İzlenmesinde Kullanılmaları. In Salihoğlu, B., Öztürk, B. (Eds). İklim Değişikliği ve Türkiye Denizleri Üzerine Etkileri. Ankara: ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü Türk Deniz Araştırmaları Vakfı.
- [12] Kahraman Yiğit, M., & Halıcı, M. G. 2021. *Buellia epigaea* (Pers.) Tuck, a new record of lichenized fungus species for Antarctica. *Czech Polar Reports*, 11(1), 9-15.
- [13] Láska, K., Barták, M., Hájek, J., Prošek, P., & Bohuslavová, O. 2011. Climatic and ecological characteristics of deglaciated area of James Ross Island, Antarctica, with a special respect to vegetation cover. *Czech Polar Reports*, 1(1), 49-62.
- [14] Smith, R. L., & Øvstedal, D. O. 1994. *Solorina spongiosa* in Antarctica: an extremely disjunct bipolar lichen. *The Lichenologist*, 26(2), 209-213.

- [15] Barták, M., Váczi, P., Stachoň, Z., & Kubešová, S. 2015. Vegetation mapping of moss-dominated areas of northern part of James Ross Island (Antarctica) and a suggestion of protective measures. *Czech Polar Reports*, 5(1), 75-87.
- [16] Gardes, M., & Bruns, T. D. 1993. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes-application to the identification of mycorrhizae and rusts. *Molecular ecology*, 2(2), 113-118.
- [17] White, T. J., Bruns, T., Lee, S., Taylor, J. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ (eds) *PCR Protocols: a Guide to Methods and Applications*, pp. 315-322. Academic Press, New York
- [18] Hall, T. A. 1999. BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic acids symposium series*, 41(41), 95-98.
- [19] Tamura, K., Stecher, G., & Kumar, S. 2021. MEGA11: molecular evolutionary genetics analysis version 11. *Molecular biology and evolution*, 38(7), 3022-3027.
- [20] van den Boom, P. P., & Alvarado, P. 2021. *Catillaria flexuosa* (Catillariaceae), a new lichen species described from the Netherlands. *The Lichenologist*, 53(2), 193-202.
- [21] Øvstedal, D. O., Lewis-Smith, R. I. 2001. *Lichens of Antarctica and South Georgia. A Guide to Their Identification and Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, 411p.
- [22] Fryday, A. M. 2006. New and interesting North American lichen records from the alpine and sub-alpine zones of Mt. Katahdin, Maine. *The Bryologist*, 109(4), 570-579.
- [23] Węgrzyn, M. 2008. New records of lichens and lichenicolous fungi from the Polish Tatra Mountains. *Polish Botanical Journal*, 53(2), 163-168.
- [24] Andersen, H. L., & Ekman, S. 2005. Disintegration of the Micareaceae (lichenized Ascomycota): a molecular phylogeny based on mitochondrial rDNA sequences. *Mycological Research*, 109(1), 21-30.
- [25] Wirth, V., Hauck, M., Brackel, W. V., Cezanne, R., de Bruyn, U., Dürhammer, O., Schiefelbein, U. 2011. Checklist of lichens and lichenicolous fungi in Germany. Georg August University of Göttingen, Version, 2, 19.
- [26] Fryday, A. M. 2000. On *Rhizocarpon obscuratum* (Ach.) Massal., with notes on some related species in the British Isles. *The Lichenologist*, 32(3), 207-224.
- [27] Kristinsson, H., Hansen, E. S., Zhurbenko, M. 2006. Pan-Arctic Lichen Checklist. Conservation of Arctic Flora and Fauna Working Group (CAFF), Akureyri, Iceland, 53p.
- [28] James, P. W. 1965. A new check-list of British lichens. *The Lichenologist*, 3(1), 95-153.
- [29] Gilbert, O. L., Fryday, A. M. 1996. Observations on the lichen flora of high ground in the west of Ireland. *The Lichenologist*, 28(2), 113-127.
- [30] Kristinsson, H. 1999. Gróðurbreytingar á klapparsamfélögum við Hvalfjörð frá 1976 til 1997. Gróðurfar; Umhverfisáhrif; Hvalfjörður. <http://utgafa.ni.is/skyrslur/1999/NI-99001.pdf>
- [31] Miller, N. G., Fryday, A. M., Hinds, J. W. 2005. Bryophytes and lichens of a calcium-rich spring seep isolated on the granitic terrain of Mt. Katahdin, Maine, USA. *Rhodora*, 107(932), 339-359.
- [32] Roux, C. 2012. Liste des lichens et champignons lichénicoles de France. *Bulletin de la Société linnéenne de Provence Numéro spécial*, 16, 1-220.
- [33] Elvebakk, A., & Bjerke, J. W. 2006. The Skibotn area in North Norway—an example of very high lichen species richness far to the north: A supplement with an annotated list of species. *Mycotaxon*, 96, 141-146.
- [34] Alstrup, V., Hansen, E. S., Daniels, F. J. 2000. Lichenized, lichenicolous and other fungi from North and North-East Greenland. *Folia Cryptogamica Estonica*, 37, 1-20.

- [35] Rodriguez, J. M., Passo, A., Chiapella, J. O. 2018. Lichen species assemblage gradient in South Shetlands Islands, Antarctica: relationship to deglaciation and microsite conditions. *Polar Biology*, 41(12), 2523-2531.
- [36] Kim, J. H., Ahn, I. Y., Hong, S. G., Andreev, M., Lim, K. M., Oh, M. J., Hur, J. S. 2006. Lichen flora around the Korean Antarctic Scientific Station, King George Island, Antarctic. *The Journal of Microbiology*, 44(5), 480-491.
- [37] Olech, M., Słaby, A. 2012. The lichen biota of Antarctic Specially Protected Area No. 151, Lions Rump (King George Island). In: *Lichen protection-Protected lichen species*. Sonar Literacki, Gorzów Wielkopolski, pp. 67-79.
- [38] Favero-Longo, S. E., Worland, M. R., Convey, P., Smith, R. I. L., Piervittori, R., Guglielmin, M., Cannone, N. 2016. Primary succession of lichen and bryophyte communities following glacial recession on Signy Island, South Orkney Islands, Maritime Antarctic. *Antarctic Science*, 24(4), 323-336.
- [39] Lücking, R., Stuart, B. L., & Lumbsch, H. T. 2004. Phylogenetic relationships of Gomphillaceae and Asterothyriaceae: evidence from a combined Bayesian analysis of nuclear and mitochondrial sequences. *Mycologia*, 96(2), 283-294.
- [40] Esslinger, T. L., McCune, B., & Haughland, D. L. 2017. *Physconia labrata*, a new species from western North America and Asia. *The Bryologist*, 120(4), 427-434.
- [41] Orekhova, A, Marečková, M, Hazdrová, J, Barták, M. 2018. The effect of upper cortex absence on spectral reflectance indices in Antarctic lichens during thallus dehydration. *Czech Polar Reports*, 8, 107-118.
- [42] Olech, M. 1994. Lichenological assessment of the Cape Lions Rump, King George Island, South Shetland Islands; a baseline for monitoring biological changes. *Polish Polar Research*, 15(3-4), 111-130.
- [43] Rivera, M. S, Perez Catán, S, Di Fonzo, C. I, Dopchiz, L, Arribere, M. A, Ansaldo, M, Bubach, D. F. 2018. Lichen as biomonitor of atmospheric elemental composition from Potter Peninsula, 25 de Mayo (King George) Island, Antarctica. *Ann Mar Sci*, 2(1), 009-015.
- [44] Thor, G. 1995. Reassessment of the first lichen and moss collections from Heimefrontfjella, Dronning Maud Land. *Antarctic science*, 7(3), 261-264.
- [45] Smith, R. I. L. 1993. The vegetation of Cockburn Island, Antarctica. *Polar Biology*, 13, 535-542.
- [46] Putzke, J. 2020. Bryophytes and their Associates in South Shetland Islands-Antarctica. *Contemporary Research on Bryophytes*, 1, 8-19.
- [47] Schmitz, D., Putzke, J., de Albuquerque, M. P., Schünemann, A. L., Vieira, F. C. B., Victoria, F. D. C., Pereira, A. B. 2018. Description of plant communities on Half Moon Island, Antarctica. *Polar Research*, 37(1), 1523663
- [48] Davydov, E. A., & Yakovchenko, L. S. 2017. *Rhizocarpon smaragdulum*, a new monosporic yellow-thalline species and some additional species of the genus *Rhizocarpon* from the Altai Mountains (Siberia). *The Lichenologist*, 49(5), 457-466.
- [49] McCarthy, P., Elix, J. 2014. The lichen genus *Rhizocarpon* in mainland Australia. *Telopea*, 16, 195-211.
- [50] Halıcı, M. G. 2017. Similarities of Lichen biodiversity in Erciyes Mountain (Kayseri, Turkey) and James Ross Island (Antarctica). *Международный симпозиум по Евро-Азиатскому биооразнообразию SEAB-2017, Ukraine*. <https://elib.bsu.by/handle/123456789/180475>
- [51] Fryday, A. M. 2003. Additional lichen records from New Zealand 31. *Australasian Lichenology*, 46, 36-40.
- [52] Pereira, A. B., Spielmann, A. A., Martins, M. F. N., Francelino, M. R. 2007. Plant communities from ice-free areas of Keller Peninsula, King George Island, Antarctica. *Oecologia Brasiliensis*, 11(1), 14-22.
- [53] Olech, 1989

- [54] Colesie, C., Gommeaux, M., Green, T. A., Büdel, B. 2014a. Biological soil crusts in continental Antarctica: Garwood Valley southern Victoria Land, and Diamond Hill, Darwin Mountains region. *Antarctic Science*, 26(2), 115-123.
- [55] Green, T. A., Seppelt, R. D., Brabyn, L. R., Beard, C., Türk, R., Lange, O. L. 2015. Flora and vegetation of Cape Hallett and vicinity, northern Victoria Land, Antarctica. *Polar Biology*, 38(11), 1825-1845.
- [56] Cannone, N., Seppelt, R. 2008. A preliminary floristic classification of southern and northern Victoria Land vegetation, continental Antarctica. *Antarctic Science*, 20(6), 553-562.
- [57] Castello, M., Martellos, S., Nimis, P. L. 2006. VICTORIA: an on-line information system on the lichens of Victoria Land (Continental Antarctica). *Polar Biology*, 29(7), 604-608.
- [58] Nayaka, S., Upreti, D. 2019. Diversity and ecophysiology of lichens in Schirmacher Oasis, Antarctica. Twenty Eighth Indian Antarctic Expedition 2008 Ministry of Earth Sciences. Technical Publication No. 26, 305-326.
- [59] Kelman, E. 2015. Wildlife Colonies in the Ross Sea. Supervised Project Report (ANTA604), <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/14110>
- [60] Ertz, D., Poulsen, R. S., Charrier, M., & Sjøchting, U. 2017. Taxonomy and phylogeny of the genus *Steinera* (Arctomiales, Arctomiaceae) in the subantarctic islands of Crozet and Kerguelen. *Phytotaxa*, 324(3), 201-238.
- [61] Kitaura, M. J., Costa, P. C., Scur, M. C., & Lorenz, A. P. 2019. Genetic and morphological variations of the lichenized fungus *Steinera intricata* (Arctomiaceae, Lecanoromycetes) from southern South America to Antarctic Peninsula. *Polar Biology*, 42(5), 907-918.
- [62] Halıcı, M. G., Vondrák, J., Demirel, R., Ceylan, A., & Candan, M. (2014). Teloschistaceae (lichenized Ascomycetes) in Turkey II.—Some poorly known taxa. Supported by molecular data. *Nova Hedwigia*, 98(3-4), 449-458.
- [63] Smykla, J., Krzewicka, B., Wilk, K., Emslie, S. D., & Śliwa, L. 2011. Additions to the lichen flora of Victoria Land, Antarctica. *Polish Polar Research*, 123-138.
- [64] Andreev, M. P. (2013). Lichens of the oasis Molodyozhnyi and adjacent areas (Enderby Land, Antarctic). *Novitates Systematicae Plantarum non Vascularium*, 47, 167-178.

Appendices

Appendix A.

Table 1. Genbank numbers of used sequences in phylogenetic trees within this study.

Genbank Number	Species	Locality
OP324602	JR 0.026 <i>Catillaria constrictans</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324601	JR 0.167 <i>Gyalidea antarctica</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324609	JR 0.025 <i>Physconia muscigena</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324610	JR 0.089 <i>Physconia muscigena</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324611	JR 0.159 <i>Physconia muscigena</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324612	JR 0.202 <i>Physconia muscigena</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324613	JR 0.300 <i>Physconia muscigena</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324614	JR 0.317 <i>Physconia muscigena</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324615	JR 0.327 <i>Physconia muscigena</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324616	JR 0.393 <i>Physconia muscigena</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324605	JR 0.010 <i>Rhizocarpon geminatum</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324606	JR 0.054 <i>Rhizocarpon geminatum</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324607	JR 0.231 <i>Rhizocarpon geminatum</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324608	JR 0.400 <i>Rhizocarpon geminatum</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324671	JR 0.297 <i>Steinera intricata</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324618	JR 0.088 <i>Xanthocarpia tominii</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324619	JR 0.129 <i>Xanthocarpia tominii</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324620	JR 0.325 <i>Xanthocarpia tominii</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324621	JR 0.360 <i>Xanthocarpia tominii</i>	James Ross Island, Antarctica
OP324603	CL 0.925 <i>Xanthocarpia tominii</i>	Turkey
OP324604	CL 1.010 <i>Xanthocarpia tominii</i>	Turkey
KC559095	<i>Anaptychia ciliaris</i>	Spain
MK812677	<i>Bryobilimbia diapensiae</i>	Norway
MW367452	<i>Calogaya saxicola</i>	Canada
KF360370	<i>Catillaria chalybeia</i>	Norway
MZ159742	<i>Catillaria chalybeia</i>	United Kingdom
MG925962	<i>Catillaria constrictans</i>	Norway
DQ534457	<i>Catillaria corymbosa</i>	King George Island, Antarctica
HQ650651	<i>Catillaria erysiboides</i>	Sweden
MG925963	<i>Catillaria erysiboides</i>	Ireland
MT248986	<i>Catillaria flexuosa</i>	Netherlands
MW045827	<i>Catillaria flexuosa</i>	Netherlands
OK332960	<i>Catillaria fungoides</i>	Czech Republic
KF689898	<i>Catillaria lenticularis</i>	Slovakia
FR799312	<i>Catillaria nigroclavata</i>	United Kingdom
FR799313	<i>Catillaria nigroclavata</i>	United Kingdom
OL453196	<i>Catillaria nigroisidiata</i>	Czech Republic
MG925964	<i>Catillaria scotinodes</i>	Norway
HQ650649	<i>Catolechia wahlenbergii</i>	-
KJ542546	<i>Diploschistes scruposus</i>	Spain
KC806067	<i>Gregorella humida</i>	-
MZ159569	<i>Gyalidea fritzei</i>	United Kingdom
MN483071	<i>Gyalidea</i> aff. <i>lecidopsis</i> var. <i>eucarpa</i>	USA
AY368114	<i>Physconia americana</i>	Spain
KY990715	<i>Physconia detersa</i>	USA
DQ862487	<i>Physconia distorta</i>	Portugal
MK812071	<i>Physconia distorta</i>	Norway
AY368119	<i>Physconia elegantula</i>	USA
EF582757	<i>Physconia elegantula</i>	USA
AY368124	<i>Physconia enteroxantha</i>	Spain
AY368128	<i>Physconia grisea</i>	Spain
DQ862488	<i>Physconia grisea</i>	Spain
AY498684	<i>Physconia grumosa</i>	Spain
KY990716	<i>Physconia grumosa</i>	USA

AY368130	<i>Physconia isidiigera</i>	USA
AY368131	<i>Physconia kurokawae</i>	USA
KY990717	<i>Physconia labrata</i>	Canada
KY990718	<i>Physconia labrata</i>	USA
AY368133	<i>Physconia leucoleiptes</i>	USA
EF582773	<i>Physconia leucoleiptes</i>	USA
AY368135	<i>Physconia muscigena</i>	USA
AY368136	<i>Physconia muscigena</i>	Canada
AY368137	<i>Physconia muscigena</i>	USA
JQ301696	<i>Physconia muscigena</i>	Canada
LS483123	<i>Physconia muscigena</i>	Slovakia
LS483124	<i>Physconia muscigena</i>	Slovakia
LS483125	<i>Physconia muscigena</i>	Slovakia
LS483126	<i>Physconia muscigena</i>	Slovakia
MK811781	<i>Physconia muscigena</i>	Norway
AJ421422	<i>Physconia perisidiosa</i>	Germany
AY368142	<i>Physconia perisidiosa</i>	USA
KY990723	<i>Physconia perisidiosa</i>	USA
AY368143	<i>Physconia servitii</i>	Portugal
EF582765	<i>Physconia servitii</i>	Somalia
DQ862491	<i>Physconia subpulverulenta</i>	Spain
DQ862496	<i>Physconia thorstenii</i>	Spain
AY368147	<i>Physconia venusta</i>	Spain
DQ862498	<i>Physconia venusta</i>	Spain
KU687450	<i>Rhizocarpon badioatrum</i>	Norway
KU687451	<i>Rhizocarpon bolanderi</i>	Norway
AF483617	<i>Rhizocarpon copelandii</i>	Norway
KU687455	<i>Rhizocarpon copelandii</i>	Norway
HQ650708	<i>Rhizocarpon disporum</i>	-
KY680774	<i>Rhizocarpon disporum</i>	Russia
AF483615	<i>Rhizocarpon distinctum</i>	Norway
AF483614	<i>Rhizocarpon geminatum</i>	Norway
KP314320	<i>Rhizocarpon geminatum</i>	Svalbard
KY266908	<i>Rhizocarpon geminatum</i>	Norway
MK629880	<i>Rhizocarpon geminatum</i>	China
KU687446	<i>Rhizocarpon jemtlandicum</i>	Norway
KU687449	<i>Rhizocarpon leptolepis</i>	Finland
AF483616	<i>Rhizocarpon polycarpum</i>	Norway
KX079701	<i>Rhizocarpon quinonum</i>	USA
KU687458	<i>Rhizocarpon rittokense</i>	Norway
KU687459	<i>Rhizocarpon rittokense</i>	Norway
KU687452	<i>Rhizocarpon subgeminatum</i>	Norway
KU687457	<i>Rhizocarpon subgeminatum</i>	Norway
AF483613	<i>Rhizocarpon suomiense</i>	Norway
KU687448	<i>Rhizocarpon suomiense</i>	Norway
MH717162	<i>Steinera intricata</i>	King George Island, Antarctica
MH717163	<i>Steinera intricata</i>	Livingston Island, Antarctica
MH717164	<i>Steinera intricata</i>	King George Island, Antarctica
MH717165	<i>Steinera intricata</i>	King George Island, Antarctica
MH717167	<i>Steinera intricata</i>	Livingston Island, Antarctica
MF893083	<i>Steinera isidiata</i>	Crozet Island, Subantarctica
NR152550	<i>Steinera isidiata</i>	Crozet Island, Subantarctica
MF893088	<i>Steinera latispora</i>	Crozet Island, Subantarctica
MF893089	<i>Steinera lebouvieri</i>	Crozet Island, Subantarctica
MF893090	<i>Steinera lebouvieri</i>	Kerguelen Island, Subantarctica
MF893093	<i>Steinera membranacea</i>	Kerguelen Island, Subantarctica
NR152552	<i>Steinera membranacea</i>	-
MF893102	<i>Steinera molybdoplaca</i>	Kerguelen Island, Subantarctica
MF893103	<i>Steinera molybdoplaca</i>	Kerguelen Island, Subantarctica
MF893106	<i>Steinera pannarioides</i>	Crozet Island, Subantarctica
MF893107	<i>Steinera pannarioides</i>	Crozet Island, Subantarctica

MF893108	<i>Steinera subantarctica</i>	Prince Edward Island, Subantarctica
KC179126	<i>Xanthocarpia crenulatella</i>	Austria
MG552488	<i>Xanthocarpia crenulatella</i>	Pakistan
KC179127	<i>Xanthocarpia epigaea</i>	Spain
KC179128	<i>Xanthocarpia erichanseni</i>	Greenland
KC179129	<i>Xanthocarpia feracissima</i>	USA
MK110661	<i>Xanthocarpia feracissima</i>	-
MG954190	<i>Xanthocarpia ferrarii</i>	Russia
MG954191	<i>Xanthocarpia ferrarii</i>	Russia
KU926971	<i>Xanthocarpia interfulgens</i>	Russia
KU926973	<i>Xanthocarpia interfulgens</i>	Russia
MG954186	<i>Xanthocarpia interfulgens</i>	Russia
MG954187	<i>Xanthocarpia interfulgens</i>	Russia
KC416124	<i>Xanthocarpia lactea</i>	Italy
KC179131	<i>Xanthocarpia marmorata</i>	Italy
KU926974	<i>Xanthocarpia marmorata</i>	Russia
MN512254	<i>Xanthocarpia marmorata</i>	Greece
KC179132	<i>Xanthocarpia ochracea</i>	France
KJ133483	<i>Xanthocarpia ochracea</i>	Ukraine
MG954185	<i>Xanthocarpia tominii</i>	Russia

Dağıtık Yapıdaki Kampüslerde Otomatik Araç Geçiş Sistemi İçin Bir Hibrit Veri Merkezi Modeli

Bilal Babayigit¹, Gülsüm Cebeci²

²Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, KAYSERİ
¹ Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, KAYSERİ

(Alınış / Received: 09.08.2022, Kabul / Accepted: 03.10.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

Otomatik Araç Geçiş,
Sistem Uç Hesaplama, Veri
Merkezi, Uç Veri Merkezi

Öz: Otomatik araç geçiş sistemleri (OGS) yalnızca yetkilendirilmiş kişilerin kullanımına açılmış alanların insansız kontrolüne imkan veren hizmetlerdir. Gerçek zamanlı hizmetlerden olan geçiş sistemlerinde en çok karşılaşılan sorunlar ağ tıkanıklıklarından dolayı yaşanan gecikmelerdir. Geçiş sistemleri için yaygın olarak tercih edilen sistem tasarımlarına bakıldığında geleneksel olarak istemci sunucu mimarisi ile merkezleştirilmiş veri merkezi ve internet alt yapısı üzerinde haberleşen cihazlardan oluşan bir yapı olduğu görülmektedir. Günden güne artan veri miktarı ve bundan dolayı oluşan ağ trafik yoğunluğunda verileri işleyip yönetmek ve sistem kurulumları için farklı disiplinlerin ortaya çıkışı kaçınılmaz olmaktadır. Verinin üretildiği yerde işlenmesi prensibine dayanan uç hesaplama (edge computing) tam bu noktada karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada Erciyes Üniversitesi otomatik geçiş sistemi için edge tabanlı hibrit bir veri merkezi modeli sunulmuştur. Geleneksel yöntem ile oluşturulan OGS 'lerde yaşanan gecikme sorunlarını ortadan kaldırmak için önerilen bu model birçok kurum ve üniversite tarafından da kullanılacaktır. İhtiyaç ve fayda analizi yapılarak ortaya çıkartılan örnek sistem tasarımı, uygulama ve sonuçlarıyla birlikte sunulacaktır. Sonuç bölümünde ise uygulanan yeni modelin performans verimliliği açısından geleneksel yapı ile değerlendirme sonuçlarından bahsedilecektir.

A Hybrid Data Center Model for Distributed Automatic Vehicle Access System

Keywords

Automatic Vehicle Access
System,
Edge Computing,
Data Center,
Edge Data Center

Abstract: Automatic vehicle access systems (OGS) are services that allow unmanned control of areas that are only available to authorized persons. The most common problems in relay systems, which are real-time services, are delays due to network congestion. When we look at the system designs that are widely preferred for transition systems, we see that traditionally it is a structure consisting of client server architecture, centralized data center and devices communicating on the internet infrastructure. The emergence of different disciplines for processing and managing data and system installations is inevitable in the increasing amount of data day by day and the resulting network traffic density. Edge computing, which is based on the principle of processing data where it is produced, appears at this point. In this study, an edge-based hybrid data center model for Erciyes University automatic transition system is presented. This model, which is proposed to eliminate the delay problems experienced in OGS created with the traditional method, will also be used by many institutions and universities. The sample system design, which was revealed by performing a need and benefit analysis, will be presented with its implementation and results. In the conclusion part, the traditional structure and evaluation results will be mentioned in terms of performance efficiency of the new model applied.

*İlgili Yazar, email: gulsum@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Otomatik geçiş sistemleri (OGS) belirli kişilerin kullanımına açılmış alanlara araçların giriş çıkış yapmasına izin veren radyo frekansı kullanılarak oluşturulan yapılar olup önceleri sadece otobanlarda kullanılmaya başlanmış sonrasında birçok kamu, kuruluş, üniversiteler ve binalar tarafından kullanılmaktadır. OGS 'ler sınırlandırılmış alanların trafiğinin kontrol etmek, izlemek ve ileriye yönelik ek planlamalar oluşturabilmek adına raporlamalar üretmede de tercih edilen gerçek zamanlı hizmetlerdir.

Modern dünyanın getirisi olarak her nesnenin bir bilgi taşıyabilir olması ve akıllı sistemlerin hayatımızdaki rolünün giderek çoğalması teknolojik yenilikleri de beraberinde getirmiştir. Hızla miktarı artan veriler kurulan sistemlerde ağ üzerinde taşınmakta ve bu yoğun veri trafiğinin kontrol altına alınabilmesi adına farklı metotlar geliştirilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalara baktığımızda OGS 'ler için kurulan veri merkezlerinde klasik mantıkla yani merkezde bir sunucuyla tüm cihaz isteklerinin değerlendirip sonuçları cihazlara yollandığı bir yapının kurulduğu görülmektedir. Bu yapılarda servis kalitesinin çok yüksek olamadığını yaşanan zaman problemlerinden dolayı söyleyebilmekteyiz. Sorunun önüne geçebilmek adına diğer yayınlarımızda uç veri merkezleri kullanılarak oluşturulan yapılar geliştirilerek gecikme sürelerinin mevcuttan daha iyi hale getirilebildiği gösterilmiştir [1]. Uç bilişim, gecikmeyi ve bant genişliği kullanımını azaltmak için bilgi işlemi veri kaynağına mümkün olduğunca yaklaştırmaya odaklanan bir ağ felsefesidir. Daha basit bir ifadeyle, uç bilgi işlem, bulutta daha az işlem çalıştırmak ve bu işlemleri bir kullanıcının bilgisayarı, bir IoT (nesnelerin interneti cihazı) cihazı veya bir uç sunucu gibi yerel yerlere taşımak anlamına gelir. Hesaplamayı ağına getirmek, bir istemci ve sunucu arasında gerçekleşmesi gereken uzun mesafeli iletişim miktarını en aza indirilmektedir.

Tüm verilerin bulut ya da merkezdeki sunuculara yönlendirip buradan cevap dönmesini beklemek ağ üzerinde ciddi anlamda trafik yoğunluğuna sebep olarak hizmetlerde beklemelere neden olmaktadır [2]. Verilerin üretildiği noktada toplanıp değerlendirilmesi çalışma prensibine dayanan edge computing kavramı ağ tıkanıklarından dolayı yaşanacak gecikmelerin önüne geçerek kullanımı her geçen gün artan bir teknolojidir. 1990'lı yılların sonlarında kullanıcılara web ve video içeriği sunmak için kullanılmış olduğu görülmektedir [3]. Donanım maliyetlerinin zaman içinde azalmasıyla birlikte avantajları da göz önüne alındığında popülerliğinin arttığı görülmektedir. Bu teknolojiyi tercih eden gerçek zamanlı veri ile çalışan uygulamalar arasında akıllı şehir uygulamaları, üretim tesis takip otomasyonlarına sahip endüstriyel kuruluşlar ve hastaneler sıralanabilir.

Bu çalışmada otomatik geçiş sistemi için klasik ve edge mimarisinin birlikte kullanıldığı hibrit bir model önerilerek hizmet süresi iyileştirilirken optimum bir maliyet tablosu ile Erciyes Üniversitesi geçiş sistemine yeni bir model sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1 Otomatik Geçiş Sistemleri

Geçiş sisteminde akıllı kartlar ve araç etiketleri okuyuculara okutularak giriş çıkış yapılmaktadır. Bu kartlar bir çeşit elektromanyetik dalga olan radyo frekansıyla iletişimi ifade eden kablosuz bağlantı türü sayesinde iletişim sağlarlar. Sistem genel olarak kontrol üniteleri, rfid (radyo frekansı ile tanımlama) okuyucular, etiketler, antenler, yönetim yazılımı ve bunların barındırıldığı ağ tabanlı bilgi işlem mimarisinden oluşmakta olup şekil 1'de gösterilmiştir. Kontrol üniteleri kendine ait işlemcisi, belleği, motor sürücüleri ve giriş çıkış portları olan otomasyon sistemlerinde kullanılan elektronik devrelerdir [4]. Kontrol üniteleri ağdan gelen ya da üzerlerindeki hafızada olan veriyi işleyebilen akıllı cihazlardır. Okuyucular kartların üzerlerindeki bilgiyi okuyup değerlendirmek üzere yazılıma yollayan donanımsal alettir. Sistem bileşenleri ve çalışma prensiplerine baktığımızda OGS 'lerin çift yönlü veri iletimiyle izleme, takip, kontrol ve raporlamaya imkan sunan hizmetler olduğunu görmekteyiz [5].

Geçiş noktasına gelen bir aracın etiketinden antene gelen sinyaller algılanmakta ve sahibi ile ilgili bilgiyi taşıyan bu nesnenin geçiş hakkı sorgulanmak üzere merkez sunucuya yollanmakta işlem sonuca göre ise geçişi sağlanmaktadır.



OTOMATİK GEÇİŞ SİSTEMİ BİLEŞENLERİ

Şekil 1. Sistem bileşenleri

Dağıtık yapıdaki yani geniş alana yayılmış çok sayıda kontrol noktası bulunan sahalarda aynı anda merkez sunucuya çok fazla sorgu gidip cevabı dönmektedir. Bu çift yönlü veri alış verişi ağ üzerinde fazla yük oluşturduğundan girişlerde kullanıcıların zaman kaybetmesine dolayısıyla sunulan hizmetin kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Akıllı sistemlere olan talebin ve nesnelerin kullanım oranlarının arttığı günümüz uygulamalarında yaşanan bant genişliğinden tasarruf etme ihtiyacı ve gecikme sorunlarının giderilme ihtiyacı verinin üretildiği noktaya yakın yere depolanıp işlenmesine olanak sağlayan uç hesaplama tekniğinin geliştirilmesini sağlamıştır. Otomatik geçiş sisteminde yaşanan gecikmelerin önüne geçmek adına daha önceki yayınlarımızda uç veri merkezi önerisinde bulunmuştuk.

2.2. Edge Bilişim ve Kullanım Alanları

Uç bilgi işlem modelinin, bulutta veya merkezi bir sunucuda değil, verilerin toplandığı ve analiz edildiği konumun yakınında bilgi işlem içerdiği göz önüne alındığında, genellikle verilerin işlendiği bir modeli tanımlamak için "bulut bilişim" ile birbirinin yerine kullanılır [6]. Bununla birlikte, bulut bilişim tipik olarak Cisco Systems, Dell, Intel, Microsoft ve Princeton Üniversitesi gibi üye şirketlerle birlikte OpenFog Konsorsiyumu tarafından tercih edilirken, uç bilişim, özellikle nesnelerin interneti (IoT) ile daha ticari olarak kullanılmaktadır. Veri üreten ve toplayan nesnelerin interneti cihazlarının sayısı günden güne artış göstermek ve bu cihazlar ile ortaya koyulan kontrol ile izleme uygulamaları yaşamımızda geniş ölçüde yer almaktadır. Akıllı ve otomatik sistemlerin hayatımızdaki yeri arttıkça evlerde, ofislerde, işletmelerde ve araçlarımızda büyük sıçramalar olacaktır. Milyonlarca sensör ve cihazlardan gelen verileri ile gerçekleştirilen hizmetlerde ağ karmaşıklığı ve hizmet kalitesi doğru orantılı olmaktadır. Bu kapsamda omurga ağın kenarında oluşturulan uç noktalar genel ağ yoğunluğunu azaltılmasına imkan tanımaktadır. Ağ diyagramındaki uç ifadesi, trafiğin ağa girdiği veya çıktığı noktayı belirtmektedir. Uç noktalarda hem çözümleme hem barındırmanın yapılabilir olması donanım maliyetlerindeki yıllar içindeki düşüş şüphesiz etkili olmuştur [7]. Klasik yaklaşımda tüm veriler merkezi sisteme yüklenmekte ve hesaplama sonuçlarının da tekrar uç cihazlara iletilmesi gereklidir ki iş süreci tamamlanmış olsun. Anlamli anlamsız tüm verilerin büyük veri merkezine yönlendirilmesi karmaşıklığa sebep olacağından ötürü uç hesaplama ile önemli olanları sıralamak, saklamak ardından analiz etmek ve istediğiniz önemli olanları aktarmış olmaktadır. Gerçek zamanlı çalışmalarda yanıt süresi oldukça önemli bir unsur olmasından dolayı klasik mimari ile gerçekleştirilen sistemler nitelikli hizmet sunmamızda yeterli olamamaktadır. Uç hesaplama, veri toplama ve kontrol fonksiyonlarını, yüksek bant genişliğine sahip içerik deposunu ve uygulamaları son kullanıcıya yakınlaştırmaktadır [8]. Daha büyük bir bulut bilişim mimarisinin bir parçası olarak da bir ağın (internet veya özel ağ) mantıksal bir uç noktasına yerleştirilmekte olduğu şeklinde de ifade edebilmekteyiz.

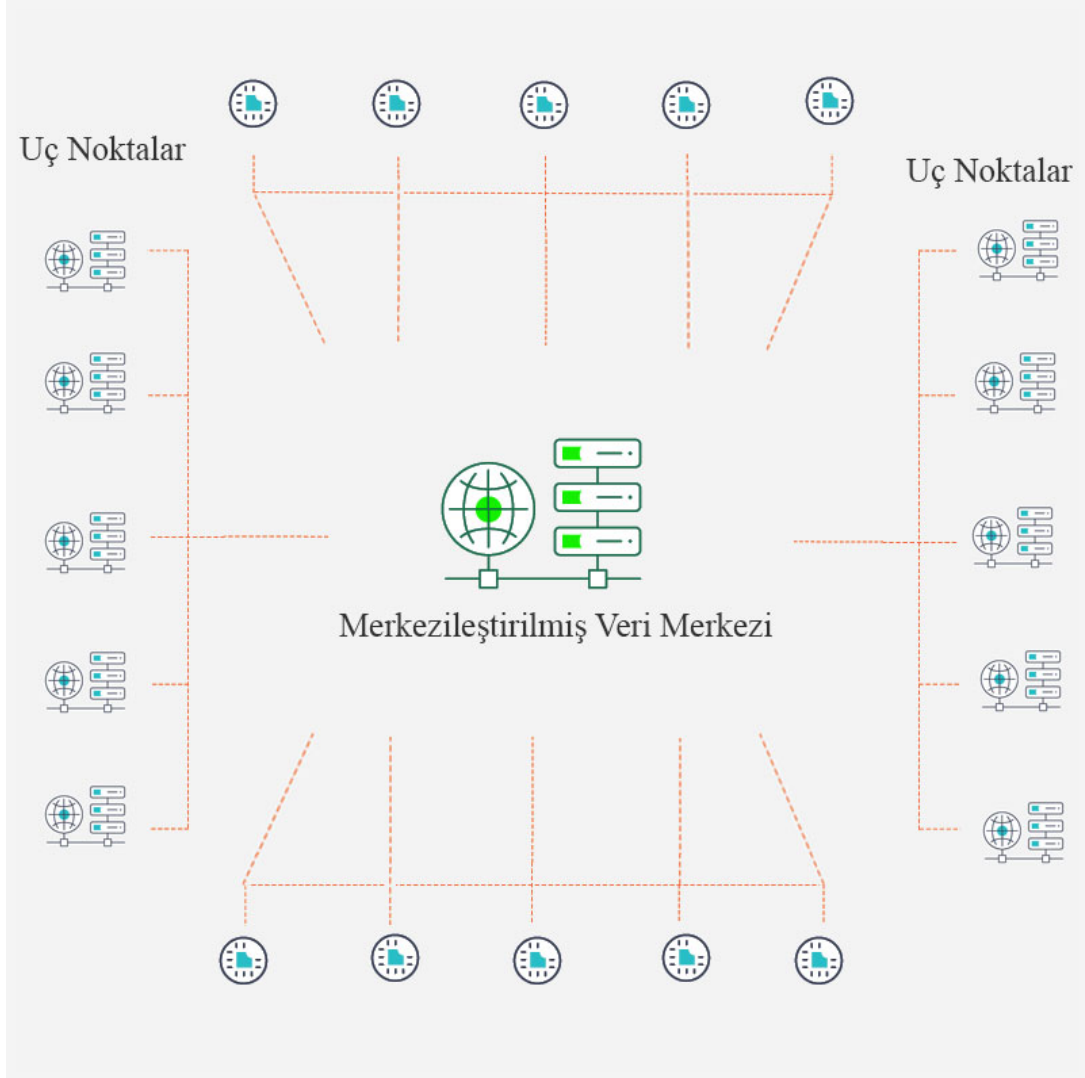
Uç hesaplama kaynak kullanımını uygunlaştırarak ta geleneksel mimarilerin ötesinde performans avantajı sunmaktadır [9]. Uç cihazlarda kullanılan işlemciler daha düşük güç gereksinimiyle daha gelişmiş donanım güvenliği sunar. Uç'lar aynı zamanda veri aktarımı için temel protokolün değişebileceği noktalardır. Uç bilgi işlem, işleme ve depolama yeteneklerini ihtiyaç duyulan yere yakınlaştırmakta olduğu için otonom araç, bankacılık, imalat, perakende, sağlık sektörleri ve sürücü izleme gibi alanlarda yaygın kullanımı görülmektedir [11]. Ayrıca güç

üretimi, akıllı trafik ışıkları, cihazların arızalanmasını önleyen sensörlü sistemler, akıllı ev uygulamaları, trafiği yeniden yönlendirme, üretimi optimize etme gibi birçok alanda uç hesaplamasının kullanıldığı görülmektedir [9].

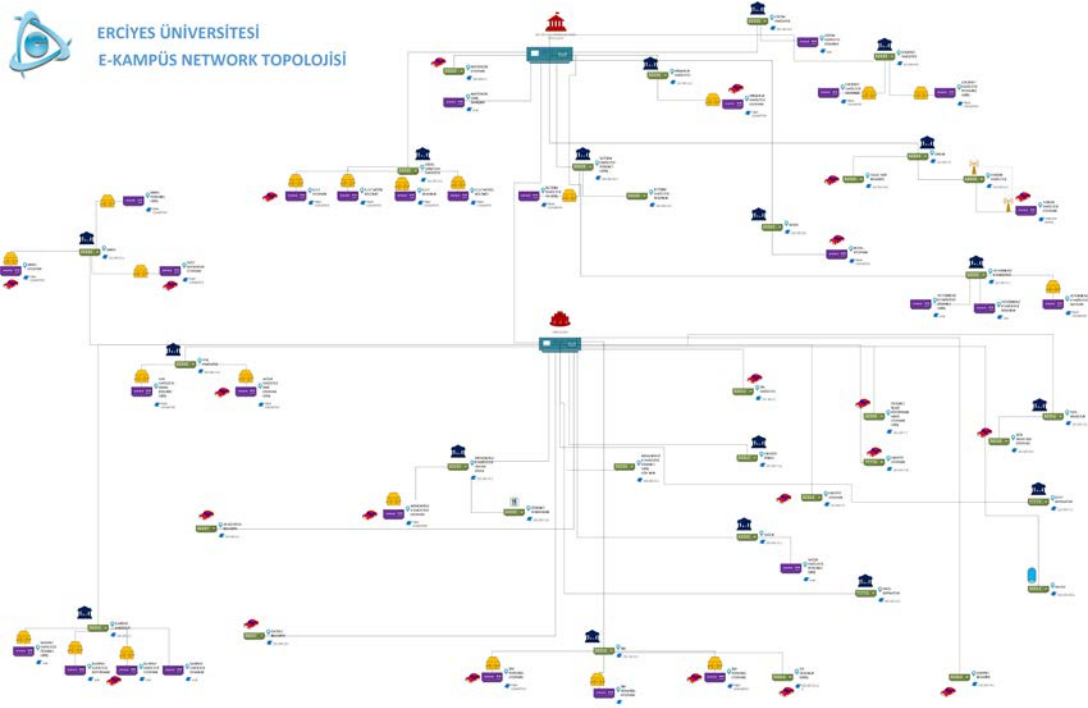
2.3. Hibrit Veri Merkezi Modeli

Modelde geçiş noktalarından kullanım yoğunluğu yüksek olan noktalar merkez sunucuya doğrudan bağlı olarak yönetilirken daha az kullanılan noktalarının uç hesaplama ile kontrol edilmesi sağlanarak hibrit model ortaya koyulmuştur. Şekil 2'de görüldüğü gibi uç hesaplama noktalarında akıllı kontrol kartları kullanılmakta diğer noktalar merkez ile direkt ağ üzerinden bağlantılıdır.

Erciyes üniversitesinde kullanılmakta olan sistemde 18 araç geçiş noktası ve 280 bina giriş kapısı her noktanın merkez sunucuya bağlı olduğu klasik yöntem ile gerçekleştirilmekte olup ağ topolojisi şekil 3'te gösterilmektedir. Trafik yoğunluğunun ve internet kesintilerinin olması durumunda verilen hizmette kesintiye uğramaktadır. Kampüs yoğunluğu göze alındığında giriş çıkışların en yoğun olduğu zaman dilimleri olan sabah ve akşam saatlerinde geçiş noktalarında beklemelerin ve tıkanmaların yaşanmakta olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4'te önerilen veri modeli gösterilmiş olup model'de araç geçiş noktalarının akıllı kontrol kartları ile yönetildiği diğer tüm noktaların merkez sunucuya direkt bağlı olduğu bir yapı ortaya koyulmuştur. Sunucuya yoğun talep gönderen noktalar uç nokta olarak yönetilip omurga ağın bant genişliğinden iktisat sağlanmış ve buna bağlı hizmet kalitesi artırılması sağlanmaktadır.



Şekil 2. Hibrit Veri Merkezi

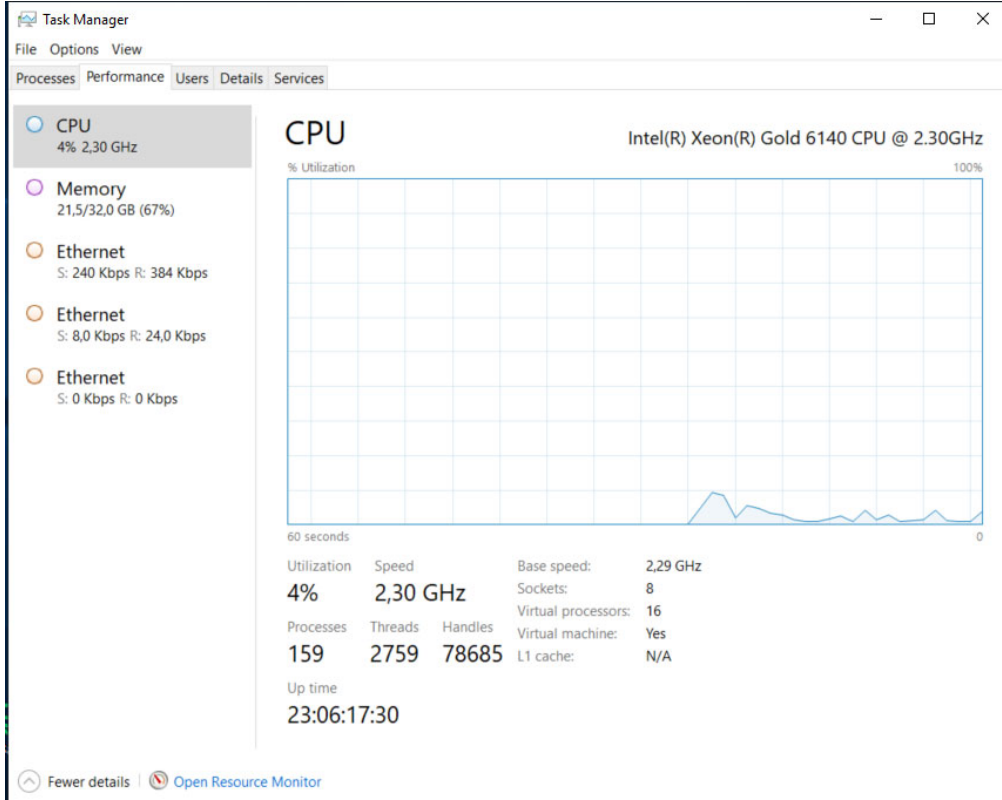


Şekil 3. Ağ topolojisi

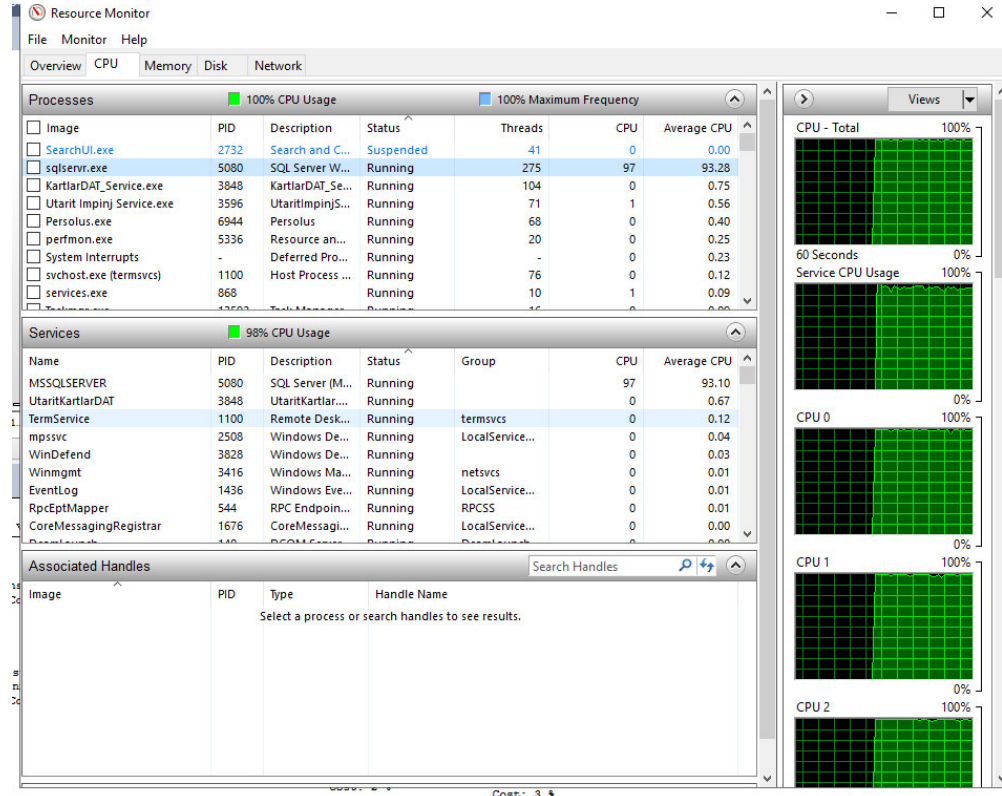
3. Bulgular

Geleneksel yaklaşım ile sistem tasarımı yapılan geçiş kontrol hizmetlerinde yaşanan gecikmelerden yola çıkılarak önerilen model ile bekleme süreleri mevcut durumdan daha aşağı çekilmiştir. Hizmet kalitesine yönelik değerlendirmede çalışan servislerin sunucunun merkezi işlem birimini kullanım oranı ile yapılmış ve şekil 4 'te gösterilmiştir. Tüm geçiş noktalarının ağda aktif olduğu zaman baz alınarak merkez sunucunun merkezi işlem birimindeki iş yükü %4 lük oranda ve 2.30 GHz hızında olduğu görülmüştür. Klasik yaklaşımdaki kullanım durumu ise şekil 5 'te gösterilmekte olup aynı iş yükünde iken sunucunun merkezi işlem biriminin %100 'de çalıştığı gözlemlenmiştir.

Hibrit veri merkezi modeli ile yönettiğimiz sistemde uç hesaplama sayesinde sunucu üzerinde oluşturduğu sorgu yükünün azaltılmasından ötürü hizmet kalitesini iyileştirildiği bir sistem ortaya koyulmuştur.



Şekil 4. Yeni model merkezi işlem birimi kullanım oranı



Şekil 5. Geleneksel model merkezi işlem birimi kullanım oranı

4. Tartışma ve Sonuç

Otomatik geçiş sistemlerinde belirli alanlara giriş çıkış yapan araçları kontrol ve yönetimi için kullanılan sistemler olup verilen hizmette zaman kaybı yaşanmadan trafik akışının sürdürülebilirliği çok önemli bir parametredir.

OGS'lerde yaygın olarak tercih edilen tüm geçiş noktalarının merkez sunucu tarafından işlendiği yapının hizmet kalitesi için yeterli gelmediği bulgulardan da anlaşılmaktadır. Bu çalışmada sunulan uç hesaplama mimarisi ile harmanlanmış hibrit bir modeli önerisinin başarılı sonuçları bulgular ile de belirtilmiş ve sahada da uygulaması yapılmıştır. Gecikme sorunlarının önüne geçmedeki yüksek başarısından dolayı bu yapının birçok kurum ve işletme tarafından da ileride tercih edilebileceği öngörülmektedir. Uç hesaplama yöntemlerindeki yüksek başarımlarından daha fazla yararlanmak için gelecek çalışmalar olarak makine öğrenmesiyle tüm kontrol noktalarının uç hesaplama mimarisinde olan yapı kurulması hedeflenmektedir.

Kaynakça

- [1] Cebeci, G., Babayiğit, B. 2022. Multi Edge Data Center Model For Automatic Transition Systems 9(2022), 3-5.
- [2] Armbrust, M., Fox, A., Gri_th, A., Joseph, A. D., Katz, R., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D., Rabkin, A., Stoica, I. 2010. A view of cloud computing. <https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/1721654.1721672> (Erişim Tarihi: 2010).
- [3] Ertuğrul, S., 2021. Fog Computing, Edge Computing and IoT 14(2021), 8.
- [4] Stratus Technologies. 2021. What is Edge Computing & Why is it Important?. <https://www.stratus.com/edge-computing> (Erişim Tarihi: 30 Ekim 2021).
- [5] Kumar, V., Kumar, R., Khan, A. A., Kumar, V., Chen, Y.-C., & Chang, C.-C. (2022). RAFI: Robust Authentication Framework for IoT-Based RFID Infrastructure. *Sensors*, 22(9), 3110.
- [6] Weinhardt, C., Anandasivam, A., Blau, B., Borissov, N., Meinel, T., Michalk, W. ve Stöser, J. (2009). Cloud computing—a classification, business models, and research directions. *Business & Information Systems Engineering*, 1(5), 391–399.
- [7] Edge Computing. (t.y.). 2021. Edge Bilişim. https://stringfixer.com/tr/Edge_computing (Erişim Tarihi: 2021).
- [8] Güven, E. Y., Çamurcu, A. Y. 2018. Edge Computing Security Application: Kılıç. (2018) 3rd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), 248-253.
- [9] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637-646.
- [10] Ergen, E. 2008. İnşaat Sektöründe Radyo Frekanslı Tanımlama (RFID) Teknolojisi Uygulamaları (2008), 5.
- [11] Fox, B. (2012). Cloud computing a “game-changer” for EU economy, Kroes says. 13 Mart 2018 tarihinde <https://euobserver.com/news/117695> adresinden erişildi.

The Investigation of Performances of Different Proportional-Derivative Control Based Fuzzy Membership Functions in Balancing the Inverted Pendulum (IP) on Cart

Ahmet Gani^{*1}, Hasan Rıza Özçalık²

^{*1}Kayseri University Faculty of Engineering-Architecture and Design Electrical-Electronics Engineering, KAYSERİ

²Kahramanmaraş Sütçü İmam University Faculty of Engineering and Architecture Electrical and Electronics Engineering, Retired Professor, KAHRAMANMARAŞ

(Alınış / Received: 29.08.2022, Kabul / Accepted: 07.10.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Keyword 1, Inverted Pendulum on Cart
Keyword 2, Different Fuzzy Membership Functions
Keyword 3, Proportional-Derivative Control

Abstract: The present study aims to balance an inverted pendulum (IP) system on cart using fuzzy controllers with different membership functions (MFs) based on proportional-derivative control. To this end, a cart was designed to track an intended trajectory in a horizontal (linear) position, while IP was balanced in a vertical (angular) position. This controller system was simulated in Matlab/Simulink, and performance rates were measured for IP's vertical position and cart's horizontal position. Simulation results demonstrated that triangular fuzzy membership function (MF) improved rise time, settling time and overshoot for the IP's vertical position by 8%, 4.35% and 7.7%, respectively, compared to gaussian fuzzy MF. Similarly, for the cart's horizontal position, triangular fuzzy MF improved rise time, settling time and overshoot by 3.8%, 3 and 30%, respectively, compared to gaussian fuzzy MF. When all performance rates are analyzed in terms of IP's vertical position and cart's horizontal position, it was found that triangular fuzzy MF displayed a more satisfactory performance compared to gaussian fuzzy MF.

Arabalı Ters Sarkacın Dengelenmesi için Farklı Oransal-Türevsel Denetim Tabanlı Bulanık Üyelik Fonksiyonlarının Başarımlarının İncelenmesi

Anahtar Kelimeler

Anahtar Kelime 1, Arabalı Ters Sarkaç
Anahtar Kelime 2, Farklı Bulanık üyelik fonksiyonları
Anahtar Kelime 3, Oransal-Türevsel Denetim

Öz: Bu çalışmada, arabalı bir ters sarkaç (TS) sisteminin oransal-türevsel denetim tabanlı farklı üyelik fonksiyonlu (MF) bulanık denetleyiciler kullanılarak dengelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla araba yatay konumda (çizgisel konum) arzu edilen yörüngeyi takip ederken, sarkacın da dikey konumda (açısal konum) dengede kalması sağlanmıştır. Tasarlanan denetim sistemine ait benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında yapılmış olup sarkacın dikey ve arabanın yatay konum denetimi için elde edilen başarımların değerleri ayrı ayrı verilmiştir. Benzetim çalışmasından edilen denetim başarımların değerleri incelendiğinde sarkacın dikey konumu için yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım bakımından üçgen bulanık üyelik fonksiyonunun gauss bulanık üyelik fonksiyonuna göre sırasıyla %8, %4.35 ve %7.7 oranlarında iyileştirme yaptığı görülmüştür. Benzer şekilde arabanın yatay konumu için de yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım bakımından üçgen bulanık üyelik fonksiyonunun (ÜF) gauss bulanık ÜF'ye göre sırasıyla %3.8, %3 ve %30 oranlarında daha iyi denetim başarımına sahip olduğu görülmüştür. Sarkacın dikey konum ve arabanın yatay konum denetimi için tüm denetim başarımların değerleri analiz edildiğinde üçgen bulanık ÜF'nin gauss bulanık ÜF'ye göre daha tatmin edici sonuçlar verdiği açıkça görülmüştür.

*Corresponding Author, email: ahmetgani@kayseri.edu.tr

1. Introduction

Inverted pendulum (IP) on cart is an unstable and non-linear system. It is an important field of study which offers the opportunity to test existing controller systems and develop new controller mechanisms [1]. There are various IP systems in the field of engineering. Among the most popular systems are IP on cart [2-4], double IP [5-6] and rotational single-arm pendulum (Furuta pendulum) [7-8]. Due to the difficulty of control and the need for further improvements on the system, numerous studies have been so far carried out on IP. Many studies on IP in the existing literature focus on the performance of a controller system in balancing IP in a vertical (angular) position [9]. In the current literature, intelligent control systems, linear and non-linear systems and hybrid systems as a combination of different methods have been so far proposed to balance IP [10]. While the most well-known linear control methods can be listed as proportional-integral, proportional-derivative, proportional-integral-derivative [11-12] and linear-quadratic regulator [13-20], non-linear control methods are sliding mode control [21-24] and back-stepping control [25-28]. On the other hand, fuzzy neural networks [29-32], adaptive neuro-fuzzy inference system [33-37], optimization algorithms [38-41] and fuzzy logic (FL) [42-54] are intelligent control systems. It is also possible to benefit from hybrid control systems [55-61] with a combination of different control systems. The literature review above indicates that a high number of control methods have been so far proposed in order to balance an unstable and vertical IP system on cart.

In the present study, a mathematical model was designed for an IP system on cart via Matlab/Simulink. Thanks to a single input-multiple output (SIMO) control approach, different proportional-derivative based fuzzy membership functions (MFs) were used to help the cart track an intended horizontal trajectory and balance the pendulum in a vertical position. Unlike some control methods such as proportional-derivative-integral [57, 59-60], linear quadratic [62], self-tuning fuzzy [61-62] and fuzzy sugeno [53, 57], which were used by the authors in their previous studies on the IP system on cart, the control performances of different proportional-derivative based fuzzy MFs (triangular and gaussian) were analyzed. The main contribution of the present study is that it is the first in the existing literature to have analyzed the control performances of different proportional-derivative based fuzzy MFs in balancing an IP system on cart, which contributes to the originality of the present study.

The rest of the present study is organized as follows: The mathematical model of IP system on cart, basic structure of the FL control system and proportional-derivative FL system are described in Section 2. The comparative results of the detailed simulation studies are presented in Section 3. The obtained numerical data from simulation studies are discussed in Section 4.

2. Material and Method

The present section describes the mathematical modelling of IP system on cart and design of and proportional-derivative FL system.

2.1 The Mathematical Modelling of IP System on Cart

IP on cart system requires a mathematical modelling in order for the cart to track an intended horizontal trajectory and to keep its pendulum in a vertical position. This mathematical model is created using laws of physics. As shown in Figure 1, IP on cart involves the movements of a condensed pendulum pole with a length of L and mass of m along a cart with a mass of M . The angle between the pole and vertical position intersecting its area of movement is represented by θ , while its distance to a certain reference point in a horizontal position is denoted by x , respectively. While the movement of a pole is limited to x - y axis, the cart is allowed to only move along x axis. At this point, non-linear model of IP is calculated using Newton's laws of motion [63-65].

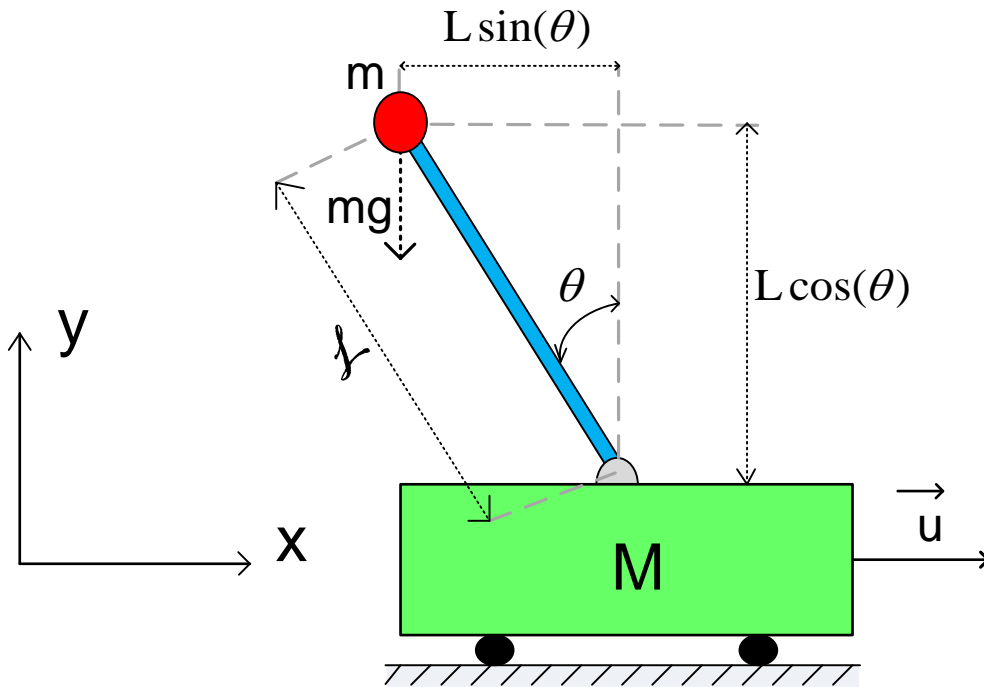


Figure 1. IP on cart

The center of gravity for a mass of m is defined in (x,y) coordinates in Equation (1) and (2).

$$x_g = x + L \sin \theta \tag{1}$$

$$y_g = L \cos \theta \tag{2}$$

If Newton's second law is applied to the movement towards x , it gives a differential equation in Equation (3).

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + m \frac{d^2 x_g}{dt^2} = u \tag{3}$$

When the expression in Equation (1) is put back in its position in Equation (3), it gives Equation (4).

$$(M + m) \ddot{x} - mL(\sin \theta) \dot{\theta}^2 + mL(\cos \theta) \ddot{\theta} = u \tag{4}$$

Secondly, if Newton's second law is applied to the movement of m around the pole, it gives a differential equation in Equation (5).

$$m \frac{d^2 x_g}{dt^2} L \cos \theta - m \frac{d^2 y_g}{dt^2} L \sin \theta = mgL \sin \theta \tag{5}$$

When the expressions in Equation (1) and (2) are put back in their respective positions in Equation (5), it gives Equation (6).

$$m \left[\ddot{x} - L(\sin \theta) \dot{\theta}^2 + L(\cos \theta) \ddot{\theta} \right] L \cos \theta - m \left[-L(\cos \theta) \dot{\theta}^2 - L(\sin \theta) \ddot{\theta} \right] L \sin \theta = mgL \sin \theta \tag{6}$$

Element values for IP system on cart are given in Table 1.

Table 1. Element values for IP on cart system

Parameters	Symbol	Value	Unit
Mass of the cart	M	2.4	kg
Mass of the IP	m	0.23	kg
The length of the pole	L	0.36	m
Gravitational acceleration	g	9.8	m/sec ²
Track length	l	0.5	m

2.2. FL Control System

FL toolbox module was used to control the IP’s vertical position and the cart’s horizontal position via a FL controller. Matlab FL toolbox window is shown in Figure 2.

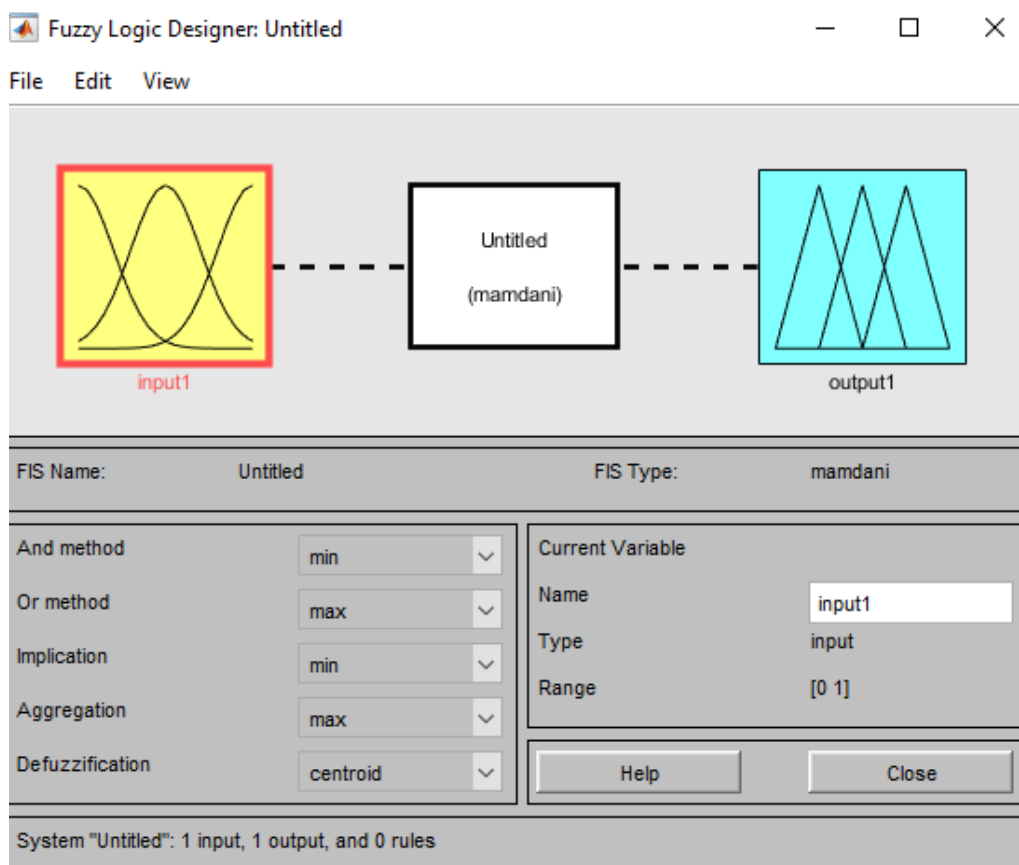


Figure 2. Matlab FL toolbox menu

After the number of optimal input and output variables is selected for the control system on this window, it is possible to select any MFs and types by entering input and output values. In addition, and/or methods, decision, fuzzification, defuzzification, mamdani and sugeno fuzzy inference methods can also be selected from this menu. The membership function (MF) and fuzzy inference windows in Matlab FL toolbox are shown in Figure 3 and 4, respectively.

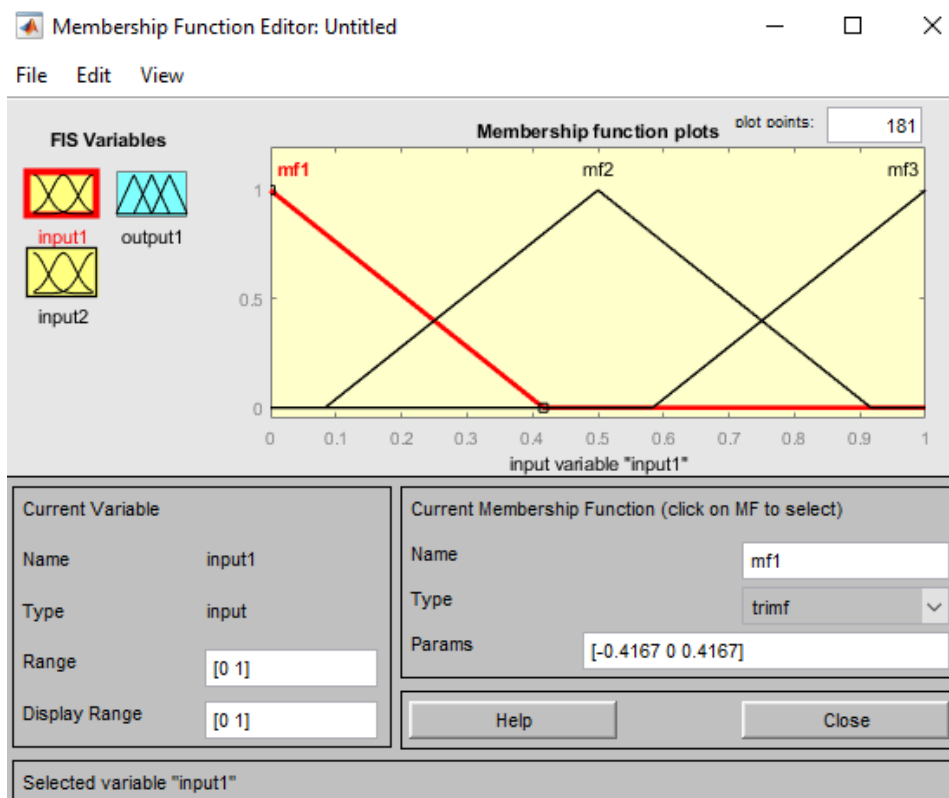


Figure 3. Matlab FL toolbox MF window

Types and ranges of MFs can be selected on Matlab FL toolbox MF window to determine optimal MFs for the designed control system. “Edit” button can be used to add or delete any MFs.

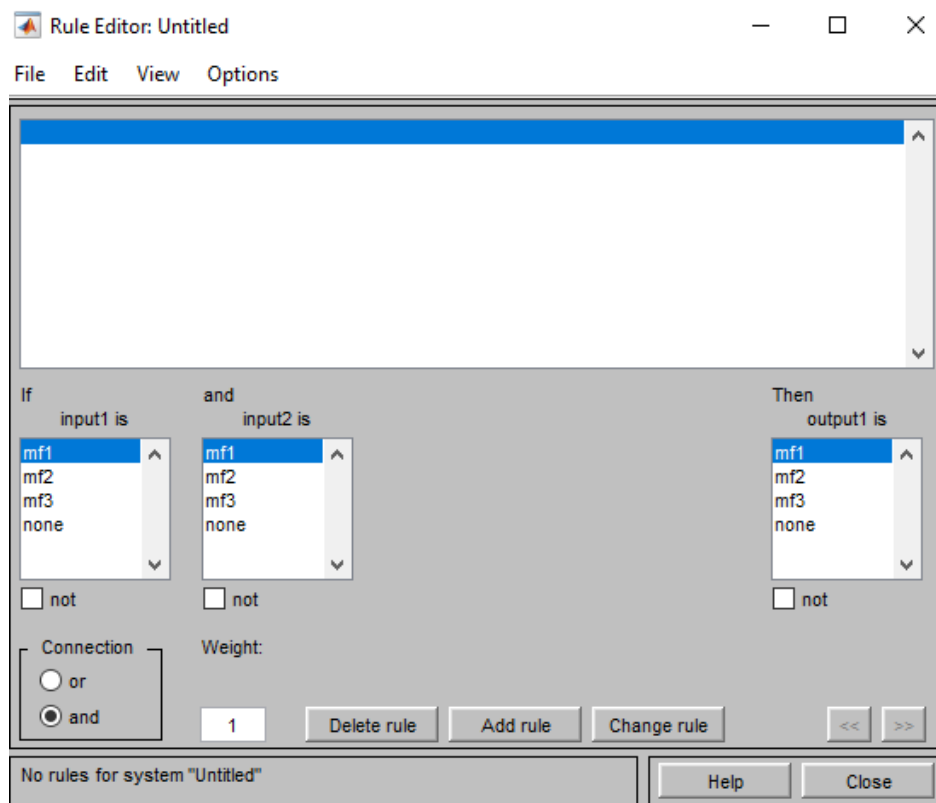


Figure 4. Matlab FL toolbox fuzzy inference window

Using Matlab FL toolbox fuzzy inference window, connection methods are selected to create a rule base suitable to the control system, and MFs are connected to each other via linguistic connectors. It must be noted that a higher number of rules and MFs in a fuzzy controller decreases oscillation and increases stability in the control system. The definition of MFs in a fuzzy controller directly affects the system response. Therefore, input values must be always entered within the range of MFs in the control system to operate rule base effectively.

Maximum error (e) range for cart's horizontal (linear) position is $[-1,1]$. Error (e), change in error (de) and output value (u) range were selected as $[-1,1]$. Linguistic variables for triangular and gaussian MFs are negative big (NB), negative medium (NM), negative small (NS), Zero (ZR), positive small (PS), positive medium (PM) and positive big (PB). Meanwhile, 7 different linguistic variables were selected for each input using triangular and gaussian MFs in the design of FL controller. As a result, rule base consisted of 49 rules without excluding any ordered pairs. It was created based on the expert's abilities, observations and system experiments. Mamdani was used as a fuzzy inference method in the designed FL controller. Center of gravity was used as a defuzzification method. In the designed system, regions with a change in (e) value higher than 0 are where the linear position starts to decrease. In particular, impact values in a region with an (e) value higher than 0 must be higher than impact values in other regions. A region with an (e) value higher than 0 and (de) value lower than 0 is the point where linear position attempts to reach a reference value. Settling time and overshoot were taken into account to determine impact values in this region. The region with an (e) value and (de) value equal to 0 is the most critical point for the system, and therefore its impact values must be selected accurately. (e) and (de) were used as inputs in the designed fuzzy control system, and all rules in the rule table were processed to check all probabilities.

(e), (de) and linguistic variables for output (u) in triangular MF are as follows:

$$NB = [-1.333 \ -1 \ -0.6667],$$

$$NM = [-1 \ -0.6667 \ -0.3333],$$

$$NS = [-0.6667 \ -0.3333 \ -5.551e-17],$$

$$ZR = [-0.3333 \ 0 \ 0.3333],$$

$$PS = [-5.551e-17 \ 0.3333 \ 0.6667],$$

$$PM = [0.3333 \ 0.6667 \ 1]$$

$$PB = [0.672 \ 1.005 \ 1.338],$$

Triangular MF for (e), (de) and (u) is shown in Matlab FL toolbox in Figure 5.

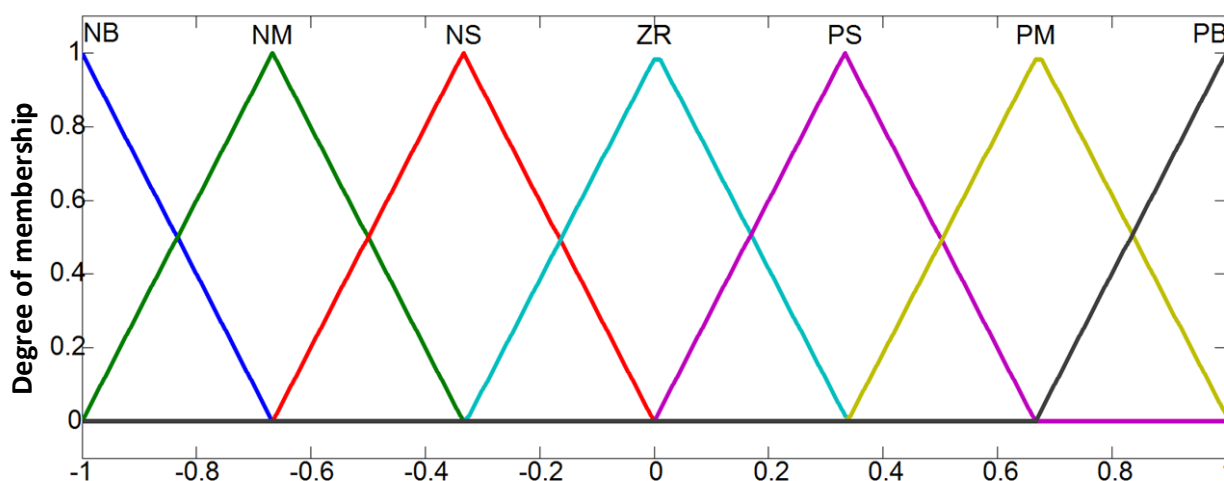


Figure 5. Triangular MF for (e), (de) and (u)

(e), (de) and linguistic variables for (u) in gaussian MF are as follows:

$$NB = [0.1416 \ -1],$$

$$NM = [0.142 \ -0.6613],$$

$$NS = [0.1416 \ -0.3334],$$

$$ZR = [0.1416 \ 0],$$

$$PS = [0.1416 \ 0.3334],$$

$$PM = [0.1416 \ 0.6666],$$

$$PB = [0.1416 \ 1],$$

Gaussian MF for (e), (de) and (u) is shown in Matlab FL toolbox in Figure 6.

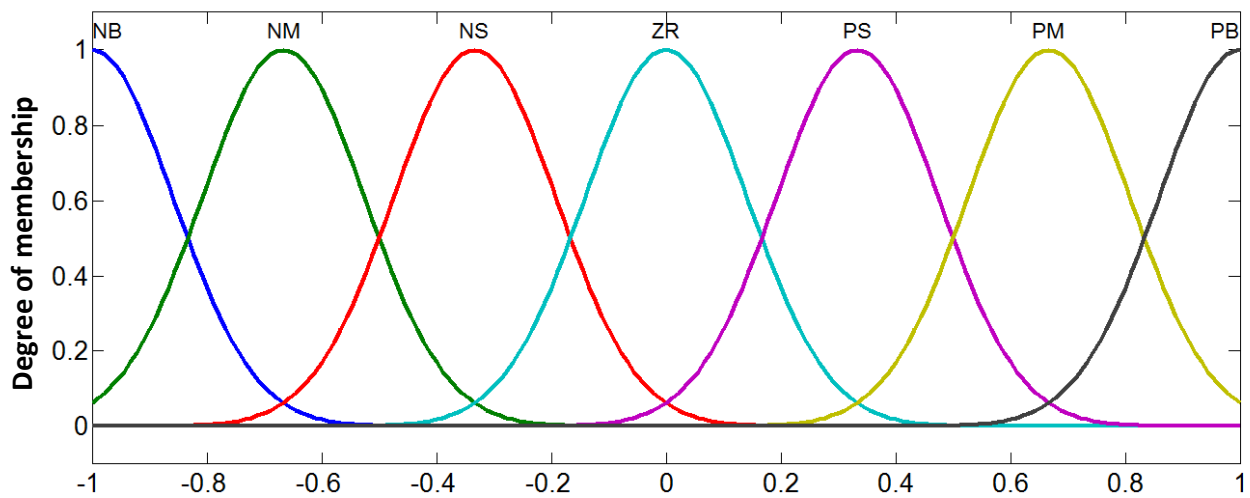


Figure 6. Gaussian MF for (e), (de) and (u)

Maximum (e) range for IP's angular position is [-0.3, 0.3]. (e) value range in triangular and gaussian MF was selected as [-0.3, 0.3]. (de) and (u) value range was selected as [-1,1]. Linguistic variables for triangular and gaussian MFs are (NB), (NM), (NS), (ZR), (PS), (PM) and (PB). Meanwhile, 7 different linguistic variables were selected for each input using triangular and gaussian MFs for IP's vertical (angular) position in the design of FL controller. As a result, rule base consisted of 49 rules without excluding any ordered pairs. Mamdani was used as a fuzzy inference structure in the designed FL controller. Center of gravity was used as a defuzzification method. In the designed system, regions with a change in (e) value higher than 0 are those where the angular position starts to decrease. In particular, impact values in a region with an (e) value higher than 0 must be higher than impact values in other regions. A region with an (e) value higher than 0 and (de) value lower than 0 is the point where the angular position attempts to reach a reference value. Settling time and overshoot were taken into account to determine impact values in this region. The region with an (e) value and (de) value equal to 0 is the most critical point for the system, and therefore its impact values must be selected accurately. (e) and (de) were used as inputs in the designed fuzzy control system, and all rules in the rule table were processed to check all probabilities.

Linguistic variables for (e) in triangular MF are as follows:

$$NB = [-0.4 \ -0.3 \ -0.2],$$

$$NM = [-0.3 \ -0.2 \ -0.1],$$

$$NS = [-0.2 \ -0.1 \ -1.388e-17],$$

$$ZR = [-0.1 \ 8.674e-19 \ 0.1],$$

$$PS = [-1.388e-17 \ 0.1 \ 0.2],$$

PM= [0.1 0.2 0.3],

PB= [0.2 0.3 0.4],

Membership functions for (e) in triangular MF are shown in Matlab FL toolbox in Figure 7.

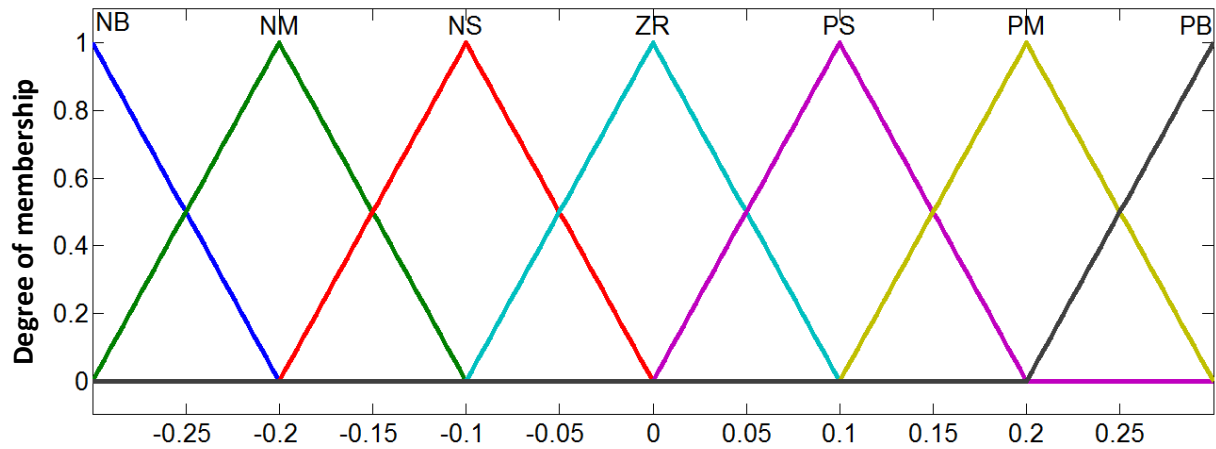


Figure 7. Triangular membership function for (e)

Membership functions for (de) and (u) in triangular MF are shown in Matlab FL toolbox in Figure 8.

(de) and linguistic variables for (u) in triangular MF are as follows:

NB= [-1.333 -1 -0.6667],

NM= [-1 -0.6667 -0.3333],

NS= [-0.6667 -0.3333 -5.551e-17],

ZR= [-0.3333 0 0.3333],

PS= [-5.551e-17 0.3333 0.6667],

PM= [0.3386 0.672 1.005],

PB= [0.6667 1 1.333],

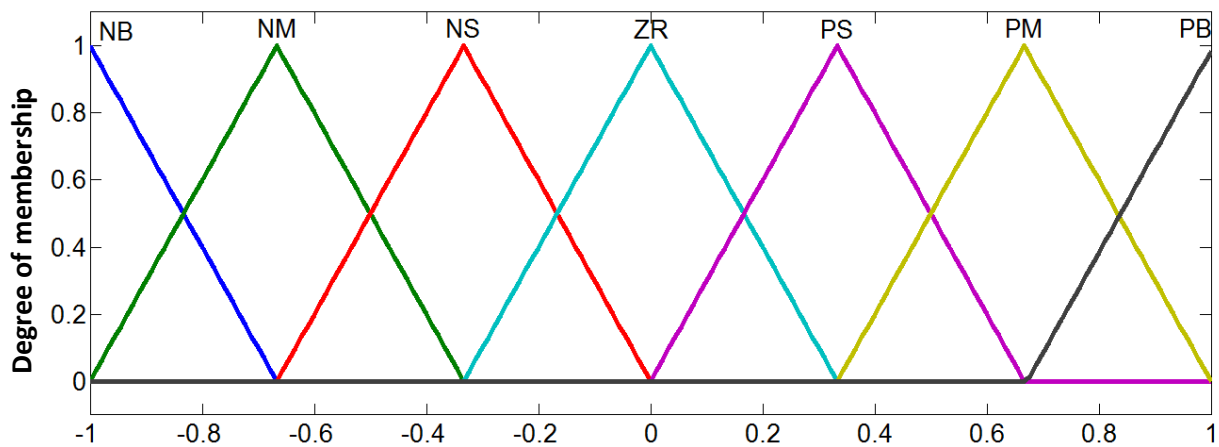


Figure 8. Triangular MF for (de) and (u)

Linguistic variables for the (e) in gaussian MF are as follows:

$$NB = [0.04247 \ -0.3],$$

$$NM = [0.0425 \ -0.203],$$

$$NS = [0.04247 \ -0.09842],$$

$$ZR = [0.04247 \ 0],$$

$$PS = [0.0425 \ 0.1],$$

$$PM = [0.04247 \ 0.2],$$

$$PB = [0.0425 \ 0.3],$$

MFs for (e) in gaussian MF are shown in Matlab FL toolbox in Figure 9.

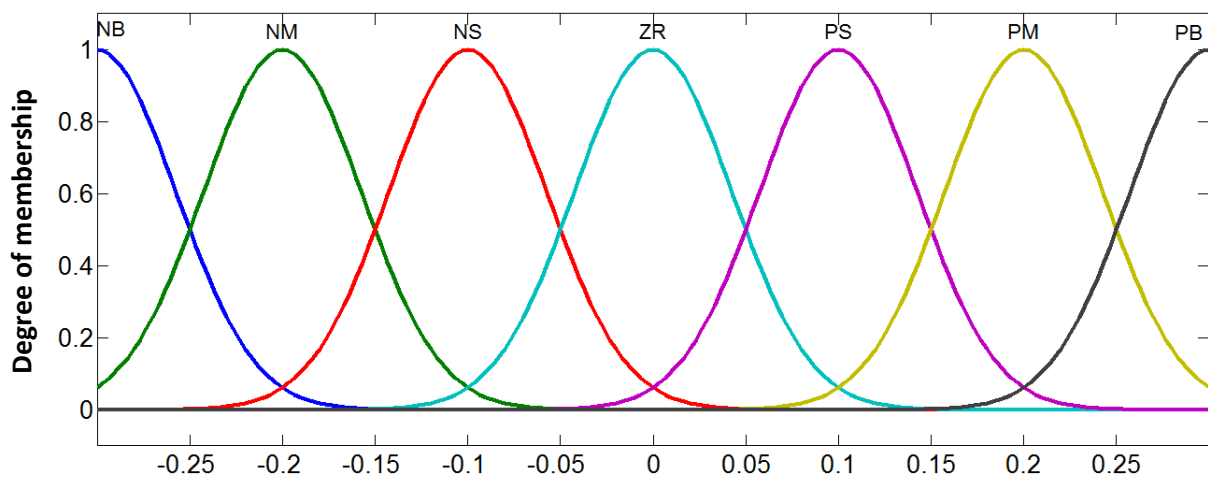


Figure 9. Gaussian MF for (e)

(de) and linguistic variables for (u) in Gaussian MF are as follows;

$$NB = [0.1416 \ -1],$$

$$NM = [0.1416 \ -0.6667],$$

$$NS = [0.1416 \ -0.3333],$$

$$ZR = [0.1416 \ 0],$$

$$PS = [0.142 \ 0.339],$$

$$PM = [0.1416 \ 0.6667],$$

$$PB = [0.1416 \ 1],$$

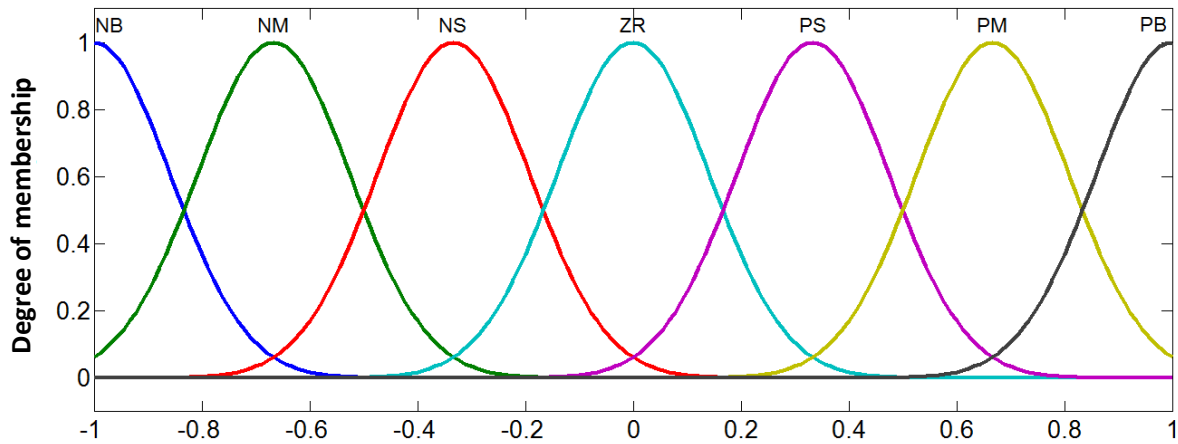


Figure 10. Gaussian MF for the (de) and (u)

Rule table used for IP system on cart is given in Table 2.

Table 2. The rule table used for IP system on cart

		<i>de</i>						
<i>u</i>		NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
<i>e</i>	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZR
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZR	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZR	PS	PM
	ZR	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZR	PS	PM	PB	PB	PB	PB

2.3. Proportional-Derivate Control Based FL System

Proportional-derivative control based FL system is a two-input single-output control system which was developed based on conventional proportional-derivative. A proportional-derivative controller consists of proportional and derivative gain factors. It is used to minimize rise time, overshoot and instability in a control system. The output of proportional-derivative controller is given in Equation (7). Matlab/Simulink diagram of a proportional-derivative control based FL system is shown in Figure 11.

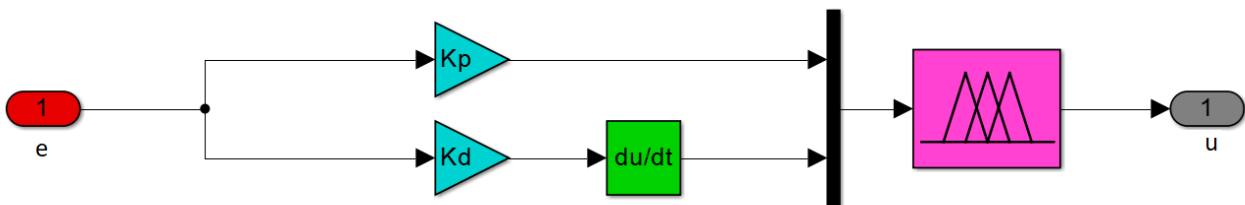


Figure 11. Matlab/Simulink diagram of a proportional-derivative control based FL system

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) \tag{7}$$

K_p and K_d gains are particularly important for the design of a proportional-derivative control based fuzzy controller. When changing gains, to determine the most optimal values for the designed control system, K_p value was increased if the system response was slow, while K_d value was increased if overshoot and oscillation rates were high (65). Proportional and derivative gains for the control of IP's vertical (angular) position were adjusted as $K_p=8$ and $K_d=5$, respectively. On the other hand, for the control of cart's horizontal (linear) position, the proportional and derivative gains were adjusted as $K_p=1.6$ and $K_d=3$, respectively. The initial and reference vertical (angular) positions were set to 0.035 radians (2 degrees) and 0 radians, respectively, for IP. On the other hand, initial and reference horizontal (linear) positions were set to 0 m and 0.1 m, respectively, for cart [4]. As shown in Figure 12, disturbance in the designed system was a pulse signal with an amplitude of 0.25N. The model designed for the control system simulated on Matlab/Simulink is shown in Figure 13.

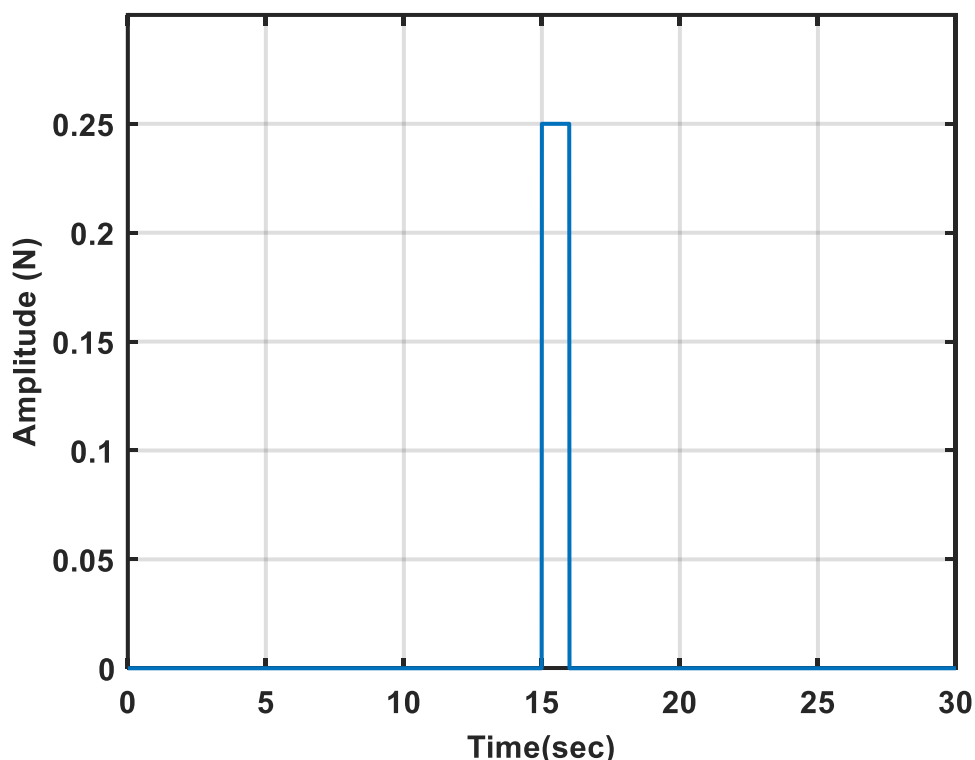


Figure 12. Disturbance Input Signal

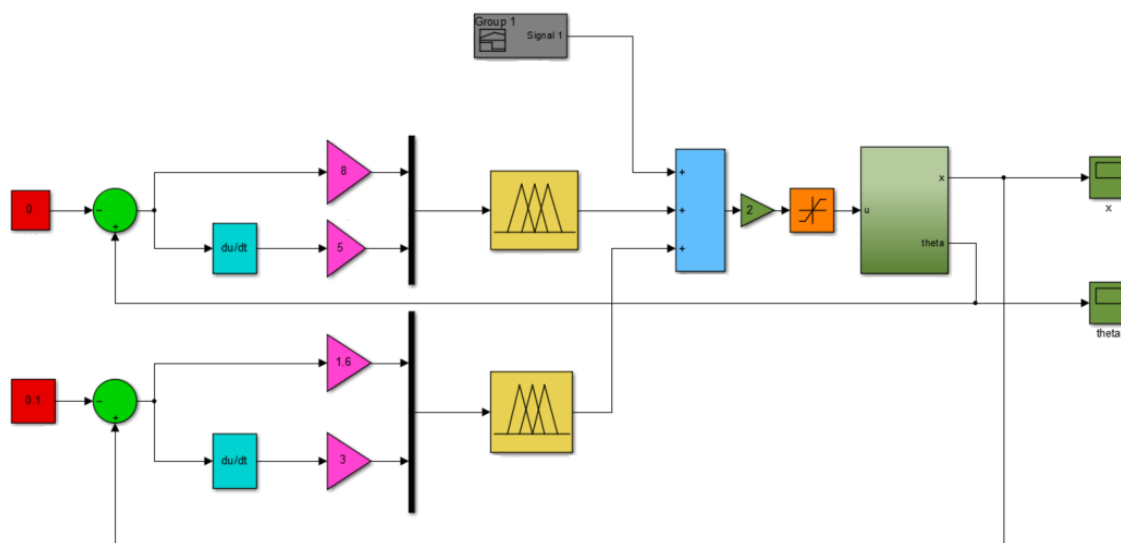


Figure 13. Matlab/Simulink model designed for the proportional-derivative control-based FL system

3. Results

3.1 Simulation Studies for the IP System on Cart

IP system on cart is a single-input multiple-output (SIMO) one. In the current literature, there are several studies which focused on independent control of cart's horizontal (linear) position against the reference input or IP's vertical (angular) position against the reference input. However, the present study proposes a proportional-derivative control based controller with different fuzzy (MFs) for the simultaneous control of cart's horizontal (linear) position and IP's vertical (angular) position. The disturbances for IP on cart's horizontal (linear) and vertical (angular) position were added to control signals and given to the system as an input. The disturbance pulse signal was applied to the system at the 15th second and lasted 1 second. The control signal was limited within a range of $u=[-1,1]$. The control of IP on cart's vertical (angular) position using triangular and Gaussian MFs are shown in Figure 14.

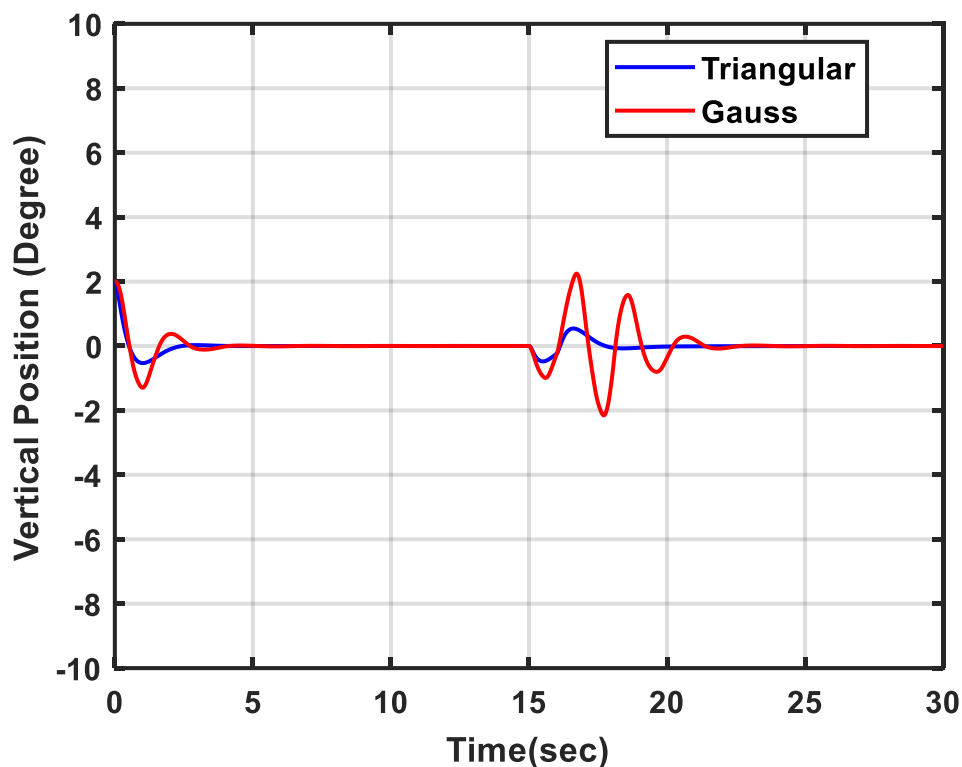


Figure 14. The control of IP on cart's vertical (angular) position using triangular and gaussian MFs

The control of IP on cart's horizontal (linear) position using triangular and gaussian MFs is shown in Figure 15.

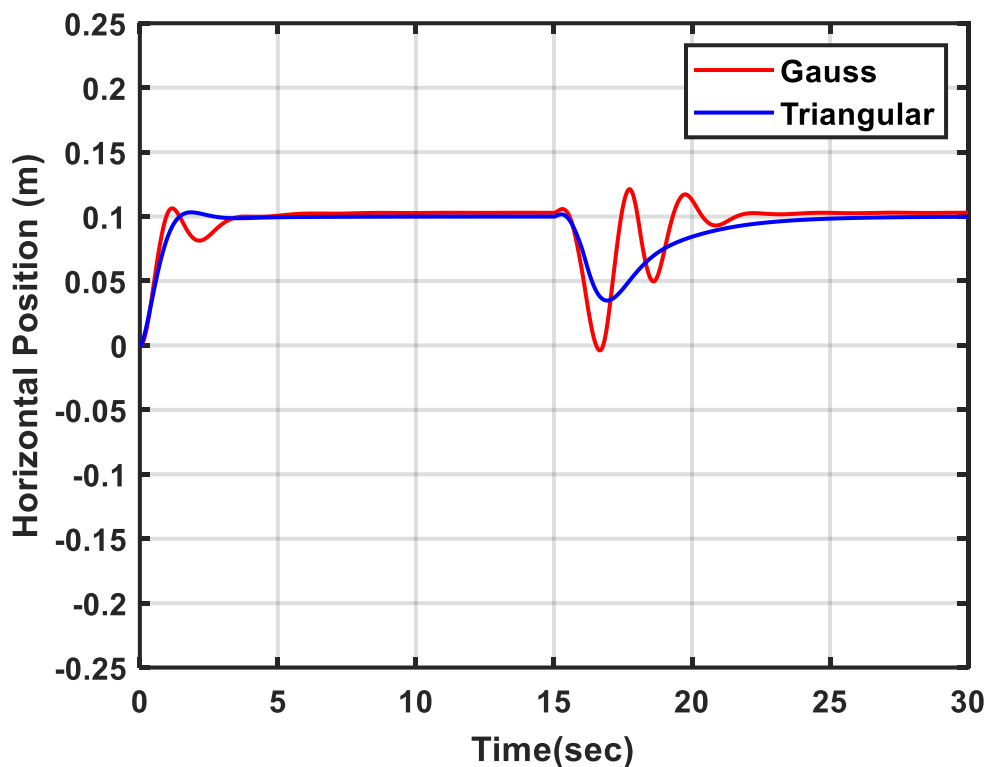


Figure 15. The control of IP on cart’s horizontal (linear) position using triangular and gaussian MFs

The impact of triangular and gaussian MFs on the proposed controller’s performance in terms of IP on cart’s vertical (angular) position was analyzed. As shown in Figure 14, three important performance parameters for the proposed controller, namely rise time (t_r), settling time (t_y) and overshoot (M%), were assessed in terms of IP on cart’s vertical (angular) position. The results are summarized in Table 3.

Table 3. The control performance for IP on cart’s vertical (angular) position

Performance values	t_r (sec)	t_y (sec)	M%
Triangular	0.23	4.4	12
Gaussian	0.25	4.6	13

The impact of triangular and gaussian MFs on the proposed controller’s performance in terms of IP on cart’s horizontal (linear) position was analyzed. As shown in Figure 15, three important performance parameters for the proposed controller, namely rise time (t_r), settling time (t_y) and overshoot (M%), were assessed in terms of IP on cart’s vertical (angular) position. The results are summarized in Table 4.

Table 4. The control performance for IP on cart’s horizontal (linear) position

Performance Values	t_r (sec)	t_y (sec)	M%
Triangular	0.625	3.3	7
Gaussian	0.650	3.4	10

According to Tables 3 and 4, improved performance values of triangular membership function for controlling IP’s vertical and the cart’s horizontal position are shown in Figure 16.

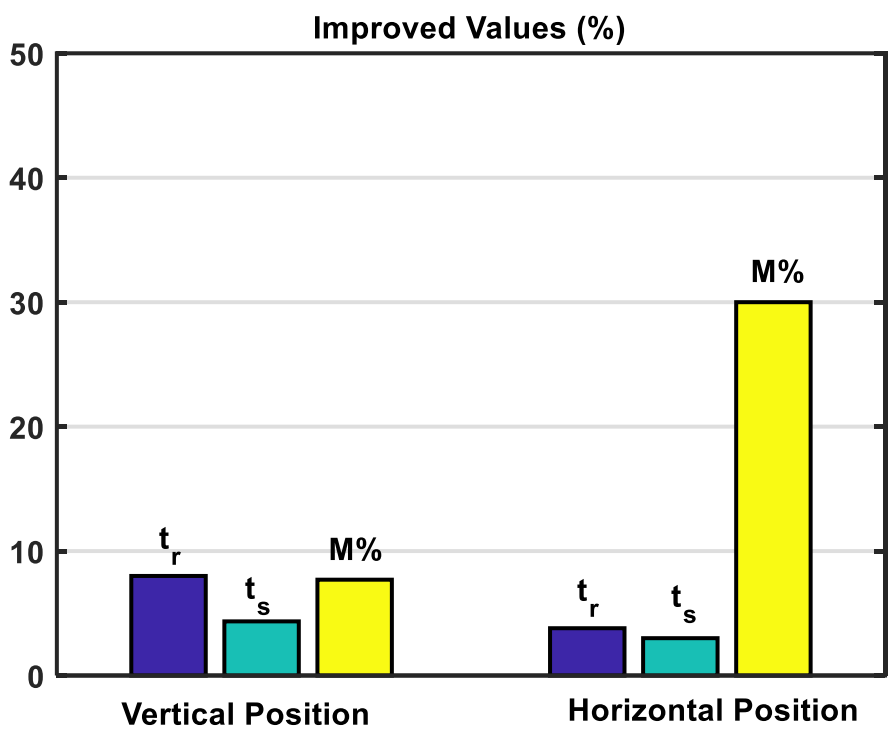


Figure 16. Improved performance values of triangular membership function for controlling IP’s vertical and cart’s horizontal position

As for the control of IP’s vertical position, a disturbance signal was applied at the 15th second for 1 second, and the system with triangular membership function was balanced and came to a steady-state (without oscillation) position after 4 seconds. On the other hand, the system with gaussian membership function underwent oscillation and was balanced after 6 seconds. Similarly, as for the control of cart’s horizontal position, the system with a gaussian membership function underwent oscillation and was balanced in an unstable position. However, the system with a triangular membership function was balanced in a steady-state position. Settling time performance values of both membership functions for vertical and horizontal positions following disturbance signals are given in Tables 5 and 6, respectively.

Table. 5 IP’s vertical position control values following a disturbance signal

Performance Values	t_y (sec)
Triangular	4
Gaussian	6

Table. 6 Cart’s horizontal position control values following a disturbance signal

Performance Values	t_y (sec)
Triangular	10
Gaussian	10

4. Discussion and Conclusion

The present study designed a non-linear model for an IP system on a cart to control the IP's vertical (angular) position and the cart's horizontal (linear) position simultaneously using different proportional-derivative control-based fuzzy MFs against disturbance signals. The results demonstrated that fuzzy triangular MF displayed the highest performance in the control of the IP on cart's vertical (angular) and horizontal (linear) position thanks to its narrower peak, higher slope, and quicker response to change in error. It was also observed that steady-state error in the system response was caused by the system input value range and that a narrower range would contribute to a more accurate system. In addition to the methods used in the present study, future studies are recommended to focus on obtaining better system responses through the optimization of the most optimal rules and membership functions for FL control systems.

References

- [1] Peker, F., Kaya, İ., 2017. PID tip denetleyiciler kullanılarak yapılan bir ters sarkaç stabilizasyonunun performans analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), (2017). 563-574.
- [2] Yoshida, K., 1999. Swing-up control of an inverted pendulum by energy-based methods. In *Proceedings of the 1999 American Control Conference*, 02-04 June 1999. (Vol. 6, pp. 4045-4047). IEEE.
- [3] Razzaghi, K., Jalali, A. A., 2012. A new approach to stabilization control of an inverted pendulum, using PID controller. In *Advanced Materials Research*, Vol. 403, (2012), 4674-4680. Trans Tech Publications Ltd.
- [4] Gani, A., 2014. Lineer olmayan dinamik sistemlerin denetiminde bulanık mantık esaslı denetim yöntemlerinin performansının incelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 95s, Kahramanmaraş.
- [5] Furuta, K., Okutani, T., Sone, H., 1978. Computer control of a double inverted pendulum. *Computers & Electrical Engineering*, 5(1), 67-84.
- [6] Jaiwat, P., Ohtsuka, T., 2014. Real-time swing-up of double inverted pendulum by nonlinear model predictive control. In *5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes* (pp. 290-295).
- [7] Åström, K. J., Furuta, K., 2000. Swinging up a pendulum by energy control. *Automatica*, 36(2), (2000), 287-295.
- [8] Gordillo, F., Acosta, J. A., Aracil, J. 2003. A new swing-up law for the Furuta pendulum. *International Journal of Control*, 76(8), (2003), 836-844.
- [9] Peker, F., & Kaya, İ., 2016. Performance analysis of an inverted pendulum stabilization based on PID Controllers. In *Proceedings International Engineering, Science and Education Conference*, 01-03 December 2016 (pp. 640-646).
- [10] Peker, F., 2017. Ters sarkaç sisteminin PI-PD denetleyici kullanılarak kontrol edilmesi. *Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 80s. Diyarbakır.
- [11] Samara, R., Hikmarika, H., Dwijayanti, S., & Suprpto, B. Y. 2019. Comparison of Inverted Pendulum control system using Proportional-Integral-Derivative (PID) and Proportional-Integral (PI). In *2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)* (pp. 316-320). IEEE.
- [12] Peker, F., & Kaya, İ., 2017. Identification and real-time control of an inverted pendulum using PI-PD controller. In *2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)* (pp. 771-776). IEEE.
- [13] Kuśmierz, B., Gromaszek, K., & Kryk, K., 2018. Inverted pendulum model Linear-Quadratic Regulator (LQR). In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018* (Vol. 10808, pp. 1921-1928). SPIE.
- [14] Lee, H. W., 2017. Performance of the balance of circular inverted pendulum by using lqr controlled theory. In *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)* (pp. 415-416). IEEE.
- [15] Wan, L. L., Lei, J., & Wu, H. X. 2014. Design of LQR Controller for the Inverted Pendulum. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1037, pp. 221-224). Trans Tech Publications Ltd.
- [16] Kumar, C., Lal, S., Patra, N., Halder, K., & Reza, M., 2012. Optimal controller design for inverted pendulum system based on LQR method. In *2012 IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)* (pp. 259-263). IEEE.
- [17] Fang, H., Tang, W., & Zheng, E., 2012. Research on inverted pendulum control based on LQR. In *Advances in Mechanical and Electronic Engineering* (pp. 375-380). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [18] Peng, Y., & Liu, Z. N., 2012. Optimal Design of LQR Controller for Single Inverted Pendulum. In *Advanced Materials Research* (Vol. 472, pp. 1505-1509). Trans Tech Publications Ltd.
- [19] Wang, H., Dong, H., He, L., Shi, Y., & Zhang, Y. 2010. Design and simulation of LQR controller with the linear inverted pendulum. In *2010 international conference on electrical and control engineering* (pp. 699-702). IEEE.

- [20] Lingyan, H., Guoping, L., Xiaoping, L., & Hua, Z. 2009. The computer simulation and real-time stabilization control for the inverted pendulum system based on LQR. In 2009 Fifth International Conference on Natural Computation (Vol. 6, pp. 438-442). IEEE.
- [21] Czyżniewski, M., Łangowski, R., Klasa, D., & Matwiszyn, M., 2021. A case study of robust sliding mode control applied to an inverted pendulum on a cart. In 2021 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) (pp. 156-161). IEEE.
- [22] Osman, N., Fareh, R., Tha'er, O. S., Khalid, H. M., & Ghommam, J. 2021. Inverted Pendulum System Disturbance and Uncertainty Effects Reduction using Sliding Mode-Based Control Design. In 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD) (pp. 186-193). IEEE.
- [23] Cui, J., 2019. Numerical Design Method for Nonlinear Sliding Mode Control of Inverted Pendulum. In 2019 Chinese Control Conference (CCC) (pp. 2646-2649). IEEE.
- [24] Bsili, I., Ghabi, J., & Messaoud, H., 2015. Discrete sliding mode control of inverted pendulum. In 2015 World Symposium on Mechatronics Engineering & Applied Physics (WSMEAP) (pp. 1-6). IEEE.
- [25] Rudra, S., & Barai, R. K., 2012. Robust adaptive backstepping control of inverted pendulum on cart system. *International journal of control and automation*, 5(1), 13-26.
- [26] Deng, L., & Gao, S., 2011. The design for the controller of the linear inverted pendulum based on backstepping. In *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology* (Vol. 6, pp. 2892-2895). IEEE.
- [27] Ebrahim, A., & Murphy, G. V. 2005. Adaptive backstepping controller design of an inverted pendulum. In *Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory*, 2005. SSST'05. (pp. 172-174). IEEE.
- [28] Singh, V. K., & Kumar, V., 2014. Adaptive backstepping control design for stabilization of inverted pendulum. In *2014 Students Conference on Engineering and Systems* (pp. 1-5). IEEE.
- [29] Korkmaz, D., Bal, C., & Gökbulut, M., 2015. Modeling of inverted pendulum on a cart by using Artificial Neural Networks. In *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 2642-2645). IEEE.
- [30] Mladenov, V., 2011. Application of neural networks for control of inverted pendulum. *WSEAS Transactions on circuits and systems*, 10(2), 49-58.
- [31] Noh, J. S., Lee, G. H., Choi, H. J., & Jung, S., 2009. Robust control of a mobile inverted pendulum robot using a RBF neural network controller. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (pp. 1932-1937). IEEE.
- [32] Kim, S. S., Lee, G. H., & Jung, S., 2008. Implementation of a neural network controller on a DSP for controlling an inverted pendulum system on an XY plane. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 5439-5443.
- [33] Kharola, A., 2016. Design of a hybrid adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) controller for position and angle control of inverted pendulum (IP) systems. *International Journal of Fuzzy System Applications (IJFSA)*, 5(1), 27-42.
- [34] Tatikonda, R. C., Battula, V. P., & Kumar, V., 2010. Control of inverted pendulum using adaptive neuro fuzzy inference structure (ANFIS). In *Proceedings of 2010 IEEE international symposium on circuits and systems* (pp. 1348-1351). IEEE.
- [35] Al-Mekhlafi, M. A., Wahid, H., & Aziz, A. A., 2018. Adaptive neuro-fuzzy control approach for a Single Inverted Pendulum System. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 8(5).
- [36] Meenakshi, R., & Manimozhi, M., 2016. Adaptive neuro-fuzzy inference system controller design for single stage inverted pendulum. In *2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)* (pp. 472-476). IEEE.
- [37] Tatikonda, R. C., Battula, V. P., & Kumar, V., 2010. Control of inverted pendulum using adaptive neuro-fuzzy inference structure (ANFIS). In *Proceedings of 2010 IEEE international symposium on circuits and systems* (pp. 1348-1351). IEEE.
- [38] Mousa, M. E., Ebrahim, M. A., Zaky, M. M., Saied, E. M., & Kotb, S. A., 2021. Hybrid optimization technique for enhancing the stability of inverted pendulum system. *International Journal of Swarm Intelligence Research (IJSIR)*, 12(1), 77-97.
- [39] Maity, S., & Luecke, G. R., 2019. Stabilization and optimization of design parameters for control of inverted pendulum. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 141(8).
- [40] Singhal, N. K., & Swarup, A., 2019. Performance improvement of inverted pendulum using optimization algorithms. In *2019 3rd international conference on electronics, communication and aerospace technology (ICECA)* (pp. 316-322). IEEE.
- [41] Hou, X. L., & Xu, X. H. 2006. Optimization of feedback control parameters of equilibrium point about nonlinear inverted pendulum. *Kongzhi Lilun yu Yingyong/ Control Theory & Applications*, 23(3), 467-470.
- [42] Chmielewski, A., Gumiński, R., Maciąg, P., & Mączak, J. (2016). The use of fuzzy logic in the control of an inverted pendulum. In *Dynamical Systems: Theoretical and Experimental Analysis* (pp. 71-82). Springer, Cham.

- [43] Huang, Y. H., Zhang, L., Zhang, P. P., Ru, F. F., & Wang, K. Q., 2015. Fuzzy control and simulation of single inverted pendulum. In *Control Engineering and Information Systems: Proceedings of the 2014 International Conference on Control Engineering and Information Systems (ICCEIS 2014, Yueyang, Hunan, China, 20-22 June 2014)*. (p. 109). CRC Press.
- [44] Pal, A. K., & Chakrabarty, J., 2014. Adaptive fuzzy control of inverted pendulum with a fuzzy-based set-point weighting scheme. In *2014 Fourth International Conference of Emerging Applications of Information Technology* (pp. 46-51). IEEE.
- [45] Tripathi, S. K., Panday, H., & Gaur, P., 2013. Robust control of Inverted Pendulum using fuzzy logic controller. In *2013 Students Conference on Engineering and Systems (SCES)* (pp. 1-6). IEEE.
- [46] Wang, H., & Bai, Y., 2013. Application of fuzzy control in the inverted pendulum. In *Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (Vol. 2, pp. 1354-1357)*. IEEE.
- [47] Prasad, L. B., Gupta, H. O., & Tyagi, B., 2011. Intelligent control of nonlinear inverted pendulum dynamical system with disturbance input using fuzzy logic systems. In *2011 International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering* (pp. 136-141). IEEE.
- [48] Roose, A. I., Yahya, S., & Al-Rizzo, H., 2017. Fuzzy-logic control of an inverted pendulum on a cart. *Computers & Electrical Engineering*, 61, 31-47.
- [49] Pham, D. B., Pham, D. T., Dao, Q. T., & Nguyen, V. A., 2022. Takagi-Sugeno fuzzy control for stabilizing nonlinear inverted pendulum. In *Intelligent Systems and Networks* (pp. 333-341). Springer, Singapore.
- [50] Patra, A. K., Mishra, A. K., Agrawal, R., & Nahak, N., 2021. Stabilizing and trajectory tracking of inverted pendulum based on fuzzy logic control. In *Intelligent and Cloud Computing* (pp. 563-573). Springer, Singapore.
- [51] Kulikova, I. V., 2020. Control the movement of an inverted pendulum by using a first-order type Takagi-Sugeno-Kang fuzzy controller. In *Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1546, No. 1, p. 012088)*. IOP Publishing.
- [52] Gani, A., Açıkgöz, H., Kiliç, E., & Sit, S., 2014. Fuzzy logic based control of inverted pendulum. *Elektrik - Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 27, 29 November 2014. Bursa.
- [53] Gani, A., Kececioğlu, O. F., Acikgoz, H., & Sekkeli, M., 2017. Fuzzy logic controller design based on Sugeno inference method for nonlinear inverted pendulum dynamical system. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences-Sigma Muhendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 19-30.
- [54] Gani, A., Baş, Z., Acikgoz, H., & Kececioğlu, O., 2014. Control of nonlinear dynamic inverted pendulum system using fuzzy logic based control methods. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(9), 1400-1404.
- [55] Nguyen, N., Pham, V., Ho, T., & Dao, T., 2022. Designing an effective hybrid control strategy to balance a practical inverted pendulum system. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(5), 80-87. doi:10.14445/22315381/IJETT-V70I5P210.
- [56] Kharola, A., 2016. Design of a hybrid adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) controller for position and angle control of inverted pendulum (IP) systems. *International Journal of Fuzzy System Applications (IJFSA)*, 5(1), 27-42.
- [57] Sit, S., Kiliç, E., Özcalık, H. R., Alhasan, H. A., & Gani, A., 2016. Modeling and performance comparison of PD and Takagi-Sugeno type fuzzy logic controllers for inverted pendulum system. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 6(2), (2016), 76-84.
- [58] Patel, N., & Nigam, M. J., 2013. Design of fuzzy PD controller for inverted pendulum in real time. In *Proceedings of International Conference on Advances in Computing* (pp. 955-962). Springer, New Delhi.
- [59] Gani, A., Açıkgöz, H., Kiliç, E., & Sit, S. PD-Bulanık mantık denetleyici ve PD denetleyici kullanarak ters sarkaç sisteminin dinamik performans analizi *Uluslararası Hakemli Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi* 2(1), 2014.
- [60] Gani, A., Özcalık, H. R., Sekkeli, M., Kececioğlu, O. F., & Sit, S., 2016. Dynamic performance comparison of PD and PD-fuzzy logic controllers for inverted pendulum system. *International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE'16)*, March 19-20, 2016, Kilis.
- [61] Gani A., Kececioğlu O.F., Baş Z., Acikgoz H., and Sekkeli M. Dynamic performance analysis of self-tuning fuzzy-PID controller for the inverted pendulum system. *4th International Fuzzy Systems Symposium* November, 5-6, 2015-İstanbul, Turkey. pp.32-35.
- [62] Gani A., Kececioğlu O.F., Dogmuş O., Gunes M., Öz Ayarlamalı Bulanık-PID, PID ve LQR Denetleyiciler ile Ters Sarkaç Sisteminin Denetimi. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, 10-12 Eylül 2015-Denizli, Turkey. pp.540-545.
- [63] Ogata, K., 1990. *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall Inc.
- [64] Yıldız, C., 2008. Genetik algoritma destekli bulanık denetim kullanarak vektör esaslı asenkron motor kontrolü, Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Kahramanmaraş.
- [65] Prasad, Lal Bahadur., Gupta, Hari Om., Tyagi, Barjeev., 2011. Intelligent Control of Nonlinear Inverted Pendulum Dynamical System with Disturbance Input using Fuzzy Logic Systems. *International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering*.

Covering-based Generalized Intuitionistic Fuzzy-Rough Set Models for A Selecting HVAC System

Salih Himmetoğlu^{*1}, Emel Kızılkaya Aydoğan², Yılmaz Delice³

^{*1} Kayseri University Develi Vocational College Management and Organization, KAYSERİ

² Erciyes University Engineering Faculty Industrial Engineering, KAYSERİ

³ Kayseri University Faculty of Applied Sciences International Trade and Logistic, KAYSERİ

(Alınış / Received: 01.07.2022, Kabul / Accepted: 03.10.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

HVAC,
Intuitionistic Fuzzy-covering,
Rough Set Theory,
Fuzzy Set Approximations

Abstract: In today's urban life, modern buildings such as apartments, schools, hospitals, and work offices are quite important for people's life. Since people spend most of their time in these buildings, a significant decision-making process is required for the design and selection of heating (H), ventilation (V), and air conditioning (AC) systems. The most important criteria in these decision-making processes are the low effect on the environment, high comfort, low cost, and high energy productivity. These basic parameters considered to select the most suitable HVAC systems in the buildings may not have crisp values every time. Since some of the criteria for HVAC systems are described as linguistic, it is not possible to evaluate the systems with traditional methods using crisp values. Therefore, we propose new and flexible method called covering-based generalized intuitionistic fuzzy (IF)-rough set models based on IF-technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) principles. The upper and lower approximations in the rough set theory, and IF-implicator and IF-t norms operators in the IF-neighborhoods are utilized for the proposed methodology. In this study, nine different HVAC systems are investigated according to nine different criteria for four main factors in the selection of HVAC systems. According to the obtained results, it can be seen that the proposed method is a suitable multi criteria decision-making (MCDM) approach that considers the linguistic uncertainties in order to determine the most suitable HVAC system.

Bir HVAC Sistemi Seçimi için Örtme Tabanlı Genelleştirilmiş Sezgisel Bulanık-Kaba Küme Modelleri

Anahtar Kelimeler

HVAC,
Sezgisel Bulanık-Örtme,
Kaba Küme Teorisi,
Bulanık Küme Yaklaşımları

Öz: Günümüz kent yaşamında apartman, okul, hastane, işyeri gibi modern yapılar insan yaşamı için oldukça önemlidir. İnsanlar zamanlarının çoğunu bu binalarda geçirdikleri için ısıtma (H), havalandırma (V) ve iklimlendirme (AC) sistemlerinin tasarımı ve seçimi için önemli bir karar verme süreci gerekmektedir. Bu karar verme süreçlerinde en önemli kriterler; çevreye az etki, yüksek konfor, düşük maliyet ve yüksek enerji verimliliğidir. Binalarda en uygun HVAC sistemlerini seçmek için düşünülen bu temel parametreler her zaman net değerlere sahip olmayabilir. HVAC sistemleri için bazı kriterler dilsel olarak tanımlandığından, sistemlerin kesin değerler kullanılarak geleneksel yöntemlerle değerlendirilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, IF-TOPSIS prensiplerine dayalı, kapsama tabanlı genelleştirilmiş sezgisel bulanık-kaba küme modelleri adı verilen yeni ve esnek bir yöntem öneriyoruz. Önerilen metodoloji için kaba küme teorisindeki üst ve alt yaklaşımlar ve sezgisel bulanık-komşularındaki sezgisel bulanık-anlamlandırıcı ve sezgisel bulanık-t norm operatörleri kullanılmıştır. Bu çalışmada, HVAC sistemlerinin seçiminde dört ana faktör için dokuz farklı kritere göre dokuz farklı HVAC sistemi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen yöntemin en uygun HVAC sistemini belirlemek için dilsel belirsizlikleri dikkate alan uygun çok kriterli karar verme yaklaşımı olduğu görülmektedir.

*Corresponding Author, email: salihhimmetoğlu@kayseri.edu.tr

1. Introduction

Buildings are very important for people in modern city life. Due to developing cities with the industrial revolution, the population of cities increased and socio-economic structure changed. This situation affects the shape of the structure and the purpose of the materials used. The population growth in the cities forced people to build a multi-storey building. This caused the problems of heating, lighting and ventilation in multi-storey buildings. Because heating, cooling, ventilation and lighting services must be equally provided to many households at the same time. With the development of technology, the increase in living standards positively affected the comfort of people's living and working areas. Heating, lighting, ventilation and air conditioning in buildings are the main factors that determine the comfort level. Through the today's technology, HVAC systems can control these factors. We can say that HVAC systems have four main evaluation criteria. These are energy consumption, comfort, environmental impacts and costs. Most of the energy consumed in buildings is used for heating, ventilation, air conditioning and lighting. The International Energy Agency states that the construction sector has an important position in global energy consumption. although HVAC systems have an important function to meet the basic need of the buildings, the environmental and climate problems caused by energy used cannot be ignored. Especially, greenhouse gases and air pollution (foggy, smoke, etc.) occurring because of energy consumption may cause undesirable environmental and climatic problems while providing comfort in structures. Moreover, considering that one third of global CO₂ emissions are due to buildings, the importance of HVAC systems to be used in structures becomes even more important. It is important to evaluate HVAC systems in terms of human comfort such as thermal comfort, noise, and pollution. In addition, setup costs, operational and maintenance costs are important criteria to be taken into consideration for setup and use of HVAC systems. While evaluating a HVAC system, there are many factors as mentioned above and, there is a holistic and dynamic interaction between these factors [1]. HVAC systems to be used in buildings must be integrated with cost, energy and environment.

MCDM methods, which give very effective results in decision-making problems with crisp values, are widely applied in the literature. However, real-life decision-making processes may not always depend on exact decisions and values. In the absence of crisp values when using only multi-criteria decision-making (MCDM) methods, it is very difficult to make a clear evaluation using traditional methods [2]. The methods defined with a binary function may remain incapable in problems involving human judgment. Therefore, the fuzzy set theory used for solving the problems including imprecise values was first presented by Zadeh [3]. Membership degrees can be between 0 and 1 in the fuzzy set theory, which gives good results for problems in many branches such as engineering, economy, and management, instead of the sets consisting of 0 or 1 value such as classical methods. In the fuzzy set theory, the sum of membership and non-membership degrees equals to 1. In this situation, an alternative is either member or not member to a set at a certain degree. That is, while membership degrees in the fuzzy set theory are considered, the uncertainty of the membership situations is not defined. In the fuzzy set theory, the sum of membership and non-membership degrees equals to 1. In this situation, an alternative is either member or not member to a set at a certain degree. That is, while membership degrees in the fuzzy set theory are considered, the uncertainty of the membership situations is not defined. An alternative has no information of any degree about the related set. Therefore, the intuitionistic fuzzy (IF) set approach is presented by Atanassov [4]. He takes into account the degree of 'indeterminacy or hesitancy' along with the membership and non-membership degrees. It has been determined by studies that IF set theory is more effective than traditional fuzzy set theory in overcoming uncertainty [5]. Therefore, intuitionistic fuzzy (IF) set models can be used to evaluate uncertain linguistic expressions. Traditional MCDM problems with IF information are mainly focused on an IF binary relation [6]. However, some complicated problems cannot be effectively solved by an IF relation [6]. Although some alternatives have IF logic, some alternatives do not. Therefore, the IF approach may not obtain effective and consistent results. There is a need to apply new methods that make important contributions and offer different perspectives to MCDM problems by increasing the effect of IF set models and reducing their negative effects. Accordingly, in this study, covering-based generalized IF-rough models based on IF-TOPSIS principles are used. IF-neighborhoods are created by using IF-implicator and IF-triangular norm (t norm) operators. Upper and lower approximation values are calculated according to these neighborhoods. Obtained upper and lower approximations are integrated into the IF-TOPSIS principle and the most suitable system is determined. It is aimed to determine the most suitable HVAC system by using the upper and lower approximation in the rough set theory in cases where the traditional MCDM methods and IF models are ineffective.

In the literature, considering the cost, electricity consumption, and comfort, HVAC systems become MCDM problems [7]. Decision-making methods in building energy management are one of the commonly used methods [8]. However, there are very limited papers in the literature about the related subject. Balcomb [9] used the decision-making methods to compare design alternatives of the building strategies. The study is related to insulation, glazing, duct leakage, thermal mass. De Wit and Augenbroe [10] made a choice in order to compare

two design strategies using Bayesian decision theory. They discussed whether adding a cooling system in thermal zone considering uncertainties. Wang et al. [11] proposed a fuzzy-MCDM method for the selection of the cool storage system. The subjective judgments (dependent on the decision-maker) and objective (dependent on numerical values) values are considered together to determine the most suitable alternative. They evaluate the storage systems according to high-temperature water cooling storage, phase change material cooling storage, ice storage, chilled water storage, and air conditioning criteria. Hopfe [12] adopted the analytic hierarchy process, one of the MCDM methods, in order to make a decision about set-up cost, architectural form, and symbolism performances criteria of two buildings. Kim and Augenbroe [13] studied a multi-criterion assessment considering organizational behavior for ventilation operation in a hospital isolation room. They adapted a variable air volume (VAV) in response to the complaint that the current operation was not sufficient since the related fan material caused excessive energy consumption. The study evaluated the current practice by supporting a rational selection of ventilation operation through a set of objective performance criteria in order to demonstrate the efficiencies of the adaptive VAV operation. Zhang et al. [14] apply fuzzy-MCDM for the scheme selection processes of heating and cooling recourses in HVAC systems. They consider initial investment cost, annual operating expense, cycle life, and reliability as the evaluation criteria. Kim et al. [15] studied the decision making of the HVAC system using Bayesian Markov Chain Monte Carlo method. They present MCDM of HVAC systems under uncertainty. Using EnergyPlus 6.0, they studied about construction cost and total energy consumption criteria for two HVAC candidates. Former HVAC candidate has VAV for the interior zone, fan coil unit for perimeter zone gas boiler and electric chiller. Latter candidate has VAV for the interior zone, fan coil unit for perimeter zone, gas boiler and electric chiller as well as ice thermal storage system [15]. Huang et al. [16] decided a HVAC system design under peak load prediction uncertainty using MCDM technique. Case studies are used to illustrate the design procedure, and the result is compared with that of a conventional design method. Baki et al. [17] consider environmental, economic, social, and competency criteria by using an approach based on fuzzy-MCDM and best-worst methods. Poongavanam et al. [18] evaluate 14 different automotive air conditioning systems by using TOPSIS, EDAS, and MOORA methods. They use the latent heat of vaporization, thermal conductivity, vapor pressure, saturated fluid density, specific heat capacity, dynamic viscosity, GWP, ozone depletion potential, and cost per pound as performance criteria. Wan et al. [19] evaluate the effects of the supply vane angles and supply air temperature on ventilation performance by considering both 13 different heat comfort scales and human factors. They propose the TOPSIS method based on set pair analysis.

Unlike the above studies, it is aimed to select the most suitable HVAC systems by using the MCDM method based on IF and rough set theories. The IF and rough set methods are integrated with each other to obtain more consistent solutions in real-life problems. Finally, the MCDM method based on the IF-TOPSIS principle has been applied. The investment cost, operational cost, maintenance cost, green gas effect, energy consumption effect, thermal comfort, air quality, noise, and smog are considered as performance criteria for nine different HVAC systems.

Rest of the paper is structured as follows. Section 2 includes a brief review of the relevant literature. In Section 3, a brief definition of IF-TOPSIS and the covering-based generalized IF-rough set models are given. Section 4 presents IF-TOPSIS and covering-based generalized IF-rough set model for selecting HVAC system. Finally, a conclusion is presented in Section 5.

2. Material and Method

2.1. IF sets

Attonasov [20] defines the degree of the membership $\mu_A(x)$, degree of non-membership $\nu_A(x)$ as well as degree of indeterminacy $\pi_A(x)$ in IF sets. In IF set theory, sum of $\mu_A(x)$ and $\nu_A(x)$ is smaller than 1. If sum of $\mu_A(x)$ and $\nu_A(x)$ equals 1, IF set returns fuzzy set. The lower value of $\mu_A(x)$, the more accurate the as relative crisp information about the x element. Assume that X is a non-empty set. An IF set in X is shown in equations (1), (2) and (3).

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle \mid x \in X \} \quad (1)$$

$$0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1 \quad (2)$$

$$\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x) \quad (3)$$

2.2. IF-neighborhood, IF-implicator, and IF-t norm

IF-neighborhood is a model which determines distances of alternatives for each criterion. Assume that $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ is an IF-covering set representing criteria; $U = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ is a set of alternatives, I is IF-implicator operator and $N^C(x_i)$ is IF-neighborhood of alternative i . $N^C(x_i)$ is shown with formula equation (4) in [21].

$$N^C(x_i)(x_j) = \bigwedge_{A \in C} I(A(x_i), A(x_j)) \quad i, j \in \{1, \dots, m\} \tag{4}$$

where N^C is reflective, T -transitive, serial, and IF-covering. $I(A(x_i), A(x_j)) = (\min(1 + \mu_{x_j} - \mu_{x_i}, 1 + v_{x_i} - v_{x_j}), \max(0, v_{x_j} - v_{x_i}))$, where I is IF-implicator operator. $T(A(x_i), A(x_j)) = (\max(0, \mu_{x_i} + \mu_{x_j} - 1), \min(1, v_{x_i} + v_{x_j}))$, where T is IF-t norm operator.

2.3. Lower and upper approximations for covering based IF-rough set models

Assume that C is IF-covering set, U is a non-empty universe, I is an implicator, and T is a t-norm. In [6, 7], two pair of covering-based generalized IF-rough approximations are defined as follows:

$$C_U(A)(x_i) = \bigvee_{x_j \in U} T \left(N^C(x_j)(x_i), \bigwedge_{x_k \in U} I(N^C(x_j)(x_k), A(x_k)) \right) \tag{5}$$

$$C_L(A)(x_i) = \bigwedge_{x_j \in U} I \left(N^C(x_j)(x_i), \bigvee_{x_k \in U} T(N^C(x_j)(x_k), A(x_k)) \right) \tag{6}$$

$$C'_L(A)(x_i) = \bigwedge_{x_j \in U} I \left(N^C(x_j)(x_i), \bigwedge_{x_k \in U} I(N^C(x_j)(x_k), A(x_k)) \right) \tag{7}$$

$$C'_U(A)(x_i) = \bigvee_{x_j \in U} T \left(N^C(x_j)(x_i), \bigvee_{x_k \in U} T(N^C(x_j)(x_k), A(x_k)) \right) \tag{8}$$

2.4. IF-TOPSIS decision making approach

After C IF-covering set is built, $N^C(x_i)$ is calculated for each alternative $x_i \in U$. According to IF-covering C set, positive ideal solution A^+ and negative ideal solution A^- required for TOPSIS approach are calculated. The formulation for A^+ and A^- are shown in equation (9) and (10), respectively.

$$\mu_{A^+}(x_i), v_{A^+}(x_i) = \max_{j \in C} (\mu_{C_j}(x_i)), \min_{j \in C} (v_{C_j}(x_i)) \tag{9}$$

$$\mu_{A^-}(x_i), v_{A^-}(x_i) = \min_{j \in C} (\mu_{C_j}(x_i)), \max_{j \in C} (v_{C_j}(x_i)) \tag{10}$$

$C_L, C_U, C'_L,$ and C'_U are calculated by using A^+ and A^- . According to obtained lower and upper approximations, two ranking functions for each x_i using formula in equation (11), and (12) in [6, 7]. $(\mu(x_i), v(x_i))(+(\mu(x_j), v(x_j))) = \mu(x_i) + \mu(x_j) - \mu(x_i) * \mu(x_j), v(x_i) * v(x_j)$ is IF set summation formula, where i and $j \in \{1, \dots, m\}$.

$$S^-(x_i) = \alpha \left(\mathbf{L}(C_L(A^-)(x_i)(+)C_U(A^-)(x_i)) \right) + (1 - \alpha) \left(\mathbf{L}(C'_L(A^-)(x_i)(+)C'_U(A^-)(x_i)) \right) \tag{11}$$

$$S^+(x_i) = \alpha \left(\mathbf{L}(C_L(A^+)(x_i)(+)C_U(A^+)(x_i)) \right) + (1 - \alpha) \left(\mathbf{L}(C'_L(A^+)(x_i)(+)C'_U(A^+)(x_i)) \right) \tag{12}$$

where, α is a level adjustment value. $\mathbf{L}(A)(x_i) = \mu(x_i) + v(x_i) * \pi(x_i)$ is score function. Finally, relative closeness coefficient C^* is calculated by using the TOPSIS method principle for each alternative with equation (13).

$$C^* = \frac{S^-(x_i)}{S^-(x_i) + S^+(x_i)} \tag{13}$$

3. Results

In this study, it is aimed to determine the most suitable system among nine different HVAC systems for a public building HVAC systems have four basic assessment factors as mentioned Section 1. According to these factors, nine criteria were determined. These are investment cost, operational cost, maintenance cost, green gas effect, energy consume effect, thermal comfort, air quality, noise, and smog labeled $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9$, respectively. Since the calculations are quite complicated, the solution structure was coded in MATLAB®. Also, a framework was formed over MATLAB in order to apply the software to different problems. The results were easily obtained. Linguistic terms and their IF degrees in terms of criteria for each HVAC system are shown in Table 1.

Table 1. Linguistic terms to evaluate the alternatives

Linguistic Terms	IF degrees		
	μ	ν	π
Excellent	1	0	0
Quite good	0.75	0.1	0.15
Good	0.6	0.25	0.15
Medium	0.5	0.5	0
Bad	0.25	0.6	0.15
Quite bad	0.1	0.75	0.15

In order to properly operate the decision-making process, the decision matrix must be carefully created by the decision-makers. IF-decision matrix determined according to linguistic terms is shown in Table 2.

Table 2. IF-decision matrix

HVAC	Assessment Criteria								
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
X_1	0.6;0.25; 0.15	0.75;0.1; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.5;0.5;0	1;0;0	0.5;0.5;0	0.5;0.5;0	0.25;0.6; 0.15	0.75;0.1; 0.15
X_2	0.5;0.5;0	1;0;0	0.6;0.25; 0.15	0.6;0.25; 0.15	0.6;0.25; 0.15	0.6;0.25; 0.15	0.5;0.5;0	0.5;0.5;0	0.6;0.25; 0.15
X_3	0.75;0.1; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.5;0.5;0	0.5;0.5;0	0.75;0.1; 0.15	0.25;0.6; 0.15	0.25;0.6; 0.15	0.5;0.5;0	1;0;0
X_4	0.1;0.75; 0.15	0.75;0.1; 0.15	0.6;0.25; 0.15	0.75;0.1; 0.15	0.75;0.1; 0.15	0.6;0.25; 0.15	1;0;0	0.75;0.1; 0.15	0.25;0.6; 0.15
X_5	0.5;0.5;0	0.25;0.6; 0.15	0.5;0.5;0	0.5;0.5;0	0.75;0.1; 0.15	0.75;0.1; 0.15	0.6;0.25; 0.15	1;0;0	0.75;0.1; 0.15
X_6	0.25;0.6; 0.15	0.6;0.25; 0.15	1;0;0	0.25;0.6; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.6;0.25; 0.15	0.6;0.25; 0.15	0.75;0.1; 0.15	0.75;0.1; 0.15
X_7	1;0;0	0.25;0.6; 0.15	0.5;0.5;0	0.1;0.75; 0.15	0.5;0.5;0	0.5;0.5;0	0.5;0.5;0	0.25;0.6; 0.15	0.6;0.25; 0.15
X_8	0.1;0.75; 0.15	0.5;0.5;0	0.6;0.25; 0.15	0.75;0.1; 0.15	0.75;0.1; 0.15	1;0;0	0.75;0.1; 0.15	0.6;0.25; 0.15	0.75;0.1; 0.15
X_9	0.25;0.6;0 .15	0.75;0.1;0 .15	0.6;0.25;0 .15	1;0;0	0.5;0.5;0	0.6;0.25;0 .15	0.75;0.1;0 .15	0.6;0.25;0 .15	0.6;0.25; 0.15

As shown in Table 2, at least one criterion equals to the value (1; 0; 0) for each alternative. Therefore, decision matrix is an IF-covering set. That is, the methodology mentioned in Section 3 is proper for this application. Firstly, IF-neighborhood $N^C(x_i)$ is calculated for each alternative x_i by using equation (4). IF-neighborhood results are obtained in Table 3.

Table 3. IF-neighborhood relations

Relation	HVAC Alternatives								
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
$N^C(x_1)$	1;0;0	0.6;0.25; 0.15	0.35;0.65; 0	0.5;0.5;0	0.5;0.5;0	0.1;0.75;0 .15	0.5;0.5;0	0.5;0.5;0	0.5;0.5;0
$N^C(x_2)$	0.5;0.5;0	1;0;0	0.1;0.75;0 .15	0.6;0.25;0 .15	0.25;0.65; 0.15	0.5;0.5;0	0.25;0.6;0 .15	0.5;0.5;0	0.75;0.25 ;0
$N^C(x_3)$	0.6;0.25; 0.15	0.6;0.4;0	1;0;0	0.35;0.65; 0	0.6;0.4;0	0.35;0.65; 0	0.6;0.4;0	0.35;0.65; 0	0.5;0.5;0
$N^C(x_4)$	0.5;0.5;0	0.85;0.15; 0	0.35;0.65; 0	1;0;0	0.5;0.5;0	0.35;0.65; 0	0.35;0.65; 0	0.6;0.4;0	0.6;0.4;0
$N^C(x_5)$	0.6;0.25;	0.85;0.15;	0.85;0.15;	0.6;0.25;0	1;0;0	0.35;0.65;	0.6;0.4;0	0.6;0.25;0	0.6;0.4;0

	0.15	0	0	.15		0		.15	
$N^c(X_6)$	0.1;0.75; 0.15	0.6;0.25; 0.15	0.5;0.5;0	0.6;0.25;0 .15	0.5;0.5;0	1;0;0	0.5;0.5;0	0.6;0.25;0 .15	0.6;0.25; 0.15
$N^c(X_7)$	0.6;0.25; 0.15	0.5;0.5;0	0.75;0.15; 0.1	0.1;0.75;0 .15	0.5;0.5;0	0.25;0.6;0 .15	1;0;0	0.1;0.75;0 .15	0.25;0.6; 0.15
$N^c(X_8)$	0.5;0.5;0	0.85;0.15; 0	0.6;0.4;0	1;0;0	0.6;0.4;0	0.35;0.65; 0	0.35;0.65; 0	1;0;0	0.6;0.4;0
$N^c(X_9)$	0.5;0.5;0	0.6;0.25; 0.15	0.35;0.65; 0	0.75;0.15; 0.1	0.5;0.5;0	0.25;0.6;0 .15	0.1;0.7;0. 15	0.6;0.4;0	1;0;0

After the IF-neighborhood relations are calculated with equation (4), positive ideal solution A^+ and negative ideal solution A^- are computed. For both the ideal solutions, each lower and upper approximation is calculated by using equations (5), (6), (7), and (8). It is obvious that A^+ is (1; 0; 0) for each alternative x_i . Therefore, all approximations equal to U for A^+ . The results of the ideal solutions and each A^- approximation values are shown in Table 4.

Table 4. Ideal solutions and approximations

Relation	HVAC Alternatives								
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
A^+	1;0;0	1;0;0	1;0;0	1;0;0	1;0;0	1;0;0	1;0;0	1;0;0	1;0;0
A^-	0.1;0.75 ; 0.15	0.5;0.5;0	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.25;0.6; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.1	0.1;0.75; 0.15	0.25;0.6; 0.15
$C_L(A^-)(x_i)$	0.1;0.75 ; 0.15	0.5;0.5;0	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.25;0.6; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.25;0.6;0 .15
$C_U(A^-)(x_i)$	0.1;0.75 ; 0.15	0.5;0.5;0	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.25;0.6; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.25;0.6;0 .15
$C_L(A^-)(x_i)$	0.1;0.75 ; 0.15	0.5;0.5;0	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.25;0.6; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.25;0.6;0 .15
$C_L(A^-)(x_i)$	0.1;0.75 ;0.15	0.5;0.5;0	0.1;0.75; 0.15	0.35;0.65; 0	0.35;0.65; 0	0.1;0.75; 0.15	0.1;0.75; 0.15	0.35;0.6 5;0	0.25;0.6;0 .15

According to equations (11) and (12), two ranking functions S^+ and S^- are calculated by using lower and upper approximation values. Here, α is a level adjustment value, and is assumed as 0.5. Then, the values of the S^+ , S^- , and closeness function C^* are calculated in Table 5.

Table 5. Ranking values and closeness coefficient

Relation	HVAC Alternatives								
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
S^-	0.3292	0.6987	0.3489	0.4625	0.5584	0.3292	0.3292	0.4625	0.5104
S^+	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C^*	0.2477	0.4113	0.2587	0.3163	0.3583	0.2477	0.2477	0.3163	0.3379

Finally, alternative having the highest closeness coefficient is the best choice, and alternative having the lowest closeness is the worst choice. According to the value of C^* , nine HVAC systems are ranked as follows: $X_2 > X_5 > X_9 > X_8 \approx X_4 > X_3 > X_7 \approx X_6 \approx X_1$.

If traditional IF methods are used for the problems with an IF-covering structure, the effective results may not be obtained. Many conventional IF operators are available in the literature. One of the most widely used operators is fuzzy weighted averaging (IFWA) operator proposed by Xu [21] in equation (14).

$$X_i = \left[1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{ij})^{\alpha_j}; \prod_{j=1}^n (v_{ij})^{\alpha_j}; \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{ij})^{\alpha_j} - \prod_{j=1}^n (v_{ij})^{\alpha_j} \right] \quad (14)$$

where, x_i is IF value of alternative i , n is number of the performance criteria ($j = 1, \dots, n$) and α_i is the weight of each criterion for IFWA operator.

Assume that the weights equal to each other for each criterion in Table 2. Once the IFWA operator is applied for IF matrix in table 2, we obtain following results for $X_1, (j = 1, \dots, 9)$:

$$X_1(\mu_{1j}) = 1 - (1 - 0.6)^{0.111}(1 - 0.75)^{0.111}(1 - 0.1)^{0.111}(1 - 0.5)^{0.111}(1 - 1)^{0.111}(1 - 0.5)^{0.111}(1 - 0.5)^{0.111}(1 - 0.25)^{0.111}(1 - 0.75)^{0.111} = 1.$$

$$X_1(v_{1j}) = (0.25)^{0.111}(0.1)^{0.111}(0.75)^{0.111}(0.5)^{0.111}(0)^{0.111}(0.5)^{0.111}(0.5)^{0.111}(0.6)^{0.111} = 0.$$

$$X_1(\pi_{1j}) = (1 - 0.6)^{0.111}(1 - 0.75)^{0.111}(1 - 0.1)^{0.111}(1 - 0.5)^{0.111}(1 - 1)^{0.111}(1 - 0.5)^{0.111}(1 - 0.5)^{0.111}(1 - 0.25)^{0.111}(1 - 0.75)^{0.111} - (0.25)^{0.111}(0.1)^{0.111}(0.75)^{0.111}(0.5)^{0.111}(0)^{0.111}(0.5)^{0.111}(0.5)^{0.111}(0.6)^{0.111} = 0.$$

If the same computation is applied for other alternatives, we obtain the same results. That is, scores of all alternatives equal to each other such as $X_2 \approx X_5 \approx X_9 \approx X_8 \approx X_4 \approx X_3 \approx X_7 \approx X_6 \approx X_1$. The IFWA operator cannot make a ranking. Therefore, we cannot choose the most suitable alternative for problems with the IF-covering structure.

4. Discussion and Conclusion

It is very important that the building provides comfort to people in terms of HVAC systems. In addition, HVAC systems should not cause problems in the climate and environment. Since some of the criteria for HVAC systems are described as linguistic, it is not possible to evaluate the systems with traditional methods using crisp values. Moreover, even traditional IF operators may not provide an effective solution for the problems described as linguistic such as IF-covering. In this study, covering-based generalized IF-rough set model was utilized for selecting HVAC system to be used in a public building. Also, According to IF-decision matrix generated, IF-neighborhood was calculated. Approximation operators in rough set theory adapted covering-based IF structure. Through IF-TOPSIS principle and using approximation values, closeness coefficients were calculated for each HVAC alternative system. HVAC systems were ranked according to the results and the best solution has been determined. If there is the IF-covering structure under the linguistic expressions, the proposed structure offers appropriate solutions. Although the IFWA operator, which is one of the IF methods for certain alternatives, cannot find a solution, the proposed covering-based generalized IF-rough set model provides a solution. According to the solution obtained, alternative 2 is obtained as the best option. Alternatives 1, 6, and 7 are determined as the worst options. In future studies, the scope of the study can be expanded by making comparisons with different methods. In addition, the proposed approach can be applied to different problems in construction, industry, economics, social, and management branches.

References

- [1] Bayraktar, M. 2015. A methodology for energy optimization of buildings considering simultaneously building envelope, HVAC, and renewable system parameters. İstanbul University, Institute of Science and Technology, Ph. D. Thesis, 388pp, İstanbul.
- [2] Burak, E., Boran, F. E., Kurt, M. 2015. Ergonomic Product Selection Using Intuitionistic Fuzzy TOPSIS Method. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 3(3), 433-440.
- [3] Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- [4] Atanassov, K. T. 1986. Intuitionistic Fuzzy Sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20(1), 87-96.
- [5] Xu, Z. 2007. Some Similarity Measures of Intuitionistic Fuzzy Sets and Their Applications to Multiple Attribute Decision-making. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 6(2), 109-121.
- [6] Zhang, L., Zhan, J., Xu, Z. 2019. Covering-based Generalized IF Rough Sets with Applications to Multi-attribute Decision-making. *Information Sciences*, 478, 275-302.
- [7] Dogson, J. S., Spackman, M., Pearman, A., Philips, L. D. 2009. *Multi-criteria Analysis: A Manual*. Department for Communities and Local Government, London, 165pp.
- [8] Huang, J. P., Poh, K. L., Ang, B. W. 1995. Decision Analysis in Energy and Environmental Modeling. *Energy*, 20(9), 843-855.
- [9] Balcomb, J. D., Kurtner, A. 2000. Multi-criteria Decision-making Process for Buildings: In Collection of Technical Papers. IEEE 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 24-28 July, Las Vegas, 528-535.
- [10] De Wit, S., Augenbroe, G. 2002. Analysis of Uncertainty in Building Design Evaluations and Its Implications. *Energy and Buildings*, 34(9), 951-958.
- [11] Wang, J. J., Zhang, C. F., Jing, Y. Y., Zheng, G. Z. 2008. Using The Fuzzy Multi-criteria Model to Select The Optimal Cool Storage System for Air Conditioning. *Energy and Buildings*, 40(11), 2059-2066.

- [12] Hopfe, C. J. 2009. Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization. Eindhoven University, Ph. D. Thesis, 215pp, Eindhoven.
- [13] Kim, S. H., Aughenbroe, G. 2009. Ventilation Operation in Hospital Isolation Room: A Multi-criterion Assessment Considering Organizational Behavior in Building Simulation. 11th International IBPSA Conference, 27-30 July, Glasgow, 1322-1329.
- [14] Zhang, C., Hu, S. 2010. Fuzzy Multi-Criteria Decision-making for Selection of Schemes on Cooling and Heating Source. IEEE Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, August, (2), 876-878.
- [15] Kim, Y. J., Ahn, K. U., Park, C. S. 2014. Decision Making of HVAC System Using Bayesian Markov Chain Monte Carlo Method. Energy and Buildings, 72, 112-121.
- [16] Huang, P., Huang, G., Wang, Y. 2015. HVAC System Design under Peak Load Prediction Uncertainty Using Multi-criterion Decision-making Technique. Energy and Buildings, 91, 26-36.
- [17] Baki, R. 2021. An Integrated, Multi-criteria Approach Based on Environmental, Economic, Social, and Competency Criteria for Supplier Selection. RAIRO: Recherche Opérationnelle, 55, 1487.
- [18] Poongavanam, G., Sivalingam, V., Prabakaran, R., Salman, M., Kim, S. C. 2021. Selection of The Best Refrigerant for Replacing R134a in Automobile Air Conditioning System Using Different MCDM Methods: A comparative Study. Case Studies in Thermal Engineering, 27, 101344.
- [19] Wan, T., Bai, Y., Wu, L., He, Y. 2021. Multi-criteria Decision-making of Integrating Thermal Comfort with Energy Utilization Coefficient under Different Air Supply Conditions Based on Human Factors and 13-value Thermal Comfort Scale. Journal of Building Engineering, 39, 102249.
- [20] Attanasov, K. T. 1999. Intuitionistic Fuzzy Sets. Physica Publisher, Heidelberg, 137pp.
- [21] Xu, Z. H. 2007. Intuitionistic Fuzzy Aggregation Operators. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 15(6), 1179-1187.

iSeg-WNet: Volumetric Segmentation of Infant Brain MRI Images

Gaffari Çelik*¹

*¹ Agri Ibrahim Cecen University Vocational School Department of Computer Technology, AĞRI

(Alınış / Received: 06.04.2022, Kabul / Accepted: 25.08.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Deep Learning,
CNN,
Segmentation,
Dice Loss,
3D MRI Segmentation,
iseg-2019,
iseg-2017

Abstract: Examination of infant brain development is extremely important in terms of early diagnosis of possible brain dysfunctions. Brain MRI structures are usually studied by segmentation into white matter (WM), gray matter (GM) and cerebrospinal fluid (CSF) tissues. Low-density contrast between tissues in infant brains complicates the segmentation process. It is seen that the segmentation process is done very well with the Deep Learning architectures that have been developed recently. In this study, an architecture called Deep Learning-based iSeg-WNet is proposed for segmentation of infant brain MRI images. Appropriate hyperparameters were determined by different studies and the performances of different architectures were compared. Performance comparison was made according to Dice metric. In experimental studies, it has been observed that the use of MRI images in T1w and T2w images together increases the segmentation performance. At the same time, high performance was obtained by using Dice Loss as a cost function and MinMax normalization as a data normalization process. When the segmentation performances of different architectures are examined, it is seen that the proposed architecture segments CSF (%91.8), GM (%89) and WM (%86) tissues with the highest success. The proposed architecture is available at <https://github.com/GaffariCelik/iSeg-WNet>.

iSeg-WNet: Bebek Beyin MRI Görüntülerinin Volumetrik Bölütlemesi

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme,
CNN,
Bölütleme,
Dice Loss,
3D MRI Bölütleme,
iseg-2019,
iseg-2017

Öz: Bebek beyin gelişiminin incelenmesi, doğabilecek beyin fonksiyon bozuklarının erken teşhisi açısından son derece önemlidir. Beyin MRI yapıları genellikle beyaz madde (WM), gri madde (GM) ve beyin omurilik sıvısı (CSF) dokularına bölütlenmesi ile işlemi ile incelenmektedir. Bebek beyinlerinde dokular arasındaki düşük yoğunluklu kontrast bölütleme işlemi zorlaştırmaktadır. Son dönemlerde geliştirilen Derin Öğrenme mimarileri ile bölütleme işleminin son derece çok iyi yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada bebek beyin MRI görüntülerinin bölütlenmesi için Derin Öğrenme tabanlı iSeg-WNet adıyla bir mimari önerilmiştir. Farklı çalışmalar ile uygun hiperparametreler belirlenmiş ve farklı mimarilerin performansları karşılaştırılmıştır. Performans karşılaştırılması Dice metriğine göre yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, T1w ve T2w çekimlerdeki MRI görüntülerinin beraber kullanılması bölütleme performansının artırdığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda maliyet fonksiyonu olarak Dice Loss ve veri normalizasyon işlemi olarak da MinMax normalizasyonun kullanılması ile yüksek başarı elde edilmiştir. Farklı mimarilerin bölütleme performansları incelendiğinde, önerilen mimari ile CSF(%91.8), GM (%89) ve WM (%86) dokularını en yüksek başarı ile bölütlediği görülmüştür. Önerilen mimariye <https://github.com/GaffariCelik/iSeg-WNet> adresinden erişilebilir.

*Corresponding Author, email: gcelik2014@gmail.com

1. Introduction

The advancement of brain imaging techniques has played an important role in the study of brain anatomy and functions. Magnetic Resonance Imaging (MRI) technique is widely used to characterize disorders in brain structure and to extract structural information from various contrast images. Brain MRI segmentation plays an important role in analyzing changes in brain structures that occur over time. Brain MRI segmentation is very important in the pre-diagnosis of Alzheimer's, Parkinson's, Schizophrenia Multiple Sclerosis and other brain diseases, and the detection of diseased tissues in the post-diagnostic stages [1]. However, brain MRI segmentation is a difficult task due to the presence of noise, density irregularity, movement, and partial volume effects during image acquisition [2].

Thanks to the advances in MRI imaging of the infant brain anatomy, it was ensured that a healthy image was obtained with the obtained high-resolution images. MRI images can be viewed in different scans such as T1-weighted (T1w), T2-weighted (T2w), resting state functional MRI (rsfMRI), and diffusion-weighted MRI (dMRI). MRI images taken in different modalities offer important opportunities in the study of brain anatomy and analysis of early postnatal brain development. There are significant differences in MRI images according to age groups. This difference is clearly understood in Figure 1. Baby brain images are more difficult to process and analyze than adult brains. There are great differences in a baby's brain structure, brain size, density changes, intra-tissue inhomogeneity, tissue contrast and regionally different tissue images depending on age [3-6]. However, in infants' brain MRIs, increased noise, low contrast between tissues, and continued white matter myelination lead to misclassification of brain tissues [7].

In examining both normal and abnormal early brain development of infants, it is important to examine brain MRIs by segmenting white matter (WM), gray matter (GM) and cerebrospinal fluid (CSF) tissues [8]. Early examination of brain growth patterns and morphological changes in neurologically developmental disorders, accurate segmentation of MRI images into WM, GM and CSF tissues is crucial [9]. With segmentation, it is aimed to segment brain tissues. This process is performed manually by clinical experts. However, this process, which is an extremely sensitive issue, is time consuming, subject to intra- or inter-observational variables and requires specialist physicians. Consistent results have been obtained with automatic segmentation methods developed using deep learning methods recently. This is considered as alternative methods for manual partitioning problems [7,10].

Deep learning has a deep network architecture consisting of many layers, unlike neural networks that can have a single layer. Having such a deep network architecture enables a detailed feature map to be extracted from the input data by self-learning, as opposed to manual feature extraction from input data in machine learning algorithms. Deep learning performs impressively on large amounts of data. In addition, this success has been greatly contributed by the rapid development of graphics processing units (GPUs). Due to rapid advances in the computing power of GPUs, it has enabled the rapid development of complex deep learning models [6]. Deep learning, image resolution [11], brain MRI segmentation [10, 12, 13], image registration [14], generating images from EEG signal [15], mammographic lesions detection [16], lung segmentation [17, 18], classification of white blood cells [19], brain disease classification [20], detection of arrhythmia [21-23] and detecting pneumonia from chest X-ray images [24], determination of basic physical movements of people [25], Classification of Breast Cancer [26] and breast lymph node segmentation [27].

Our main contributions in this study can be summarized as follows:

- Development of a new deep learning-based architecture that segments 3D Brain MRIs
- Segmentation of pediatric brain MRIs using different datasets
- Segmentation of MRI images in different modalities (T1w,T2w) and examination of their success
- Performance evaluation of the proposed architecture in different Hyperparameters
- Evaluation of 3D MRI segmentation performances of different architectures

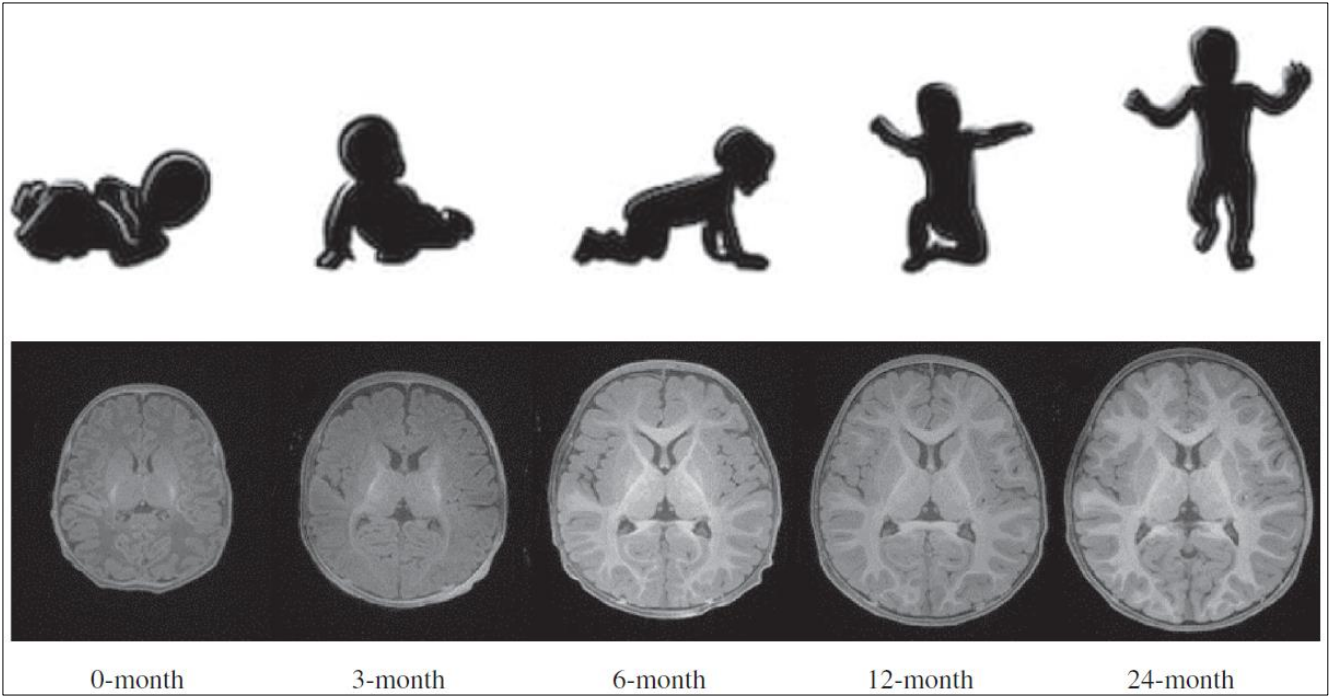


Figure 1. Baby brain MRI sample images taken between 0-24 months at T1w weight [6].

2. Material and Method

In this study, two datasets, iseg-2017 [9] and iseg-2019 [28], were used for segmentation of child brain MRI images. A CNN-based architecture is proposed for segmentation of MRI images.

2.1. Material

iseg-2017 [9] and iseg-2019 [28] datasets were published by the MICCAI (Medical Image Computing and Computer-Aided Intervention) community to conduct research on brain tissue segmentation, which includes MRI images of the 6-month-old infant brain. The characteristics of the datasets are presented in Table 1. The datasets consist of 10 MRIs taken in the T1w and T2w modalities. Each data sample has dimensions of $144 \times 192 \times 256$ and a resolution of $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ mm³. In addition, each MRI is supplied with masks (groundTrue, GT) labeled to three brain tissues, GM, WM, and CSF, to guide the learning of algorithms during the training phase. In the iseg-2017 dataset, the background (BGR) is labeled 0, the CSF region 10, the GM region 150, and the WM region 250. In the iseg-2019 dataset, it is labeled as BGR 0, CSF region 1, GM region 2, and WM region 3.

Table 1. Properties of data sets

Data Sets	MRI dimension	Voxel size (mm ³)	Modalities	Number of MRI	Labelling
iseg-2017	144x192x256	1.0x1.0x1.0	T1w, T2w	10	BGR:0, CSF:10, GM:150, WM:250
iseg-2019	144x192x256	1.0x1.0x1.0	T1w, T2w	10	BGR:0, CSF:1, GM:2, WM:3

Table 1. shows that the labeling of brain regions (GT) of the data sets is different. GTs are relabeled according to Eq. 1.

$$GT_{iseg-2017}^{new}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } GT_{iseg-2017}(x) == 10 \\ 2 & \text{else if } GT_{iseg-2017}(x) == 150 \\ 3 & \text{else if } GT_{iseg-2017}(x) == 250 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

Figure 2 shows the modalities of an image taken from an exemplary MRI and the segmented GT. In GT, red indicates CSF tissue, blue indicates WM tissue, and green indicates GM tissue. Datasets are available at <https://iseg2017.web.unc.edu/> and <https://iseg2019.web.unc.edu/>.

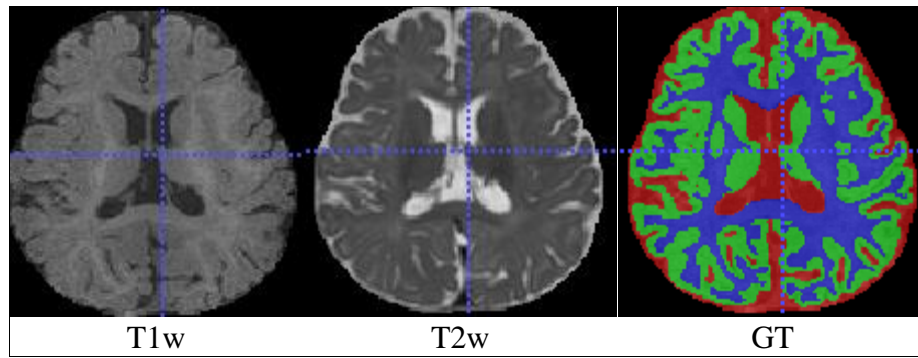


Figure 2. T1w, T2w modalities and mask(GT) of an MRI image. Red indicates CSF tissue, blue indicates WM tissue, and green GM tissue.

2.2 Method

Although Machine learning has shown high success in various fields, its performance is largely dependent on the features extracted from the training datasets, which is seen as a significant disadvantage. It has received a lot of attention recently that deep learning architectures automatically extract the best features from the raw input data with the help of convolutional neural network (CNN) without any preprocessing. CNNs form the basic building block of Deep learning algorithms [29, 30]. CNNs architectures are considered feedforward networks consisting of convolution layers, pool layers, and fully connected layers, as shown in Figure 3. These networks provide information flow from the input layer to the output layer. While the convolution and pooling layers feature mapping from the input data, the last fully connected layer is fed in a coordinated manner by the previous fully connected layers, giving the information of each class [31].

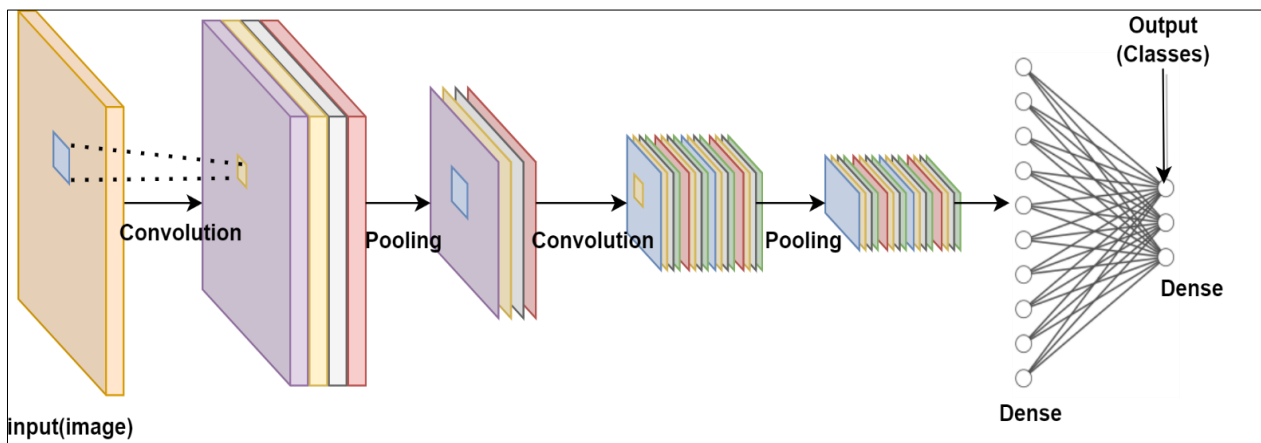


Figure 3. Basic lines of CNN architecture

In this study, a CNN-based architecture is proposed that enables segmentation of infant brain MRI images. This architecture, called iSeg-WNet, is shown in Figure 4. The architecture consists of input, encoder, bottleneck, decoder and output stages. In the entry phase, MRIs in T1w and T2w modalities are given as input. After the input data is passed through the encoder, bottleneck and decoder processes, respectively, the same processes are repeated and given to the output unit.

In the encoder part, convolution, normalization, activation and refutation processes were applied gradually. Except for the last stage, decay was used after the activation process in all the other stages. In the first and second stages, the 3D Convolution process with stride 2 and kernel size 3 was used. After the convolution process, instance normalization [32], Leaky ReLU activation function and dropout with a ratio of 0.2 were used, respectively. At each stage, provided that the previous operations and parameters are kept constant, only the stride value is renewed in the 3D convolution process by giving 1 to it. In the last stage, the kernel ratio value of 5 is given in the 3D convolution process. The other processes were repeated and connected to the Bottleneck section. In the encoder section, the initial filter number was given 64 and increased 2 times at each stage. The feature map was expanded with the progressively increasing number of filters. In addition, with the stride parameter, the data size is reduced and unnecessary features are eliminated.

In the bottleneck section that combines the encoder and decoder, the number of filters is 256 and the kernel size is 5, and 3D convolution process is applied. After the convolution process, the result obtained by applying the

normalization and activation process is combined with the result of the initial convolution process. The same operations were repeated four times and connected to the decoder section.

With the Conv3DTranspose operation in the decoder section, both the convolution operation and the data size are gradually enlarged. After the Conv3DTranspose process, the results obtained by applying normalization and activation processes are combined with the result at the same stage in the Encoder section. In this way, it is ensured that the features are reused. After the assembly stage, the dropout process was carried out. At the same stage, provided that the number of filters remains the same, 3D convolution, normalization, activation and decay processes are applied. These processes were repeated by gradually reducing the number of filters by two times. Encoder, bottleneck and decoder sections were repeated for the second time and connected to the output section. After the Conv3DTranspose process in the output section, the segmentation of the brain tissue sections was performed with the softmax activation function. Dice Loss cost function was used for the training of the architecture [33].

$$L_{Dice} = \frac{2|X \cap Y|}{|X| + |Y|} \quad (2)$$

Here, X and Y represent GT and segmentation result information.

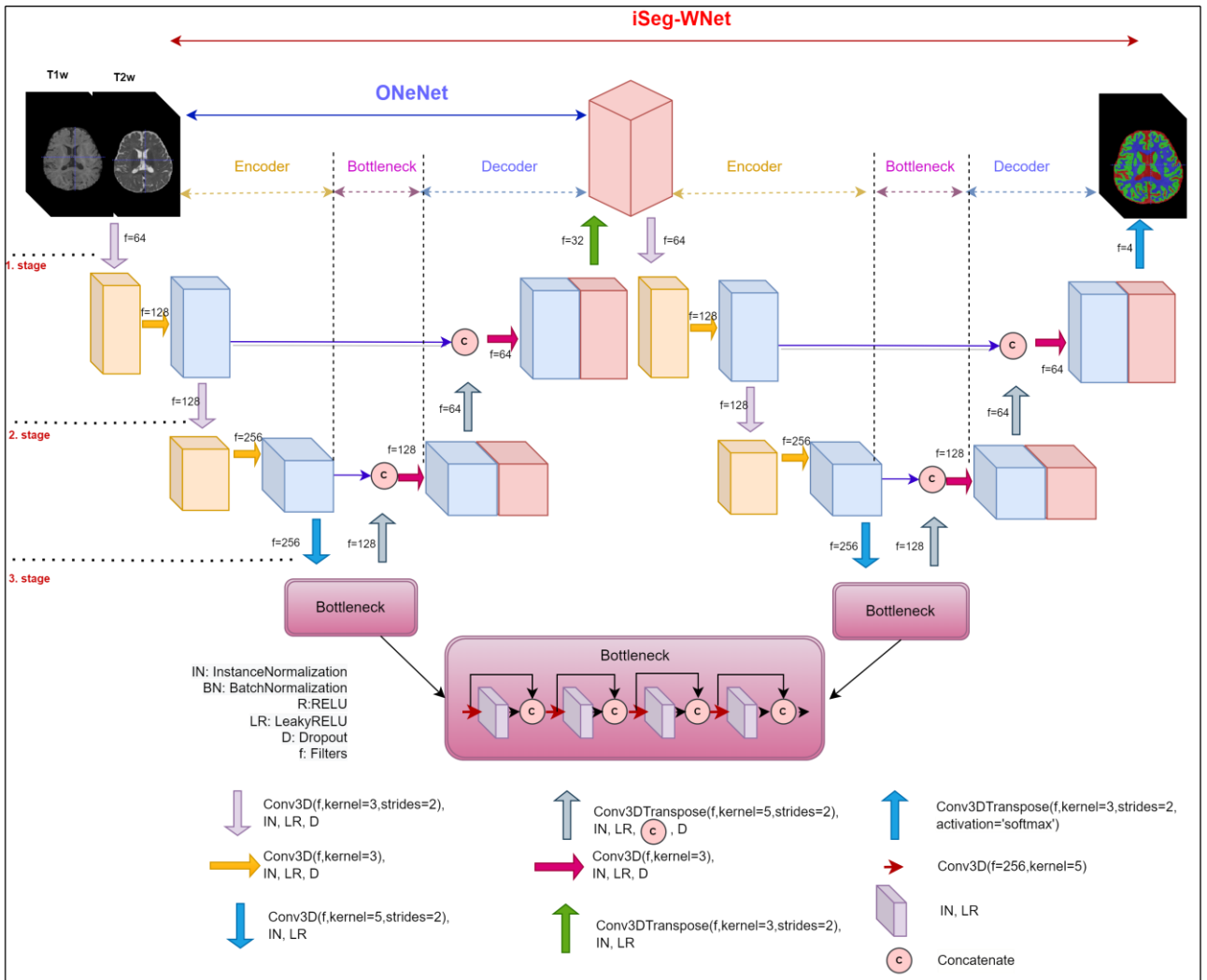


Figure 4. iSeg-WNet architecture

OneNet architecture has an architecture similar to UNet architecture. The OneNet architecture is the first part of the iSeg-WNet architecture, as shown in Figure 4. Only in the last layer, the number of filters is 4 and the softmax optimization function is used. Softmax activation function is expressed mathematically as in Eq. 3 [34]:

$$Z^k = \frac{e^{x^k}}{\sum_{i=1}^n e^{x^i}} \quad (3)$$

Here, x and n represent the input vector and the number of classes, respectively. Up to $k=1 \dots n$ and Z represents the output vector. The sum of the values of Z is 1.

3. Results

In this section, different studies have been carried out using the iSeg-WNet architecture for segmentation of child brain MRIs. First of all, a study was conducted according to the different modalities in the datasets. The goal here is to find the appropriate modality for appropriate tissue segmentation. In the second study, a study was carried out according to the loss functions in order to increase the segmentation performance. Thirdly, performance evaluation was made according to different normalization processes. Finally, after the appropriate parameters were determined, the successes of different architectures were evaluated.

The most widely used Dice metric in the literature was used to evaluate the performances of the studies. The Dice metric is given in Equation 2. In the studies, 80% of the data set is reserved for training and 20% for testing. An out-of-memory error occurs when training architectures without any changes in MRI dimensions during the training phase. To solve this problem, MRIs are cropped in 128x144x128 size and given as an input to architectures, provided that they remain within the brain region. The Adam (Learning_rate=0.0001) optimization function is used as the optimization function in the architectures. In each work, Architectures 180 min. has been trained. Weights were recorded every 60 minutes and their performance was observed.

In the first application, it was made on how MRIs taken in different modalities affect segmentation performance. As an introduction to the iSeg-WNet architecture, T1w, then T2w, and finally both modalities were given to the architecture network together and trained separately. In this application, categorical crossentropy is used as a cost function. The results of the first application to select the best modality as data input are given in Table 2. When the results are examined, it is seen that the highest performance is achieved when T1w and T2w modalities are given together as an introduction to architecture. We can say that a high performance has been achieved with the T1w weight. A lower performance was obtained with the T2w modality. Categorical crossentropy can be expressed as [35]:

$$L_{CE} = \sum_{i=1}^c y_{true} \log(y_{pre}) \quad (4)$$

Here $y_{pred} \in (0, 1)$, i . for example the forecast distribution and $y_{true} \in (0, 1)$, i . represents the true distribution of the sample.

Table 2. Performance evaluation according to modalities in different modalities using the categorical crossentropy cost function

Train(min.)	Mri	T1w				T2w				T1w+T2w			
		CSF	GM	WM	Avg	CSF	GM	WM	Avg	CSF	GM	WM	Mean
60	1	0,894	0,868	0,854	0,872	0,89	0,824	0,752	0,822	0,889	0,876	0,868	0,878
	2	0,894	0,868	0,854	0,872	0,83	0,79	0,776	0,799	0,914	0,879	0,825	0,873
	3	0,911	0,87	0,813	0,865	0,89	0,824	0,752	0,822	0,914	0,879	0,825	0,873
	4	0,912	0,87	0,813	0,865	0,83	0,79	0,776	0,799	0,889	0,876	0,868	0,878
	Mean	0,903	0,869	0,834	0,87	0,86	0,807	0,764	0,81	0,902	0,878	0,847	0,876
120	1	0,909	0,877	0,867	0,884	0,895	0,883	0,763	0,847	0,926	0,883	0,83	0,88
	2	0,923	0,874	0,816	0,871	0,938	0,796	0,786	0,84	0,926	0,883	0,83	0,88
	3	0,909	0,877	0,867	0,884	0,895	0,833	0,763	0,83	0,895	0,877	0,875	0,882
	4	0,923	0,874	0,816	0,871	0,838	0,796	0,786	0,807	0,895	0,877	0,875	0,882
	Mean	0,916	0,876	0,842	0,878	0,892	0,827	0,775	0,831	0,911	0,88	0,853	0,881
180	1	0,923	0,879	0,82	0,874	0,851	0,806	0,79	0,816	0,907	0,885	0,879	0,89
	2	0,923	0,879	0,82	0,874	0,899	0,84	0,766	0,835	0,931	0,886	0,833	0,883
	3	0,916	0,884	0,869	0,89	0,899	0,84	0,766	0,835	0,931	0,886	0,833	0,883
	4	0,916	0,884	0,869	0,89	0,851	0,806	0,79	0,816	0,907	0,885	0,879	0,89
	Mean	0,92	0,882	0,845	0,882	0,875	0,823	0,778	0,825	0,919	0,886	0,856	0,887

After determining the data in the appropriate modality in the first application, T1w and T2w modalities are given together as data input for the training of architectures and testing in other studies.

In the second application, the performance of the iSeg-WNet architecture was examined according to different cost functions and the results are presented in Table 3. Although the results are close to each other, it is seen that the highest performance is obtained with Dice Loss as a cost function.

Table 3. Performance evaluation according to loss functions

		Categorical_Loss				Dice_Loss_class_weight [33]				Dice_Loss			
Train(min.)	Mri	CSF	GM	WM	Mean	CSF	GM	WM	Mean	CSF	GM	WM	Mean
60	1	0,889	0,876	0,868	0,878	0,882	0,865	0,86	0,869	0,897	0,872	0,868	0,879
	2	0,914	0,879	0,825	0,873	0,904	0,866	0,816	0,862	0,915	0,874	0,823	0,871
	3	0,914	0,879	0,825	0,873	0,904	0,866	0,816	0,862	0,915	0,874	0,823	0,871
	4	0,889	0,876	0,868	0,878	0,882	0,865	0,86	0,869	0,89	0,872	0,868	0,877
	Mean	0,902	0,878	0,847	0,876	0,893	0,866	0,838	0,866	0,904	0,873	0,846	0,874
120	1	0,926	0,883	0,83	0,88	0,889	0,875	0,872	0,879	0,897	0,883	0,878	0,886
	2	0,926	0,883	0,83	0,88	0,889	0,875	0,872	0,879	0,897	0,883	0,878	0,886
	3	0,895	0,877	0,875	0,882	0,918	0,878	0,827	0,874	0,926	0,885	0,831	0,881
	4	0,895	0,877	0,875	0,882	0,918	0,878	0,827	0,874	0,926	0,885	0,831	0,881
	Mean	0,911	0,88	0,853	0,881	0,904	0,877	0,85	0,877	0,912	0,884	0,855	0,884
180	1	0,907	0,885	0,879	0,89	0,893	0,881	0,878	0,884	0,906	0,887	0,88	0,891
	2	0,931	0,886	0,833	0,883	0,919	0,883	0,831	0,878	0,906	0,887	0,88	0,891
	3	0,931	0,886	0,833	0,883	0,919	0,883	0,831	0,878	0,931	0,889	0,835	0,885
	4	0,907	0,885	0,879	0,89	0,893	0,881	0,878	0,884	0,931	0,889	0,835	0,885
	Mean	0,919	0,886	0,856	0,887	0,906	0,882	0,855	0,881	0,919	0,888	0,858	0,888

In the third application, performance evaluation was made according to the normalization processes in the data preprocessing stage. The proposed architecture is trained with different normalization processes and the results are given in Table 4. When the results are examined, it is seen that the highest MinMax normalization is achieved with a performance of 88.9%. Minmax normalization is given in Eq. 5, z-score normalization is given in Eq. 6 [36].

$$v' = \frac{v - \min_A}{\max_A - \min_A} \quad (5)$$

$$z = \frac{v - \mu_A}{\sigma_A} \quad (6)$$

Here, v' and z represent the normalized feature, and v represents the original feature. Expression A properties, \min_A is the smallest value of property A , \max_A is the largest value of property A ; μ_A indicates the mean and σ_A the standard deviation.

Table 4. Segmentation results according to different normalization processes in the data preprocessing stage

		Notnormalization				MinMaxNorm.				Zscore_Norm.			
Train(min.)	Mri	CSF	GM	WM	Mean	CSF	GM	WM	Mean	CSF	GM	WM	Mean
60	1	0,897	0,872	0,868	0,879	0,891	0,877	0,868	0,879	0,902	0,873	0,822	0,866
	2	0,915	0,874	0,823	0,871	0,891	0,877	0,868	0,879	0,89	0,882	0,875	0,882
	3	0,915	0,874	0,823	0,871	0,916	0,881	0,83	0,876	0,902	0,873	0,822	0,866
	4	0,89	0,872	0,868	0,877	0,916	0,881	0,83	0,876	0,89	0,882	0,875	0,882
	Mean	0,904	0,873	0,846	0,874	0,904	0,879	0,849	0,877	0,896	0,878	0,849	0,874
120	1	0,897	0,883	0,878	0,886	0,901	0,884	0,878	0,888	0,902	0,89	0,882	0,891
	2	0,897	0,883	0,878	0,886	0,901	0,884	0,878	0,888	0,917	0,883	0,829	0,876
	3	0,926	0,885	0,831	0,881	0,927	0,888	0,836	0,884	0,917	0,883	0,829	0,876
	4	0,926	0,885	0,831	0,881	0,927	0,888	0,836	0,884	0,902	0,89	0,882	0,891
	Mean	0,912	0,884	0,855	0,884	0,914	0,886	0,857	0,886	0,91	0,887	0,856	0,884
180	1	0,906	0,887	0,88	0,891	0,931	0,892	0,839	0,887	0,912	0,882	0,829	0,874
	2	0,906	0,887	0,88	0,891	0,904	0,888	0,881	0,891	0,912	0,882	0,829	0,874
	3	0,931	0,889	0,835	0,885	0,931	0,892	0,839	0,887	0,899	0,891	0,883	0,891
	4	0,931	0,889	0,835	0,885	0,904	0,888	0,881	0,891	0,899	0,891	0,883	0,891
	Mean	0,919	0,888	0,858	0,888	0,918	0,89	0,86	0,889	0,906	0,887	0,856	0,883

After obtaining the best hyperparameters that increase the success of the iSeg-WNet architecture, a new application has been carried out to compare the performances of different architectures. In this application, the performances of iSeg-WNet, OneNet and 3D-UNet [37] architectures were compared by keeping the hyperparameters the same, and the results are shown in Table 5. U-Net architecture consists of encoder,

bottleneck and decoder parts. The encoder section consists of 3 stages, and at each stage, convolution, RELU activation and subsampling (maxpooling) processes are applied. The bottleneck section acts as a transition that connects the Encoder and Decoder sections to each other. This is the section where the relu activation operations are applied after the convolution and each convolution operation. Another part, Decoder, has a 3-stage structure. At each stage, the oversampling, convolution and relu operation is applied after each convolution operation. At the same time, the feature outputs of the encoder section at each stage are transferred to the decoder section and reused.

When the results in Table 5 are examined, it is seen that the proposed architecture has a higher success rate of 88.9% compared to other architectures.

Table 5. Segmentation results of different architectures

		3D U-Net [37]				OneNET				Our(iSeg-WNet)			
Train(min.)	Mri	CSF	GM	WM	Mean	CSF	GM	WM	Mean	CSF	GM	WM	Mean
60	1	0,922	0,883	0,776	0,86	0,88	0,868	0,864	0,871	0,891	0,877	0,868	0,879
	2	0,897	0,862	0,826	0,862	0,908	0,874	0,822	0,868	0,891	0,877	0,868	0,879
	3	0,922	0,883	0,776	0,86	0,88	0,868	0,864	0,871	0,916	0,881	0,83	0,876
	4	0,922	0,883	0,776	0,86	0,908	0,874	0,822	0,868	0,916	0,881	0,83	0,876
	Mean	0,916	0,878	0,789	0,861	0,894	0,871	0,843	0,869	0,904	0,879	0,849	0,877
120	1	0,924	0,884	0,786	0,865	0,924	0,877	0,819	0,873	0,901	0,884	0,878	0,888
	2	0,894	0,86	0,832	0,862	0,898	0,869	0,858	0,875	0,901	0,884	0,878	0,888
	3	0,894	0,86	0,832	0,862	0,924	0,877	0,819	0,873	0,927	0,888	0,836	0,884
	4	0,924	0,884	0,786	0,865	0,898	0,869	0,858	0,875	0,927	0,888	0,836	0,884
	Mean	0,909	0,872	0,809	0,863	0,911	0,873	0,839	0,874	0,914	0,886	0,857	0,886
180	1	0,923	0,884	0,793	0,867	0,917	0,87	0,808	0,865	0,931	0,892	0,839	0,887
	2	0,923	0,884	0,793	0,867	0,897	0,86	0,844	0,867	0,904	0,888	0,881	0,891
	3	0,894	0,861	0,836	0,864	0,897	0,86	0,844	0,867	0,931	0,892	0,839	0,887
	4	0,894	0,861	0,836	0,864	0,917	0,87	0,808	0,865	0,904	0,888	0,881	0,891
	Mean	0,909	0,873	0,815	0,866	0,907	0,865	0,826	0,866	0,918	0,89	0,86	0,889

Example images obtained as a result of segmentation of an MRI by the architectures are given in Figure 5. The first line shows the whole brain, the second, third and fourth lines show the axial, coronal and sagittal images, respectively.

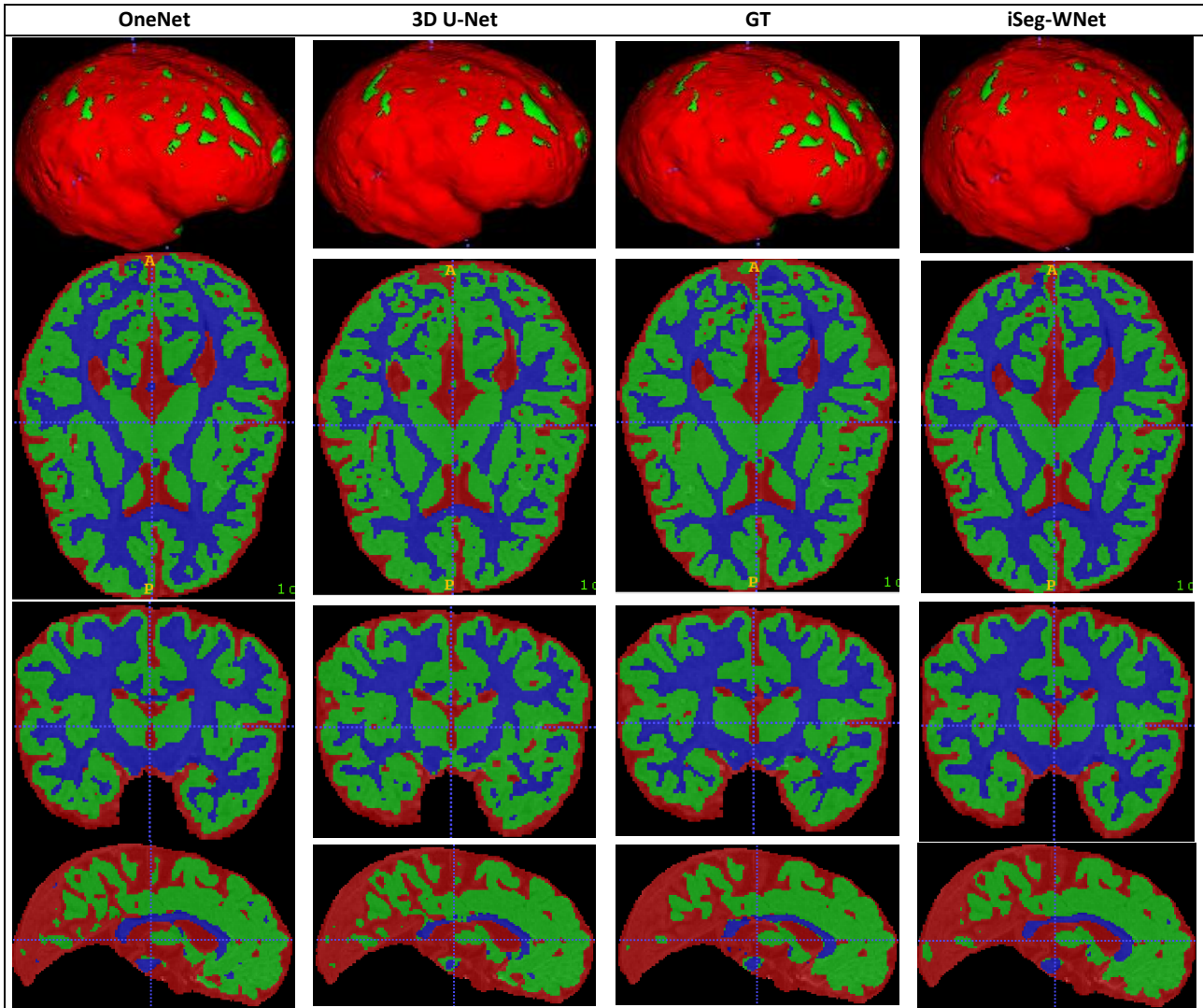


Figure 5. Sample images obtained as a result of segmentation of a sample MRI from the test dataset by architectures

4. Discussion and Conclusion

In the study of the development of infant brains, prevention of brain growth patterns and morphological changes in neurological developmental disorders is very important. In this respect, it is important to examine and correctly segment the brain tissues of the white matter (WM), gray matter (GM) and cerebrospinal fluid (CSF) brain regions. In this study, a deep learning-based architecture called iSeg-WNet is proposed, which provides segmentation of brain tissues using the iseg-2017 and iseg-2019 datasets containing 6-month 3D brain MRI images. The iSeg-WNet architecture is formed by repeating these structures based on Encoder, Bottleneck and Decoder structures twice.

Different experimental studies have been carried out with the proposed architecture and appropriate hyperparameters have been found. In addition, the appropriate modality that will increase the segmentation performance has been determined for MRI images with different modalities (T1w, T2w) in the datasets. Finally, the performances of different architectures are compared.

With the first experimental study, the appropriate modality was determined. Accordingly, when the images in T1w and T2w modalities were given together as an input to the architecture, it was seen that it showed the highest success with an average success rate of 88.7%. In the second application, the performance evaluation of the proposed architecture was made according to different cost functions. The highest success rate of 88.8% was achieved with the Dice_Loss cost function. In the third application made according to different normalization processes, the highest performance was obtained by using MinMax normalization with a success rate of 88.9%. In the last experimental study to examine the performances of different architectures, it was seen that the iSeg-WNet architecture exhibited the highest segmentation performance with 91.8% CSF tissue, 89% GM tissue, 86% WM tissue and 88.9% on average.

References

- [1] Ghosal ,P. Chowdhury, Kumar, T. A. Bhadra, A. K. Chakraborty, J. Nandi, D. 2021. MhURI:A Supervised Segmentation Approach to Leverage Salient Brain Tissues in Magnetic Resonance Images. *Comput. Methods Programs Biomed.*, 200, 105841, doi: 10.1016/j.cmpb.2020.105841.
- [2] Balafar, M. A. Ramli,A. R. Sariipan, M. I. Mashohor, S. 2010. Review of brain MRI image segmentation methods. *Artif. Intell. Rev.*, 33(3), 261–274, 2010, doi: 10.1007/s10462-010-9155-0.
- [3] Jenkinson, M. Beckmann, C. F. Behrens, T. E. J. Woolrich, M. W. Smith, S. M. 2012. FSL, *NeuroImage*, 62, 782–790, doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.09.015.
- [4] Dai,Y. Shi, F. Wang,L. Wu, G. Shen, D. 2013. IBEAT: A toolbox for infant brain magnetic resonance image processing. *Neuroinformatics*, 11(2), 211–225, doi: 10.1007/s12021-012-9164-z.
- [5] Fischl, B. 2012. FreeSurfer. *Neuroimage*, 62(2), 774–781, doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.01.021.
- [6] Mostapha, M. Styner, M. 2019. Role of deep learning in infant brain MRI analysis. *Magn. Reson. Imaging*, 64(June), 171–189, doi: 10.1016/j.mri.2019.06.009.
- [7] Wang, L. et al. 2014. Segmentation of neonatal brain MR images using patch-driven level sets. *Neuroimage*, 84, 141–158, doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.08.008.
- [8] Dolz, J. Desrosiers, C. Wang, L. Yuan, J. Shen, D. Ayed, I. B. 2020. Deep CNN ensembles and suggestive annotations for infant brain MRI segmentation. *Comput. Med. Imaging Graph.*, 79, 101660, doi: 10.1016/j.compmedimag.2019.101660.
- [9] Wang, L. et al. 2019. “Benchmark on automatic six-month-old infant brain segmentation algorithms: The iSeg-2017 challenge. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 38(9), 2219–2230, doi: 10.1109/TMI.2019.2901712.
- [10] Bui, T. D. Shin, J. Moon, T. 2019. Skip-connected 3D DenseNet for volumetric infant brain MRI segmentation. *Biomed. Signal Process. Control*, 54, 101613, 2019, doi: 10.1016/j.bspc.2019.101613.
- [11] Çelik, G. Talu, M. F. 2020. Resizing and cleaning of histopathological images using generative adversarial networks. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 554, 122652, doi: 10.1016/j.physa.2019.122652.
- [12] Çelik, G. Talu, M. F. 2022. A new 3D MRI segmentation method based on Generative Adversarial Network and Atrous Convolution. *Biomed. Signal Process. Control*, 71(PA), 103155, doi: 10.1016/j.bspc.2021.103155.
- [13] Akkus, Z. Galimzianova, A. Hoogi, A. Rubin, D. L. Erickson, B. J. 2017. Deep Learning for Brain MRI Segmentation: State of the Art and Future Directions. *J. Digit. Imaging*, 30(4), 449–459, doi: 10.1007/s10278-017-9983-4.
- [14] Yang, X. Kwitt, R. Styner, M. Niethammer, M. 2017. Quicksilver: Fast predictive image registration – A deep learning approach. *Neuroimage*, 158(July), 378–396, doi: 10.1016/j.neuroimage.2017.07.008.
- [15] Çelik, G. Talu, M. F. 2021. Generating the image viewed from EEG signals. *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, 27(2), 129–138, doi: 10.5505/pajes.2020.76399.
- [16] Kooi, T. *et al.* 2017. Large scale deep learning for computer aided detection of mammographic lesions. *Med. Image Anal.*, 35, 303–312, doi: 10.1016/j.media.2016.07.007.
- [17] Souza, J. C. Bandeira Diniz, J. O. Ferreira, J. L. França da Silva, G. L. Corrêa Silva, A. de Paiva, A. C. 2019. An automatic method for lung segmentation and reconstruction in chest X-ray using deep neural networks. *Comput. Methods Programs Biomed.*, 177, 285–296, 2019, doi: 10.1016/j.cmpb.2019.06.005.
- [18] Gaál, G. Maga, B. Lukács, A. 2020. Attention U-net based adversarial architectures for chest X-ray lung segmentation. *CEUR Workshop Proc.*, 2692, 1–7.
- [19] Başaran, E. 2022. Classification of white blood cells with SVM by selecting SqueezeNet and LIME properties by mRMR method. *Signal, Image Video Process.*, doi: 10.1007/s11760-022-02141-2.
- [20] Talo, M. Yildirim, O. Baloglu, U. B. Aydin, G. Acharya, U. R. 2019. Convolutional neural networks for multi-class brain disease detection using MRI images. *Comput. Med. Imaging Graph.*, 78, 101673, doi: 10.1016/j.compmedimag.2019.101673.
- [21] Yildirim, Ö. Pławiak, P. Tan, R. S. Acharya, U. R. 2018. Arrhythmia detection using deep convolutional neural network with long duration ECG signals. *Comput. Biol. Med.*, 102(September), 411–420, doi: 10.1016/j.compbiomed.2018.09.009.
- [22] Hannun A. Y. *et al.* 2019. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory

- electrocardiograms using a deep neural network. *Nat. Med.*, 25(1), 65–69, 2019, doi: 10.1038/s41591-018-0268-3.
- [23] Acharya, U. R. *et al.*, 2017. A deep convolutional neural network model to classify heartbeats. *Comput. Biol. Med.*, 89(August), 389–396, doi: 10.1016/j.compbio.2017.08.022.
- [24] Rajpurkar, P. *et al.* 2017. CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection on Chest X-Rays with Deep Learning. *arXiv*, 3–9, <http://arxiv.org/abs/1711.05225>.
- [25] ÇALIŞAN, M. TALU, M. F. 2020. Comparison of Methods for Determining Activity from Physical Movements. *J. Polytech.*, 0900(1), 17–23, doi: 10.2339/politeknik.632070.
- [26] Özcan, T. 2020. Yığınlanmış Özdevinimli Kodlayıcılar ile Göğüs Kanserinin Sınıflandırılması ve Klasik Makine Öğrenme Metotları ile Performans Karşılaştırması. *Erciyes Univ. J. Institute Sci. Technol.*, 36(2), 2020, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/erciyesfen/726739>.
- [27] Bozdog, Z. Talu, F. M. 2021. Pyramidal nonlocal network for histopathological image of breast lymph node segmentation. *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, 14(1), 122–131, doi: 10.2991/ijcis.d.201030.001.
- [28] Sun, Y. *et al.* 2021. Multi-Site Infant Brain Segmentation Algorithms: The iSeg-2019 Challenge. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 40(5), 1363–1376, 2021, doi: 10.1109/TMI.2021.3055428.
- [29] Subramanian, N. Elharrouss, O. Al-Maadeed, S. Chowdhury, M. 2022. A review of deep learning-based detection methods for COVID-19. *Comput. Biol. Med.*, 143, 105233, doi: 10.1016/j.compbio.2022.105233.
- [30] Valizadeh, M. Wolff, S. J. 2022. Convolutional Neural Network applications in additive manufacturing: A review. *Adv. Ind. Manuf. Eng.*, 4, 100072, doi: 10.1016/j.aime.2022.100072.
- [31] Lecun, Y. Bengio, Y. Hinton, G. 2015. Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444, doi: 10.1038/nature14539.
- [32] Ulyanov, D. Vedaldi, A. Lempitsky, V. 2016. Instance Normalization: The Missing Ingredient for Fast Stylization. *arXiv*, <http://arxiv.org/abs/1607.08022>.
- [33] Cirillo, M. D. Abramian, D. Eklund, A. 2020. Vox2Vox: 3D-GAN for Brain Tumour Segmentation. *arXiv*, 1–10.
- [34] Gao, B. Pavel, L. 2017. On the Properties of the Softmax Function with Application in Game Theory and Reinforcement Learning. *arXiv*, 1–10, <http://arxiv.org/abs/1704.00805>.
- [35] Han, S. Shao, H. Huo, Z. Yang, X. and Cheng, J. 2022. End-to-end chiller fault diagnosis using fused attention mechanism and dynamic cross-entropy under imbalanced datasets. *Build. Environ.*, 212, 108821, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108821.
- [36] Jain, S. Shukla, S. and Wadhvani, R. 2018. Dynamic selection of normalization techniques using data complexity measures. *Expert Syst. Appl.*, 106(252–262), doi: 10.1016/j.eswa.2018.04.008.
- [37] Çiçek, Ö. Abdulkadir, A. Lienkamp, S. S. Brox, T. Ronneberger, O. 2016. 3D U-Net: Learning Dense Volumetric Segmentation from Sparse Annotation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 424–432.

On The Projective Planes In Projective Space $PG(4,4)$

Süheyla EKMEKÇİ ^{*1} Ayşe BAYAR ² Ziya AKÇA ³

^{*1,2,3}Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Fakültesi,
Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, ESKİŞEHİR

(Alınış / Received:21.03.2022,Kabul/ Accepted:11.09.2022,Online Yayınlanma/Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Projective Space,
Projective Plane,
Veronesean Map,
Conic

Abstract: In this study, firstly, it is shown that the geometric structure, which is the image under the projection and the Veronesean map of the projective plane over the field $GF(4)$ is the projective plane of order 4 such that the set of points spans $PG(4,4)$ and the lines set consists of conics in $PG(4,4)$ by introducing with coordinates. Then taking points span $PG(4,4)$, the projective plane of order 4 is determined such that every line of the plane is a conic plane in $PG(4,4)$.

$PG(4,4)$ Projektif Uzayındaki Projektif Düzlemler Üzerine

Anahtar kelimeler

Projektif Uzay,
Projektif Düzlem,
Veronesean Dönüşüm,
Konik

Öz: Bu çalışmada önce $GF(4)$ cismi üzerindeki projektif düzlemin Veronesean dönüşüm ve izdüşüm altında görüntüsü olan geometrik yapının, noktalar kümesi $PG(4,4)$ projektif uzayını geren noktalardan ve doğrular kümesi $PG(4,4)$ uzayındaki koniklerden oluşan, 4. mertebeden projektif düzlem olduğu koordinatlarının sunumu ile verilmektedir. Daha sonra $PG(4,4)$ uzayını geren noktalar kümesi alınarak, doğruları konik düzlemleri olan 4. mertebeden projektif düzlem koordinatları belirlenmektedir.

*Corresponding Author, email: sekmekci@ogu.edu.tr

1. Introduction

The n -dimensional projective space over the Galois field $GF(q)$ is denoted by $PG(n, q)$. The Veronesean map maps the point of $PG(n, q)$ with coordinates (x_0, x_1, \dots, x_n) onto the point of $PG\left(\frac{n(n+3)}{2}, q\right)$ with coordinates $(x_0^2, x_1^2, \dots, x_n^2, x_0x_1, \dots, x_0x_n, \dots, x_1x_n, \dots, x_{n-1}x_n)$. The image of the Veronesean map is called the quadric Veronesean. The quadric Veronesean has the geometric and combinatorial properties. Many researchers have studied using the quadric Veroneseans in classical algebraic and finite geometry. A characterization of the Veronese spaces by means of their maximal subspaces was presented in [7]. In [6], the combinatorial characterization of Veronesean in $PG(n, q)$ was given. In [2], Veronese varieties of degree d over a Galois field were studied and it was shown that the projections of Veronese varieties were some of known caps. Authors in [8] showed that all Veronesean caps in finite projective spaces are projections of quadric Veroneseans and got the stronger result by weakening one of the conditions in [6]. In [9], they presented that the classification all embeddings $\theta: PG(n, q) \rightarrow PG(d, q)$, with $d \geq \frac{n(n+3)}{2}$, such that θ maps the points on each line to a coplanar points and such that the image of θ generates $PG(d, q)$, gave the characterization on quadric Veroneseans and union of projections and introduced the notation of a generalized Veronesean embedding. In [1], the classification all

embeddings $\theta: PG(n, \mathcal{K}) \rightarrow PG(d, \mathcal{F})$, with $d \geq \frac{n(n+3)}{2}$ and \mathcal{K}, \mathcal{F} skew field, such that θ maps the points on each line in $PG(d, \mathcal{K})$ to a coplanar points in $PG(d, \mathcal{F})$, and such that the image of θ generates $PG(d, \mathcal{F})$ is given and to relax the conditions in [9] is studied.

In present study firstly it is introduced that the image under the projection and the Veronesean map of $PG(2,4)$ is the projective plane of order 4 in 4-dimensional projective space. Then, when the points spanning $PG(4,4)$ are taken in three conic planes, the projective plane of order 4 is determined such that every line of the plane is a conic plane in $PG(4,4)$. This is handled with introducing coordinates in $PG(2,4)$ and in $PG(4,4)$ and the computations are done with coordinates based on the field $GF(4)$.

2. Material and Method

In sequel, the basic definitions and theorems required for this study are summarized as the following:

2.1 Projective Plane

Definition 2.1.1. A projective plane \mathcal{P} is an incidence structure $(\mathcal{N}, \mathcal{D}, \circ)$ where \mathcal{N} is a set whose elements are called points, \mathcal{D} is a set whose elements are called lines and $\circ \subset \mathcal{N} \times \mathcal{D}$ is an incidence relation such that the following axioms are satisfied:

- P1) Any two distinct points are on a unique line,
- P2) Any two distinct lines are intersect at a unique point,
- P3) There are four points in \mathcal{P} such that no three points of them are collinear, [5].

Theorem 2.1.2. The positive integer n that satisfies the following properties is called the order of the finite projective plane \mathcal{P} .

- i) There are $n + 1$ points on every line in \mathcal{P}
- ii) There are $n + 1$ lines passing through each point in \mathcal{P}
- iii) There exist $n^2 + n + 1$ points in \mathcal{P} ,
- iv) There exist $n^2 + n + 1$ lines in \mathcal{P} , [5].

Theorem 2.1.3. Let \mathcal{F} be any field. A point-line geometry is a triple $(\mathcal{N}, \mathcal{D}, \circ)$ consisting of the points set \mathcal{N} , the lines set \mathcal{D} determined algebraically with the elements of the field \mathcal{F} and the incidence relation \circ . Obviously,

$$\begin{aligned} \mathcal{N} &= \{(x_1, x_2, x_3) : x_i \in \mathcal{F}, (x_1, x_2, x_3) \neq (0, 0, 0), (x_1, x_2, x_3) \equiv \lambda(x_1, x_2, x_3), \lambda \in \mathcal{F} - \{0\}\} \\ \mathcal{D} &= \{[a_1, a_2, a_3] : a_i \in \mathcal{F}, [a_1, a_2, a_3] \neq [0, 0, 0], [a_1, a_2, a_3] \equiv \mu[a_1, a_2, a_3], \mu \in \mathcal{F} - \{0\}\}, \\ \circ &: (x_1, x_2, x_3) \circ [a_1, a_2, a_3] \Leftrightarrow a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 = 0. \end{aligned}$$

Any point in \mathcal{N} is represented by a triple (x_1, x_2, x_3) where x_1, x_2, x_3 are not all zero. Nonzero multiples of a triple represent the same point. \mathcal{D} has the same properties. This point-line geometry $(\mathcal{N}, \mathcal{D}, \circ)$ defined by \mathcal{F} , is a projective plane and is denoted by $P_2\mathcal{F}$. Let r and p be a positive integer and a prime number, respectively. The projective plane of order $n = p^r$ over the finite Galois field $\mathcal{F} = GF(p^r)$ of p^r elements is denoted by $P_2\mathcal{F} = PG(2, p^r)$, [5].

A polynomial $p(x) = x^2 + x + 1$ over the field $\mathcal{F} = GF(2)$ is irreducible. The field $GF(4) = GF(2^2) = \{0, 1, t, t^2\}$ is the extension of the field $GF(2)$. The set of points in the projective plane $PG(2,4)$ over $GF(4)$ is $\mathcal{N} = \{N_0, N_1, \dots, N_{20}\}$, where

$$\begin{aligned} N_0 &= (0, 1, 0), N_1 = (0, 0, 1), N_2 = (0, 1, 1), N_3 = (0, 1, t^2), N_4 = (0, 1, t), N_5 = (1, 1, 1), N_6 = (1, 0, 1), N_7 = (1, t, 1), \\ N_8 &= (1, t^2, 1), N_9 = (1, 1, 0), N_{10} = (1, 1, t^2), N_{11} = (1, 1, t), N_{12} = (1, t, t^2), N_{13} = (1, t^2, t), N_{14} = (1, 0, 0), N_{15} = (1, t, 0), \\ N_{16} &= (1, t^2, 0), N_{17} = (1, 0, t^2), N_{18} = (1, 0, t), N_{19} = (1, t^2, t^2), N_{20} = (1, t, t). \end{aligned}$$

The lines set of $PG(2,4)$ is $\mathcal{D} = \{D_0, D_1, \dots, D_{20}\}$, where

$$\begin{aligned} D_0 &= [1, 0, 0], D_1 = [1, 0, 1], D_2 = [0, 0, 1], D_3 = [1, 0, t], D_4 = [1, 0, t^2], D_5 = [1, 1, 0], D_6 = [0, 1, 0], D_7 = [1, t, 0], \\ D_8 &= [1, t^2, 0], D_9 = [0, 1, 1], D_{10} = [1, t^2, t], D_{11} = [1, t, t^2], D_{12} = [1, 1, 1], D_{13} = [1, t, t], D_{14} = [1, t^2, t^2], D_{15} = [1, t^2, 1], \\ D_{16} &= [1, t, 1], D_{17} = [1, 1, t^2], D_{18} = [1, 1, t], D_{19} = [0, 1, t^2], D_{20} = [0, 1, t]. \end{aligned}$$

Incidence relation " \circ " is as in table 2.1.

Table 2.1. Incidence Relation of PG(2,4)

D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{14}	D_{15}	D_{16}	D_{17}	D_{18}	D_{19}	D_{20}
N_0	N_0	N_0	N_0	N_0	N_1	N_1	N_1	N_1	N_2	N_4	N_3	N_2	N_2	N_2	N_3	N_4	N_4	N_3	N_4	N_3
N_1	N_5	N_9	N_{10}	N_{11}	N_5	N_6	N_8	N_7	N_5	N_5	N_5	N_6	N_7	N_8	N_6	N_6	N_7	N_8	N_8	N_7
N_2	N_6	N_{14}	N_{12}	N_{13}	N_9	N_{14}	N_{13}	N_{12}	N_{14}	N_{13}	N_{12}	N_9	N_{11}	N_{10}	N_{11}	N_{10}	N_9	N_9	N_{11}	N_{10}
N_3	N_7	N_{15}	N_{17}	N_{18}	N_{10}	N_{17}	N_{16}	N_{15}	N_{19}	N_{15}	N_{16}	N_{12}	N_{16}	N_{15}	N_{15}	N_{16}	N_{18}	N_{17}	N_{12}	N_{13}
N_4	N_8	N_{16}	N_{19}	N_{20}	N_{11}	N_{18}	N_{19}	N_{20}	N_{20}	N_{17}	N_{18}	N_{13}	N_{17}	N_{18}	N_{19}	N_{20}	N_{19}	N_{20}	N_{14}	N_{14}

2.2 The Projective Spaces

Let V be an $n+1$ -dimensional vector space over the field \mathcal{F} . For any two nonzero vectors $A = (a_0, a_1, \dots, a_n)$ and $B = (b_0, b_1, \dots, b_n)$ in V , $A \sim B \Leftrightarrow a_i = \lambda b_i, i = 1, 2, \dots, n, \lambda \in \mathcal{F}$ and $\lambda \neq 0$, is the equivalence relation on the nonzero vectors in V . The equivalence classes are the 1-dimensional subspaces of the vector space with the origin removed. The set of them is called n -dimensional projective space over \mathcal{F} and is denoted by $PG(n, \mathcal{F})$. The elements of $PG(n, \mathcal{F})$ are called points of projective space. If $\mathcal{F} = GF(q)$, the projective space of order q is shown by $PG(n, q)$, [3].

A k -space (k -dimensional subspace) in $PG(n, \mathcal{F})$ is a set of points all of whose corresponding to vectors determine a $k + 1$ -dimensional subspace in V . i -dimensional subspaces $i=0,1,2$ are called a point, a line, a plane, respectively.

A k -space π_k is the set of points represented by the vector $t_0X_0 + t_1X_1 + \dots + t_kX_k$, where X_0, X_1, \dots, X_k are $k + 1$ linearly independent vectors and $t_i \in \mathcal{F} - \{0\}$.

2.3 The Veronesean Map

The Veronesean map is a map

$$\vartheta: PG(n, \mathcal{F}) \rightarrow PG\left(\frac{n(n+3)}{2}, \mathcal{F}\right), n \geq 1,$$

$$P(x_0, x_1, \dots, x_n) \rightarrow (y_{00}, y_{11}, \dots, y_{n-1,n}), y_{ij} = x_i x_j, 0 \leq i, j \leq n$$

ϑ maps the set of points of each line of $PG(n, \mathcal{F})$ to a set of coplanar points of $PG\left(\frac{n(n+3)}{2}, \mathcal{F}\right)$ and such that the image of ϑ generates $PG\left(\frac{n(n+3)}{2}, \mathcal{F}\right)$. The Veronesean map maps a point $P(x_0, x_1, \dots, x_n)$ of $PG(n, \mathcal{F})$ onto the point $P(x_0^2, \dots, x_n^2, x_0x_1, \dots, x_0x_n, \dots, x_{n-1}x_n)$ of $PG\left(\frac{n(n+3)}{2}, \mathcal{F}\right)$. The set of these points of $PG\left(\frac{n(n+3)}{2}, \mathcal{F}\right)$ is called the quadric Veronesean and is denoted by $\mathcal{V}_n^{2^n}$, or, for short \mathcal{V}_n , [4].

For $n = 1$, the Veronesean \mathcal{V}_1^2 is a conic in $PG(2, \mathcal{F})$. For $n = 2$, the Veronesean is a surface \mathcal{V}_2^4 of order 4 in $PG(5, \mathcal{F})$. The quadric Veronesean \mathcal{V}_n is a set of $\theta(n)$ points in $PG\left(\frac{n(n+3)}{2}, \mathcal{F}\right)$ such that no three points are collinear. In particular, for $n = 1, |\mathcal{V}_1| = \theta(1) = q + 1$ and for $n = 2, |\mathcal{V}_2| = \theta(2) = q^2 + q + 1, \mathcal{F} = GF(q)$.

Theorem 2.3.1. Let π_s be s -dimensional subspace of $PG(n, \mathcal{F})$. The image of π_s under the Veronesean map is a quadric Veronesean \mathcal{V}_s , which is the complete intersection of \mathcal{V}_n and the space $PG\left(\frac{s(s+3)}{2}, \mathcal{F}\right)$ containing \mathcal{V}_s , [4]. As a particular case, the Veronesean map maps the lines (1-dimensional subspace) in $PG(n, \mathcal{F})$ to conics of \mathcal{V}_n .

Theorem 2.3.2. Any two points of the quadric Veronesean \mathcal{V}_n are contained in a unique conic of \mathcal{V}_n , [4].

Theorem 2.3.3. The quadric Veronesean \mathcal{V}_n contains $\Phi(s; n, q)$ quadric Veroneseans \mathcal{V}_s , ($\Phi(s; n, q)$ is the number of s -dimensional subspace of $PG(n, q)$), [4].

3. Results

In this section, firstly that the image under the projection and the Veronesean map of $PG(2,4)$ is the projective plane of order 4 in 4-dimensional projective space is shown by giving the computations made with the coordinates in $PG(2,4)$ and in $PG(4,4)$.

Theorem 3.1. The image under the projection and the Veronesean map of $PG(2,4)$ is the projective plane of order 4 in 4-dimensional projective space over $GF(4)$ such that the set of points spans 4-dimensional projective space and every line of the plane is a conic.

Proof. Let the image under the projection and the Veronesean map of $PG(2,4)$ be denoted by \mathcal{P} . It will be shown that \mathcal{P} is a projective plane in $PG(4,4)$ such that the points set of \mathcal{P} spans $PG(4,4)$ and every line of \mathcal{P} is a conic. It is well known that the projective plane of order 4 is embedded in the projective space $PG(5,4)$ by the Veronesean Map. This embedding is identified on each point of $PG(2,4)$ with its image under the Veronesean map. For $\mathcal{F} = GF(4)$ and $n = 2$, the Veronesean map is

$$\begin{aligned} \vartheta: PG(2,4) &\rightarrow PG(5,4) \\ (x, y, z) &\rightarrow (x^2, y^2, z^2, xy, xz, yz) \\ N_i &\rightarrow \vartheta(N_i) = P_i. \end{aligned}$$

The images of points of $PG(2,4)$ under the Veronesean map are as the following:

$$\begin{aligned} P_0 &= (0,1,0,0,0,0), P_1 = (0,0,1,0,0,0), P_2 = (0,1,1,0,0,1), P_3 = (0,1, t, 0,0, t^2), P_4 = (0,1, t^2, 0,0, t), P_5 = (1,1,1,1,1,1), \\ P_6 &= (1,0,1,0,1,0), P_7 = (1, t^2, 1, t, 1, t), P_8 = (1, t, 1, t^2, 1, t^2), P_9 = (1,1,0,1,0,0), P_{10} = (1,1, t, 1, t^2, t^2), P_{11} = \\ &= (1,1, t^2, 1, t, t), P_{12} = (1, t^2, t, t, t^2, 1), P_{13} = (1, t, t^2, t^2, t, 1), P_{14} = (1,0,0,0,0,0), P_{15} = (1, t^2, 0, t, 0, 0), P_{16} = \\ &= (1, t, 1, t^2, 1, t^2), P_{17} = (1,0, t, 0, t^2, 0), P_{18} = (1,0, t^2, 0, t, 0), P_{19} = (1, t, t, t^2, t^2, t), P_{20} = (1, t^2, t^2, t, t, t^2). \end{aligned}$$

The images of lines in $PG(2,4)$ under the Veronesean map are conics. 21 points P_i and 21 conics are in the quadric Veronesean \mathcal{V}_2^4 of $PG(5,4)$. For instance, the image of the line $D_0 = \langle N_0, N_1, N_2, N_3, N_4 \rangle$ of $PG(2,4)$ under ϑ is the conic with the equation $x_1x_2 + x_5^2 = 0$ in $PG(5,4)$ such that $P_i, i = 0,1, \dots, 4$ are on it. Similarly, the image of the line $D_1 = \langle N_0, N_5, N_6, N_7, N_8 \rangle$ of $PG(2,4)$ under ϑ is the conic with the equation $x_0x_1 + x_3^2 = 0$ and the points $P_i, i = 0,5,6,7,8$ on this conic.

Consider a projection of the quadric Veronesean \mathcal{V}_2^4 in $PG(5,4)$ onto the hyperplane $x_0 = 0$ from the point $P = (1,1,1,0,0,0)$ which is not contained in \mathcal{V}_2^4 . If the hyperplane $x_0 = 0$ is denoted by π , the projection is

$$\begin{aligned} \beta: \mathcal{V}_2^4 \subset PG(5,4) &\rightarrow \pi \\ P_i &= (x_0, x_1, \dots, x_5) \rightarrow P'_i = \beta(P_i) = (x_0 + x_1, x_0 + x_2, x_3, x_4, x_5). \end{aligned}$$

β maps every point P of \mathcal{V}_2^4 in $PG(5,4)$ to the intersection point P' of the line XP and π . With $\beta, P'_i = \beta(P_i) = P_i, i = 0,1, \dots, 4$ and the remaining points are

$$\begin{aligned} P'_5 &= (0,0,1,1,1), P'_6 = (1,0,0,1,0), P'_7 = (t, 0, t, 1, t), P'_8 = (1,0,1, t, 1), P'_9 = (0,1,1,0,0), P'_{10} = (0, t^2, 1, t^2, t^2), \\ P'_{11} &= (0, t, 1, t, t), P'_{12} = (t, t^2, t, t^2, 1), P'_{13} = (t^2, t, t^2, t, 1), P'_{14} = (1,1,0,0,0), P'_{15} = (t, 1, t, 0, 0), \\ P'_{16} &= (t^2, 1, t^2, 0, 0), P'_{17} = (1, t^2, 0, t^2, 0), P'_{18} = (1, t, 0, t, 0), P'_{19} = (t^2, t^2, t^2, t^2, t), P'_{20} = (t, t, t, t, t^2). \end{aligned}$$

The points P'_i belong to the geometric structure \mathcal{P} . Also P'_0, P'_1, P'_2, P'_5 and P'_6 are linear independent and generate $PG(4,4)$. The projections of conics (Veronesean \mathcal{V}_1) which are the image of lines of $PG(2,4)$ are conics in π . For instance, the image of the line $D_0 = \langle N_0, N_1, N_2, N_3, N_4 \rangle$ of $PG(2,4)$ under $\beta\vartheta$ is the conics with the equation $y_0y_1 + y_4^2 = 0$ in π such that $P'_i, i = 0,1, \dots, 4$ are on it. Also the points $P'_i, i = 0,1, \dots, 4$ on this conic determine the plane $\{(y_0, y_1, y_2, y_3, y_4): y_2 = y_3 = 0, y_i \in GF(4)\}$. Similarly, the image of the line D_1 in $PG(2,4)$ under $\beta\vartheta$ is the conics with the equation $y_2^2 + y_3^2 + y_0y_3 = 0$ and the points $P'_i, i = 0,5,6,7,8$ on this conic determine the plane $\{(y_0, y_1, y_2, y_3, y_4): y_1 = 0, y_2 = y_4, y_i \in GF(4)\}$. \mathcal{P} contains 21 points P'_i and 21 conics of $PG(4,4)$. $\beta\vartheta$ is a injective map from $PG(2,4)$ onto $\mathcal{P} = \beta\vartheta(PG(2,4))$ and preserves the incidence structure of $PG(2,4)$. Therefore \mathcal{P} is isomorphic to $PG(2,4)$. Every conic consists of five points P'_i such that no three are collinear. Each two of these points are contained in unique one of these 21 conics and each two of these conics intersect in unique one of these 21 points. Thus, \mathcal{P} is the projective plane of order 4 in $PG(4,4)$. ■

In the final part of the study, when the points spanning $PG(4,4)$ are taken in three conic planes, it is shown that the projective plane of order 4 is determined such that every line of the plane is a conic plane in $PG(4,4)$. This is handled with introducing coordinates in $PG(2,4)$ and in $PG(4,4)$ and the computations are made with coordinates based on the field $GF(4)$.

Theorem 3.2. Let the points spanning $PG(4,4)$ be taken in three conic planes determined by the conic equations $x_4^2 = x_0x_1, x_2^2 + x_3^2 + x_0x_3 = 0$ and $x_2^2 + x_3^2 + x_1x_2 = 0$. Then the projective plane of order 4 is obtained in $PG(4,4)$ such that every line of the plane is a conic plane.

Proof. We want to find a projective plane of order 4 in $PG(4,4)$. All the points in this projective plane are supposed to generate $PG(4,4)$ and every line of the plane is a conic plane. So, we must find 21 points and 21

conic planes in $PG(4,4)$ such that each conic plane contains exactly 5 points of 21 points, and two conic planes meet exactly in one point of 21 points. We use the notation for points, lines and incidence relation of $PG(2,4)$ in computations to obtain the projective plane.

It is known that all points and all lines of a projective plane are identified with three distinct nonconcurrent lines. So, three conic planes corresponding to given three conics are already contained in the projective plane.

If the conic plane determined by the conic with the equation $x_4^2 = x_0x_1$ is denoted by D_0 , the points belong to D_0 in $PG(4,4)$ as following coordinates:

$N_0 = (1,0,0,0,0)$, $N_1 = (0,1,0,0,0)$, $N_2 = (1,1,0,0,1)$, $N_3 = (1, t, 0, 0, t^2)$. And, the conic plane D_0 is the set $\{(y_0, y_1, y_2, y_3, y_4): y_2 = y_3 = 0, y_i \in GF(4)\}$.

If the conic plane determined by the conic with the equation $x_2^2 + x_3^2 + x_0x_3 = 0$ is denoted by D_1 , the points belong to D_1 in $PG(4,4)$ as following coordinates:

$N_0 = (1,0,0,0,0)$, $N_5 = (0,0,1,1,1)$, $N_6 = (1,0,0,1,0)$, $N_7 = (t, 0, t, 1, t)$, $N_8 = (t^2, 0, t^2, 1, t^2)$. And, the conic plane D_1 is the set $\{(y_0, y_1, y_2, y_3, y_4): y_1 = 0, y_2 = y_4, y_i \in GF(4)\}$.

If the conic plane determined by the conic with the equation $x_2^2 + x_3^2 + x_1x_2 = 0$ is denoted by D_5 , the points belong to D_5 in $PG(4,4)$ as following coordinates:

$N_1 = (0,1,0,0,0)$, $N_5 = (0,0,1,1,1)$, $N_9 = (0,1,1,0,0)$, $N_{10} = (0, t^2, 1, t^2, t^2)$, $N_{11} = (0, t, 1, t, t)$. And, the conic plane D_5 is the set $\{(y_0, y_1, y_2, y_3, y_4): y_0 = 0, y_3 = y_4, y_i \in GF(4)\}$.

So, the lines (the conic planes) D_0, D_1 and D_5 are in the plane and 11 points of the plane are directly obtained by this lines. Note that the intersection points of the pairs of these conic planes are N_0, N_1, N_5 . The remaining points and conic planes in the projective plane will be determined such that the conic plane contains exactly five points of 21 points and the two conic planes intersect at one of the 21 points.

The conic plane D_{12} is spanned by the points N_2, N_6, N_9 and denoted by $\langle N_2, N_6, N_9 \rangle$. For every point $(y_0, y_1, y_2, y_3, y_4)$ in D_{12} , the equalities $y_0 = y_3 + y_4, y_1 = y_2 + y_4$ are valid. The lines D_{12} is

$\{(y_0, y_1, y_2, y_3, y_4): y_0 = y_3 + y_4, y_1 = y_2 + y_4, y_i \in GF(4)\}$. For every point $(y_0, y_1, y_2, y_3, y_4)$ in the plane $D_{20} = \langle N_3, N_7, N_{10} \rangle$, the equalities $y_3 = t^2y_2, y_4 = y_0 + y_1$ are obtained. Because the point N_{13} belongs to D_{12} and D_{20} , the coordinates of N_{13} must provide the conditions on D_{12} and D_{20} . From here, D_{12} and D_{20} have exactly a common point $N_{13} = (1, t^2, 1, t^2, t)$. For the planes $D_{14} = \langle N_2, N_8, N_{10} \rangle$ and $D_{15} = \langle N_3, N_6, N_{11} \rangle$, the equalities

$y_2 = y_0t + y_1 + y_4t^2, y_4 = y_0 + y_1t + y_4t^2$ and $y_3 = y_0 + (y_1 + y_2)t^2, y_4 = y_1t + y_2$ are valid, respectively. The intersection point of the planes D_{14} and D_{15} is $N_{15} = (x_0, x_1, x_0, x_0t + x_1t^2, x_0 + x_1t)$. $N_{15} = (k, 1, k, kt + t^2, k + t)$ where $k = \frac{x_0}{x_1}, x_1 \neq 0$. For the planes $D_2 = \langle N_0, N_9, N_{15} \rangle$ and $D_{20} = \langle N_3, N_7, N_{10} \rangle$, the equalities $y_3 = 0, y_4 = 0$ and

$y_2 = y_3t, y_4 = y_0 + y_1$ are valid, respectively. The intersection point of these planes is $N_{14} = (kt + 1, k, t, k(t + k, t + k, t^2t + k)$. D_0 and D_{10} intersect at the point $N_4 = (k^2t + 1 + kt^2, kt^2k + 1, 0, 0, tk^2t + 1 + kt^2)$. Since $D_{19} = \langle N_4, N_8, N_{11} \rangle$

contains the point N_4 , the equalities $k^2 + tk = 0$ and $(k^4 + k)t + k^3 + 1 = 0$ are valid. Then k equals to t . If the value of k is written at the points, $N_{15} = (t, 1, t, 0, 0)$, $N_{14} = (t, t, 0, 0, 0)$, $N_4 = (1, t^2, 0, 0, t)$ are obtained. The intersection point of the planes $D_8 = \langle N_1, N_7, N_{15} \rangle$ and $D_{12} = \langle N_2, N_6, N_9 \rangle$ is $N_{12} = D_8 \wedge D_{12} = (t, t^2, t, t^2, 1)$.

Since the equality $N_{12} = t^2N_4 + tN_8 + t^2N_{11}$ is valid, the point N_{12} is in the plane D_{19} which is spanned by the points N_4, N_8, N_{11} . Since the planes $D_2 = \langle N_0, N_9, N_{15} \rangle, D_7 = \langle N_1, N_8, N_{13} \rangle$ and $D_{11} = \langle N_3, N_5, N_{12} \rangle$ intersect the point N_{16} , its coordinates are found as $(t^2, 1, t^2, 0, 0)$. Similarly, the planes $D_3 = \langle N_0, N_{10}, N_{12} \rangle, D_6 = \langle N_1, N_6, N_{14} \rangle$ and $D_{10} = \langle N_4, N_5, N_{13} \rangle$ intersect the point $N_{17} = (1, t^2, 0, t^2, 0)$. The point $N_{18} = (1, t, 0, t, 0)$ is obtained from the intersection of the planes $D_4 = \langle N_0, N_{11}, N_{13} \rangle, D_6 = \langle N_1, N_6, N_{14} \rangle$ and $D_{11} = \langle N_3, N_5, N_{12} \rangle$.

The points $N_{19} = (t^2, t^2, t^2, t^2, t^2)$ and $N_{20} = (1, 1, 1, 1, t)$ are found by the intersections of $D_3 = \langle N_0, N_{10}, N_{12} \rangle, D_7 = \langle N_1, N_8, N_{13} \rangle$ and $D_4 = \langle N_0, N_{11}, N_{13} \rangle, D_8 = \langle N_1, N_7, N_{15} \rangle$, respectively.

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Let $\{N_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ be the set of points of $S = (\mathcal{N}', \mathcal{D}', \circ')$, with line set $\{D_i : i = 0, 1, \dots, 20\}$ such that the points of \mathcal{N}' span $PG(4,4)$ and D_i is a conic plane. Any two distinct elements N_i and N_j of the points set belong to unique member D_k of the lines set \mathcal{D}' . Any two distinct elements D_i and D_j of the lines set have unique point N_k of the points set \mathcal{N}' in common. Each element N_i of \mathcal{N}' is contained five conic planes and each element D_i of \mathcal{D}' contains five points of \mathcal{N}' . The incidence structure S formed by \mathcal{N}' and \mathcal{D}' is a projective plane of order 4 such that S generates $PG(4,4)$ and S is isomorphic to $PG(2,4)$. ■

Acknowledgment

This work was supported by the Scientific Research Projects Commission of Eskişehir Osmangazi University under Project Number 201619D37.

References

- [1] Akça, Z., Bayar, A., Ekmekçi, S., Kaya, R., Thas, J. A. and Van Maldeghem, H. 2012. Generalized Veronesean Embeddings of Projective Spaces, Part II. The Lax Case. *Ars Combinatoria*, CIII, pp. 65-80.
- [2] Cossidente, A., Labbate, D., Sicilino, A. 2001. Veronese Varieties Over Finite Fields and Their Projections. *Design, Codes and Cryptography*, 22, 19-32.
- [3] Hirschfeld, J.W.P. 1979. *Projective Geometries Over Finite Fields*, Clarendon Press, Oxford, 474s.
- [4] Hirschfeld, J.W.P., Thas, J.A. 2016. *General Galois Geometries*, Springer Monographs in Mathematics, Springer-Verlag London, 409s.
- [5] Kaya, R. 2005. *Projektif Geometri*, Osmangazi Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, 392s.
- [6] Mazzocca, F. and Melone, N. 1984. Caps and Veronese Varieties In Projective Galois Spaces. *Discrete Mathematics*, 48, 243-252.
- [7] Melone, N. 1983. Veronese Spaces. *Journal of Geometry*, 20, 169-180.
- [8] Thas, J.A. and Van Maldeghem, H. 2004. Classification of Finite Veronesean Caps. *European Journal of Combinatorics*, 25, 275-285.
- [9] Thas, J.A. and Van Maldeghem, H. 2011. Generalized Veronesean Embeddings of Projective Spaces. *Combinatorica*, 31 (5), 615-629.

Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı gerçekleştirimi

Jean Luck RANDRIANANTENAINA¹, Ahmet Yasin BARAN¹, Nimet KORKMAZ², Recai KILIÇ¹

¹Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ
²Kayseri Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 09.05.2022, Kabul / Accepted: 25.08.2022, Online Yayınlanma/ Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

Memristor, pencere fonksiyonu, yeniden yapılandırılabilir devre uygulaması, histerezis eğrisi, Alan Programlanabilir Analog Dizi (FPAA).

Öz: Bu çalışmada gerilim kontrollü bir memristör modeli olan Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin karakteristik akım-gerilim ilişkisinin deneysel olarak gözlemlenebilmesi amacıyla, Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog gerçekleştirimi sunulmaktadır. Bahsi geçen memristör elemanının gerçekleştirimi; analog doğası, farklı doğrusal olmayan fonksiyonların eleman üzerinde kolaylıkla inşa edilebilmesi, hızlı prototiplendirme imkânı sunması ve düşük maliyeti ile dikkat çeken FPAA platformu ile yapılmıştır. Bu kapsamda, Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının nümerik benzetimi yapılmıştır. Bu benzetimlerde, memristör elemanının karakteristik dinamiği olan histerezis eğrisi gözlemlenmiştir. İlgili memristör elemanın girişine farklı frekans değerlerine ayarlanan sinüzoidal işaretler uygulanmıştır. Böylece memristör elemanının frekansa bağımlı çalışma karakteristiği gözlemlenebilmiştir. Son olarak, Tukey pencere fonksiyonunun FPAA platformundaki tasarım aşamalarının detayları ve elde edilen gerçekleştirim sonuçları sunulmuştur.

FPAA-based Implementation of the memristor device designed with the Tukey window function

Keywords

Memristor, Window function, Reconfigurable circuit implementation, Hysteresis curve, Field Programmable Analog Array (FPAA).

Abstract:

In this study, the programmable and reconfigurable analog realization of the memristor device designed with the Tukey window function is presented to observe experimentally the characteristic current-voltage relationship of the Nonlinear Ion Model that is a voltage-controlled memristor model. The realization of this memristor element has performed with the FPAA platform, which stands out with its analog nature, the ability to easily construct different nonlinear functions on this device, the possibility of rapid prototyping, and its low cost. In this context, a numerical simulation of the memristor element designed with the Tukey window function has been made. The hysteresis curve, which is the characteristic dynamic of the memristor element, is observed in these simulations. Sinusoidal signals adjusted to different frequency values are applied to the input of this memristor element. Thus, the frequency dependent operating characteristic of the memristor element is observed. Finally, the details of the design stages of the Tukey window function on the FPAA platform and the obtained implementation results are presented.

*İlgili Yazar, email: abaran@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Leon Chua, dört temel devre değişkeni olan akım, gerilim, elektriksel yük ve manyetik akı arasındaki ilişkinin klasik devre teorisinin üç temel elemanı olan direnç, indüktör ve kapasitör elemanları ile tamamlanamayacağını belirtmiştir. Dört temel devre değişkeninin altı farklı kombinasyonunun olduğunu ve tanımlamalara göre sadece beş kombinasyonun ifade edildiğini, bu sebeple dördüncü bir temel pasif devre elemanının gerekli olduğunu savunmuştur. 1971 yılında matematiksel ifadelerle tanımladığı memristörü, elektriksel yük ve manyetik akı arasındaki ilişkiyi tamamlayan dördüncü temel devre elemanı olarak rapor etmiştir [1]. Chua, memristörün akım-gerilim karakteristiğinin diğer pasif devre elemanlarından farklı olarak bir histerezis eğrisi şeklinde olduğunu ve memristöre uygulanan harici gerilimin frekans değeri arttıkça, histerezis eğrisinin alanının azaldığını belirtmiştir. İki terminalli bir eleman olarak modellenen bu komponent; Stanley Williams ve Hewlett Packard (HP) Laboratuvar ekipleri tarafından fiziksel olarak ilk kez 2008 yılında üretilmiştir. Titanyum dioksit (TiO_2) malzeme kullanılarak üretilen bu elemanla ilgili olarak HP firmasının yayımladığı raporda; elemanın küçük boyut [2], düşük güç tüketimi [3], yüksek hızlı çalışma [4], kararlı ve dengeli davranış [5], çok durumlu çalışma [6] gibi dikkat çekici özelliklerinden bahsedilmiştir. Bu gelişmelerden sonra memristörler bilgisayar mimarileri, nöromorfik sistemler ve dijital devreler gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır.

Literatürdeki bilimsel araştırmalarda ve elektronik endüstrisindeki gerçekleştirmelerde memristör elemanın farklı karakteristik özelliklerini öne çıkaran; Doğrusal İyon Sürüklenme (Linear Ion Drift) Modeli [7], Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme (Nonlinear Ion Drift) Modeli [8], Simmons Tünel Bariyer (Tunneling Barrier) Modeli [9] ve Eşik Uyarlamalı Memristör (Threshold Adaptive Memristor-TEAM) Modeli [10] gibi modeller tanımlanmıştır. Bu modellerden gerilim kontrollü bir memristör modeli olan Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli daha belirgin akım-gerilim karakteristiği ile farklılaşmaktadır. Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modellemeleri'nde sınır değeri kısıtlamaları ile karşılaşmaktadır. Bu kısıtlamalar $f(x)$ ile tanımlanan Biölek, Prodromakis, Strukov, Joglekar ve Tukey gibi farklı pencere fonksiyonları tanımlanarak azaltılmaktadır [11-15]. Biölek pencere fonksiyonu modeli genel olarak sınır noktaları üzerinde kısıtlama koşulları problemini ortadan kaldırmaktadır. Bu fonksiyon sınır noktalarındaki kısıtlamaları çözmüş olsa da sınırlarda devamlılık gösterememekte ve süreksizliğe neden olmaktadır. Biölek pencere fonksiyonuna benzer şekilde, Prodromakis pencere fonksiyonu modelinde de sınır noktaları üzerinde kısıtlama koşulları problemi bulunmaktadır. Prodromakis pencere fonksiyonu modelinde iki kontrol parametresi vardır. Bu parametrelerin biri ile pencere fonksiyonunun biçimine karar verilirken, diğer ile pencere fonksiyonunun genliğinin skalası ölçeklendirilebilmektedir. Strukov pencere fonksiyonu modeli HP modelin sınır koşullarındaki davranışı ifade etmek için önerilmiştir. Memristör elemanının sınır koşullarının belli özel şartlarla sınırlandırılması sağlanması amaçlanmıştır. Bununla birlikte, Strukov pencere fonksiyonu modelinde hiçbir dış alan etkisi memristörün durumunu değiştirememektedir ve bu önemli bir problemidir. Joglekar pencere fonksiyonu modeli, Strukov pencere fonksiyonunun eksikliklerini telafi etmek için önerilmiştir. Joglekar pencere fonksiyonu memristörün temel karakteristiklerinden olan doğrusal olmama özelliğini karşılamakta ve bir kontrol parametresi kullanılarak model üzerinde eğrimsellik ayarı ve kontrolü yapılabilmektedir. Öte yandan, Joglekar pencere fonksiyonunun temel problemi ise sınır değerine ulaşıldığında bu pencere fonksiyonunun sıfır değerinde kalmasıdır. Memristör modellemesinde sınır kısıtlama problemi için önerilen pencere fonksiyonlarına alternatif tanımlamalardan biri de Tukey pencere fonksiyonu modelidir [16,17]. Bu model literatürde mevcut sınır fonksiyonlarının kullanımında karşılaşılan hataları daha az indirmek için önerilmiştir. Bu modelde geleneksel pencere fonksiyonlarında bulunan kontrol değişkeni gibi bir ayar parametresinin bulunmamasıdır. Böylece Tukey pencere fonksiyonu ile sınırlandırılan memristör elemanının memristans ifadesi kolaylıkla elde edilebilmektedir. Öte yandan, Tukey pencere fonksiyonu trigonometrik ifadelerle tanımlandığından dolayı özellikle gerçekleştirim çalışmalarında, literatürde mevcut diğer pencere fonksiyonlarına göre daha az tercih edilmektedir.

Memristör elemanının modelleme çalışmalarının ardından, elemanın farklı devre ve sistemlerde kullanılabilmesi amacıyla fiziksel olarak üretimine ve gerçek zamanlı elektriksel karakteristik çıkışlarına ihtiyaç duyulmuştur. HP tarafından üretilen prototipe ilaveten, memristör elemanının deneysel gerçekleştirmelerde kullanılabilmesi için farklı donanımlar kullanılarak gerçekleştirilen emülatör devreleri de ortaya konmuştur[18-27]. Son yıllarda farklı doğrusal olmayan fonksiyonlarla karakterize edilen sistemlerin elektronik donanımlarla gerçekleştirmelerinde alternatif çözümler sunan programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog ya da dijital elemanların kullanımına yönelik pek çok farklı çalışma literatüre kaydedilmiştir. Benzetim programlarının sunduğu avantajlara benzer şekilde hassas parametre ayarı yapabilmeye imkân sağlama, ayrık donanımlarla yapılan gerçekleştirmelere benzer şekilde ise gerçek zamanlı elektriksel çıktılar sunma özellikleri ile bu elemanlar oldukça dikkat çekmektedir. Literatürde memristör elemanının kullanıldığı tasarımların test edilmesi ve doğrulanması için farklı emülatör devrelerinin kullanımı yerine, analog programlanabilir donanım platformlarının tercih edildiği çalışmalar mevcuttur. Tahir ve Saif [28] akı kontrollü memristör modelini nümerik olarak simüle ettikten sonra, modelin donanım gerçekleştirimini bir alan programlanabilir analog dizi (Field Programmable Analog Array-

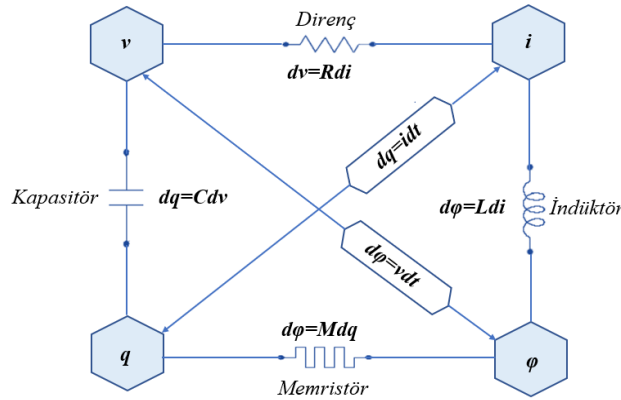
FPAA elemanı kullanılarak yapmışlardır. Arık ve Kılıç [29], memristör tabanlı kaotik sistemlerin deneysel olarak test edilmesi ve doğrulanması için alan programlanabilir analog dizi (FPAA) elemanını kullanmışlardır.

Bu çalışmada ise, gerilim kontrollü bir memristör modeli olan Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin karakteristik akım-gerilim ilişkisinin deneysel olarak gözlemlenebilmesi amacıyla, Tukey pencere fonksiyonu ile modellenen memristör elemanının programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog gerçekleştirimi sunulacaktır. Bahsi geçen memristör elemanının; analog doğası, farklı doğrusal olmayan fonksiyonların eleman üzerinde kolaylıkla inşa edilebilmesi, hızlı prototiplendirme imkânı sunması ve düşük maliyeti ile dikkat çeken FPAA elemanı ile gerçekleştirimi yapılacaktır. Böylece analog elektriksel çıkışlara ihtiyaç duyulan uygulamalar için alternatif bir gerçekleştirim yaklaşımı sunulacaktır. Memristör elemanının FPAA platformları ile emüle edilmesi sonucunda, bu elemanın kullanıldığı pek çok sistemin gerçekleştirme sürecine de katkılar sağlanacaktır.

Bu kapsamda Bölüm 2'de öncelikle memristans ve memdüktans tanımlamaları ile ilgili kısa bir girişin ardından, Tukey pencere fonksiyonu ile tanımlanan memristör elemanının nümerik benzetimi yapılacaktır. Bu benzetimlerde, memristör elemanının karakteristik eğrisi olan histerezis yapısının gözlemlenebilmesi için, elemanın girişine farklı frekans değerlerine ayarlanan sinüzoidal işaretler uygulanmıştır. Böylece memristör elemanının frekansa bağımlı çalışma karakteristiği gözlemlenebilmiştir. Bölüm 3'te Tukey pencere fonksiyonunun FPAA platformundaki tasarım aşamalarının detayları ele alınacaktır. Elde edilen FPAA tabanlı gerçekleştirim sonuçları da bu bölümde verilecektir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

2. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının nümerik benzetimi

Direnç, kapasitör ve indüktör elektronik devrelerde kullanılan iki terminalli temel pasif devre elemanlarıdır. Devre teorisinde bu komponentlerin terminallerinden akan akım (i), terminaller arasındaki potansiyel farkı voltaj (v) olarak tanımlanmaktadır. Terminalden akan akımın integrali alındığında elektriksel yük (q) ve terminaller arasındaki potansiyel farkın integrali alındığında manyetik akı (φ) değişkenleri elde edilmektedir. Direnç, terminaller arasındaki potansiyel fark ile terminaller üzerinden geçen akım arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Kapasitör, yük (q) ve voltaj (v) arasındaki ilişkiyi gösterir. İndüktör, akım (i) ve manyetik akı (φ) arasındaki ilişkiyi karşılamaktadır. Chua tarafından hafızalı direnç olarak tanımlanan memristör ise, voltaj ve akımın zamana göre integrallerinin alınmasıyla elde edilen elektriksel yük ile manyetik akı değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi dördüncü temel pasif devre elemanı olarak kabul edilmektedir.



Şekil 1. Temel devre değişkenleri ve temel devre elemanları arasındaki ilişki [7]

Elektriksel yük ile manyetik akıyı ilişkilendiren memristör, yük ve akı arasındaki ifadeye göre memristans ve memdüktans olmak üzere iki farklı şekilde tanımlanmaktadır. Burada yük ile akı arasındaki ilişki Denklem (1)'deki gibi yükün fonksiyonu olarak tanımlanırsa memristans (yük-kontrollü memristör), Denklem (2)'deki gibi akımın fonksiyonu olarak tanımlanırsa memdüktans (akı-kontrollü memristör) olarak adlandırılır.

$$v = M(q)i$$

$$M(q) = \frac{d\varphi(q)}{dq} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} i &= W(\varphi)v \\ W(\varphi) &= \frac{dq(\varphi)}{d\varphi} \end{aligned} \quad (2)$$

Denklem (1) ve Denklem (2)'den görüleceği üzere herhangi bir zamanda memristörün çıkışı; giriş işareti ile memristansı ya da memdüktansı temsil eden doğrusal olmayan bir fonksiyonun çarpımına eşittir (çarpımsal transfer fonksiyonu) ve giriş sıfır olduğunda memristör çıkışı da sıfıra gitmeye zorlanır (sıfırdan geçiş). Bu tanımlama memristör elemanının karakteristik dinamiği olan histerisiz eğrisini karşılamaktadır. Denklem (1) ve Denklem (2)'deki (q) ve (φ)'nin akım ve voltaja göre integralleri $q = \int_{-\infty}^t i(\tau)d\tau$ ve $\varphi = \int_{-\infty}^t v(\tau)d\tau$ olmak üzere akım ve gerilim bağıntıları düzenlenirse, Denklem (3)'teki sonuç elde edilir:

$$\begin{aligned} v(t) &= M\left(\int_{-\infty}^t i(\tau)d\tau\right)i(t) \\ i(t) &= W\left(\int_{-\infty}^t v(\tau)d\tau\right)v(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Denklem (3), memristörün kalıcı hafıza özelliğine sahip olduğunu gösterir. Burada, memristans ve memdüktansın değeri giriş işaretinin tüm geçmiş değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Bu nedenle giriş işareti uygulandığı sürece memristans (ya da memdüktans) değişimini korur. Giriş işareti kesilirse, tekrar giriş işareti uygulanana kadar son anda bulunduğu değerinde kalır [30].

Williams ve ekibi ilk fiziksel memristörü Hewlett-Packard laboratuvarında gerçekleştirmiştir. Doğrusal Sürüklenme Modeli veya kısaca HP modeli olarak adlandırdıkları yapıyı ince bir titanyum dioksit (TiO_2) filmi iki platin (Pt) elektrot arasına yerleştirilerek üretmişlerdir [7]. Memristöre bir uyartım işareti uygulandığında iki bölge arasındaki sınırın zamanın bir fonksiyonu olarak hareket ettiği düşünülerek, yük kontrollü memristör üzerindeki voltaj HP tarafından aşağıdaki gibi modellenmiştir:

$$v(t) = M(w)i(t) = \left[R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \left(1 - \frac{w(t)}{D}\right) \right] i(t) \quad (4)$$

Burada, $w(t)/D$ ifadesi (x) değişkeni ile tanımlanarak (w) değişkenini normalize etmiştir. Burada D yarı iletken kalınlığını temsil etmektedir. $x \in [0,1]$. $x(t) = 0$ durumunda $M(x) = R_{off}$ ve $x(t) = 1$ durumunda ise $M(x) = R_{on}$ değerlerine karşılık gelmektedir. Bu durumda Denklem (4) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\begin{aligned} M(x) &= R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x) \\ v(t) &= [R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x)]i(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Memristörün elektriksel davranışı, ince bir titanyum dioksit (TiO_2) filmleri arasındaki sürüklenme ile ilgilidir ve $[0, D]$ aralığıyla sınırlıdır. Bu filmler arasındaki sınırlardaki durum, Doğrusal İyon Sürüklenme Modeli'nin önemli bir problemi olarak bilinmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için pencere fonksiyonu (window function) yaklaşımı gündeme gelmiş ve durum denklemlerindeki bu doğrusal olmama durumu Denklem (6)'daki gibi güncellenmiştir:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{on}}{D^2} i(t) f(x) \quad (6)$$

Memristörün yapısal dinamiğine bağlı olarak ($\mu_v R_{on}/D^2$) fiziksel parametresini sabit bir (k) parametresi olarak kabul edilirse, Denklem (6) aşağıdaki gibi güncellenebilir:

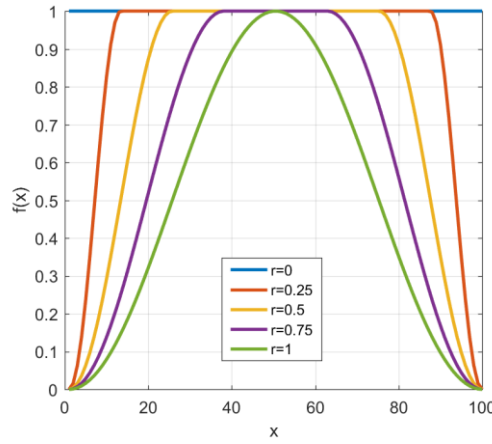
$$\frac{dx(t)}{dt} = ki(t)f(x) \quad (7)$$

Literatürde Denklem (7)'de tanımlanan $f(x)$ pencere fonksiyonu, Strukov, Joglekar, Biolek, Prodromakis ve Tukey pencere fonksiyonları gibi birçok farklı fonksiyon ile tanımlanmıştır [11-14,16,17]. Tukey pencere fonksiyonu matematiksel olarak diğer modellerden daha kompleks olduğundan ve trigonometrik ifadeler içerdiğinden daha az kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu model diğer modeller kullanıldığında karşılaşılan sınır koşul hatalarını

daha aza indirgemek için önerilmiştir. Yasuhiro Takahashi ve arkadaşları [16, 17] 2015 yılında Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin karakteristik davranışını geleneksel modellerden farklı olarak kontrol parametresi içermeyen Denklem (8)'deki Tukey pencere fonksiyonu ile modellemeyi önermişlerdir.

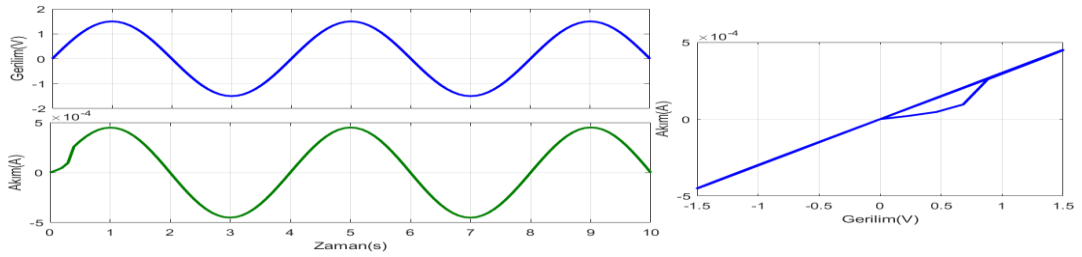
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \left[x - \frac{r}{2} \right] \right) \right); & (0 < x \leq \frac{r}{2}) \\ 1; & (\frac{r}{2} < x \leq 1 - \frac{r}{2}) \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \left[x - 1 + \frac{r}{2} \right] \right) \right); & (1 - \frac{r}{2} < x \leq 1) \end{cases} \quad (8)$$

Tukey pencere fonksiyonu zaman düzleminde düzgün karakteristiktir ve pencere zaman aralıklarının çoğunluğu için bir değerine yakındır. Şekil 2'de görüldüğü gibi pencere fonksiyonunun bir değerini koruduğu süreyi belirleyen uzunluk "Konik Uzunluk" olarak bilinir. Konik uzunluk Denklem 8'deki $f(x)$ fonksiyonunun (r) derecesinin farklı değerlerine göre değişmektedir. (r) derecesi ne kadar düşükse, konik uzunluk bir değerinde daha fazla sabit kalmaktadır.

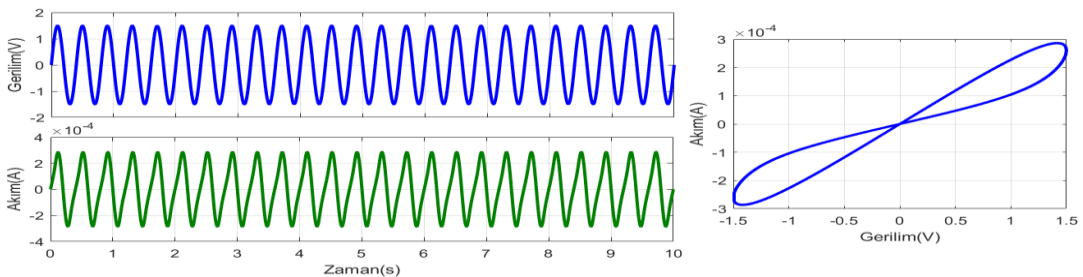


Şekil 2. Tukey penceresi fonksiyonunun farklı (r) değerleri için grafikleri.

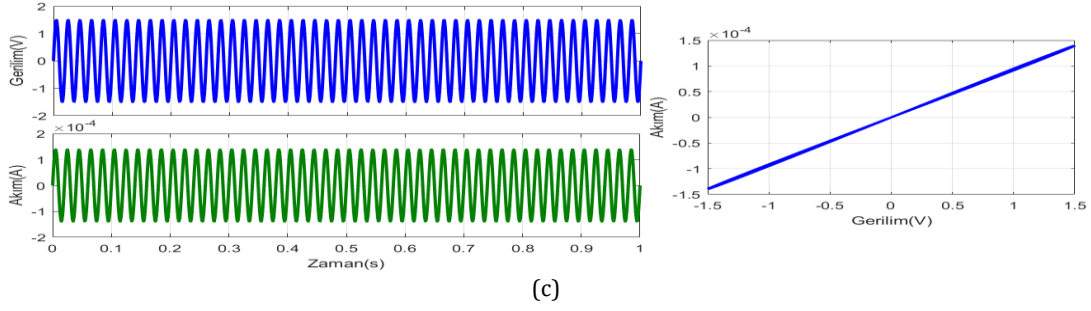
Bu çalışmada, nümerik benzetim için Denklem (6)'daki Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin parametreleri $R_{on} = 0.1 \text{ k}\Omega$, $R_{off} = 16 \text{ k}\Omega$, $\mu_v = 30 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 / (\text{Vs})$ ve $D = 9 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ olarak ayarlanmış ve $f(x)$ fonksiyonu yerine Tukey pencere fonksiyonu kullanılmıştır. Giriş voltajı, tepe değeri 1.5V olan bir sinüs dalgası olarak seçilmiştir. Bu giriş işaretinin frekans değeri sırasıyla $\omega_1 = 0,25 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 2,5 \text{ rad/s}$ ve $\omega_3 = 50 \text{ rad/s}$ olarak ayarlanmıştır. Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak oluşturulan bu memristörün girişine bu frekans değerlerindeki sinüzoidal işaretlerin ayrı ayrı uygulanması ile elde edilen nümerik benzetim sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



(a)



(b)



Şekil 3. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanın giriş gerilimi/çıkış akımı dalga biçimleri ve a) $\omega = 0,25$ rad/s, b) $\omega = 2,5$ rad/s, c) $\omega = 50$ rad/s için V-I özellikleri

Şekil 3'te görüldüğü gibi sinüzoidal girin frekansı $\omega_1 = 0,25$ rad/s değerinde iken, memristor elemanın çıkışında ölçülen akımın fazında hemen hemen hiçbir değişiklik gözlenmemiştir. $\omega_2 = 2,5$ rad/s'de simetrik bir histerezis eğrisi gözlemlenmiştir. Son olarak, sinüzoidal giriş işaretinin frekansı $\omega_3 = 50$ rad/s olduğunda, memristor elemanı bir direnç gibi davranmış ve faz portre gösteriminde direnç gibi doğrusal bir çıkış karakteristiği gözlemlenmiştir. Buna göre, Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısının karakteristik histerezis eğrisini FPAA platformunda gözlemlmek için, $\omega_2 = 2,5$ rad/s frekanslı ve $A = 1,5$ V genlikli sinüzoidal bir giriş işaretinin kullanılabilirliği belirlenmiştir.

3. FPAA tabanlı gerçekleştirim detayları

FPAA (Field Programmable Analog Array), alan programlanabilir analog diziler; analog ve hibrid devrelerin tasarımında kararlılık, doğruluk ve hızlı prototip teknikleri sunan, temel analog işlemleri içeren ve farklı analog fonksiyonları gerçeklemek için elektriksel olarak yeniden programlanabilen tümdevrelerdir. FPAA elemanı giriş çıkış portlarından, lojik kontrol biriminden ve elemanın hafızasını belirleyen ve CAB (Configurable Analog Block) adı verilen yapılandırılabilir analog bloklardan meydana gelir. Bir FPAA kartının hafızasının yetmediği tasarımlarda FPAA kartları birleştirilebilir [31]. Analog işlemler CAB blokları içerisinde gerçekleşir ve bu işlemler için anahtarlamalı kapasitör tekniği kullanılmaktadır. FPAA üzerinde gerçekleştirilmek istenen sistem, öncelikle nümerik analizlerle test edilmelidir. Bunun sebebi, FPAA elemanı ± 2 V saturasyon seviyesine sahip olmasıdır. Saturasyon seviyesini aşan parametrelere yeniden ölçeklendirme işlemi uygulanır. Ölçeklendirme işleminden sonra modeldeki fonksiyonlara karşılık gelen uygun CAM blokları belirlenir. Bu bloklar arasındaki ara bağlantılar ANADIGM DESIGNER-2 arayüz programı üzerinde oluşturulur. Modellenen sistem bir seri port aracılığı ile FPAA'ye gönderilir. Kart üzerinde bulunan giriş çıkış birimlerinden yararlanılarak, osiloskop yardımı ile gerekli ölçümler yapılır.

Bu çalışmada ANADIGM firmasının ürettiği AN231E04 platformu kullanılmıştır. ANADIGM DESIGNER-2 programında çeşitli analog fonksiyonları gerçekleştirmek için önceden tanımlı CAM (Configurable Analog Module) olarak adlandırılan yeniden yapılandırılabilir analog bloklar mevcuttur. Yeniden ölçeklendirme sonrasında Denklem (9)'daki forma dönüşen Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısının FPAA tabanlı gerçekleştirimi için kullanılan CAM blokları ve bloklar arasındaki bağlantılar Şekil 4'te görülmektedir.

$$v(t) = M(x)i(t)$$

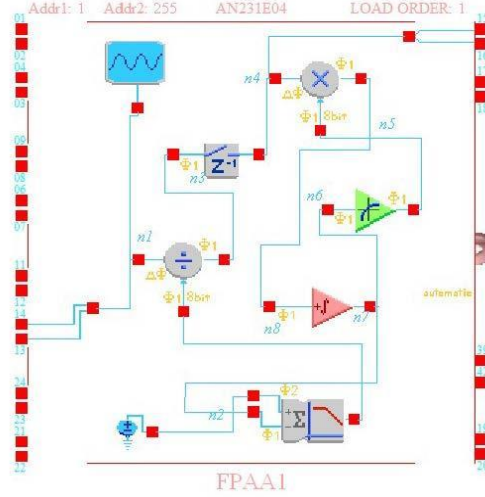
$$M(x) = 0,00625x + (1 - x)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = 2,47i(t)f(x)$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \left[x - \frac{r}{2} \right] \right) \right); & \left(0 < x \leq \frac{r}{2} \right) \\ 1; & \left(\frac{r}{2} < x \leq 1 - \frac{r}{2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \left[x - 1 + \frac{r}{2} \right] \right) \right); & \left(1 - \frac{r}{2} < x \leq 1 \right) \end{cases}$$

(9)

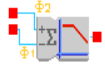
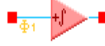
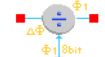



Burada SUMFILTER, TRANSFER FUNCTION, VOLTAGE, MULTIPLIER, DIVIDER, INTEGRATOR, HOLD, OSCILLATOR olarak isimlendirilen CAM blokları kullanılmıştır. TRANSFER FUNCTION bloğu kullanılarak $f(x)$ fonksiyonu elde edilmiştir. Memristans fonksiyonu, SUMFILTER bloğu kullanılarak oluşturulmuştur. $dx(t)/dt=2,47i(t)f(x)$ fonksiyonu ile tanımlanan katkılı bölge ile katkısız bölge arasındaki sınır hızı MULTIPLIER bloğu ile oluşturulmuştur. Akımı $i(t)=v(t)/M(x)$ tanımlaması ile elde etmek için bir DIVIDER bloğu kullanılmıştır. Bir OSCILATOR bloğu kullanılarak $v(t)$ sinüzoidal giriş işareti gerçekleştirilmiştir. Denklem (9)'daki diferansiyel denklemin çözümü için gerekli olan integral işlemi INTEGRATOR bloğu ile gerçekleştirilmiştir. HOLD bloğu, MULTIPLIER ve DIVIDER blokları arasındaki faz durumunu düzenlemek için kullanılmıştır. Son olarak Denklem (9)'daki sabit parametreler, bir DC gerilim kaynağı olan VOLTAGE bloğu ile gerçekleştirilmiştir.





Şekil 4. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPAA gerçekleştirim şeması.

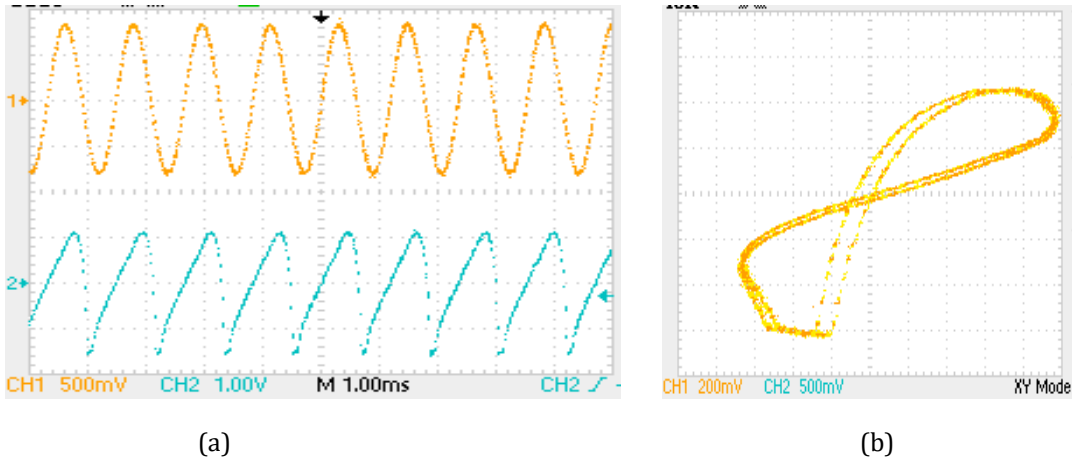
Şekil 4'te verilen Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısının FPAA tabanlı gerçekleştiriminde kullanılan bloklar ve bu blokların parametre değerleri Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1: Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı uygulamasında kullanılan CAM blokları için bir özet.

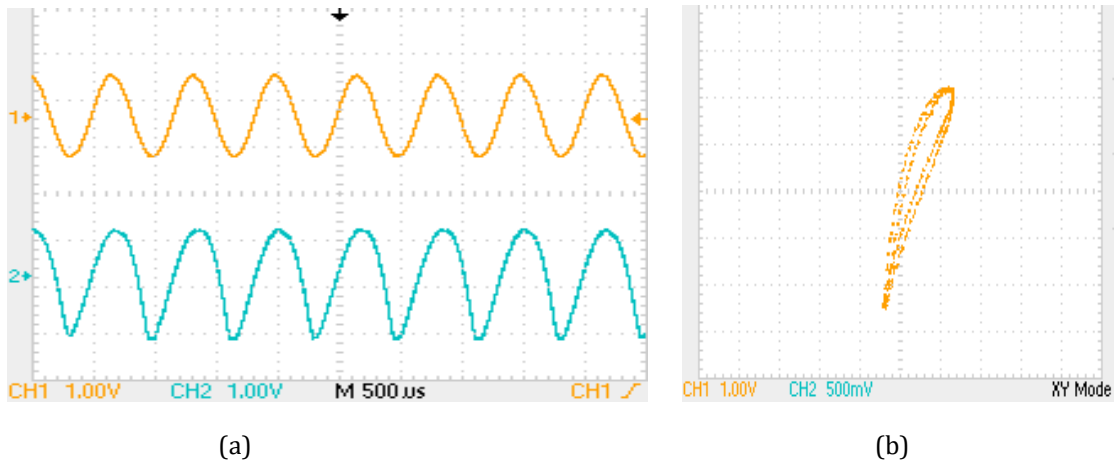
Blok adı	Seçenekler	Parametreler	Açıklamalar
SumFilter 	Çıkış Değişiklikleri: Faz 1 Giriş 1: Evirmeyen Giriş 2: Eviren Giriş 3: Kapalı	Köşe Frekansı: 0,35 kHz Kazanç 1: 1,07 Kazanç 2: 1	Bu CAM, üç girişe kadar matematiksel toplama işlemini karşılamaktadır.
Integrator 	Polarite (Kutupluk): Evirmeyen Girdi Örnekleme: Faz 1 Kontrol Karşılaştırması: Sıfırlama Yok	İntegral Alma Sabiti: [1/us]:0,05	Bu CAM, programlanabilir integral sabitine sahip bir integral alıcı bloğudur.
Divider 	Örnekle ve Bekletme: Kapalı	Bölme Sabiti: 0,34	Bu CAM matematiksel bölme işlemini karşılamaktadır.
Multiplier 	Örnekle ve Bekletme: Kapalı	Çarpım Sabiti: 0,34	Bu CAM matematiksel çarpma işlemini karşılamaktadır.
Hold 	Girdi Örnekleme: Faz 1		Bu CAM bir örnek oluşturur ve tutar.
Transfer Function 	Çıkışı Bekletme: Kapalı		Bu CAM, 256 nicelikle kullanıcı tarafından belirlenen bir voltaj aktarım işlevi uygular.

OscillatorSine 		Osilasyon Frekansı[kHz]: 0,8 Tepe genliği [V]: 1,5	Bu CAM, sinüzoidal bir çıkış oluşturur. Bu oluşturulan sinyal programlanabilir genlik ve frekansa sahiptir.
Voltage 	Polarite (Kutupluk): +2V		Bu CAM, tasarımda ihtiyaç duyulan sabit katsayıları karşılamak için kullanılmaktadır.

Arayüz programı ile modellenen Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısı seri port ile herhangi bir dönüşüme ihtiyaç duymadan doğrudan AN231E04 kartına gömülmüştür. Ardından bir osiloskop ile deneysel ölçümler yapılmıştır. Şekil 5a'da Tukey pencere fonksiyonu memristor modelinin girişine uygulanan $v(t)$ sinüzoidal işaretini (üstteki) ile çıkışta ölçülen akım değeri (alttaki) $i(t)$ 'nin zaman domeni gösterimleri görülmektedir. Şekil 6b'de ise girişe uygulanan $v(t)$ sinüzoidal işarete karşılık çıkışta ölçülen $i(t)$ akımının oluşturduğu faz portresi gösterimi ile gözlemlenen histerezis eğrisi deneysel olarak elde edilmiştir. Böylece, Tukey pencere fonksiyonu memristör modeli FPAA platformu ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. FPAA tabanlı elde edilen gerçekleştirim sonuçları ile nümerik benzetim sonuçları birbirleriyle oldukça uyumludur.



Şekil 5. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristor modeli'nin FPAA tabanlı deneysel gerçekleştirim sonuçları (Osilasyon Frekansı[kHz]: 0,8 Tepe genliği [V]: 1,5): a) $v(t)$ giriş (üstteki) ve $i(t)$ çıkış (alttaki) işaretleri, b) $v(t)$ - $i(t)$ faz portresi gösterimi.



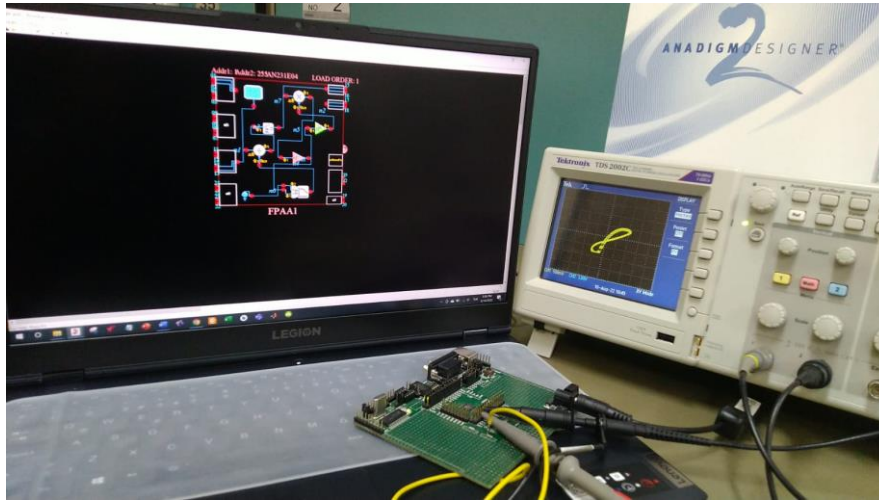
Şekil 6. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristor modeli'nin FPAA tabanlı deneysel gerçekleştirim sonuçları (Osilasyon Frekansı[kHz]: 1,5 Tepe genliği [V]: 1,5): a) $v(t)$ giriş (üstteki) ve $i(t)$ çıkış (alttaki) işaretleri, b) $v(t)$ - $i(t)$ faz portresi gösterimi.

Memristör elemanın girişine uygulanan sinüzoidal işaretin frekansı artırıldığında bu elemanın karakteristiği değişir. Frekans arttıkça giriş-çıkış eğrisinin direnç elemanın karakteristiğine benzeyen bir cevaba yaklaştığı görülmektedir. Bu durumu FPAA elemanı üzerinde gözlemlmek için Tablo 1. de görülen OscillatorSine bloğunun

frekansı 1.5 kHz olarak ayarlanmıştır. Giriş-çıkış arasındaki frekansa bağımlı değişimin sonucu Şekil 6.b'de görülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Memristör elemanı elektronik bir donanımdır; fakat henüz ticari üretimi yapılmamaktadır. Bu sebeple elemanın özelliklerini karşılayacak taklit devrelerinin tasarlanması önemli bir araştırma alanıdır. Literatürde ayrıık donanımlarla yapılan taklit devrelerinin kullanımını ele alan çalışmalar mevcut olsa da Tukey pencere fonksiyonunun kompleks modeli nedeniyle bu fonksiyonun ayrıık donanımlarla gerçekleştirim süreci oldukça güçtür. Öte yandan alan programlanabilir analog diziler; analog ve hibrid devrelerin tasarımında kararlılık, doğruluk ve hızlı prototip teknikleri sunan, temel analog işlemleri içeren ve farklı analog fonksiyonları gerçeklemek için elektriksel olarak yeniden programlanabilen tümdevrelerdir. Bu çalışmada da trigonometrik tanımlamalar içermesi açısından geleneksel pencere fonksiyonlarından daha kompleks bir tanımlamaya sahip olan Tukey pencere fonksiyonu, FPAA donanımının analog yapısı ve önceden tanımlı programlanabilir CAM blokları sayesinde kolaylıkla gerçekleştirilmiştir. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının temel karakteristiklerinin incelenmesi ve giriş işaretinin frekansına olan hassasiyetinin gözlemlenmesi için nümerik benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçları ilgili bölümde verilmiştir. Ardından, bu sistemin FPAA tabanlı gerçekleştirim sürecinde kullanılan CAM blokları ve bu blokların işlevleri ele alınmıştır. Bu sistemin FPAA tabanlı gerçekleştirimi sonucu osiloskop ile kaydedilen gerçek zamanlı çıkış sinyalleri de sunulmuştur. Böylece, Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan bu memristör elemanının FPAA platformu kullanılarak gerçekleştirimi literatürde ilk kez rapor edilmiştir. Elde edilen gerçekleştirim sonuçlarının, nümerik benzetim sonuçları ile oldukça benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bu sistem için hazırlanan deney düzeneğine ait bir gösterim Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Tukey pencere fonksiyonu tabanlı memristör modelinin FPAA tabanlı gerçekleştirimi için hazırlanan deney düzeneğine ait bir gösterim.

Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı gerçekleştirimde kullanılan CAB alanları ve güç tüketimi sonuçları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı gerçekleştirimde kullanılan CAB alanları ve güç tüketimi sonuçları.

CAB1 (kullanılan/toplam kapasite)	CAB2 (kullanılan/toplam kapasite)	CAB3 (kullanılan/toplam kapasite)	CAB4 (kullanılan/toplam kapasite)	Güç tüketim
8/8	6/8	8/8	7/8	164±49mW

Bu gerçekleştirim çalışması sonucunda elde edilen çıktılar kullanılarak, farklı pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanlarının FPAA tabanlı gerçekleştirimlerinin de mümkün olduğu söylenebilir. Burada sunulan tasarım teknikleri kullanılarak, farklı memristör modeli uygulamalarının prototipleri hızlı bir şekilde oluşturulabilir ve bu tasarımların programlanabilir platformlarda test ve doğrulama süreci de gerçekleştirilebilir. Tukey pencerefonksiyonu memristör modelinin yeniden yapılandırılabilir platformla kullanılarak gerçekleştirme çalışması başka memristör modellerinin uygulamalarına esin kaynağı olabilir. Burada sunulan tasarım teknikleri

kullanılarak, diğer memristör modellerinin uygulamaların prototipleri hızlı bir şekilde oluşturulabilir ve bu programlanabilir platformlarda test ve doğrulama süreci yürütülebilir. Bu çalışmada elde edilen Tukey pencere fonksiyonu memristör modelinin analog gerçekleştirimin deneysel sonuçları gelecekteki çalışmalarda da kullanılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2022-11759 proje kodu ile desteklenmektedir.

Kaynakça

- [1] Chua, L. 1971. Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transaction on Circuits Theory*, 18(5), 507-519.
- [2] Waser, R., Dittmann, R., Staikov, G., Szot, K. 2009. Redox Based resistive switching memories-nanoionic mechanisms, prospects, and challenges. *Advanced Materials*, 21(25-26), 2632-2663.
- [3] Schindler, C., Weides, M., Kozicki, M.N., Waser, R. 2008. Low current resistive switching in Cu-SiO₂ cells. *Applied Physics. Letter*, 92, 1-4.
- [4] Jo, S.H., Lu, W. 2008. CMOS compatible nanoscale nonvolatile resistance switching memory. *Nano Lett*, 8(2), 392-397.
- [5] Jo, S.H., Kim, K.H., Lu, W. 2009. High-density crossbar arrays based on a Si memristive system. *Nano Letters*, 9(2), 870-874.
- [6] Wang, S.Y., Huang, C.W., Lee, D.Y., Tseng, T.Y., Chang, T.C. 2010. Multilevel resistive switching in Ti/Cux O/Pt memory devices. *Journal of Applied Physics*, 108(11), 114110.
- [7] Strukov, D.B., Snider, G.S., Start, D.R., Williams, R.S. 2008. The missing memristor found. *Nature*, 453(7191), 80-83.
- [8] Kavehei, O., Iqbal, A., Kim, Y. S., Eshraghian, K., Al-Sarawi, S. F., Abbott, D. 2010. The fourth element: characteristics, modelling and electromagnetic theory of the memristor. In *Proceeding of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 466(2120), 2175-2202.
- [9] Pickett, M.D., Strukov, D.B., Borghetti, J.L., Yang J.J., Snider G.S., Stewart, D.R. 2009. Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices. *Journal of Applied Physics*, 106, 074508.
- [10] Kvatinsky, S., Friedman E.G., Kolodny, A., Weiser, U.C. 2013. TEAM: Threshold adaptive memristor model. *IEEE Transactions on Circuits and System I: Regular Papers*, 60, 211-21.
- [11] Biolek, Z., Biolek, D., Biolek, Z., Biolková, V. 2009. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift. *Radioengineering*, 18(2).
- [12] Prodromakis, T., Peh, B.P., Papavassiliou, C., Toumazou, C. 2011. A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58, 3099-3105.
- [13] Biolek, D., Biolek, Z., Biolkova, V. 2009. SPICE modeling of memristive, memcapacitative and meminductive systems. *ECCTD 2009 - European Conference on Circuit Theory and Design Conference Program*, 249-52.
- [14] Joglekar, Y.N., Wolf, S.J. 2009. The elusive memristor: Properties of basic electrical circuits. *European Journal of Physics* 30(4), 661-675.
- [15] Singh, J., Raj, B. 2019. An accurate and generic window function for nonlinear memristor models. *Journal of Computational Electronics*, 18(2), 640-647.

- [16] Yasuhiro T., Toshikazu S., Michio Y. 2015. Memristor SPICE Model with Tukey Window Function for Stable Analysis. International Microsystem, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference. IEEE Catalog Number: CFP1459B-ART, ISBN: 978-1-4799-7727-7.
- [17] Yasuhiro T., Toshikazu S., Michio Y. 2015. SPICE model of memristive device using Tukey window function. IEICE Electronics Express, 12,(5), 1-7.
- [18] Karakulak, E., Mutlu, R. 2009. Mühendislik Eğitiminde Kullanılabilecek Bir Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi. 13th National Congress of Electrical, Electronics, Computer and Biomedical Engineering, 4-7.
- [19] Pershin, Y. V., Di Ventra, M. 2009. Practical approach to programmable analog circuits with memristors.
- [20] Valsa, J., Biolek, D., Biolek, Z. 2010. An analogue model of the memristor. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 24(4), 400-408.
- [21] Kim, H., Sah, M.P., Yang, C., Cho, S., Chua, L.O. 2012. Memristor emulator for memristor circuit applications. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 59(10):2422-2431.
- [22] Sodhi, A., Gandhi, G. 2010. Circuit mimicking TiO₂ memristor: a plug and play kit to understand the fourth passive element. International Journal of Bifurcation and Chaos, 20(08), 2537-2545.
- [23] Sah, M.P., Yang, C., Kim, H., Chua, L. 2012. A voltage mode memristor bridge synaptic circuit with memristor emulators. Sensors 2012, 12(3), 3587-3604.
- [24] Wang, X.Y., Fitch, A.L., Herbert, H.C.I., Sreeram, V., Qi, W.G. 2012. Implementation of an analogue model of a memristor based on a light-dependent resistor. Chinese Physics B, 21(10), 108501.
- [25] Abuelma'Atti, M.T., Khalifa, Z.J. 2015. A continuous-level memristor emulator and its application in a multivibrator circuit. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 69(4), 771-775.
- [26] Abuelma'Atti, M.T., Khalifa, Z.J. 2014. A new memristor emulator and its application in digital modulation. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 80(3), 577-584.
- [27] Sanchez-Lopez, C., Mendoza-Lopez, J., Carrasco-Aguilar, M.A., Muniz-Montero, C. 2014. A floating analog memristor emulator circuit. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 61(5), 309-313.
- [28] Tahir, F., Ramadhan, S. 2018. Analog Programmable Circuit Implementation for Memristor. Iraq Journal of Electronic Engineering, 14(1), 1-9.
- [29] Arik, S., Kiliç, R. 2014. Reconfigurable hardware platform for experimental testing and verifying of memristor based chaotic systems. Journal of Circuits, System and Computer, 23(10), 1450145.
- [30] Oster, G. F., Auslander, D. M. 1973. The memristor: A new bond graph element. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control.
- [31] Anadigm Designer. www.anadigm.com (Accessed date: May 06, 2022).

Design and Manufacturing of a New Rail-Type Irrigation System for Modern Seedling Greenhouses

Mustafa ARIK^{*1}, İhsan KORKUT^{*}

*1 Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, ANKARA/ TURKEY

(Alınış / Received: 11.07.2022, Kabul / Accepted: 29.11.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Modern greenhouse,
Irrigation system,
New rail-type design,
AutoCad and Lumnion
Solidworks

Abstract: In this study, a new rail-type automatic irrigation system was designed and manufactured to provide sustainable and efficient irrigation, which is one of the most important requirements of modern seedling greenhouses. Irrigation and pesticides spraying can be done at the same time with the new rail-type irrigation system (RTIS), and water/pesticides spraying pressure and irrigation height can be adjusted based on seedling type. The RTIS were achieved approximately 60% water savings compared to the old irrigation system. The RTIS is expected to increase seedling yield while lowering greenhouse maintenance costs significantly.

Modern Fide Seraları İçin Yeni bir Raylı Sulama Sistemi Tasarımı ve İmalatı

Anahtar Kelimeler

Modern sera,
Sulama sistemi,
Yeni ray tipi tasarım,
AutoCad ve Lumnion
Solidworks

Öz: Bu çalışmada, modern fide seralarının en önemli gereksinimlerinden biri olan sürdürülebilir ve verimli sulamanın sağlanması için yeni bir raylı tip otomatik sulama sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Yeni raylı sulama sistemi ile sulama ve ilaçlama aynı anda yapılabilmekte ve fide tipine göre su/pestisit püskürtme basıncı ve sulama yüksekliği ayarlanabilmektedir. Yeni tip raylı sulama sistemi ile eski sulama sistemine göre yaklaşık %60 su tasarrufu sağlanmıştır. Yeni raylı sulama sisteminin, sera bakım maliyetlerini önemli ölçüde düşürürken fide verimini artırması beklenmektedir.

*Corresponding Author, email: arikmustafa372@gmail.com

1. Introduction

Greenhouses are structures that allow the production of seeds, saplings, and seedlings under the most appropriate environmental conditions, regardless of the environmental conditions that change depending on the climate. In greenhouses, the necessary conditions such as relative humidity, temperature, light, air, and carbon dioxide circulation, can be controlled [1-4]. Greenhouse farming began in Turkey around 50-55 years ago, in the provinces of Antalya and İçel [5]. Turkey is one of the top four greenhouse cultivation countries in the world, while Europe ranks second (after Spain) [6]. Turkey has a total greenhouse area of 789603.5 decares as of 2019. Plastic greenhouses account for 47.96% (378670.5 daa), low plastic tunnels account for 28.42% (224400.4 daa), high plastic tunnels account for 14.06% (111037.9 daa), and glass greenhouses account for 9.56% (75494.7 daa) of existing greenhouse areas (789603.5 daa) [7].

Modern (closed) greenhouse (automated agriculture) practices that offer sustainable and efficient production for four seasons were accelerated by agricultural technology that was developed in parallel with technological developments in the fields of electronics and mechatronics [8-11]. In modern greenhouses where sensors, wired-wireless communication technologies, and digital electronics are used effectively, optimum operating conditions can be achieved in the greenhouse. In modern greenhouse enterprises, the optimum conditions determined for plant growth defined in the automation system are compared with the

instantaneous data received via sensors, and automatic interventions could be made to optimize the greenhouse conditions. In other words, irrigation if irrigation is required, heating if heating is required, humidification if humidification is required, etc. can be made out automatically in the greenhouse. Thus, it is ensured that the products are grown in the modern greenhouse grow and develop under optimum conditions. Thus, plant growth rate and product quality can be improved [12]. The constantly changing factors in the greenhouse in the horizontal and vertical directions could be measured in real-time in modern greenhouses, saving energy, water, and fertilizer. Furthermore, in recent years, efforts were accelerated to meet the ever-increasing population's food needs sustainably, to increase product efficiency/quality, and, most importantly, to ensure the efficient use of limited natural resources such as water. The significance of developing and implementing automation-based effective irrigation systems in agricultural production was recognized in this context. Therefore, the studies in this context was accelerated. [13-17].

Çakır and Calis (2007)[18], who was studying the development of a remote-controlled automatic irrigation system, used PIC 16F877 microcontroller in their studies. The system they designed allows for automatic or manual irrigation over the PSTN telephone line. The soil moisture was used as trigger data. It was stated that with the developed remote-controlled irrigation system, water and labor savings are achieved. Fidan and Karasekreter (2011)[19] designed an SMS-controlled irrigation automation control unit (SKB). The system could be controlled by an SMS message by the user. It was reported that electricity and water savings are achieved with the system, which can send an information message to the user by adjusting the irrigation time in case of natural precipitation. Sakaguchi et al. (2011)[20] measured the water level of the plants with the help of electrodes placed on the leaves of the plants and transferred the data to the computer. In their study, it was revealed that there was no change in the amount of liquid of the plants that went into sleep mode under closed-heat stable environmental conditions. In a study using activators and special sensors, a WNS-based irrigation system was designed (Angelopoulos et al. 2011)[21]. Another research group made a new design they call iRain. They designed an automation system that transfers the moisture value of the soil to the network environment with the help of XBee. With this design, irrigation for three days was prevented automatically in the case of natural precipitation (Caetano et al. 2014)[22]. Abbas and his working group (2014)[23] were designed a smart irrigation system for gardens using 6 sensor nodes points, 1 base station, USB programming card, data acquisition card, a radio module, and wireless sensor network. They reported that with this system, excessive irrigation can be prevented in rainy seasons. This design, which was a smart automatic irrigation system application, can evaluate the data it receives from the moisture sensors placed in the soil with a Java application, and according to the data, can be directed through the sendroid valves of the irrigation process. In another study, the researchers who took temperature and humidity measurements from every point of the garden and evaluated the measurement data with a fuzzy logic method designed a Zigbee-based garden irrigation system (Al-Ali et al. 2015)[24]. Agrawal and Singhal (2015)[25] developed a low-cost drip irrigation system using Arduino and Raspberry Pi. The measurement data was evaluated using the irrigation automation system, if necessary, the irrigation process was activated with the solenoid valves. As a result, it was reported that the developed irrigation system in the study provides energy and water savings.

Modern seedling greenhouses are the greenhouse sector that requires the most careful maintenance among other production types. Even though the investment costs are quite high than the others, the investment costs can be quickly recovered with the correct/appropriate seedling growing techniques. For this reason, it is well known, the care shown in the maintenance of modern seedling greenhouses and growing seedlings is important. The most important factor influencing seedling growth and yield is the effective supply of water to the seedlings. For this reason, a new rail-type automatic irrigation system (RTIS) was designed and manufactured in this study to provide sustainable and efficient irrigation, which is one of the most important requirements of modern seedling greenhouses. The goal of the RTIS was to be able to perform irrigation and pesticides spraying at the same time, as well as to be able to adjust the water pressure and irrigation height based on the seedling type. Furthermore, the RITS was intended to reduce operating, labor, and maintenance costs of the greenhouse. The new design was expected to increase seedling yield while significantly lowering greenhouse maintenance costs.

2. Material and Method

The new rail-type irrigation system (RTIS) was designed to ensure the uniform distribution of irrigation water/fertilizer and pesticides to seedlings in seedling production greenhouses, thereby supporting seedling rapid growth. The working principle of the new type of rail irrigation system was based on the fact that the installation sets (where the irrigation nozzles were located) on a rail line connected to the

greenhouse cages and the hose car carrying the water to the nozzles are moved back and forth along the tunnel. This movement was driven by the reducer and steel ropes in the greenhouse area.

2.1. Material selection and technical parameters

Seedling greenhouse cultivation is a type of agricultural production that necessitates a high level of precision. The irrigation system as a whole should proceed at the same level during irrigation, and equal amounts of water should be distributed to each point of the seedling benches. For this reason, the rail line used was one of the most important pieces of equipment in the movement of the rail irrigation system. It was made of galvanized material to ensure the feasibility of the irrigation system and to minimize the vibration that changes depending on the irrigation/ pesticides spraying pressure (2-4 bar).

The idea of producing the rail line with 3 different galvanized profiles (pipe profile, box profile, or D profile) was investigated. It was decided to make it from galvanized box profile for simultaneous minimization of both rail movement vibration and irrigation system installation cost. In the selection of the box profile, strength, ease of supply, and the amount of load on the greenhouse were also taken into account.

The number of double-row nozzles mounted on the installation set designed from galvanized box profiles and the distance between the nozzles can be adjusted according to the greenhouse tunnel width and the length of the seedling benches. In addition, the distance between the nozzles can be adjusted depending on the plant type, the amount of pesticide to be applied, and the irrigation flow. The chosen nozzles are resistant to high pressure (2-4 bar). A double row nozzle system was designed so that pesticide spraying and irrigation can be done at the same time. In this way, time, energy, and labor savings were achieved. The water going to the nozzles was transmitted by plastic-based pipes connected to the hose trolley.

Table 1. Technical design parameters of RTIS

Features	Value ranges
The maximum and minimum speed of the new irrigation system on the rail line	2-10 m/min
Water pressure range (max-min) in the new irrigation system	1-3 bars
Distance between nozzles in the new irrigation system	20 cm
Spraying pressure range (max-min)	2-4 bars
How to decide the irrigation time	Data from humidity and temperature sensors are being evaluated
Sensors used in automation based irrigation system	Soil moisture sensor, Temperature sensor
The device on which the controller interface of the automation is installed	Computer
Variable parameters in the automation system	temperature, humidity
Max-min operating ranges of variable parameters	T= 16-20 °C Rh= 60-80%
Irrigation height range of the new type irrigation system according to the seedling type	0.2-0.5m
If the "0" point of the seedling bench is accepted, the max.-min operating height range	15cm-1m
Number of pumps in the new rail type irrigation system	2 pumps
How many valves and valve type in the new irrigation system	3 manual valves per turn
Track length of the new irrigation system	100 meters per acre
The length of the sub-set to which the nozzles are attached in the new irrigation system	10 meters
Number of nozzles installed in the lower plumbing kit	42 pieces
Construction material of nozzles	polyethylene
Parts not produced from galvanized material in the irrigation system	All of them
Type of engine used in the irrigation system, its feature	30-40 m ³ /h 40 ss-cast body

The irrigation system was controlled by a frequency inverter motor-reducer. The purpose of choosing this control system was to enable in cases where sensitive irrigation and fertilization were required, the rail connected to the engine to move along the tunnel at the speed determined by the grower, with the frequency change on the engine, and for allowing made for irrigation/fertilization by the needs.

The height of the irrigation system plumbing set was designed adjusted according to the seedling type/size. The irrigation/ pesticides spraying was able to do at a height of a minimum of 35 cm from the seedling stand. In this way, irrigation/pesticide spraying efficiency was increased and damage to the seedling was prevented. Besides, thanks to the adjustable height of the irrigation system, fogging/humidification could be done under required conditions.

3. Result And Discussion

3.1. Design of New Rail Type Irrigation System

The AutoCAD drawing of the new type of rail irrigation system was presented in Figure 1, and the photographs of the Lumion simulation application are presented in Figure 2. Also, the Lumion application video was given in the supplementary document. Solid-works design of all parts of the RITS were made and presented systematically in Figure (3-7). Detailed design of the rail system and butt gear reducer were presented in Figure 3, installation undercarriage in Figure 4, the irrigation system installation hanger set in Figure 5, installation top set in Figure 6, and the irrigation system hose trolley in Figure 7.

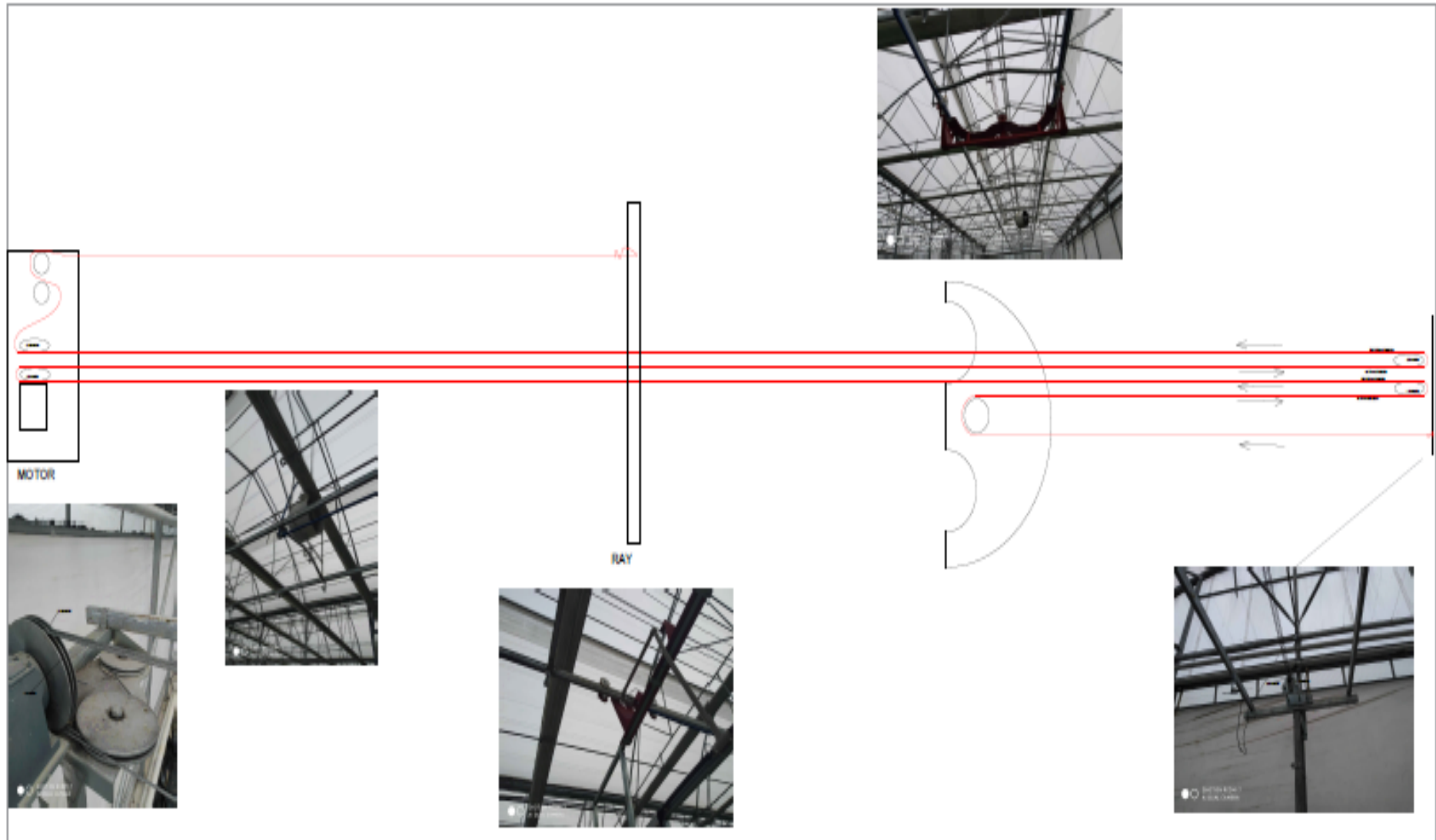


Figure 1. AutoCAD drawing of the new rail type irrigation system

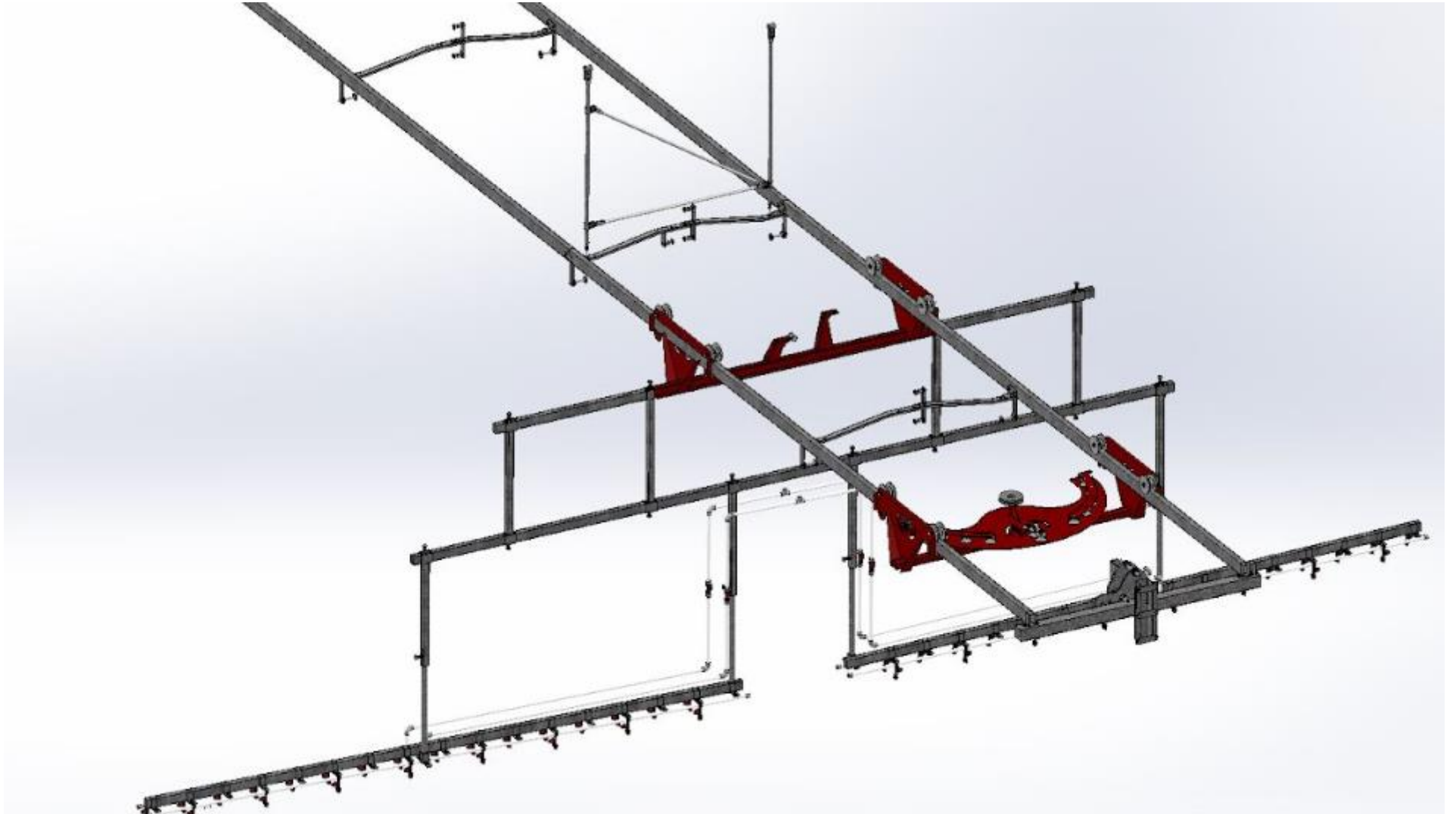


Figure 2. Lumion program images of the RTIS

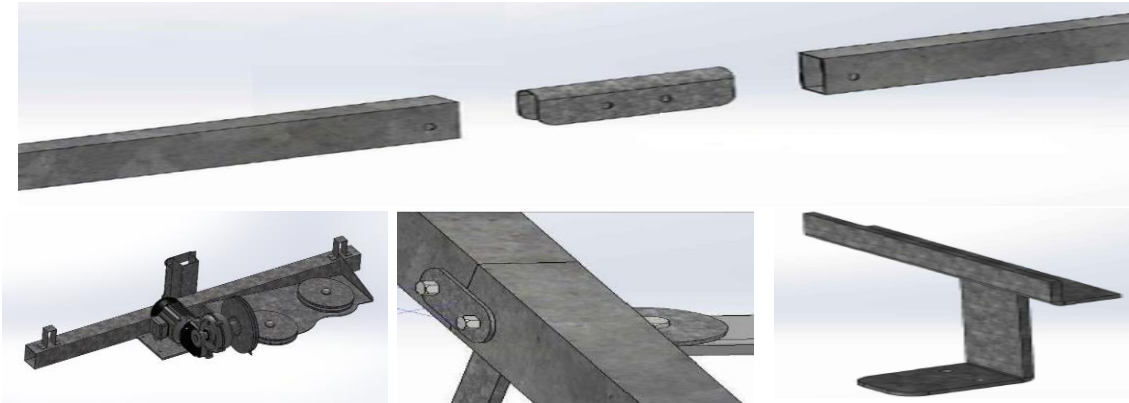


Figure 3. Solidworks drawing of the rail system and butt gear reducer

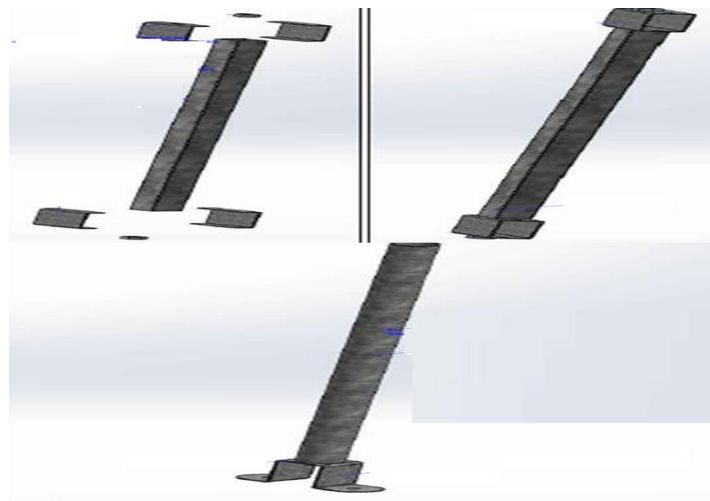


Figure 4. Solidworks design of irrigation system installation undercarriage



Figure 5. Solidworks design of irrigation system installation hanger set

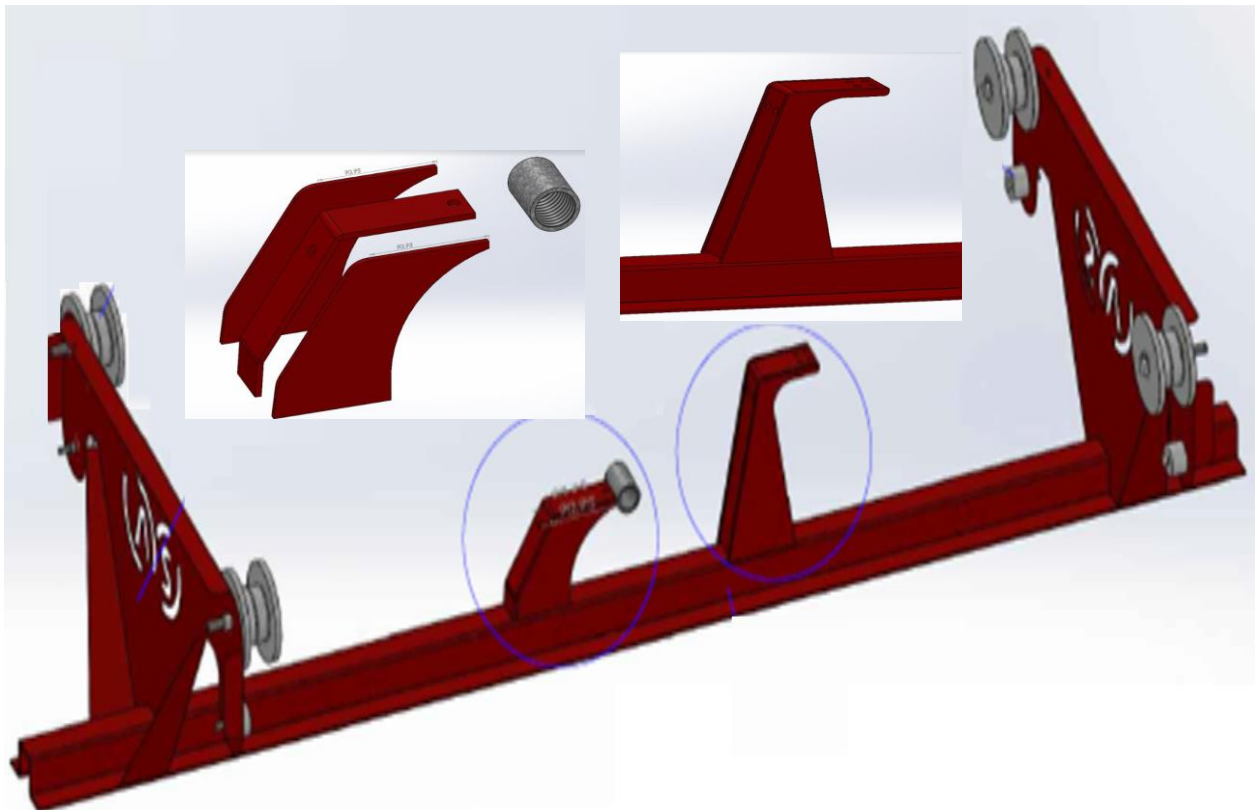


Figure 6. Solidworks design of irrigation system installation top set

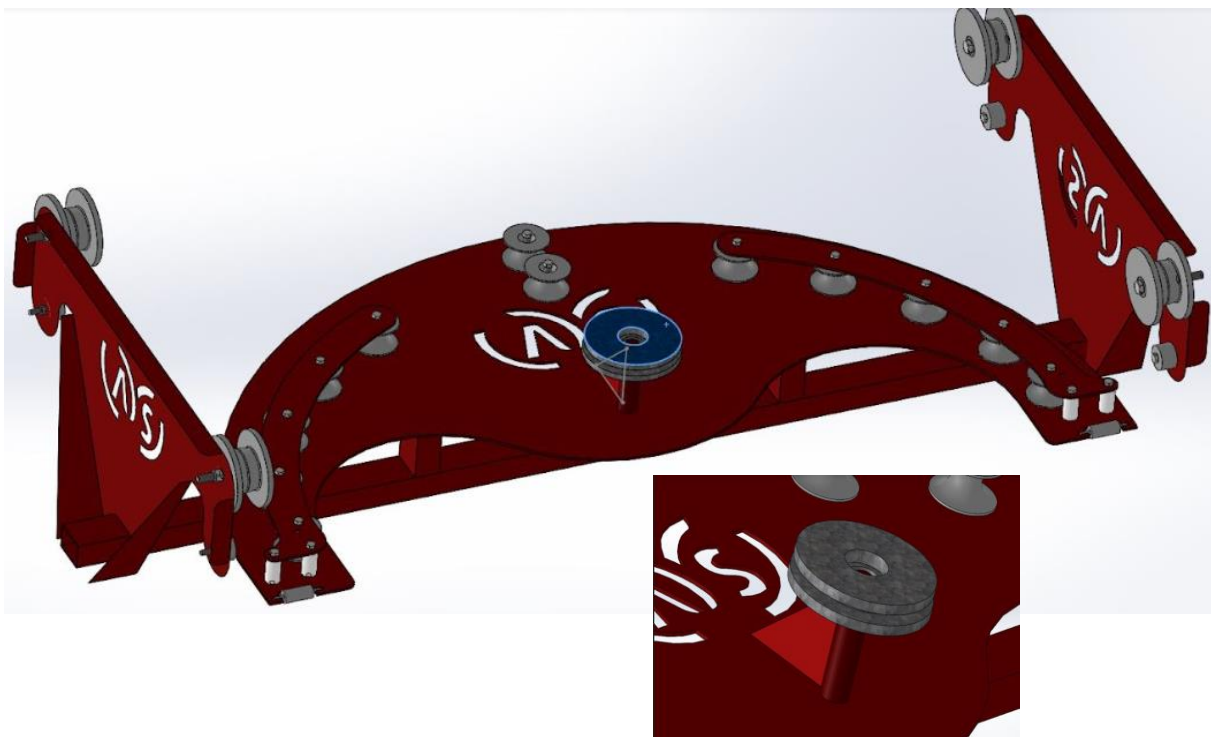


Figure 7. Solidworks design of irrigation system hose trolley

3.2. Assembly Plan and Installation of the New Rail Type Irrigation System

The installation of the RTIS was done in two steps. (a). the installation steps were schematized, and the installation was planned with CAD program (b). Installation of the RTIS was carried out in the application greenhouse. Figure 8 depicts schematic design of the new irrigation system's assembly stages. The assembly process's technical details were summarized in six main steps (Figure 8 a-f).

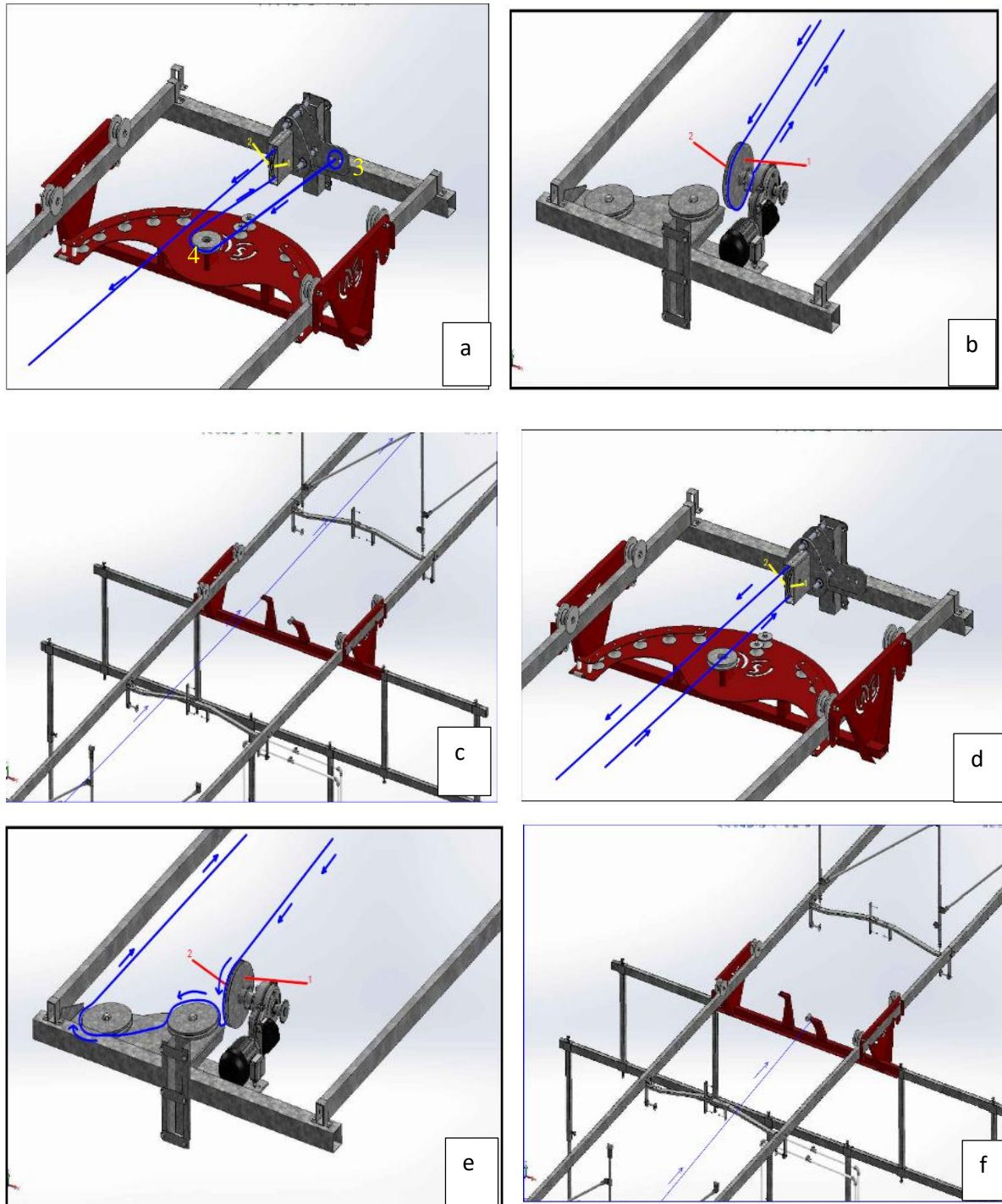


Figure 8. The installation procedure of the RTIS

The RTIS irrigation system, the assembly of which was planned with CAD program, was installed in the Mersin application seedling-greenhouse within the AYTEKIN Group. The field photos of the installation stages was presented in Figure 9. In addition, the video of the RTIS into the application seedling-greenhouse was given in the supplementary document.

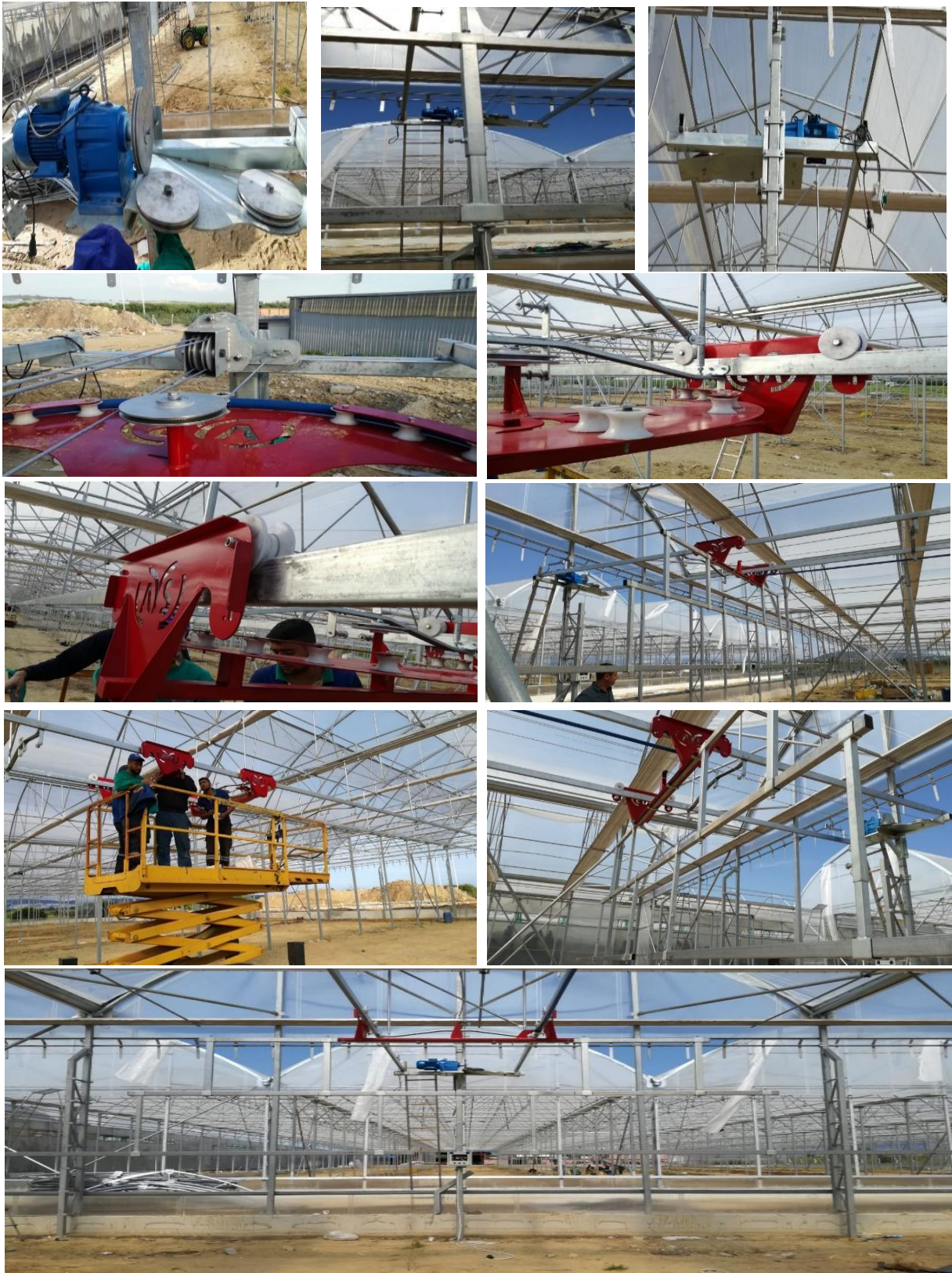


Figure 9. Installation of the RTIS in the application greenhouse

4. Conclusion

In the traditional type irrigation system (TIS) (Figure 10), irrigation was carried out only by the movement of the water hoses on the rails, without the use of ropes. The required hose length was three times the length of the greenhouse tunnel. The RTIS's hose length was only half the length of the greenhouse's tunnel (Figure 11 and supplementary information video 1-2). The detailed compared features are presented in Table 2.

As a result,

- The RTIS has reduced the cost of the hose, which must be replaced at regular intervals.
- In the traditional type irrigation system, the hose mess of the installation set had been creating a crowded environment in the greenhouse. The RTIS resulted in an increase in useful free space in the greenhouse.
- Due to the pressure created while pesticide spraying in the traditional type irrigation system, there had been a significant level of vibration during the movement of the installation set. For this reason, it was known that optimum pesticides spraying could not be done. Since vibrations can be minimized with the newly designed RTIS, effective pesticides spraying can be done.
- In the traditional type irrigation system, irrigation and pesticides spraying could not be done at the same time, in the new design, it can be done in two processes at the same time.
- In the traditional type irrigation system, there was no fogging/humidification feature. In the new design, the humidity content of the greenhouse can be regulated if necessary.
- In the traditional type irrigation system, water pressure/flow rate and irrigation height were fixed values. With the new type of rail irrigation system, irrigation parameters (irrigation/ pesticides spraying pressure, flow rate, and irrigation height) can be adjusted according to the seedling type and size using automation.
- Since the RTIS was operated on an automation basis, labor and greenhouse maintenance costs were decreased compared to the old irrigation system.
- Since the RTIS system enables the water to be distributed equally and efficiently to the entire greenhouse area, approximately 60% water savings were achieved compared to the old irrigation system.
- It was observed that the new irrigation system will lead to an increase in seedling quality and productivity.
- Considering the water and food bottleneck scenarios anticipated at the international level in the coming years, the advantage of the RTIS will be more clearly observed.



Figure 10. The traditional type irrigation system



Figure 11. The new rail-type irrigation system

Table 2. The detailed compared features

Compared feature	Tradational type irrigation system	New Raily type irrigation system
Amount of water consumed (per plant)	4 L/day	1,2 L/day
Water consumption (per m ²)	16 L/day	4,8 L/day
Water saving with new system (per m ²)	12.2 L/gün	
Hose length used per unit tunnel length (m/m)	1	0.5
Annual hose cost consumption (per m/m)	1 TL	0,5 TL
Number of workers per square meter (person/m ²)	5	2
Annual labor costs (TL)	180000	72000
Annual labor savings with new system (TL)	108000	
The annual energy savings with new system (%)	50%	

ASSOCIATED CONTENT**Supplementary Information**

Video 1-[Click to watch the Lumion simulation of the new rail-type irrigation system.](#)

Video 2-[Click to watch the video of the new type of rail irrigation system.](#)

Notes

The authors declare no competing financial interest.

References

- [1]. TS EN 13031-1 2003. Seralar- Tasarım ve Yapım- Bölüm 1: Ticari Üretim Seraları ICS 65.040.030 Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA.
- [2]. Anonim 2019 [Örtü Altı Yetiştiricilik \(tarimorman.gov.tr\)](#) last access date: 06.07.2022
- [3]. Öztürk H.H. ve Başçetinçelik A. 2002. Seralarda Havalandırma. Türkiye Ziraat Odaları Birliği, Yayın No: 2002
- [4]. İşcan S., Ayyıldız Z., Çınar M., Erarslan H., Karataş T. ve Tepeli E. 2004. Örtü Altı Yetiştiriciliği. T.C. Tarım ve Köy işleri Bakanlığı, Adana Ziraat Üretim İşletmesi Personel Eğitim Merkezi Müdürlüğü, Yayın No: 10
- [5]. Yüksel A.N. 2004. Sera Yapım Tekniği. Hasad Yayıncılık, ISBN 975-8377-09-4, İstanbul, 287s.
- [6]. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2019a. <https://www.tarimorman.gov.tr/Konular/Bitkisel-Uretim/Tarla-Ve-Bahce-Bitkileri/Ortu-Altı-Yetistircilik>
- [7]. TUIK, 2019a. www.tuik.gov.tr, last access date: 06.07.2022
- [8]. Doğan Ç., 2018. Isı Korumalı Modern Seralarda Üretici Koşullarında Toplam Isı Gereksinim Katsayısının Belirlenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi.
- [9]. Özfuruncu M., 2019. Malatya Yöresinde Modern Sera Yapılabilirliğinin Isıger-Sera Uzman Sistemi İle Araştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [10]. Özgürel M., 2019. Adıyaman Bölgesi Modern Seracılık İşletmelerinin Isı Tüketimlerinin Hesaplanması Ve Isı Koruma Önlemlerinin Isı Tüketimine Etilerinin Araştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [11]. Altunbaş Y., 2018. Bitki Su İhtiyacına Göre Uzaktan Kontrollü Bahçe Sulama Sistemi Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [12]. Apaydın, T. 2015. Seracılık Yatırımı. (Fırat Kalkınma Ajansı, Röportaj Yapan), last access date: 06.07.2022
- [13]. Sudharshan N., AVS Kasturi Karthik., JS Sandeep Kiran., S. Geetha., 2019. Renewable Energy Based Smart Irrigation System, Procedia Computer Science, 165, 615–623.
- [14]. Al-Ali, A. R., Nabulsi, A. A, Mukhopadhyay, S., Awal, M. S., Fernandes, S., Ailabouni, K., 2019. IoT-solar energy powered smart farm irrigation system, Journal of Electronic Science and Technology, 17 (4), 1-14.
- [15]. Kang, S., van Iersel, M. W., Kim, J., 2019. Plant root growth affects FDR soil moisture sensor calibration”, Scientia Horticulturae, 252, 208-211.

- [16]. Yılmaz, A., 2019. Fotovoltaik Sistem ve Damla Sulama Yöntemiyle Sulanan Fındıkta Sulama Uygulamalarının Verim ve Verim Bileşenlerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, Ordu.
- [17]. Domínguez-Niño, J. M., Oliver-Manera, J., Girona, J., Casadesús, J., 2020. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors, *Agricultural Water Management*, 228, 59-66.
- [18]. Çakır, A., Çalış, H. 2007, Uzaktan Kontrollü Otomatik Sulama Sistemi Tasarımı ve Uygulaması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3), 258-261.
- [19]. Fidan, U., Karasekreter, N. 2011. GSM/SMS Tabanlı Sulama Otomasyon Kontrol Biriminin Geliştirilmesi ve Uygulaması, *e-Journal of Nem Sciences Academy*, 6(1), 71-77.
- [20]. Sakaguchi, Y., Nakamura, T., Sugisaka, Y., Tanaka, H.T. 2011. Water-volume measurement of plants by using itplanter, *SICE Annual Conference 2011, Tokyo, Japan*, 2798-2800.
- [21]. Angelopoulos, C.M., Nikoletseas, S., Theofanopoulos, G.C. 2011. A Smart System for Garden Watering using Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobility management and wireless Access*, 167-170.
- [22]. Caetano, F., Pitarmaa, R., Reisb, P. 2014. Intelligent management of urban garden irrigation, *9th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Covilhã, Portugal, 1-6.
- [23]. Abbas, A.H., Mohammed, M.M., Ahmed, G.M., Ahmed, E.A., Seoud, R.A.A.A. 2014. Smart Watering System for Gardens using Wireless Sensor Networks, *International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, Fayoum, Egypt, 1-5.
- [24]. Al-Ali, A.R., Qasaimeh, M., Al-Mardinia, M., Radder, S., Zualkernan, IA. 2015. ZigBee-Based Irrigation System for Home Gardens, *Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, 2015 International Conference on, American University of Sharjah, 1-5.
- [25]. Agrawal, N., Singhal, S. 2015. Smart Drip Irrigation System using Raspberry pi and Arduino *International Conference on Computing, Communication & Automation*, Noida, India, 928-932.

Elektrikli Araçların Şarj Yöntemleri ve Şarj İstasyon Tipleri

Furkan KARAPINAR^{*1}, Ferhat DALDABAN²

^{*1}Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ

²Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 26.05.2022, Kabul / Accepted: 26.08.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

DC,
AC,
Şarj İstasyonu,
Şarj Yöntemleri,
Elektrikli Araç

Öz: Günümüzde hızla gelişen teknoloji ile birlikte elektrikli araç teknolojisi de büyük bir ilerleme kaydetmiştir. Bu ilerleme sonucunda elektrikli araçlar hayatımızın önemli bir parçası olmuştur. Ancak bu araçlarda gidilebilecek mesafe ve şarj etme sorunları ortaya çıkmıştır. Elektrikli araçlarda uzun ve yavaş şarj sorunu üretici ve kullanıcıların ortak problemi olmuştur. Bu problemi en aza indirmek için çeşitli şarj etme yöntemleri ve bu araçları şarj eden farklı istasyon tipleri ortaya çıkmıştır. Şarj etme yöntemleri ve şarj istasyon tipleri değerlendirilirken uygulama prensibi ve şarj etme süreleri dikkate alınmıştır. Bu çalışmada şarj etme yöntemleri Mod1, Mod2 ve Mod3; şarj istasyon tipleri ise AC Şarj, DC Şarj ve Kablosuz Şarj olarak değerlendirilecektir.

Electric Vehicles Charging Methods and Charging Station Types

Keywords

DC,
AC,
Charging Station,
Charging Methods,
Electric Vehicle

Abstract: Today, with the rapidly developing technology, electric vehicle technology has made great progress. As a result of this progress, electric vehicles have become an important part of our lives. However, distance problems and charging problems have emerged in these vehicles. The problem of long and slow charging in electric vehicles has been a common problem for manufacturers and users. In order to minimize this problem, various charging methods and different types of stations charging these vehicles have emerged. While evaluating the charging methods and charging station types, the application principle and charging times were taken into account. The charging methods in this study are Mod1, Mod2 and Mod3; charging station types will be considered as AC Charge, DC Charge and Wireless Charge.

*İlgili Yazar, email: furkankarapinar38@gmail.com

1. Giriş

Günümüzde, teknolojinin hızla gelişmesi ve nüfusun hızlı bir şekilde artması sonucu, özellikle fosil yakıtlar başta olmak üzere yenilenemeyen enerji kaynaklarının hızlıca tükenmesine sebep olmuştur. Küresel birincil enerji tüketimi büyümesi geçen yıl yüzde 5,5 artarak tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaştı. Fosil yakıtlar, geçen yıl birincil enerji kullanımının yüzde 82'sini oluşturdu. Birincil enerji kullanımının geri kalan payı hidroelektrik (yüzde 6,8), yenilenebilir enerji (yüzde 6,7) ve nükleer enerji (yüzde 4,2) aldı. Bu artış elektrikli araç teknolojisindeki enerji kullanımının artışının etkilemiştir. Bilindiği gibi, araçların hareket üretmek için bir tahrik sistemine ihtiyacı vardır ve bu hareket genellikle iki yöntemle sağlanır. Birincisi ve en önemlisi bir içten yanmalı motor ve ikincisi de bir elektrik motorudur. Başlangıçta araçların elektrikli motorlarla çalıştırılabileceği düşünülmeye rağmen, rota tamamen içten yanmalı motorlara çevrilmiştir. Bunun başlıca temel nedenleri, yarı iletken teknolojisinin ihtiyacı karşılayabilecek düzeyde olmaması, düşük pil kapasitesi ve mevcut olmayan şarj

istasyonlarıdır. Fakat içten yanmalı motorlar, daha karmaşık sistemlere sahiptirler. Ayrıca, içten yanmalı motorların kullanılması, uzun vadede tüm insanlık ve dünyanın ekolojik dengesi için daha fazla soruna yol açmaya devam etmektedir [1]. Elektrikli araçlar, petrol ve türevleri yakıtlara ihtiyaç duymadan çalışması özelliği bakımından, bu araçları almak isteyen veya araçlarını geleceğe yönelik değiştirmek isteyen insanlar için son derece cazip alternatifler sunmaktadır. Bu yeni nesil otomobiller, içten yanmalı araçlara göre farklı bir güç sistemine sahip olduğu için insanların aklında birçok soru işareti bırakıyor. Şarj konusu ise şüphesiz bu soruların başında gelmektedir. Elektrikli araç sektörünün gelişmesiyle şarj teknolojisi de hızla gelişmeye devam etmektedir. Fakat günümüzde neredeyse bütün araçlar için belirlenen güç değerleri, bağlantı tipleri ve kablo gereklilikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada bu elektrikli araçlar için şarj etme yöntemleri, şarj istasyon tipleri ve modları sunulmuştur [2].

2. Elektrikli Araç Şarj Etme Yöntemleri

Elektrikli araçlar için günümüz teknolojisinde üç türlü şarj etme yöntemi bulunmaktadır. Bunlar: batarya değiştirme, kablosuz ve kablolu şarj yöntemleridir. Kablolu şarj etme yöntemi kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Bunlar AC ve alternatif akım tipi şarj üniteleri ile DC kullanan doğru akım şarj üniteleridir. Bu araçların neredeyse tamamı AC ve DC şarj istasyonlarından bataryalarını şarj edebilmektedir.

Kablosuz şarj etme yönteminde elektrikli araçlarda şarj aparatı gereksinimine ihtiyaç duymaması bakımından hem kullanışlı hem de daha güvenilir bir yöntemdir. Bu şarj etme metodunda, elektrikli aracın yüzeye kurulan indüklenmiş bir ortama bırakılıp şarj olması gerekmektedir. Bu elektrik alanda oluşan elektromanyetik dalgalar sayesinde araç şarj olmaktadır. Günümüzde bu sistem hala tam olarak istenilen seviyede olmayıp araçların giderken de şarj olabilmesi için çalışmalar yapılmaktadır.

Batarya değişimi işlemi ise genelde belirlenen değişim noktalarında yapılmaktadır. Söz konusu şarj yönteminde şarj dolumu sırasında zaman kaybı yaşamak istemeyenler tarafında tercih edilmektedir. Bu yöntem ile aracın bataryası boşaldığında, dolu bataryanın araca entegrasi şarj merkezlerinde veya ilgili servislerde kısa sürede yapılmaktadır [3].

2.1. Kablo ile Şarj Seviyeleri

Elektrikli araçların kablolu şarj yönteminde gerekli ekipmanlar, alınan aracın modeline göre değişkenlik göstermektedir. Kullanımı zor olmayan kablolu şarj metodunda ev tipi şarj, standart şarj ve hızlı şarj şeklinde üç farklı seviye bulunmaktadır [3].

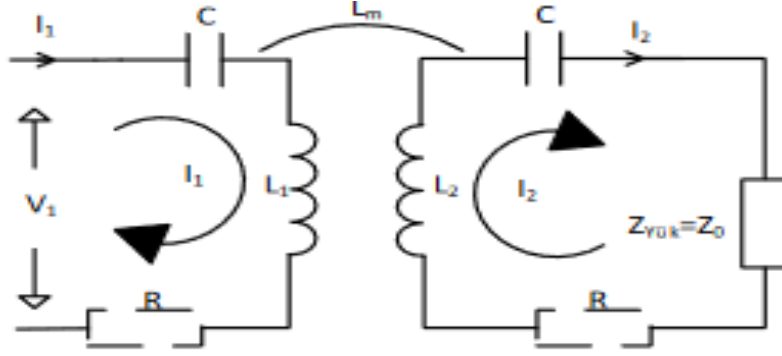
Seviye 1 (Ev Tipi) şarj yönteminde araç normal bir ev prizine bağlanarak şarj edilmektedir. Yavaş şarj olarak da bilinen seviye 1, şarj işlemini 120 Volt gerilim değeri ile sağlamaktadır. Ev tipi priz üzerinde 1 saatlik şarj ile ortalama 6-8 kilometre yol alınabilmektedir. Bataryanın tamamen dolması, aracın modeline ve markasına göre 7-29 saat aralığında değişkenlik gösterebilmektedir. Şarj işleminde herhangi bir dönüştürücü kullanılmamaktadır. Şarj aparatları genelde araçla birlikte bulunmaktadır.

Seviye 2 Şarj (Standart Tip), hızlı şarj tipine kıyasla daha ucuz, yavaş şarj tipine oranla daha kısa sürede şarj olmaktadır. Seviye 2 şarj tipi 240 Volt ila 400 Volt değerinde enerji aktarımı yapan prize ihtiyaç duymaktadır. Bu şarj tipindeki üniteler genelde şehir merkezlerinde, alışveriş merkezleri, benzinlikler ve dinlenme tesisleri gibi halka açık alanlarda bulunabilmektedir. Seviye 2 şarj modu ile araç, 1 saat şarj edilmesiyle ortalama 25-40 km mesafe alabilmektedir. Elektrikli aracın %100 şarj olması 2-10 saat sürmektedir. Bataryanın dolumu süresince enerji dönüştürücüsüne gerek yoktur. Seyyar 240 Volt prizler ile batarya dolumu kolayca gerçekleştirilmektedir. Bu şarj tipi için şarj ekipmanları aracın kendi üzerinde bulunmaktadır [3].

Seviye 3 (Hızlı Tip) şarjın, hem doğru akım hem de alternatif akım tipleri bulunmaktadır. Alternatif akım modunda üç fazlı sistemler enerjilendirme için kullanılırken, doğru akım modunda ise alternatif akım elektrik şebekesinden doğrultularak doğru akım için kullanılmaktadır. Seviye 3 şarj metodunda ekipmanlar, alternatif akım modunda araca entegre edilmiş, doğru akım tipinde araca entegre değildir. DC şarj, AC şebekeden doğrultulan enerji ile sağlanmaktadır. DC şarjda 10 dakika şarj etme ile ortalama 70 km'ye yakın yol kat edilmektedir. Daha hızlı enerji transferi ile bataryanın tamamen dolması diğer seviyelere göre daha kısa sürede gerçekleşmektedir [3-4].

2.2. Kablosuz Şarj

Günümüzde artık birçok elektronik cihaz kablosuz şarj edilebilmektedir. Örneğin; akıllı telefonlarımız, saatlerimiz, tabletlerimiz ve daha birçok cihazımız kablo olmadan şarj edilebilmektedir. Kablo olmadan şarj edilebilen bu cihazlarımız dok (dock) adı verilen şarj etme yüzeyine konularak kablo varmış gibi şarj edilebilmektedir. Şarj etme yüzeyinin enerjisi ise, kablo ile prize bağlanarak ya da kendi içindeki batarya sistemi ile sağlanabilir. Şarj edilecek cihaz ile şarj eden yüzey arasındaki enerji aktarımı, manyetik rezonanslı kuplaj (MRK) vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. MRK birçok değişkene sahip karmaşık bir konudur[4].



Şekil 1. Manyetik rezonanslı kuplaj eşdeğer devresi[4]

Şekil 1'de MRK'nın eşdeğer devresi görülmektedir. Elektrikli araçları şarj etmek için bu sistem araçlarımızı park ettiğimiz alanlara yada otopark gibi toplu alanların zeminine entegre edilerek kolayca kullanılabilmesi planlanmaktadır. Bu şarj işlemi iki yönlü olduğu için araçların altına da şarj alabilen çeşitli malzemelerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlemlerle birlikte araçların park edildiği yerlerde kolayca şarj edilebilmesi planlanmaktadır [5].

2.3. Batarya Değiştirme Yöntemi

Elektrikli araçların gideceği maksimum yol, bataryalarının doluluk oranıyla doğru orantılıdır. Bu araçlar benzinli ve dizel araçlara göre daha az yol almaktadır. İçten yanmalı motorlara sahip araçlar enerji gereksinimini elektrikli araçlara kıyasla daha kısa sürede karşılamaktadırlar. Bu durum elektrikli araçların batarya değiştirme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Böylece bu araçlar için batarya değiştirme metodunu ortaya çıkarmıştır. Bu metod ile şarj olmayan bataryayı yenisi ile değiştirmek için yaklaşık 1,5 dakikalık süre gerekmektedir [5-6].

2.4. Elektrikli Araç Şarj Modları

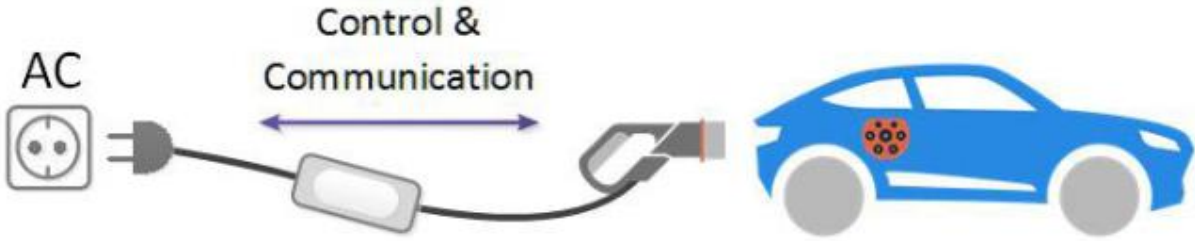
Elektrikli araçlar, bataryaları yapıları gereği doğru akımla da şarj olabilmektedir. Mod 1, Mod 2 ve Mod 3 şarj işlemlerinde alternatif akım, doğru akıma araç üzerinde yerleşik şarj sistem ile çevrilirken, Mod 4 metoduyla, bu dönüşüm işlemi şarj istasyonunda gerçekleştirilir.

Mod 1, elektrikli aracın doğrudan alternatif akım, şebekeden şarj edilmesi olarak tanımlanır. Gelen akım 16 Amper, gerilim ise tez fazda 250 Volt ve üç fazda ise 480 Volt ile sınırlıdır. Bu mod için ayrıca topraklama gerekmektedir. Birçok ülkede Mod 1 tip şarj, güvenlik nedeniyle yasaklanmıştır. Çünkü çoğu prizde topraklama ve koruyucu cihaz yoktur. Bu güvenlik sorunlarını azaltmak için Mod 2 şarj geliştirilmiştir.



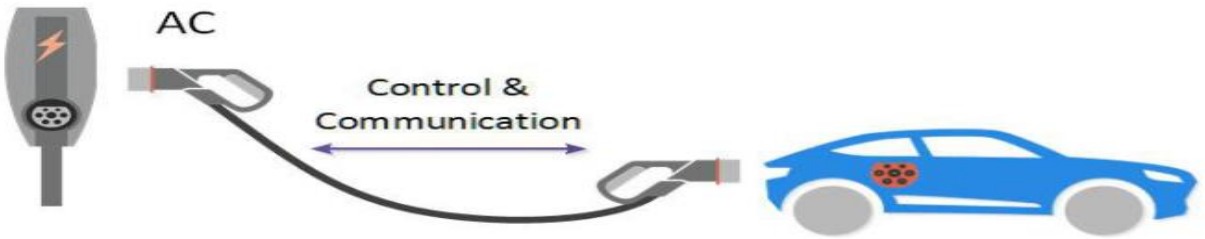
Şekil 2. Mod 1 şarj modu[7]

Mod 2 şarjı, AC ve DC akımlarına karşı entegre şok korumalı özel bir kablonun kullanılmasıyla geliştirilmiştir. Mod 2 şarjda, şarj kablosu elektrikli araçla birlikte verilir. Mod 1 şarjdan farklı olarak, Mod 2 şarj kablosunda elektrik çarpmasına karşı koruma sağlayan dahili koruma bulunmaktadır. Mod şarj şu anda elektrikli araçları şarj etmenin en kullanışlı ve yaygın modudur. Şarj kablosunda entegre bir koruma cihazı bulunan ev prizi veya endüstri prizi aracılığıyla AC'de yeniden şarj edilmesidir[7].



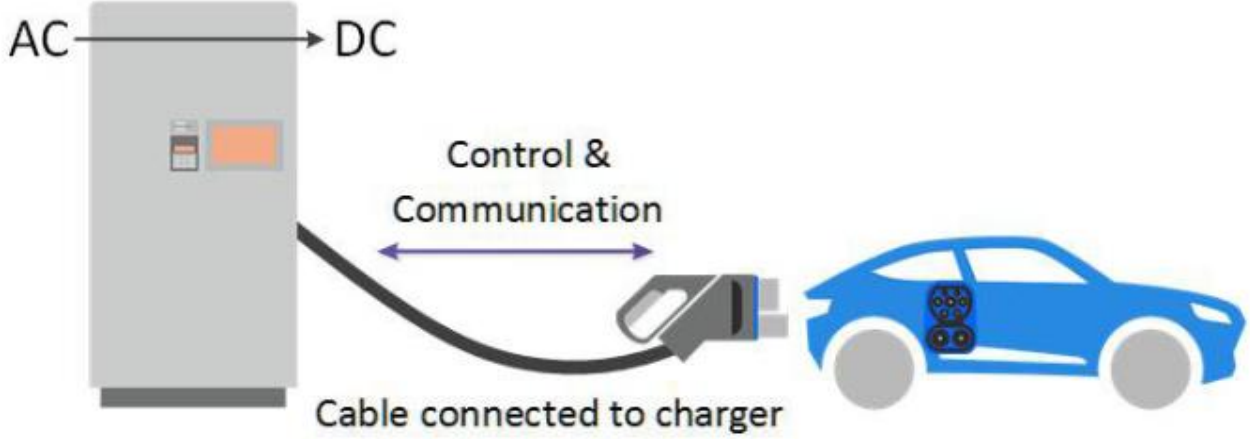
Şekil 3. Mod 2 şarj modu[7]

Mod 3 şarjı, elektrikli araç şarjı için özel bir şarj istasyonunun veya duvara monteli şarj kutusunun kullanılmasını içerir. Her ikisi de AC veya DC akımlarına karşı şok koruması sağlar. Mod3'te, bağlantı kablosu duvar kutusu veya şarj istasyonu ile birlikte sağlanır ve elektrikli aracın şarj için özel bir kablo ihtiyacına gerek duymaz. Mod 3 şarjı şu anda elektrikli araçlar için tercih edilen yöntemdir. Bu işlemde araç şarj merkezine bağlandığında aralarında bağlantı kurulur. Araç alabileceği en yüksek akım miktarını istasyona bildirir, bu sayede istasyon araca gidecek en uygun akımı belirleyerek araca aktarır[7].



Şekil 4. Mod 3 şarj modu[7]

Mod 4 ise genellikle DC hızlı şarj veya sadece hızlı şarj olarak bilinmektedir. Bununla birlikte Mod 4 için çok çeşitli şarj oranları mümkündür. Şu anda taşınabilir 5 kW ünitelerden 50 kW ve 150 kW'a kadardan 350 ve 400 kW'lara ulaşan standartlar mevcuttur. Kontrol ve koruma fonksiyonları ile oluşturulmuş doğru akımda bir şarj noktasında şarj olmaktadır. 80 Amper'e kadar akımlar için tip 2 şarj fişi veya 200 Amper akıma kadar Combo tip şarj istasyonları kullanılabilir. Bu istasyonların gücü 170 kW'a kadar ulaşabilmektedir [8].



Şekil 5. Mod 4 şarj modu[7]

Mod 4 şarj modunda prizden alınan enerji alternatif akım kaynağının, hızlı şarj merkezinde dönüştürücü üzerinden doğru akıma dönüştürülerek aracın bataryasına doğrudan doğruya ihtiyaç duymadan direkt verilmesini sağlar. Bu da yüksek akımlara ulaşabilmeyi ve hızlı şarj olmayı sağlamaktadır.

2.5. Elektrikli Araç Şarj İstasyon Tipleri

Elektrikli araçlar günümüzde alternatif akım veya doğru akım ile şarj olabilmektedir. Günümüzde bu akımları kullanan birçok şarj istasyonları kurulmuştur. Genel olarak şarj istasyon tipleri ikiye ayrılır. Bunlar AC ve DC şarj istasyonlarıdır.

Şehir şebekesinden kullandığımız AC'ye ihtiyaç duyan şarj istasyonları, sisteminin olanak sağladığı şekilde değişik hızlarda sunulmaktadır. Araca monte edilmiş olan enerji dönüştürücü ile üreticinin koyduğu limitler çerçevesinde enerji seviyesini aşmayacak şekilde AC enerji DC enerjiye dönüştürülür. Günümüzde genelde 380 Volt 3 faz ile beslenen 22kW seviyesinde AC şarj merkezleri maliyetinin daha ucuz olmasında dolayı birçok kişi tarafından kullanılmaktadır. Hem 22 kW şarj seviyesindeki istasyonları hem de belirli şirketlerin AC şarj metodu ile 43 kW hızındaki dolumu destekleme değerleri Tablo 1'de verilmiştir [9].

Tablo 1. Elektrikli araçların şarj standartları

Şarj Yöntemi	Voltaj (AC/Volt)	Faz	Maksimum Akım(A)	Maksimum Güç (W)
AC Seviye 1	120	1-Faz	12 16	1.44 1.92
AC Seviye 2	208-240	1-Faz	≤ 80	< 19.2

Elektrikli araçların bataryaları doğru akım ile şarj olurlar. Sistem içindeki dönüştürücü ile dönüştürülen güç, çok yüksek akımların etkisiyle yüksek ısı açığa çıkarır. Bu da üreticileri, güçleri sınırlandırmak zorunda bırakmaktadır. Farklı bir metot ise AC-DC enerji çeviriminin farklı bir yerde yapılmasıyla araca direkt olarak DC güç verilmesidir. Bu şekilde araca entegre edilmiş dönüştürücü kullanılmamasına paralel olarak yüksek ısı problemleri yaşanmadığı için güç sınırlaması olmamaktadır. Doğru akım ile şarj AC'ye göre desteklediği hız limiti fazla olduğu için elektrikli araçlar doğru akım ile daha hızlı ve daha çabuk şarj olabilmektedir. Araç artışıdaki gelişmeler DC şarj istasyonlarının artışı da beraberinde getirmektedir. Tablo 2'de ise Otomotiv Mühendisleri Derneğinin DC şarj istasyonu için tanımladığı DC şarj standartları verilmiştir [9].

Tablo 2. DC şarj standartları

Şarj Metodu	DC Çıkış Voltajı (DC/Volt)	Maksimum Akım (A)	Maksimum Güç (kW)
DC Seviye 1	50-1000	80	80
DC Seviye 2	50-1000	400	400

Elektrikle çalışan araçların batarya dolma süreleri; bataryanın kapasitesi, markası, desteklediği akım değeri ve şarj eden cihazın desteklediği güç değeriyle doğrudan bağlantılıdır. Alternatif akımda kullanılan Mod1 ve Mod2 ile şarj edilen bataryalar, daha yavaş şarj edildiği için batarya dolma süreleri daha fazladır. Elektrikli araç üreten firmalar bu araçların şarj olma hızlarını farklı değişkenli ortamlarda (nem, sıcaklık vs.) test ederler. Araçları sıkıntısız çalışmaları için birçok testten geçirirler. Bu sebeple firmalar araçların şarj sürelerini güvenlik açısından belirli limitlerle sınırlandırmaktadırlar. Tablo 3’de ise AC ve DC şarj yöntemi ile araçların şarj hızı ve süreleri verilmiştir [9-10].

Tablo 3. Elektrikli araçların şarj hızları ve süreleri

Şarj Türü	Şarj Olma Hızları	60 Dakikada Alabileceği Yol	Zaman
Şarj Cihazı (8A)	1.8 kW	10 km	35 saat
1-faz AC Şarj	7.4 kW	40 km	9 saat
3-faz AC Şarj	22 kW	120 km	3 saat
DC Şarj	25 kW	150 km	1.5 saat (%80’e kadar)
Hızlı DC Şarj	50 kW	300 km	1 saat (%80’e kadar)
Ultra Hızlı DC Şarj	175 kW	1000 km	15 dakika (%80’e kadar)

3. Bulgular

Elektrikli araçların batarya kapasiteleri arttıkça, batarya dolma süreleri de uzamaktadır. Bataryalar yaklaşık %85-90 doluluk oranına kadar doğrusal olarak şarj olurken %90 üzeri doluluk oranına ulaştıktan sonra parabolik ve daha yavaş şarj olmaktadır. Bataryalar, sınırlı bir şarj/deşarj döngüsüne ve kullanım ömrüne sahiptirler. Günümüzde birçok firma batarya ömürlerini uzatmak için çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Bu nedenle araçların şebekeye enerji depolaması gibi yeni bir yöntem bulunmuştur. Bu yöntem ile birlikte batarya ömürleri de uzamaktadır. Normal şarj üniteleri elektrikli araçların topluma açık yerlerde şarj edilmesi için üretilmiştir. Normal şarj yeterli enerji miktarının bulunabileceği her yerde yapılabilir. Standart şarj istasyonları, elektrikli aracın tipine ve şarj durumuna göre 6-7 saat içinde, en düşük seviyeden tam doluma ulaşmasını sağlar. Bu üniteler tek fazda ve benzer koşullarda çalışmaktadır.

Hızlı şarj ünitelerinde ise elektrikli araçlar dakikalar içinde şarj olanağı bulabilmektedir. DC şarj standartları Japonya’da CHAdeMo kurumunun çalışmalarıyla oluşturulmuştur. Bu şarjda bağlantı 3 fazla yapılmaktadır. Tablo 4’te bütün şarj üniteleri ve özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 4. Şarj üniteleri ve özellikleri

Şarj Ünitesi	Voltaj	Akım	Güç Değeri	Şarj Seviyesi
Ev Tipi	Tek Fazlı	Kademeli 13-16-32 A	Kademeli 3-3,7-7,4 KVA	Seviye 3
Normal	Tek Fazlı	16 A	3,7 KVA	Seviye 1/2
Hızlı	DC	125 A’e kadar	50 KW	Seviye 3
	AC	63 A’e kadar	43 KVA	Seviye 3

4. Tartışma ve Sonuç

Günümüzde yenilenemeyen enerji rezervlerinin azalması ve ülkelerin bu konuda yaşadıkları sorunlar elektrikli araçları artık mecbur kılmaktadır. Bu kaynaklarının azalması, elektrikli araçlara ve diğer çevre dostu projelere yatırımları arttırmıştır. Aynı zamanda elektrikli araçların, benzin ve dizel araçlara göre daha çevreci olması dolayısıyla önümüzdeki 50 yıl içinde dünyada tamamen elektrikli araçların varlığında söz edileceği öngörülmektedir. Fakat günümüzde hala elektrikli araçların sayısında istenilen artış sağlanamamıştır. Bu duruma elektrikli araçların konusunda daha yeni yeni ilerleme sağlanması etkilidir. Her geçen gün yeni teknolojiler geliştirilmekte ve etrafımızdaki araçlar günden güne değişmektedir. Bu araçların gelişimi batarya teknolojisini ve şarj istasyonlarının gelişimini de etkilemektedir. Sadece kablolu değil kablosuz şarj ve batarya değiştirme yöntemleri de bu sayede ilerlemiştir. Artık hızlı şarj ve güvenli şarj teknolojisi de gelişmiş ve kullanımı kolay bir hâl almıştır. Şuanda bile kullandığımız akıllı telefonlarımız, tabletlerimiz, saatlerimiz, bilekliklerimiz bile kablosuz ve hızlı şarj teknolojisi ile şarj olmakta ve hayatımızı epeyce kolaylaştırmaktadır. Elektrikli araçlar için de daha kısa sürede daha uzun mesafelere ulaşma imkânı tanıyan şarj istasyonları geliştirilmektedir. Bu şarj istasyonlarının gelişmesi ve yaygınlaşması elektrikli araç satış rakamlarını da etkilemekte ve daha fazla etkileyecektir. Şuanda birçok kullanıcı bu araçları nerede şarj edebileceği konusunda fikir sahibi olmadığı için bu araçlara ön yargılı yaklaşmakta ve elektrikli araç almaktan çekinmektedir. Bu yüzden şarj istasyonlarının gelişmesi ve yaygınlaşması, bu araçları yollarda daha sık görebileceğimiz anlamına gelmektedir. Günümüzde petrol ve türevleri yakıtlar için verilen savaşlar yakın süreçte elektrikli araç alma ve bu teknolojilere yatırım yapma konusunda verilecektir. Şuan birçok ülke hızlı şarj istasyonu ve batarya için yatırımlarına başlamıştır. Hatta bu ülkeler şarj teknolojisinde bir adım öne geçmek için kablolu şarjdan ziyade kablosuz şarj sistemlerinin daha avantajlı olduğunu düşünmektedir. Batarya değişim sistemindeki yüksek maliyet nedeniyle kablosuz şarj sistemi daha avantajlı görülmektedir. Fakat şuanda bu sistemin yeterince gelişmemiş olması bu sistemin dezavantajdır ve gelişmeye daha açık bir alandır.

Kaynakça

- [1] Özbay, H., & Közkurt C., & Dalcalı, A., & Tektaş, M.(2020). Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar. Akıllı UI Aşınım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 3(1), 34-50.
- [2] Tarlak, H., İşen, E. 2018. Elektrikli Araçlar ve Akü Şarj Sistemleri. Kırklareli University Journal of Engineering and Science, 4(1), 124-141.
- [3] Yazıcı, V., Özdemir, E. 2013. Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri, 5.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 23-24 Mayıs, Kocaeli, 288-292.
- [4] Yılmaz, M., & Krein, P. T. (2012). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. IEEE transactions on Power Electronics, 28(5), 2151-2169
- [5] Kerem, A., & Gürbak H. (2020).Elektrikli araçlar için hızlı şarj istasyonu teknolojileri. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 8(3), 644-661.
- [6] Schmuelling B., Turki F. (2013). A SEPIC fed inductive charging device for electric vehicles. 2013 IV International Conference on 13-17 May, Istanbul, 1-2.
- [7] Durmuş, F.S., Kaymaz, H. 2020. Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi, 3(2), 123-139.
- [8] Kerem, A. (2014). Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(1), 1-13.
- [9] Nurmuhammed, M., & Karadağ T. (2021). Elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılması ve enerji şebekesi üzerine etkisi konulu derleme çalışması. Gazi University Journal of Science Part A, 8(2), 218-233.
- [10] Lukic, S., & Pantic, Z. (2013). Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles. IEEE Electrification Magazine, 1(1), 57-64.

Rekombinant *Escherichia coli* hMT1 Suşunun Nikel ve Alüminyuma Karşı Minimum İnhibisyon Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Şeyma Akkurt¹, Aysel Alkan Uçkun¹

¹Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 02040, Merkez/Adıyaman

(Alınış / Received: 21.09.2022, Kabul / Accepted: 29.11.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

Nikel
Alüminyum
Minimum inhibisyon
konsantrasyonu
Genetiği değiştirilmiş bakteri
Atıksuların biyolojik arıtımı

Öz: Bu çalışmada, insan MT1 geninin *Escherichia coli* (*E. coli*) BL21 yabancıl suşuna klonlanmasıyla elde edilen rekombinant *E. coli* hMT1 suşunun Ni ve Al'ye karşı direnç kapasitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yabancıl *E. coli* BL21 ve rekombinant *E. coli* hMT1 bakterilerine farklı Ni²⁺ ve Al³⁺ konsantrasyonları uygulanarak hücrelerin büyüme potansiyelleri ve Minimum İnhibisyon Konsantrasyonları (MİK) belirlenmiştir. *E. coli* BL21 ve *E. coli* hMT1 suşlarının Ni ve Al için MİK değerleri sırasıyla 200 mg/L ve 425 mg/L, 275 mg/L ve 650 mg/L olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, rekombinant suşun Ni ve Al toleransının yabancıl suşa göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Metaller arası bir kıyaslama yapıldığında ise Al'ye olan tolerans Ni'den daha yüksek bulunmuştur. *E. coli* hMT1 suşunun düşük konsantrasyonlarda bile bu metalleri adsorbe etmesinin, çevrede kullanılabilirliği açısından, yabancıl suşa göre daha yararlı olduğu söylenebilir. Bu çalışma, *E. coli* hMT1 suşunun Ni ve Al metallerinin sulardan biyolojik arıtımında kullanılması için bir ön fikir sağlayabilir.

Determination of Minimum Inhibition Concentrations of *Escherichia coli* hMT1 Recombinant Strain against Nickel and Aluminum

Keywords

Nickel
Aluminum
Minimum inhibition
concentration
Genetically engineered bacteria
Biological treatment of waste
waters

Abstract: The aim of this study was to determinate the resistance capacity of the recombinant *Escherichia coli* (*E. coli*) hMT1 strain against Ni and Al, obtained by cloning the human MT1 gene into *E. coli* BL21 wild strain. Growth potentials and Minimum Inhibition Concentrations (MIC) of cells were determined by applying different Ni²⁺ and Al³⁺ concentrations to wild *E. coli* BL21 and recombinant *E. coli* hMT1 bacteria. MIC values for Ni and Al of *E. coli* BL21 and *E. coli* hMT1 strains were determined as 200 mg/L and 425 mg/L, 275 mg/L and 650 mg/L, respectively. As a result, Ni and Al tolerance of the recombinant strain was found to be higher than the wild strain. When a comparison was made between metals, the tolerance for Al was found to be higher than for Ni. It can be said that the *E. coli* hMT1 strain adsorbing these metals even at low concentrations is more beneficial than the wild strain in terms of its availability in the environment. This study may provide a preliminary idea for the use of the *E. coli* hMT1 strain in the biological treatment of Ni and Al metals from waters.

*İlgili Yazar: sakkurt@adiyaman.edu.tr

1. Giriş

Endüstriyel faaliyetlerin yoğunlaşmasıyla birlikte su kirliliği katlanarak artmaktadır. Uygun arıtma yapılmadan toksik metallerle kirlenmiş atıksuların salınması çevreye büyük zarar verir. Madencilik, galvanizleme ve pigmentasyon gibi endüstriyel işlemler krom (Cr), kurşun (Pb), arsenik (As), kadmiyum (Cd), nikel (Ni) ve alüminyum (Al) gibi toksik metallerden oluşan önemli miktarlarda atık üretir [1]. Metal içeren atıksuları arıtmak için geleneksel yöntemlerden (kimyasal çöktürme, elektrokimyasal arıtma, filtrasyon) ileri teknolojilere (iyon değiştirme, ters ozmoz ve membran teknolojileri) kadar çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır [2-3]. Bununla birlikte, bu yöntemlerin ilk kurulum maliyeti yüksektir ve yüksek konsantrasyonda metal iyonlarının varlığından dolayı düşük verimde arıtım yapılmaktadır [2]. Etkili bir alternatif, biyosorpsiyon gibi düşük maliyetli adsorbanlarla biyolojik yöntemlerin kullanılmasıdır. Biyosorpsiyon, belirli biyokütlenin kirleticilere bağlanmasına izin veren doğal bir fiziko-kimyasal mekanizmadır. Bir diğer deyişle, metal ve fonksiyonel grupların biyokütle üzerine hızlı bir şekilde bağlanması işlemidir [2]. Başlıca avantajları arasında, düşük maliyet, düşük konsantrasyonlardaki metalleri giderme etkinliği, iyi seçicilik ve adsorban biyomateryalini yeniden oluşturma/yeniden kullanma yeteneği yer alır [4].

Ni, insan sağlığı ve çevre üzerinde toksik etkisi olan ağır metallerden biridir [5]. Atom numarası 28 ve atom kütlesi 58,69 olan, besin açısından önemli bir eser metal türüdür. pH'ya bağlı olarak, çeşitli kimyasal formlarda (Ni^{2+} , $Ni(OH)_2$, $Ni_3(O)_4$, Ni_2O_3 vb.) bulunabilir [6]. Ni, kadmiyum-nikel piller, boya ve pigmentler, gübre, galvanik endüstrileri, paslanmaz çelik için ferronikel üretiminden alaşım elementlerine, tıbbi ekipmanlara, enerji üretim endüstrilerine kadar geniş endüstriyel uygulamalara sahip ağır metallerden biridir [7-8]. Ni; esneklik, mukavemet ve yalıtım özellikleri nedeniyle alaşım hazırlamada büyük ölçüde kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi nedeniyle gaz türbinlerinde ve roket motorlarında da kullanılmaktadır [8]. Ni^{2+} iyonları, Ulusal Toksikoloji Programı (NTP), ABD Sağlık ve İnsan Hizmetleri Departmanı (HHS) ve Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) tarafından insanlar için kanserojen olarak kabul edilmektedir [9]. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen izin verilen içme suyu sınır değeri Ni için 0,07 mg/L'dir [10]. Ni'ye uzun süre maruz kalınması, insanlarda alerji, DNA hasarı, nörolojik bozukluklar, kardiyovasküler ve böbrek hastalıkları, akciğer fibrozisi ve burun kanserine neden olabilir [11].

Çalışmamıza konu olan bir diğer çevresel kirlenici metallerden Al, yerkabuğunda doğal haliyle yüksek miktarlarda bulunur. 2019 yılında dünya çapında yaklaşık 63 milyon ton Al üretilmiştir [12]. Al, yüksek iletkenlik, dövülebilirlik ve korozyon direnci gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı birçok endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Makine ve inşaat endüstrilerinde Al, esas olarak metal alaşımlarını oluşturmak için kullanılır. İlaç endüstrisinde ise paketleme, antasitler ve aşılarda kullanılmaktadır. Tekstil endüstrisinde deri için tabaklama maddesi olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca alüminyum sülfat ($Al_2(SO_4)_3$) ve polialüminyum klorür (PAC), su arıtma tesislerinde kullanılan başlıca pıhtılaştırıcı maddelerdir [13-14]. Al'nin farklı endüstriyel sektörlerde yaygın kullanımı, bu metal tarafından kirlenmiş yüksek miktarda atık üretir. Bu atıkların su kütlelerinden yetersiz bertarafı, su sistemlerini, toprakları, bitkileri ve canlıları etkileyen çeşitli çevresel sorunlara neden olur [15]. Nötr pH'larda Al'nin çözünmemesi nedeniyle [16-17], bu metal nadiren doğal olarak suda litre başına miligramın birkaç onda birinden daha yüksek konsantrasyonlarda bulunur [18]. Bununla birlikte, içme suyunda Al'in büyük bir kısmı, inorganik ve organik ligandlarla ilişkili çözünebilir, monomerik Al olarak mevcut olabilir [18-19], bu da ölümcül sonuçları olan ciddi sağlık sorunlarının nedeni olabilir. Sucul ortamlarda yaşayan organizmalar da Al^{+3} formundaki Al'nin varlığından etkilenir. Balıklar üzerindeki etkileri literatürde en çok ele alınan konudur. Araştırmacılar, bu iyon formunun 0,5 mg/L'nin üzerindeki konsantrasyonlarının, birçok türde yüksek bir ölüm oranına neden olabileceğini ve esas olarak ozmoregülasyon ve solunum sistemini etkilediğini bildirmektedir. DSÖ, Al'nin içme suyunda maksimum tolere edilme miktarını 0,2 mg/L olarak belirlemiştir [20]. Al, organizmaların işlevi için gerekli olan kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), demir (Fe) ve diğer elementlerin emilimini azaltabilir ve böylece normal metabolik süreçlerine müdahale edebilir. Hayvanlar için iyi bilinen bir nörotoksindir ve çeşitli nörodejeneratif hastalıklarla ilişkili olduğundan şüphelenilmektedir [21]. 3 mM'dan düşük Al konsantrasyonunun *E. coli*'nin büyümesini inhibe ettiği [22] ve 1 mM'dan yüksek dozunun *Desulfovibrio desulfuricans* üzerinde toksik etki yarattığı rapor edilmiştir [23]. Toksisitesine rağmen, bazı türler metabolik yollarını değiştirerek Al'ye dirençli olabilir. Oksaloasetat ve oksalat gibi organik asitler, mikroorganizmaların Al'yi dışarı atmasına izin verir [22]. Bugüne kadar Al toleransı üzerine yapılan çalışmaların çoğu bitkiler ve mantarlar üzerinde yapılmıştır ve çok az bakterinin Al toleransı gösterdiği rapor edilmiştir [22-23].

Çökeltme, oksidasyon/indirgeme, iyon değişimi, filtrasyon, elektrokimyasal işlem, membran ayırma ve buharlaştırma dahil olmak üzere metal giderimi için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin çoğu, metal konsantrasyonları 100 mg/L'den düşük olduğunda etkisizdir veya aşırı pahalıdır [24]. Bu nedenle, yeni teknolojilerin araştırılması son zamanlarda teşvik edilmiştir. Mikroorganizmaların kullanımına dayalı biyoremediasyon stratejileri potansiyel bir alternatif olarak kabul edilmiştir [25]. Ağır metallerle dirençli mikroorganizmalar endüstriyel atıksuların arıtılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu dirençli mikroorganizmaların detoksifiye etme yeteneği, atıksu sistemlerindeki ağır metallerin biyoremediasyonu için kullanılmaktadır [26]. Bakteriler her yerde bulunur, kontrollü koşullar altında yayılabilir ve ortamdaki değişikliklere karşı oldukça dirençlidir. Bu nedenle, bakteri biyokütlesi avantajlı bir biyosorbenttir [27]. Bakterilerin hücre duvarlarında enzimler, lipopolisakaritler, peptidoglikan ve lipoproteinler gibi karboksil, sülfat, fosfat ve amino grupları gibi işlevsellik açısından zengin makromoleküller bulunur. Katyonik ve anyonik grupların bir arada bulunması, bakteri hücre duvarına amfoterik bir davranış kazandırır. Bununla birlikte, Van Der Wal ve arkadaşları [28] anyonik grupların katyonik gruplara üstün olduğunu ve bu nedenle çoğu bakteri biyokütlesinin izoelektrik noktasının pH 4'ü geçmediğini doğruladı. Sonuç olarak, bakteriler ve Ni²⁺, Al³⁺ gibi pozitif yüklü kirleticiler arasındaki elektrostatik etkileşimler biyosorpsiyon sürecini destekleyebilir.

Genetiği değiştirilmiş mikroorganizmalar, kirleticilerin biyoremediasyonu ve biyodegradasyonunu arttırmak için farklı canlılardan (bakteri, maya, ökaryotlar vb.) kirleticileri gidermede etkili olduğu bilinen genlerin mikroorganizmalara aktarılması sonucunda üretilmektedir [29]. Fitoşelatinleri (PC'ler) ve metalotiyoneinleri (MT) kodlayan genler, ağır metallerin gideriminde metal bağlayıcı proteinler olarak kullanılmaktadır [30]. MT'ler mayalar da dâhil olmak üzere bakterilerden insanlara kadar çoğu organizmada bulunan düşük moleküler ağırlıklı proteinlerdir [31]. MT'ler, metal iyon koordinasyonunda ortaya çıkan metal-tiyolat komplekslerini oluşturan, sistein açısından zengin proteinlerin (amino asit içeriğinin %30'una yakın) heterojen bir ailesini oluşturur. MT'lerin toksik metallerle karşı koruma, fizyolojik metallerin homeostazi, serbest radikal temizleme ve antioksidatif stres koruması, hücrenin oksidatif durumunun kontrolü, antiapoptotik savunma gibi birçok rolü olduğu düşünülmektedir. Bazı özellikleri hala bilinmiyor olsa da tüm MT'lerin metal iyonlarını, özellikle Zn²⁺ ve Cu¹⁺'yu hücre içine alma kapasitelerinin yüksek olduğu bilinmektedir [32]. İnsan MT'leri dört farklı izoformdan oluşur. İnsan vücudunda metal toksisitesine karşı en çok sentezlenen MT izoformu MT1'dir [33]. Metal toksisitesine karşı koruma, öncelikle MT1 ve MT2'ye indirilirken, MT3'ün nöronlarda Zn homeostazında rol oynadığı düşünülmektedir ve MT4'ün işlevi tam olarak bilinmemektedir [34]. Memeli ve mikrobiyal MT'lerin metal biyosorpsiyonundaki etkinlikleri açısından incelendiği bir çalışmada genel olarak, insan MT'sini (MT1A) eksprese eden hücrelerin en iyi metal (Cd, Cu, Zn, Pb) adsorpsiyon performansını sergilediği tespit edilmiştir [35]. Bu bilgiler göz önüne alınarak, insan MT 1 geni yabanıl *E. coli* BL21 suşunun Ni ve Al metal iyonlarına karşı toleransını arttırmak için tercih edilmiştir. Bakterilerin metallerle karşı direnç kapasiteleri, minimum inhibisyon konsantrasyon (MİK) testi ile belirlenir [36]. Bakterilerin MİK'inin belirlenmesi, o bakteri türleri tarafından tolere edilebilecek en yüksek metal konsantrasyonunu gösterir [37]. Ayrıca MİK değerinin belirlenmesi, biyosorpsiyon çalışmalarında, ne kadar konsantrasyonda metal giderilebileceği hakkında bir ön fikir vermesi açısından faydalıdır. Literatürde, rekombinant bakterilerin yabanıl bakterilerden hem metal direnç kapasitelerinin hem de metal giderim oranlarının daha fazla olduğunu bildiren birçok çalışma bulunmaktadır [38-39-40].

Bu çalışmanın amacı, yabanıl *E. coli* BL21 suşuna, insan MT 1 geni klonlanarak Ni ve Al metal iyonlarına karşı direnç kapasitesinin artırılmasıdır. Çalışmada, yabanıl *E. coli* BL21 ve rekombinant *E. coli* hMT1 suşlarının Ni ve Al metal iyonları için MİK değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu MİK değerleri, atıksulardan Ni ve Al metallerinin gideriminde, klonlanan insan MT 1 (hMT1) geninin etkinliği hakkında ön fikir vermesi açısından oldukça önemlidir. Rekombinant *E. coli* hMT1 suşunun Ni ve Al'ye karşı MİK değerlerinin belirlenmesi ilk defa bu çalışmada yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Bakteri kültürlerinin yetiştirilmesi

Çalışmada *E. coli* BL21(kontrol grubu) ve *E. coli* hMT1 rekombinant suşları kullanılmıştır. Hücreler, sıvı özü (10 g/L), pepton özü (10 g/L) ve sodyum klorür NaCl (3 g/L) içeren Luria Bertani (LB) ortamında 120 rpm çalkalama hızında (MS, Major Science orbital çalkalayıcı) 37 °C'de büyütülmüştür. Rekombinant bakterilerin büyümesi için gerekli olan amfisilin antibiyotiği (Sigma-Aldrich) besiyeri ortamına eklenmiştir.

2.2. Ni ve Al solüsyonlarının hazırlanması

MİK tayininde kullanılan metal solüsyonları, Ni(NO₃)₂ (Sigma-Aldrich) ve Al₂(SO₄)₃.18H₂O (Sigma-Aldrich) metal tuzları kullanılarak hazırlanmıştır. Ni ve Al stok çözeltileri 1000 mg/L konsantrasyonlarında hazırlanmıştır. Bu stok çözeltiler distile su ile seyreltilerek deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

2.3. Gen sentezi ve klonlama

İnsan MT1 gen dizisi (genbank erişim numarası: NM_005946), Twist Bioscience'dan temin edilmiştir. MT1 gen parçası ve pET21 plazmidi, EcoRI ve NotI kesme enzimleri (Thermo Scientific) ile çift sindirilmiştir. Bu gen daha sonra pET21 plazmitine bağlanmıştır. Konakçı *E. coli* BL21 suşu kimyasal CaCl₂ protokolüne (Sigma-Aldrich) göre geni almaya hazır hâle getirilmiştir. Rekombinant pET21 plazmitleri (Sigma-Aldrich), konakçı *E. coli* BL21 hücrelerine aktarılmıştır. Daha sonra rekombinant *E. coli* hMT1 suşu, amfisilin (50 µg/mL), X-gal (mavi/beyaz hücre taraması için) ve IPTG ile takviye edilmiş LB agar plakalarına ekildi ve gece boyunca 37 °C'de inkübe edilmiştir. Plazmidi izole etmek için QIAGEN Qiaprep Spin Miniprep Kiti (Kat no: 27104) kullanılmış ve klonlamayı doğrulamak için PCR kullanılmıştır. Ek genleri doğrulamak için, izole edilmiş plazmitlerin dizileme kütüphaneleri hazırlanmış ve Miseq platformu kullanılarak dizilenmiştir.

2.4. Hücrelerin büyüme eğrisi

Yabanıl *E. coli* BL21 ve rekombinant *E. coli* hMT1 suşlarına belirli konsantrasyonlarda Ni (0-800 mg/L) ve Al (0-1000 mg/L) metalleri uygulanarak hücrelerin büyümeleri üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Hücreler, belirlenen Ni ve Al konsantrasyonlarını içeren LB besiyerinde 120 rpm karıştırma hızında, 37 °C'de 48 saat boyunca inkübe edilmiştir. Belirli aralıklarda (6., 12., 18., 24., 36., ve 48. saatlerde) erlenlerden örnekler alınarak büyümenin en iyi gözleendiği optimum değer olan 600 nm dalga boyunda mikropilaka okuyucuda (Thermo Varioscan Flash 2000) ölçülen absorbans değerleri kaydedilmiştir. Bu verilere göre hücrelerin büyüme eğrileri çizilmiştir (Şekil 1-2).

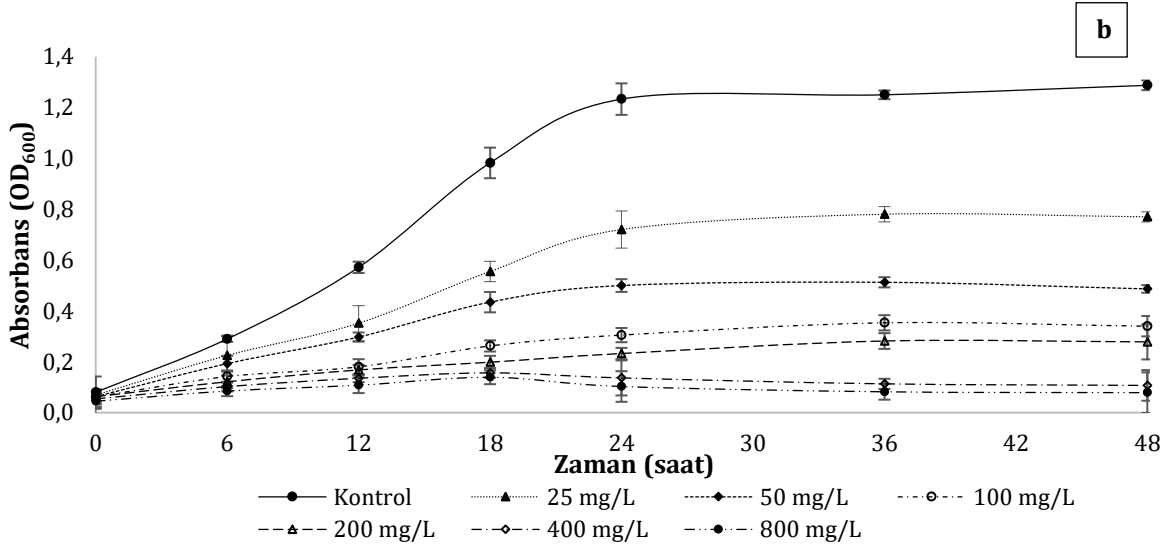
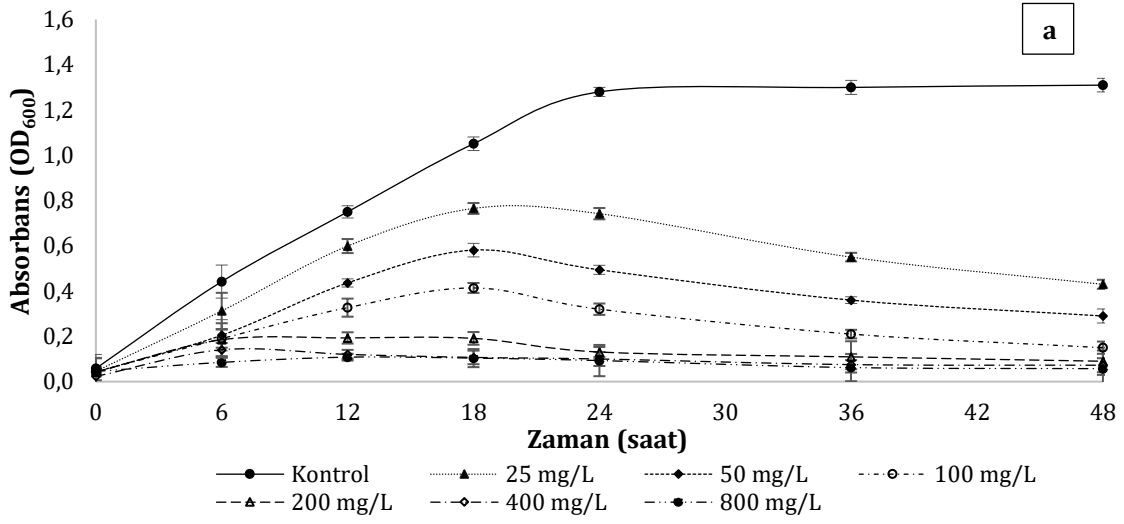
2.5. Minimum inhibisyon konsantrasyonunun (MİK) belirlenmesi

E. coli BL21 suşu kontrol olarak kullanılmıştır. *E. coli* hMT1 rekombinant suşu ile *E. coli* BL21 yabanıl suşunun Ni ve Al'ye direnç kapasiteleri, MİK testi ile mikro seyreltme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Ni ve Al'nin farklı konsantrasyonları (0-1000 mg/L) için MİK analizi yapılmıştır. 50 mL LB besiyeri içeren 100 mL'lik erlenmayer şişelerine belirlenen Ni ve Al konsantrasyonları (0-1000 mg/L) ilave edilmiştir. 600 nm dalga boyunda optik yoğunluğu (OD) 0,5'e ulaşan hücreler, bir mikropipet ile konik şişelere eklenmiştir. Rekombinant hücreler içeren erlenlere amfisilin (50 µg/mL) eklenmiştir. Erlenler 120 rpm'de çalkalanarak 37 °C'de 24 saat inkübe edilmiştir. Hücrelerin MİK değeri, mikropilaka okuyucuda (Thermo Varioscan Flash 2000) 600 nm absorbansda hücrelerin büyümesi analiz edilerek belirlenmiştir. Cihazda okunan sonuçlar kaydedilmiştir. Ayrıca hücrelere filtreyle steril edilmiş %0,1'lik trifeniltetrazoryum klorür (TTK) canlılık indikatörü olan TTC konulmuştur. Bu yöntem kullanılarak MİK değerleri doğrulanmıştır. Bu yöntemde, canlılık ve hücresel aktivite varlığında TTK, pembe bir renge dönüşerek trifenil formazana indirgenir [41]. Canlılığın göstergesi olan pembe rengin kaybolduğu ilk Ni ve Al konsantrasyonları MİK olarak belirlenmiştir. Her mikropilaka kuyusuna % 0,1 TTK ilave edilmiş ve 24 saat inkübasyona bırakılmıştır. Daha sonra örnekler bir mikropilaka okuyucuda renk değişiminin gözlelenebildiği optimum absorbans değeri olan 480 nm'de ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar, her numune için üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

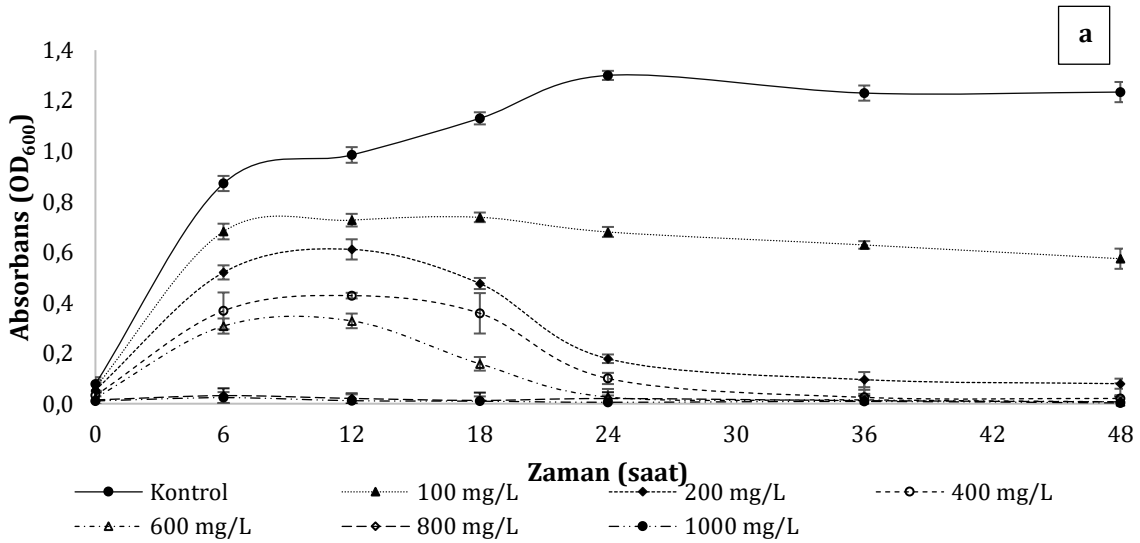
3. Bulgular

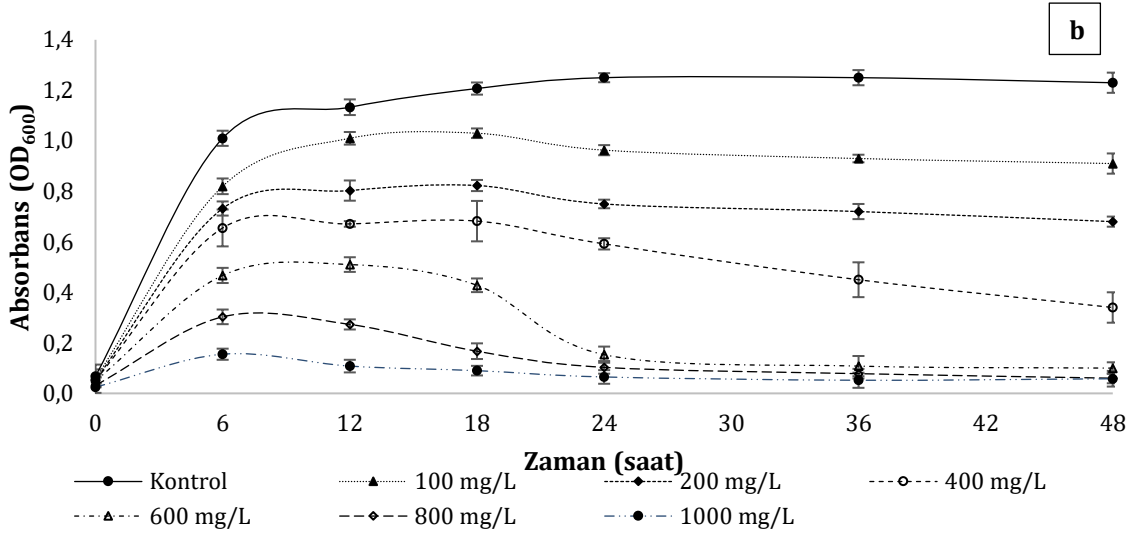
3.1. Hücrelerin büyüme potansiyeli üzerine Ni ve Al metallerinin etkisi

Farklı Ni²⁺ (0-800 mg/L) ve Al³⁺ (0-1000 mg/L) konsantrasyonlarına maruz bırakılan yabanıl *E. coli* BL21 ve rekombinant *E. coli* hMT1 suşlarının büyüme eğrileri Şekil 1 ve Şekil 2' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Farklı Ni konsantrasyonlarına maruz kalan *E. coli* BL21 (a) ve rekombinant *E. coli* hMT1 (b) süşlerinin büyüme eğrileri





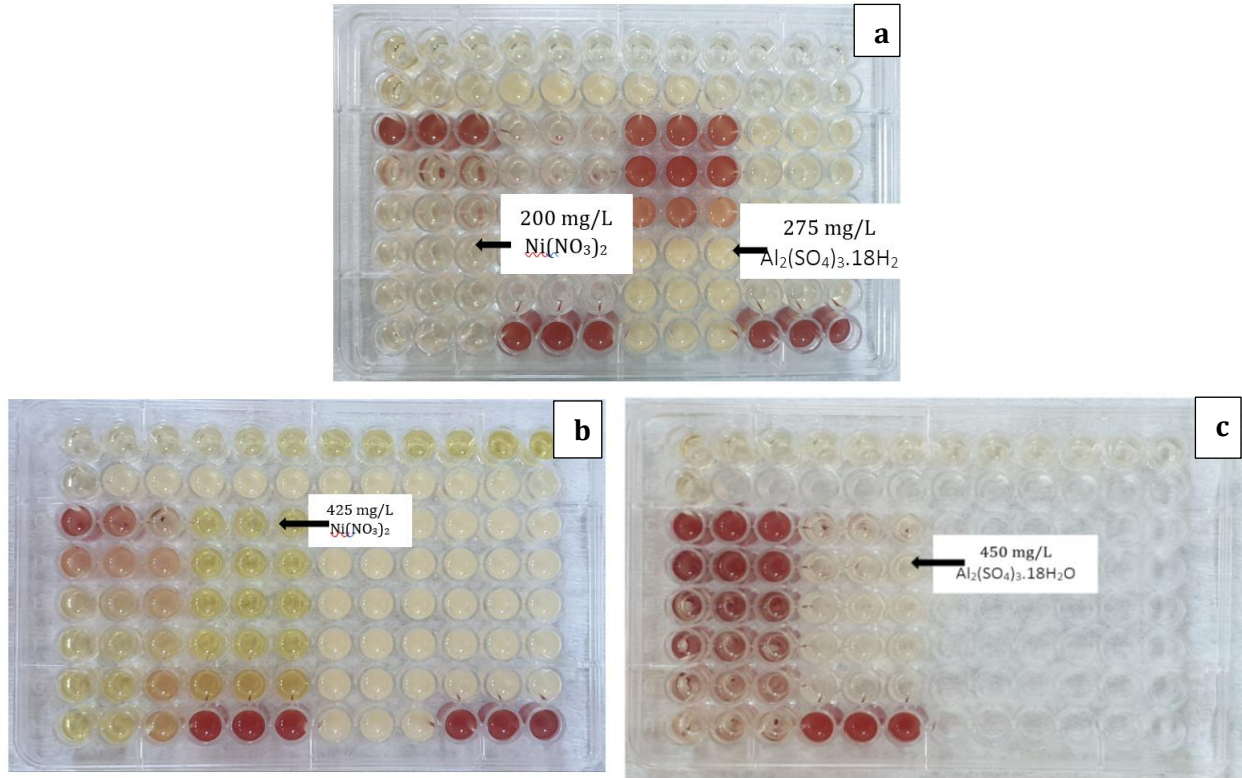
Şekil 2. Farklı Al konsantrasyonlarına maruz kalan *E. coli* BL21 (a) ve rekombinant *E. coli* hMT1 (b) suşlarının büyüme eğrileri

Ni varlığında *E. coli* BL21 ve rekombinant *E. coli* hMT1 suşlarının davranışını değerlendirmek için, suşların büyüme performansları ilk olarak Ni içermeyen (kontrol) bir ortamda belirlenmiştir. Şekil 1a'ya bakıldığında, düşük konsantrasyonlarda (25, 50, 100 mg/L) Ni uygulanan hücreler 18. saate kadar büyüme göstermiş olup 24. saate doğru büyüme hızında önemli oranda azalma gözlenmiştir ($p \leq 0.05$) ve sonrasında azalma devam etmiş ancak istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır ($p \geq 0.05$). Yüksek konsantrasyonlarda ise (200, 400, 800 mg/L) hücreler inhibe olmuş ve herhangi bir büyüme etkisi görülmemiştir. Rekombinant *E. coli* hMT1 hücrelerinde ise (Şekil 1b) 200 mg/L'ye kadar olan konsantrasyonlarda 24. saate kadar büyüme hızında önemli oranda artış gözlenmiş olup ($p \leq 0.05$), 24. saatten sonra hücreler durağan faza girmiştir. 400 mg/L ve 800 mg/L Ni konsantrasyonlarında hücreler inhibe olmuş ve herhangi bir büyüme etkisi görülmemiştir.

Şekil 2a'da, yabancı *E. coli* BL21 suşunun Al'ye karşı büyüme potansiyeli görülmektedir. Buna göre, 100 mg/L, 200 mg/L, 400 mg/L Al konsantrasyonlarında büyüme hızının 12. saate kadar arttığı, 24. saatten sonra durağan faza girdiği tespit edilmiştir. 600 mg/L'de ise 6. saate kadar hücrelerin büyüme hızında artış olduğu daha sonra gittikçe azaldığı ve 24. saatten sonra inhibe olduğu belirlenmiştir. 800 mg/L ve 1000 mg/L Al konsantrasyonlarında ise hücrelerde ilk saatten itibaren büyüme gözlenmemiştir. Rekombinant *E. coli* hMT1 hücrelerinin büyüme hızının 400 mg/L'ye kadar olan Al konsantrasyonlarında 18. saate kadar arttığı, 24. saatten itibaren durağan faza girdiği gözlenmiştir (Şekil 2b). 600 mg/L Al konsantrasyonunda hücrelerin 12. saate kadar büyüdüğü, daha sonra büyüme hızının kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek Al konsantrasyonları olan 800 ve 1000 mg/L'de ise ilk 6 saate kadar hücrelerin büyüme hızının arttığı, daha sonra durağan faza girdiği, 36. saatten sonra inhibe olduğu görülmektedir.

3.2. MİK değerleri

Bakteriyel hücreler, çevredeki ortama bağlı olarak metal iyonlarına karşı tolerans geliştirerek metal giderme potansiyellerini geliştirme yeteneğine sahiptirler. Bu çalışmanın sonucunda, yabancı *E. coli* BL21 ve rekombinant *E. coli* hMT1 suşlarının Ni için MİK değerleri, sırasıyla 200 mg/L ve 425 mg/L olarak; Al için ise sırasıyla 275 mg/L ve 650 mg/L olarak bulunmuştur. Hücrelerin MİK değerlerini doğrulamak için kullanılan TTK analizi sonunda elde edilen mikropilaka görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Ni ve Al uygulanan yabancıl *E. coli* BL21 suşunun mikroplaka görüntüsü (a), Ni uygulanan rekombinant *E. coli* hMT1 suşunun mikroplaka görüntüsü (b), Al uygulanan rekombinant *E. coli* hMT1 suşunun mikroplaka görüntüsü (c)

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışmada, Ni ve Al uygulanan yabancıl *E. coli* BL21 ve rekombinant *E. coli* hMT1 suşlarının, büyüme eğrilerinden elde edilen sonuçlar ile hücrelerin MİK değerleri sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, Ni uygulanmış yabancıl hücrelerin 18. saatten sonra, rekombinant hücrelerin ise 24. saatten sonra durağan faza girmeleri, rekombinant hücrelerin Ni'ye karşı direnç kazandığını göstermektedir. Ayrıca yabancıl hücreler 200 mg/L Ni konsantrasyonunda inhibe olurken rekombinant hücrelerin büyümeye devam etmesi, ilk inhibisyonun 400 mg/L Ni konsantrasyonunda görülmesi de yine rekombinant hücrelerin Ni'ye karşı daha toleranslı olduğunu ifade etmektedir. Yabancıl suşun Ni MİK değerinin 200 mg/L, rekombinant suşunkinin 425 mg/L olması da yine rekombinant suşun Ni'ye tolerans kapasitesinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Büyüme eğrilerinde yabancıl suşun büyüme hızının 200 mg/L Ni konsantrasyonunda, rekombinant suşun ise 400 mg/L'de inhibe olmaya başlaması, belirlenen bu MİK değerleri ile uyumluluk göstermektedir. Benzer durum Al uygulanan yabancıl ve rekombinant suşların büyüme eğrilerinde ve MİK değerlerinde de gözlemlenmiştir. Buna göre, yabancıl hücrelerin büyüme hızı 600 mg/L Al konsantrasyonunda 6. saatten sonra inhibe olurken rekombinant hücreler hala büyüme fazındaydı ve 24. saatten sonra durağan faza girebildi. Ayrıca, en yüksek Al konsantrasyonları olan 800 mg/L ve 1000 mg/L Al konsantrasyonlarında yabancıl hücrelerde ilk saatten itibaren inhibisyon gözlenirken rekombinant hücrelerde 36. saatten itibaren inhibisyon gözlenmiştir. Yani hem tolere edilebilen Al konsantrasyonu açısından hem de inhibisyonun geç saatlerde gerçekleşmesi açısından rekombinant suşun yabancıl suşa göre önemli oranda Al'ye dirençli olduğu söylenebilir. Yine rekombinant suşun Al MİK değerinin (650 mg/L), yabancıl suşunkinden (275 mg/L) daha yüksek bulunmuş olması da rekombinant suşun Al'ye direnç kapasitesinin daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. MİK değerlerinin, hücrelerin büyüme eğrilerinde Al'nin ilk inhibisyon konsantrasyonlarıyla örtüşmesi de bulgularımızı doğrulamaktadır. Birçok çalışmada yabancıl bakterilerin MİK değerleri belirlenmiştir. Giovanella ve arkadaşları [42] çalışmalarında, *Pseudomonas* sp. B50D türünün Ni için MİK değerini, 3 mM olduğunu rapor etmişlerdir. Wu ve arkadaşları [43], *Pseudomonas* sp. (X2), *Brevibacterium* sp. (X6) olmak üzere iki farklı deniz bakterisinin ve *E. coli* DH-5 α suşunun Ni MİK değerlerini sırasıyla; 500, 1000 ve 200 mg/L bulmuşlardır. Benzer bir başka çalışmada, *Lactobacillus plantarum* MF042018 suşunun Ni direnç kapasitesi olan MİK değeri 500 mg/L olarak bildirilmiştir [44]. Sharma ve arkadaşları [45], çamur, kanalizasyon ve atıksu ortamlarının 17 farklı bölgesinden izole ettikleri bakteri suşlarının Ni tolerans kapasitelerini araştırmışlardır. 4 farklı *Bacillus* izolatının 700 mg/L Ni konsantrasyonuna direnç gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca izole ettikleri diğer 33 izolatın, 500 mg/L Ni konsantrasyonunu tolere edebildiğini ileri sürmüşlerdir. Al-Gheethi [46], bir kanalizasyon atıksuyundan izole ettiği *Bacillus subtilis* türünün 6 mM Ni iyonlarını tolere edebildiğini ileri sürmüştür. Chaudhary ve arkadaşları [47], *E. coli* (ATCC 11230), *Stenotrophomonas maltophilia* (ATCC 13637),

Microbacterium sp. (MTCC 7185) suşlarının Ni MİK değerlerinin üç tür içinde 1mM olduğunu bildirmişlerdir. Senoro ve arkadaşları [48], *E. coli* (ATCC 25922) ve *S. epidermidis* RP62A'nın sırasıyla Ni MİK değerlerini 62.5 mg/L ve 125 mg/L olarak bulmuşlardır.

Ayrıca literatürde bakterilerin Ni'ye karşı direnç ve giderim kapasitesini arttırmak için Ni affinitesi yüksek genlerin klonlandığı rekombinant bakteriler ile yapılmış olan çalışmalar da bulunmaktadır [49-50]. Deng ve arkadaşları [49], *Helocobacter pylori* (NixA) ve *Staphylococcus aureus*'tan (NisA) iki farklı Ni affiniteli transmembran proteininin (NiCoTs) ve bezelye MT geninin Ni affinitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, hem NiCoT'leri hem de MT'yi ifade eden rekombinant suşların (NixA+MT ve NisA+MT) Ni affinitesinin ve direnç kapasitesinin arttığını bildirmişlerdir. Bir diğer çalışmada gram pozitif (*B. cereus* RC607) ve gram negatif (*Pseudomonas* sp. K-62) bakteri suşlarından metal bağlayıcı proteinleri (MerP) aşırı eksprese edebilen *E. coli* konakçıları, sulu ortamda Ni²⁺, Zn²⁺ ve Cr⁺³'ü adsorbe etmek için kullanılmıştır. İfade edilen MerP proteinlerinin tipi de rekombinant biyosorbentlerin performansını etkilediğini tespit etmişlerdir. Gram pozitif MerP proteinleri (yani GB hücreleri) içeren biyosorbentler Ni²⁺ için daha iyi adsorpsiyona sahipken, Gram negatif MerP içeren GP hücreleri Zn²⁺ ve Cr⁺³ iyonları için daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi sergilediğini tespit etmişlerdir [50]. Bu bağlamda, MT olarak bilinen bazı metal bağlayıcı proteinlerin, bakterilerin metallere karşı direnç kapasitelerini arttırdığı sonucuna varılabilir [51]. Ayrıca direnç kapasitelerindeki ve metal giderim oranlarındaki farklılıklar, her bakterinin izole edildikleri ortamdaki ve aktarılan genlerin farklı olması ile ilgili olabilir. Sonuç olarak Ni metali ile kirlenmiş ortamlardan izole edilen dirençli suşlar ile bu çalışmada kullanılan rekombinant *E. coli* hMT1 suşunun, Ni MİK değerlerinin birbirine yakın olduğu, hatta bazılarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu da rekombinant *E. coli* hMT1 suşunun su ve atıksulardan Ni gideriminde biyoteknolojik bir araç olarak kullanılabilme potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Al MİK değerinin belirlendiği çalışmalara baktığımızda ise yine Ni'de olduğu gibi suşların izole edildiği yere ve bakteri cinsine bağlı olarak MİK değerlerinin farklılık gösterdiği rapor edilmiştir. Titah ve arkadaşları [37], Al geri dönüşüm endüstrisi atıksuyundan izole ettikleri azot içeriği yüksek ortamlarda bol bulunan *Brochothrix thermosphacta*'yı ve birçok farklı kirlenmiş alanda bulunabilen sucul bir bakteri türü olan *Vibrio alginolyticus*'un Al MİK değerini 500 mg/L olarak belirlemişlerdir. Huang ve arkadaşları [52] asidik topraktan izole ettikleri Al'ye toleranslı olduğu bilinen *Burkholderia* sp. SB1 suşunun Al⁺³'e direnç oranını 270 mg/L olarak tespit etmişler ve bu suşun Al ile kirlenmiş asidik kırmızı toprakların biyolojik olarak iyileştirilmesi için potansiyel olarak bir ajan olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Yine aynı çalışmada, *Anoxybacillus* sp'nin, 200-800 mg/L Al⁺³ içeren bir besiyerinde %100 - %77 arasında değişen nispi büyüme oranlarıyla büyüebildiği gözlemlenmiştir [52]. Abo-Amer ve arkadaşları [53], endüstriyel atıksulardan izole ettikleri *Providencia rettgeri* MAM-4 suşunun Al⁺³ direncini 500 mg/L olarak, ticari olarak satın aldıkları *B. cereus*'un direncini yine 500 mg/L olarak belirlemişlerdir. Bu konudaki diğer çalışmalarda, *Acidiphilium cryptum*'un Al₂(SO₄)₃'a olan direncinin 100 mg/L olduğu [54], *Flavobacterium* sp'nin 2000 mg/L'ye kadar Al toleranslı olduğu, buna karşın *Arthrobacter* sp'nin maksimum Al tolerans konsantrasyonunun yaklaşık 300 mg/L olduğu rapor edilmiştir [55]. Bu çalışmalardaki Al MİK değerleri ile bizim çalışmamızdaki rekombinant *E. coli* hMT1 suşunun Al MİK değeri karşılaştırıldığında, rekombinant *E. coli* hMT1 suşunun MİK değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, rekombinant *E. coli* hMT1 suşunun sulardan Al gideriminde etkili olacağını düşündürmektedir.

Sonuç olarak, rekombinant suşun yabancı suşa göre Ni ve Al toleransının daha yüksek olduğu, rekombinant suşun ise Ni'ye göre Al'ye daha toleranslı olduğu ancak yine de düşük konsantrasyonlarda bile bu metalleri adsorbe etmesinin çevrede kullanılabilirliği açısından yabancı suşa göre daha yararlı olduğu söylenebilir. Bu sonuçlara göre, Ni ve Al içeren sular, belirtilen MİK değerlerinin üstüne ulaşmadıkça biyolojik olarak arıtılabilir. Ancak belirtilen MİK değerlerinin üstüne çıktığında bir ön arıtma işlemi uygulanabilir. Bu bilgiler ışığında, insan MT1 geninin Ni ve Al metallerinin alımını ve biyoremediasyon kabiliyetini de arttıracığı sonucuna varılabilir. Aynı zamanda bu çalışmanın sonuçları, bu rekombinant suşun pelletlerinin Ni ve Al iyonlarının sudan biyolojik olarak uzaklaştırılmasında kullanılacak biyosorbent olarak geliştirilmesi için umut vericidir.

Kaynakça

- [1] Segura, F. R., Nunes, E. A., Paniz, F. P., Paulelli, A. C. C., Rodrigues, G. B., Braga, G. Ú. L., Batista, B. L. 2016. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environmental Pollution*, 218, 813-825.
- [2] Abbas, S. H., Ali, W. H. 2018. Evaluation of biomass type blue Cyanophyta algae for the sorption of Cr (III), Zn (II) and Ni (II) from aqueous solution using batch operation system: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Global Nest Journal*, 20(1), 69-82.

- [3] Duong, H. C., Duke, M., Gray, S., Nelemans, B., Nghiem, L. D. 2016. Membrane distillation and membrane electrolysis of coal seam gas reverse osmosis brine for clean water extraction and NaOH production. *Desalination*, 397, 108-115.
- [4] Wang, J., Chen, C. 2009. Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances*, 27(2), 195-226.
- [5] Shirdam, R., Khanafari, A., Tabatabaei, A. 2006. Cadmium, nickel and vanadium accumulation by three strains of marine bacteria. 4(3),180-187.
- [6] Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., Kim, K. H. 2019. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, 125, 365-385.
- [7] Igwe, J., Abia, A. A. 2006. A bioseparation process for removing heavy metals from waste water using biosorbents. *African journal of Biotechnology*, 5(11), 1167-1179.
- [8] Kulkarni, R. M., Vidya Shetty, K., & Srinikethan, G. 2019. Kinetic and equilibrium modeling of biosorption of nickel (II) and cadmium (II) on brewery sludge. *Water Science and Technology*, 79(5), 888-894.
- [9] National Toxicology Program. 2011. NTP 12th report on carcinogens. Report on carcinogens: carcinogen profiles, 12. <https://ntp.niehs.nih.gov/go/roc14> (Erişim Tarihi: 20.08.2022).
- [10] World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinking Water Quality, Recommendations (fourth ed.) 2011. p. 541 Geneva, Switzerland, vol. 1. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf (Erişim Tarihi: 10.07.2022).
- [11] Sarkar, B., Sharma, U., Adhikari, K., Lahiri, S. K., Baltrėnaitė, E., Baltrėnas, P., Dutta, S. 2021. Application of Artificial Neural Network and Particle Swarm Optimization for modelling and optimization of biosorption of Lead (II) and Nickel (II) from wastewater using dead cyanobacterial biomass. *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(3), 100039.
- [12] Merian, E., Anke, M., Ihnat, M. 2004. Elements and their compounds in the environment edited by related titles Joachim Nölte Bernhard Welz, Michael Sperling Handbook of Elemental Speciation Markus Stoeppler, Wayne R. Reference Materials for Chemical Analysis. 64s.
- [13] Krewski, D., Yokel, R. A., Nieboer, E., Borchelt, D., Cohen, J., Harry, J., Rondeau, V. 2007. Human health risk assessment for aluminium, aluminium oxide, and aluminium hydroxide. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 10(S1), 1-269.
- [14] Gustafsson, J.P. Visual MINTEQ 3.1 User Guide. 2020. <https://vminteq.lwr.kth.se/download/> (Erişim Tarihi: 10.07.2022).
- [15] Lydersen, E., Löfgren, S., Arnesen, R. T. 2002. Metals in Scandinavian surface waters: effects of acidification, liming, and potential reacidification. *Critical reviews in Environmental Science and Technology*, 32(2-3)(2002), 73-295.
- [16] Hem, J. D. 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey. 359s.
- [17] Brown, D. J. A. 1989. Fish survival in acid waters. *Acid toxicity and Aquatic Animals*, (1989), 31-44.
- [18] Earle, J., Callaghan, T. 1989. Impacts of mine drainage on aquatic life, water uses, and man-made structures. *Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania*, chapter 4, 1-10.
- [19] Reiber, S. H., Kukull, W., Standish-Lee, P. 1995. Drinking water aluminum and bioavailability. *Journal of the American Water Works Association*, 87(5), 86-100.
- [20] Fawell, M.J.K., Guidel, *Drinking Quality*, 8 – 23.
- [21] Bondy, S. C. 2014. Prolonged exposure to low levels of aluminum leads to changes associated with brain aging and neurodegeneration. *Toxicology*, 315, 1-7.
- [22] Auger, C., Han, S., Appanna, V. P., Thomas, S. C., Ulibarri, G., Appanna, V. D. 2013. Metabolic reengineering invoked by microbial systems to decontaminate aluminum: implications for bioremediation technologies. *Biotechnology Advances*, 31(2), 266-273.
- [23] Amonette, J. E., Russell, C. K., Carosino, K. A., Robinson, N. L., Ho, J. T. 2003. Toxicity of Al to *Desulfovibrio desulfuricans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(7), 4057-4066.
- [24] Ahluwalia, S. S., Goyal, D. 2007. Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource technology*, 98(12), 2243-2257.
- [25] Martins, M., Taborda, R., Silva, G., Assunção, A., Matos, A. P., Costa, M. C. 2012. Aluminum and sulphate removal by a highly Al-resistant dissimilatory sulphate-reducing bacteria community. *Biodegradation*, 23(5), 693-703.
- [26] Varınca, K., Uçkun, M., Akkurt, Ş., Uçkun, A. A. 2021. *Ralstonia eutropha* H16 suşuyla sulu çözeltilerden kurşun ve bor biyogiderimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 37(2), 314-322.
- [27] Boeris, P. S., del Rosario Agustín, M., Acevedo, D. F., Lucchesi, G. I. 2016. Biosorption of aluminum through the use of non-viable biomass of *Pseudomonas putida*. *Journal of Biotechnology*, 236, 57-63.
- [28] Van der Wal, A., Norde, W., Zehnder, A. J., Lyklema, J. 1997. Determination of the total charge in the cell walls of Gram-positive bacteria. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 9(1-2), 81-100.
- [29] Joutey, N. T., Bahafid, W., Sayel, H., El Ghachtouli, N. 2013. Biodegradation: involved microorganisms and genetically engineered microorganisms. *Biodegradation-Life of Science*, 1, 289-320.

- [30] Ruiz, O. N., Alvarez, D., Gonzalez-Ruiz, G., & Torres, C. 2011. Characterization of mercury bioremediation by transgenic bacteria expressing metallothionein and polyphosphate kinase. *BMC biotechnology*, 11(1), 1-8.
- [31] Capdevila, M., & Atrian, S. 2011. Metallothionein protein evolution: a miniassay. *JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 16(7), 977-989.
- [32] Palacios, Ö., Atrian, S., & Capdevila, M. 2011. Zn-and Cu-thioneins: a functional classification for metallothioneins?. *JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 16(7), 991-1009.
- [33] Richards, M. P., & Beattie, J. H. 1993. Characterization of metallothionein isoforms. Comparison of capillary zone electrophoresis with reversed-phase high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography*, 648(2), 459-468.
- [34] Minami, T., Ichida, S., Kubo, K. 2002. Study of metallothionein using capillary zone electrophoresis. *Journal of Chromatography B*, 781(1-2), 303-311.
- [35] Kao, W. C., Chiu, Y. P., Chang, C. C., Chang, J. S. 2006. Localization effect on the metal biosorption capability of recombinant mammalian and fish metallothioneins in *Escherichia coli*. *Biotechnology Progress*, 22(5), 1256-1264.
- [36] Anusha, P., Natarajan, D. 2020. Bioremediation potency of multi metal tolerant native bacteria *Bacillus cereus* isolated from bauxite mines, kolli hills, Tamilnadu-a lab to land approach. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 25, 101581.
- [37] Titah, H. S., Purwanti, I. F., Tangahu, B. V., Kurniawan, S. B., Imron, M. F., Abdullah, S. R. S., Ismail, N. I. 2019. Kinetics of aluminium removal by locally isolated *brochotrix thermosphacta* and *vibrio alginolyticus*. *Journal of Environmental Management*, 238, 194-200.
- [38] Uçkun, A. A., Uçkun, M., Akkurt, Ş. 2021. Efficiency of *Escherichia coli* Jm109 and genetical engineering strains (*E. coli* MT2, *E. coli* MT3) in cadmium removal from aqueous solutions. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102024.
- [39] Akkurt, Ş., Oğuz, M., Alkan Uçkun, A. 2022. Bioreduction and bioremoval of hexavalent chromium by genetically engineered strains (*Escherichia coli* MT2A and *Escherichia coli* MT3). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(3), 1-13.
- [40] Uçkun, A. A., Uçkun, M., Akkurt, Ş. 2021. Metallothionein Geni Klonlanmış Rekombinant *Escherichia Coli* Süşlarıyla Sulu Çözeltilerden Arsenik Biyogiderimi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(14), 244-252.
- [41] Moussa, S. H., Tayel, A. A., Al-Hassan, A. A., Farouk, A. 2013. Tetrazolium/formazan test as an efficient method to determine fungal chitosan antimicrobial activity. *Journal of Mycology*, 2013, 1-8.
- [42] Giovanella, P., Cabral, L., Costa, A. P., de Oliveira Camargo, F. A., Gianello, C., Bento, F. M. 2017. Metal resistance mechanisms in Gram-negative bacteria and their potential to remove Hg in the presence of other metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 140, 162-169.
- [43] Wu, X., Huang, P., Dong, C., Deng, X. 2021. Nickel bioaccumulation by a marine bacterium *Brevibacterium* sp.(X6) isolated from Shenzhen Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112656.
- [44] Ameen, F. A., Hamdan, A. M., El-Naggar, M. Y. 2020. Assessment of the heavy metal bioremediation efficiency of the novel marine lactic acid bacterium, *Lactobacillus plantarum* MF042018. *Scientific reports*, 10(1), 1-11.
- [45] Sharma, R., Jasrotia, T., Kumar, R., Kumar, R., Umar, A., Alharthi, F. A., Al-Zaqri, N. 2021. An insight into the mechanism of 'symbiotic-bioremoval' of heavy metal ions from synthetic and industrial samples using bacterial consortium. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101302.
- [46] Al-Gheethi, A. A. S. 2014. Screening of bacterial isolates from sewage treated effluent with potential to remove heavy metals and β -lactam antibiotics (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Environmental Technology Division, School of Industrial Technology, University Science Malaysia. Penang, Malaysia).
- [47] Chaudhary, A., Shirodkar, S., Sharma, A. 2017. Characterization of nickel tolerant bacteria isolated from heavy metal polluted glass industry for its potential role in bioremediation. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 26(2), 184-194.
- [48] Senoro, D. B., Godezano, J. B., Wan, M. W., Tayo, L. L., Sauli, Z., Aris, H. 2017. Effects of pH and concentration on the capability of *E. coli* and *S. epidermidis* with bentonite clay as biosorbent for the removal of Copper, Nickel and Lead from polluted water. *International Conference on Applied Photonics and Electronic*, August 9-10, Malaysia, 01081.
- [49] Deng, X., He, J., He, N. 2013. Comparative study on Ni²⁺-affinity transport of nickel/cobalt permeases (NiCoTs) and the potential of recombinant *Escherichia coli* for Ni²⁺ bioaccumulation. *Bioresource technology*, 130, 69-74.
- [50] Kao, W. C., Huang, C. C., Chang, J. S. 2008. Biosorption of nickel, chromium and zinc by MerP-expressing recombinant *Escherichia coli*. *Journal of Hazardous Materials*, 158(1), 100-106.
- [51] Sharma, B., Shukla, P. 2021. Lead bioaccumulation mediated by *Bacillus cereus* BPS-9 from an industrial waste contaminated site encoding heavy metal resistant genes and their transporters. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123285.
- [52] Huang, S., Xiaodong, W. A. N. G., Xu, L. I. U., Genhe, H. E., Jichun, W. U. 2018. Isolation, identification, and characterization of an aluminum-tolerant bacterium *Burkholderia* sp. SB1 from an acidic red soil. *Pedosphere*, 28(6), 905-912.

- [53] Abo-Amer, A. E., Ramadan, A. B., Abo-State, M., Abu-Gharbia, M. A., Ahmed, H. E. 2013. Biosorption of aluminum, cobalt, and copper ions by *Providencia rettgeri* isolated from wastewater. *Journal of Basic Microbiology*, 53(6), 477-488.
- [54] Fischer, J., Quentmeier, A., Gansel, S., Sabados, V., Friedrich, C. G. 2002. Inducible aluminum resistance of *Acidiphilium cryptum* and aluminum tolerance of other acidophilic bacteria. *Archives of Microbiology*, 178(6), 554-558.
- [55] Illmer, P., Mutschlechner, W. 2004. Effect of temperature and pH on the toxicity of aluminium towards two new, soil born species of *Arthrobacter* sp. *Journal of Basic Microbiology: An International Journal on Biochemistry, Physiology, Genetics, Morphology, and Ecology of Microorganisms*, 44(2), 98-105.

Rüzgâr Yapısı Gösteren Kuazarların Fotometrik İncelenmesi – II: Parlaklık Değişim Genliği ve Rüzgâr Parametreleri Arasındaki İlişkiler

Nurten Filiz Ak^{*1,2}, Ömür Sayılı^{1,2}

¹Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Fen Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

²Astronomi ve Astrofizik Gözlemevi Uygulama ve Araştırma Merkezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

(Alınış / Received: 14.06.2022, Kabul / Accepted: 21.09.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

Astrofizik
Aktif Galaksiler
Kuazarlar
Kuazar Rüzgârları
Parlaklık Değişimi

Öz: Rüzgâr yapısına sahip olduğu bilinen geniş soğurma çizgili kuazarların parlaklık değişim genlikleri, kuazarın parlaklığı ile bir ters korelasyon göstermektedir. Bu ters korelasyonu da dikkate alarak, parlaklık değişim genliği ve rüzgâr parametreleri arasında ilişkilerin olup olmadığının araştırıldığı bu çalışmada, parametre ölçümleri sistematik olarak yapılmış 624 rüzgârlı kuazar incelenmiştir. Rüzgârlı kuazarları, üç farklı gruplandırma yaklaşımı ile ele alan analizler değerlendirildiğinde, aynı parlaklığa sahip kuazarların parlaklık değişim genliklerinde belirleyici etkenin rüzgâr şiddeti olduğu ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, şiddetli ve istikrarlı rüzgârlara sahip kuazarlar, daha az parlaklık değişimi göstermektedir. Bu bulgular, kuazarlardaki parlaklık değişiminin yığılma diskindeki kararsızlıklarla bağlantılı olduğu yönündeki kuramsal yaklaşımları doğrulayıcı niteliktedir.

Photometric Analysis of Quasars with Outflows -II: The Relations Between Variability Amplitude and Outflow Parameters

Keywords

Astrophysics
Active Galaxies
Quasars
Quasar Outflows
Brightness Variations

Abstract: Broad absorption line (BAL) quasars that have outflowing winds, in general, present anti correlation between their brightness and variability amplitude of their light curves. Considering this underlying correlation, we assess correlations between the variability amplitude and outflow parameters for 624 BAL quasars that have systematically determined parameters. We adopt three different approaches to group/bin the BAL quasars. The results indicate a relation between the outflow strength and variability amplitude in a way where the quasars with strong and stable outflows tend to show smaller variability amplitudes. This result favors the theoretical assumption of the main mechanism behind the variability amplitude is being the accretion disk instabilities.

*İlgili Yazar, email: nfilizak@gmail.com

1. Giriş

En güçlü ışınımına sahip aktif galaksilerin çekirdeğini oluşturan kuazarlar; merkezde bir süper kütleli kara delik, hemen dışında bir yığılma diski ve yığılma diskini bir simit şeklinde çevreleyen toz torusundan oluşan bileşenlere sahiptir. Bu bileşenlere ek olarak, bazı kuazarlar yığılma diskinde dik şekilde bir jet yapısına ve bazı kuazarlar da diskten dışa doğru eğimli rüzgâr yapılarına sahiptir [1]. Yığılma diskinden dışa doğru yönelmiş olan rüzgârla taşınan soğurucu madde, beklenen dalgaboyundan daha maviye kaymış, geniş soğurma çizgilerini oluşturur. Bir kuazarın rüzgâr yapısına sahip olduğunun doğrudan gözlemsel kanıtı olan bu çizgiler nedeniyle, rüzgâr yapısına sahip olan kuazarlar; “Geniş Soğurma Çizgili” (GSC; ing BAL: Broad Absorption Line) kuazarlar olarak adlandırılmaktadır [2].

GSC kuazarların sistematik olarak incelendiği en kapsamlı katalog, [1] çalışmasında sunulmuştur. Sloan Digital Sky Survey (SDSS) tarafından 2002 ve 2008 yılları arasında tayfsal gözlemleri elde edilmiş tüm kuazarları inceleyen çalışma, C IV (1550 Å) salma çizgisinden daha maviye kaymış, sürekliliğin en az %10 altında bir derinliğe sahip ve genişliği en az 2000 km s⁻¹ olan, en az bir soğurmaya sahip 5039 GSC kuazarın gözlemsel özelliklerini listelemiştir. Daha sonraki yıllarda yayınlanan kuazar katalogları, özel olarak GSC kuazarlar üzerinde yoğunlaşmamış ancak GSC kuazarları belirtmek için tanımlayıcı parametreler eklemiştir [örneğin, 3, 4]. GSC kuazarların tüm kuazarlara oranının yaklaşık %10—15 olduğu öngörülmüştür [5, 1].

Tüm kuazarlar, rüzgâr yapısına sahip olup olmadığından bağımsız olarak, gözlemlendiği tüm dalga boylarında düzensiz değişimler gösteren bir karakteristiğe sahiptir. X-ışın gözlemlerindeki değişimler [6, 7], morötesi ve optik bölgedeki tayfsal ve fotometrik değişimler [8] kuazarların doğasını anlamak için ayrıntılı incelemelere dahil edilmiştir. Değişimler, optik ve morötesi dalgaboylarını kapsayan tayflarda ve parlaklık ölçümü yapılan fotometrik verilerde çok kısa zaman ölçeklerinden çok uzun zaman ölçeklerine kadar yayılabilmektedir [7, 8].

Hem uzun zamanlı hem de kısa zamanlı parlaklık değişimlerinin analizleri, genel olarak kuazarların parlaklık değişim genliğinin mutlak parlaklıkla ters orantılı olduğunu ortaya koymaktadır. Simm vd. [9] çalışması, ele alınan kuazar örnekleminde bolometrik (tüm dalga boylarındaki) ışınım gücü büyük olanların küçük değişim genliğine sahip olduğunu ancak değişim genliği ve kara delik kütlesi arasında bir bağıntı bulunmadığını göstermiştir. Vanden Berk vd. [10] çalışmasında büyük genlikli parlaklık değişimi gösteren kuazarların güçlü radyo ve x-ışınlarına sahip olduğunu öne sürmüştür. Simm vd. [9] çalışması x-ışın şiddeti ve fotometrik parlaklık değişim genliği arasında olası ilişkilerin beklendiğini vurgulamış ve x-ışın şiddetinin diskin yapısındaki değişimlere bağlı olarak değişebileceğine ve fotometrik parlaklık değişiminin de buna bağlı olarak ortaya çıkabileceğine değinmiştir.

Rüzgâr yapısına sahip kuazarların parlaklık değişim genlikleri ve fiziksel parametreleri arasında bir ilişki olup olmadığını inceleyen ayrıntılı çalışmalar rüzgârların kuazarın yapısına etkilerinin anlaşılması bakımından önemlidir. Ancak literatürde yer alan çalışmalar, kuazarları rüzgâr yapısına sahip olup olmadığına bakmaksızın ele alan örneklemeler üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu inceleme serisinin ilk makalesi olan [11] çalışmasında, Catalina Sky Survey (CSS) veri tabanında ışık eğrisi gözlenmiş 1886 rüzgârlı kuazarın parlaklık değişimleri incelenmiş, parlaklık değişim genliği ve kuazar fiziksel parametreleri arasında ilişkiler aranmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, rüzgârlı kuazarların parlaklık değişim genliği değerinin geniş bir aralığa yayıldığını ve değişim genliği ile kuazarın mutlak parlaklığı arasında ters korelasyon olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, rüzgâr yapısına sahip olmayan kuazarlar için elde edilen bulgularla aynı sonuçları işaret etmektedir.

Kuazarlarda belirlenen GSC yapıları da zamana bağlı değişimler göstermektedir. Bu değişimler, zamana bağlı olarak zayıflama ya da şiddetlenme [12, 13] ortadan kaybolma [14, 15], yeniden ortaya çıkma [16] ve nadiren (pozitif ya da negatif) ivmelenme [17] şeklindedir. Filiz Ak vd. [12] çalışmasında, GSC yapılarındaki değişimler geniş bir kuazar örneklemini ele alınarak incelenmiş ve GSC yapılarına ait parametreler ile değişimler arasında ilişkiler bulunmuştur. Daha şiddetli ve daha düşük hızlarda görülen GSC'lerin kesirsel olarak daha küçük değişimler gösterdiği kaydedilmiştir. Filiz Ak vd. [13] çalışması, GSC yapılarını tanımlayan parametreler ve bu parametrelerin zamana bağlı değişimlerini açıklamak için rüzgârla taşınan soğurucu maddenin iyonlaşma potansiyelinin belirleyici bir etken olabileceğine dikkat çekmiştir.

Kuazarların yığılma diskinde dışarıya doğru rüzgâr ile taşınan maddenin iyonlaşma durumu, tayflarda hangi elementlere ait soğurma yapılarının gözlemlendiği dikkate alınarak anlaşılabilir. Filiz Ak vd. [13] çalışmasında, kuazarlar rüzgârlarının %~13'ünün yalnızca C IV, %~29'unun hem C IV hem Si IV ve %~11'inin hem C IV, hem Si IV hem de Al III soğurması oluşturduğunu belirlemiştir. Bu elementlerin iyonlaşma potansiyel enerjileri C IV için 64.5 eV, Si IV için 45.1 eV ve 28.4eV olduğundan; yalnızca C IV soğurması oluşturan rüzgârların, büyük iyonlaşma potansiyeline sahip soğurucu gaz bulundurduğu anlaşılmaktadır. Aynı hız aralığına sahip hem C IV hem Si IV hem de Al III soğurma yapılarının iyonlaşma potansiyellerinin ise çok daha düşük değerlere ulaşabildiği ortaya konulmuştur [18]. Elde edilen bulgular, düşük iyonlaşma potansiyeline sahip soğurucu gazların oluşturduğu C IV GSC yapılarının daha geniş, daha derin ve daha şiddetli olduğunu ve bu tür GSC'lerin daha az şiddet değişimi gösterdiğini işaret etmektedir [13].

Rüzgâr yapısına sahip kuazarların parlaklık değişim genliği ve rüzgâr parametreleri arasında bir bağıntı olup olmadığı bilinmemektedir. Kuazarların parlaklık değişimlerini inceleyen çalışmalar, değişimlere sebep olan olası mekanizmanın yığılma diskindeki kararsızlıklardan kaynaklanabileceğini ortaya koymaktadır. Rüzgâr yapıları, yığılma diskinde açılma momentum kaybı sağladığından, diskin daha kararlı hale gelmesini sağlayan bir mekanizmadır. Bu bakımdan, kuazarların rüzgâr parametreleri ile parlaklık değişim genlikleri arasında bir ilişki olup olmadığını incelemek konu hakkında önemli ipuçları sunabilecek potansiyele sahiptir [19].

GSÇ kuazarların parlaklık değişimlerini ele aldığımız inceleme serisinin ilki olan Filiz Ak ve Sayılı'nın [11] çalışmasında, parlaklık değişim genlikleri ile kuazar parametreleri arasında ilişkiler aranmıştır. Bu çalışmada ise parlaklık değişim genliği ve rüzgâr parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışmanın örneklem seçimi ve parametrelerin belirlenmesi Bölüm 2'de, elde edilen bulgular ise Bölüm 3'de anlatılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, kuazarların rüzgâr yapılarındaki değişimler ile fotometrik parlaklık değişimleri arasında ilişkiler aranmıştır. Bu amaca uygun olarak, ana örneklem içerisinde yer alan kuazarlar şu kriterleri sağlayacak şekilde belirlenmiştir: (a) Kuazarın, tayfsal veriler ile tespit edilmiş en az bir geniş soğurma çizgisine sahip olması gerekir. (b) Geniş soğurma çizgisinin tayfsal ölçümleri (hız, şiddet vb.) yapılmış olmalıdır. (c) Soğurma çizgilerinin uzun süreli değişimlerinin incelenmesi için kuazar uzayında en az bir yıl ara ile elde edilmiş, iki tayfsal gözlemi olmalıdır. (d) Fotometrik parlaklık değişimlerinin belirlenebilmesi için sistematik olarak elde edilmiş ışık eğrileri, değişimi belirleyebilecek sayıda veri içermelidir. Çalışmanın ana örneklem seçimi için belirlenen bu kriterlerin ayrıntıları aşağıda tartışılmıştır.

Kuazarların tayflarında gözlenen ve rüzgârların doğrudan belirteci olan soğurma çizgileri, geniş (genişliği 2000 km s^{-1} üzerinde), orta genişlikte (genişliği 2000 ila 500 km s^{-1} aralığında olanlar) ve dar soğurma çizgileri (genişliği 500 km s^{-1} altında) olarak üç gruba ayrılmaktadır [3, 4, 18]. Dar ve orta genişlikteki soğurma çizgileri sıklıkla, kuazar ve gözlemci arasında bulunan soğurucu yapılardan kaynaklanabildiğinden, kuazarın yığılma diskinden çıkan rüzgârların belirteci olarak yalnızca geniş soğurma çizgileri (GSÇ) dikkate alınmaktadır [2]. Geniş soğurma çizgileri, bazen yalnızca C IV salma çizgisinin bazen de C IV ile beraber Si IV, Al III ve Mg II salma çizgilerinin mavi tarafında tespit edilebilmektedir. Geniş soğurma çizgilerine sahip kuazarların analitik bir yaklaşımla belirlenmesi için [2] çalışmasında, GSÇ'ler sürekliliğinin en az %10 altında, en az 2000 km s^{-1} genişliğine sahip soğurma çizgileri olarak tanımlanmıştır.

SDSS tarafından gözlenen tayfları inceleyen Filiz Ak vd. [13] çalışmasında, 2000 ila 2003 yılları arasında gözlenen, kırmızıya kayma değeri $1.9 < z < 3.9$ olan kuazarlar seçilmiş ve bu kuazarların tayflarında C IV salma çizgisinden en az 3000 km s^{-1} ve en çok 20000 km s^{-1} maviye kaymış olan bölgede en az bir GSÇ bulunduran 715 rüzgârlı kuazar belirlenmiştir. Bu kuazarların tamamı radyo bölgede görece düşük ışınımaya sahip olan radyo sessiz kuazarlardır. Filiz Ak vd. [13] çalışmasında, rüzgârlı kuazarların tayflarında bulunan GSÇ yapılarının her birinin başlangıç hızı (v_{\min}), bitiş hızı (v_{\max}), genişliği (Δv), çizgi merkezinin hızı (v_{mer}), derinliği (d) ve eşdeğer genişliği (EG) ölçülmüştür.

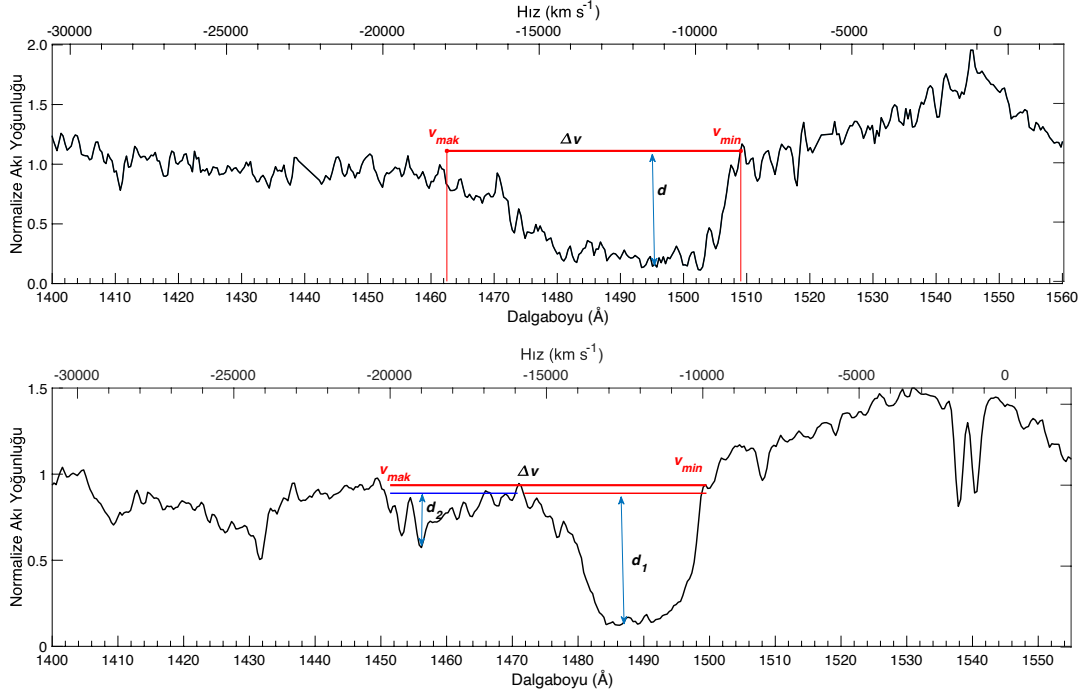
Filiz Ak vd. [13] çalışmasında, en az bir yıl ara ile gözlemleri yapılmış olan 671 kuazarın tayfında tespit edilen 851 C IV GSÇ için belirlenen parametrelerin değişimleri incelenmiştir. Rüzgârların zaman içerisinde değişimlerini tanımlayan parametreler Δt zaman farkıyla ölçülen iki değer farkı olarak tanımlanmıştır. Buna göre Δd ; derinlik değişimini, ΔEG ; eşdeğer genişlik değişimini tanımlamaktadır. Filiz Ak vd. [12, 13] çalışmalarında kuazarların eşdeğer genişliklerinin değişim miktarının eş değer genişlik değerinin kendisi ile doğru orantılı olduğu verilmiştir. Bu etkiyi göz önünde bulundurmak amacı ile eşdeğer genişlik değişimi için ikinci bir parametre olan kesirsel eşdeğer genişlik (ΔKEG) tanımlanmıştır. ΔKEG , eşdeğer genişlik değişiminin iki farklı zamanda alınmış eşdeğer genişliklerin ortalamasına oranıdır. Bir başka ifade ile $\Delta KEG = \Delta EG / \langle EG \rangle$ ile verilmiştir. GSÇ yapılarının konumları yani v_{\min} ve v_{\max} hızları sabit tutulmuş, iki farklı zamanda alınan ölçümlerden mümkün olan en geniş aralığı tanımlayan değerler v_{\min} ve v_{\max} olarak belirlenmiştir.

Rüzgâr parametreleri ve bu parametrelerin zamana bağlı değişimleri belirlenmiş olan 671 GSÇ kuazarın parlaklık değişim genliğini tanımlamak için Catalina Sky Survey (CSS) tarafından elde edilen filtresiz fotometrik ışık eğrileri kullanılmıştır. CSS bünyesinde çapları 1.5, 1.0 ve 0.7 m olan üç farklı teleskop yer almaktadır [20]. Her bir teleskoptan gelen veriler standardize edilerek, AB parlaklıklar cinsinden sunulduğundan veri tabanı içerisindeki ışık eğrileri herhangi bir yanlılığa sahip değildir. Filiz Ak vd. [11] çalışmasındaki kriterler takip edilerek GSÇ kuazarlar CSS veri tabanında 3".96 yarıçap içerisinde çapraz eşleştirme ile aranmıştır. Gecelik ortalama parlaklık ölçümlerinin sayısı en az 15 olan 624 kuazar belirlenmiştir.

Bu veriler değerlendirildiğinde, parlaklık değişim genliği, rüzgâr parametreleri ve rüzgâr değişim parametreleri arasında ilişkilerin aranması için 624 kuazar ana örneklem olarak alınmıştır. Bu örneklem, GSÇ kuazarların parlaklık değişim genliğini incelemek için herhangi bir yanlılık içermeyen homojenliktedir. Ayrıca, ışık eğrilerindeki veri sayısı, parlaklık değişim genliğini ölçmeye yetecek niteliktedir.

Ana örneklemde yer alan 624 kuazarın en az bir yıl ara ile alınmış iki farklı tayfsal gözlemleri incelendiğinde, 469 kuazarın 1 tane, 140 kuazarın 2 tane, 13 kuazarın 3 tane ve 2 kuazarın 4 tane birbirinden bağımsız rüzgâr yapısına sahip olduğu bulunmuştur. Böylece incelenen örneklem içerisindeki toplam geniş soğurma çizgisi sayısı 796'dır.

Şekil 1’de bir ve iki GSÇ’ye sahip kuazar tayfları gösterilmiştir. Birden fazla bağımsız GSÇ yapısına sahip kuazarları değerlendirirken rüzgâr parametrelerinden, en düşük hızlardaki rüzgârın başlangıç hızı v_{min} , en hızlı rüzgârın bitiş hızı v_{mak} olarak alınmıştır, bu tanımlama görsel olarak Şekil 1’de de sunulmuştur. Genişlik ve eşdeğer genişlik olarak tek bir tayfin C IV bölgesinde tespit edilen GSÇ’lerin toplam değerleri alınmıştır. Derinlik ise birden fazla GSÇ için ölçülen derinliklerin ortalaması olarak alınmıştır. Bu değerlerin birinci ve ikinci gözlenen tayflardaki farkları ise değişimler olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1. Kuazarların tayflarında bulunan GSÇ yapıları ve bu yapıya ait parametrelerin gösterimleri. Üst panelde, C IV bölgesinde bir GSÇ yapısı bulunan bir kuazar tayfı, alt panelde ise iki GSÇ yapısı bulunan bir kuazar tayfı gösterilmiştir. Soğurma çizgilerinin derinlikleri d , minimum ve maksimum hızları v ve hız genişliği Δv ile gösterilmiştir.

Kuazar ışık eğrilerinden parlaklık değişim genliğini ölçmek için [11] çalışmasında olduğu gibi öncelikle gecelik ortalama parlaklıklar belirlenmiş ve bunların değişimleri incelenmiştir. Değişimleri incelemek için tanımlanan iki parametreden bir tanesi Δm ; en parlak 10 ve en sönük 10 ölçüm arasındaki parlaklık farkıdır. Diğer bir değişim parametresi olan Normalize Değişim Parametresi (NDP) ise [11] çalışmasında verilen ifadelerle ölçülmüştür. Değişim genliklerinin yanı sıra, kuazarın ortalama parlaklığı (m_{ort}), ışık eğrisinin elde edildiği zaman aralığı (Δt_f) gibi parametreler [11] çalışmasında Bölüm 2’de verildiği şekilde hesaplanmıştır.

Kuazarlara ait parametreler olan kırmızıya kayma (z), toplam bolometrik ışınım gücü (L_{BOL}), i bandındaki mutlak parlaklık (M_i), merkezi karadelik kütlesi (M_{KD}) ve bolometrik ışınım gücü ile Eddington ışınım gücü oranı (L/L_{EDD}) [21] kataloğundan alınmıştır.

Kuazarların parametrelerini kıyaslamak için iki örneklemlili t-testi ve iki örneklemlili Kolmogorov-Smirnov (KS) testleri yapılmıştır. Her iki testin de sıfır hipotezi; karşılaştırılan iki örneklemin dağılımlarının aynı olduğunu önermektedir. t-testi dağılımların ortalama ve standart sapma değerlerindeki benzerliklere duyarlıdır, KS-test ise dağılımın türünden bağımsız olarak karşılaştırma yapmaktadır. Bu nedenle bu test sonuçlarının her ikisinin birlikte değerlendirilmesi daha anlamlı sonuçlar sunacaktır [22]. Testlerin sonucunda elde edilen güvenilirlik parametresi ($P = 1 - p$); sıfır hipotezinin reddedilmesinin ne kadar güvenilir olduğunu ifade eder. Bu çalışmada yapılan testlerde $P > \%99.9$ olan sonuçlar, sıfır hipotezinin kesin olarak reddedildiğini, $\%95 < P < \%99.9$ olan sonuçlar sıfır hipotezinin reddedilmesinin güçlü bir önerme olduğunu işaret eder. Eğer P değeri $\%95$ 'in altında ise sıfır hipotezini reddetmenin istatistiksel anlamlı olmadığı anlaşılmaktadır.

3. Bulgular

Rüzgâr yapısına sahip kuazarların tayflarında bulunan geniş soğurma çizgilerinin özellikleri ile bu kuazarların fotometrik parlaklık değişimleri arasında ilişkiler aramak için hem GSÇ parametreleri iyi bilinen hem de parlaklık değişim genlikleri belirlenmiş 624 kuazar ana örneklem olarak seçilmiştir. Parametreler arasında ilişkilerin

aranması amacıyla şu üç yaklaşım dikkate alınmıştır: (1) Kuazarların en büyük genlikli parlaklık değişimi gösteren alt grubu ile en küçük genlikli parlaklık değişimi gösteren alt grupları için GSC yapılarının özellikleri kıyaslanmıştır. (2) Kuazarlar GSC yapılarının şiddetine göre iki alt gruba ayrılmış ve bunların parlaklık değişim genlikleri kıyaslanmıştır. (3) Rüzgârların hangi element geçişlerinde soğurma çizgisi oluşturduğu, rüzgâr maddesinin iyonizasyon seviyesinin bir belirteçidir. Bu belirteç dikkate alınarak düşük, orta ve yüksek iyonizasyon seviyesine sahip rüzgârlar alt gruplar şeklinde ele alınarak rüzgâr şiddeti ve parlaklık değişim genlikleri arasında ilişkiler analiz edilmiştir. Bu üç farklı gruplama yaklaşımı ile yapılan analizlerin sonuçları aşağıda verilmektedir.

3.1. Parlaklık değişim genliğine göre gruplandırma

Ana örneklem içinde yer alan 624 kuazar içerisinde ışık eğrisindeki parlaklık değişim genliğini dikkate alan gruplandırmada, [11] çalışmasına benzer olarak; $\log(NDP) \geq 0.0$ olan 33 kuazar Büyük Genlikli (BG) ve $\log(NDP) \leq -1.0$ olan 48 kuazar ise Küçük Genlikli (KG) şeklinde gruplandırılmıştır. $\log(NDP)$ için belirlenen sınırların seçimi [11] çalışmasında Bölüm 3.1'de verilmiştir.

KG ve BG gruplarında yer alan kuazarların görünen ve mutlak parlaklıkları ile GSC yapılarının eşdeğer genişlik, derinlik ve orta hız ölçümlerinin ortalamaları Tablo 1'de verilmiştir. Gruplara ait parametreler için yapılan t ve KS-test sonuçlarından bulunan güvenilirlik değerleri son iki satırda verilmiştir.

KG ve BG gruplarında bulunan kuazarların görünen parlaklıklarının ortalamaları arasında $\sim 0^m.5$ ve mutlak parlaklıkları arasında $\sim 1^m.5$ farklılık vardır. Yapılan test sonuçları, görünen ve mutlak parlaklık dağılımlarının arasında benzerlik olmadığını (t-test için %99.6 ve KS-test için %98.8 güvenlilikle dağılımların farklı olduğunu) önermektedir. Bu bulgu [11] çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyumludur. Filiz Ak vd. [11] çalışmasında KG ve BG gruplarının parlaklık dağılımlarının %99.9'dan büyük bir güvenilirlikle farklı olduğu ve BG grubunda bulunan kuazarların daha sönük olduğu ortaya koyulmuştur. Bu çalışmanın sonuçları, [11] çalışmasına benzer olarak, BG grubunda yer alan kuazarların daha sönük olduğuna işaret etmektedir. Bu çalışmada elde edilen güvenilirlik parametrelerinin daha düşük olması ise örneklem sayılarının görece küçük olması ile açıklanabilmektedir. Mutlak parlaklıklar için elde edilen sonuçlar, görünen parlaklık için elde edilen sonuçları desteklemektedir.

Tablo 1. Parlaklık değişim genliğine göre yapılan gruplamada büyük genlikli (BG) ve küçük genlikli (KG) değişim gösteren kuazarların rüzgâr parametrelerinin kıyaslanması.

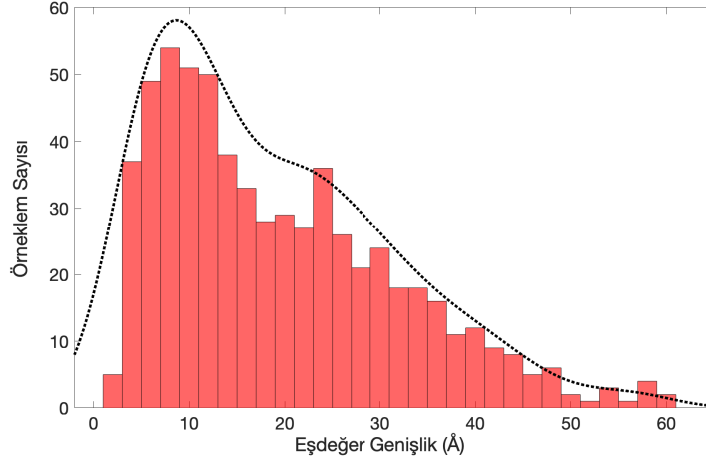
	Kriter	Sayı	m_i (kadir)	M_i (kadir)	<EG> (Å)	d	v_{orta} (km s ⁻¹)
KG	$\log(NDP) \leq -1.0$	48	18.27	-28.03	22.98	0.4480	13 319
BG	$\log(NDP) \geq 0.0$	33	18.68	-27.53	18.12	0.4042	13 552
t-test P			%99.6	%99.5	%88.2	%78.6	%21.6
KS-test P			%98.8	%99.0	%74.3	%53.1	%95.2

KG ve BG gruplarında yer alan kuazarların tayflarında belirlenen GSC yapılarının ortalama eşdeğer genişlikleri (<EG>) kıyaslandığında, KG grubu için ortalama değer ~ 23 Å ve BG için ise ~ 18 Å olduğu Tablo 1'den görülmektedir. Bu ortalama değerlerin kıyaslanması, ışık eğrilerinde büyük genlikli parlaklık değişimi gösteren kuazarların daha zayıf GSC yapılarına sahip olduğuna işaret etmektedir. Diğer yandan, dağılımları kıyaslamak için yapılan test sonuçları, dağılımlar arasında bir farklılık olduğunu önermeye yetecek güvenilirlikte değildir. Benzer şekilde derinlik (d) ve orta hız (v_{orta}) parametreleri için yapılan test sonuçları, dağılımlar arasında bir farklılık olduğunu önermeye yetecek güvenilirlikte değildir. Dolayısıyla, parlaklık değişim genliğinin büyüklüğüne göre seçilen bu gruplar için GSC yapılarının özellikleri bakımından belirgin bir fark olduğunu söylemek istatistiksel olarak mümkün değildir.

Kuazarların KG ve BG gruplarına ayrıldığında, parlaklık değişim genliği ile rüzgâr parametreleri arasında istatistiksel olarak güçlü bir ilişkinin bulunamamasının, değişim genliği ve parlaklık arasındaki güçlü bağıntı nedeniyle baskılanmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Büyük genlikli parlaklık değişimleri gösteren kuazarlar, yanlı olarak daha sönük olduğundan, GSC yapılarının özelliklerindeki olası bağılılığın gizlenmiş olması güçlü bir olasılıktır. Bu sonuçlar, kuazar gruplarının parlaklık dağılımları bakımından benzer olması şartı ile GSC özellikleri ve $\log(NDP)$ arasında ilişki aranabileceğine işaret etmektedir. Bu durum dikkate alınarak, GSC kuazarların parlaklık değişim genlikleri ve soğurma yapılarının özellikleri arasında ilişkiler aramak için farklı gruplandırma yaklaşımları yapılmıştır.

3.2. Rüzgâr şiddetine göre gruplandırma

Kuazarların parlaklık değişim genliği ile GŞÇ yapılarının özellikleri arasında olası bağıntıları incelemek için ikinci yaklaşım olarak GŞÇ yapılarının şiddetine göre gruplandırma yapılmıştır. Şekil 2’de, ana örneklem içinde yer alan 624 kuazarın EG dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılımın normal dağılımdan uzak olduğu, büyük EG değerlerine doğru güçlü bir kuyruk yapısına sahip olduğu açıkça görülebilmektedir. Bu dağılım özellikleri dikkate alınarak, GŞÇ yapıları zayıf olan kuazarlar $EG \leq 15 \text{ \AA}$ ve GŞÇ yapıları şiddetli olan kuazarlar $EG \geq 30 \text{ \AA}$ şartları ile belirlendiğinde, alt gruplardaki örneklem sayıları sırası ile 284 ve 80 olarak bulunmuştur.



Şekil 2. Ana örneklem içinde yer alan 624 kuazarın soğurma çizgisinin şiddetini tanımlayan eşdeğer genişliklerinin dağılımı. Histogram üzerinde gösterilen kesikli çizgi, normalize olasılık yoğunluk dağılımını göstermektedir.

Şekil 2’de verilen EG dağılımı için sabit genişlikli ve Gauss formunda çekirdek yoğunluk tahmini modellemesi yapılmış ve olasılık yoğunluk fonksiyonu (OYF) hesaplanmıştır. OYF, histogram şeklinde gösterilen dağılımların bir ifadesi olup, farklı dağılımların kıyaslanması için anlaşılır görseller sunduğundan tercih edilmiştir [23].

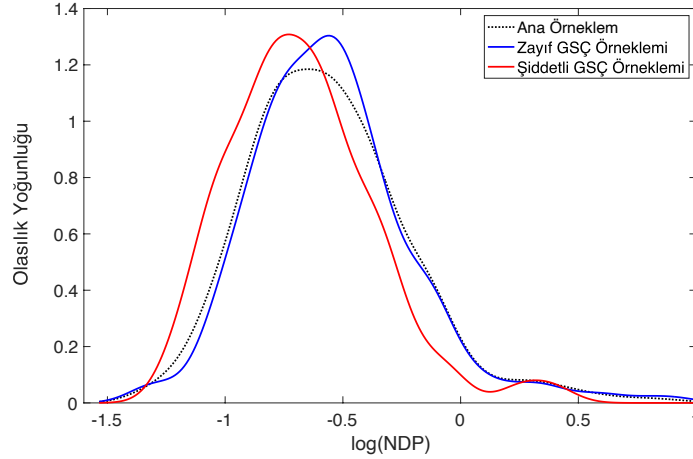
GŞÇ yapılarının şiddetinin doğrudan bir göstergesi olan EG parametresine göre yapılan sınıflandırmada, zayıf GŞÇ’ye sahip 284 ve şiddetli GŞÇ’ye sahip 80 kuazar için yapılan kıyaslamalar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2’de sunulan sonuçlar gösteriyor ki kuazar tayfında bulunan GŞÇ yapılarının şiddetine göre yapılan gruplandırmada, zayıf GŞÇ’ye sahip kuazarlar ve şiddetli GŞÇ’ye sahip kuazarların görünen ve mutlak parlaklıkları oldukça benzer dağılımlar göstermektedir. Görünür parlaklıkların ortalamaları arasındaki fark yalnızca $\sim 0^m.05$ ve mutlak parlaklıkların ortalamaları arasındaki fark ise $\sim 0^m.1$ civarındadır. Uygulanan test sonuçları ise dağılımların farklı olduğunu önermeye yetecek istatistikler vermemiştir. Buna göre seçilen örneklemelerin yapısı, [11] çalışmasında ortaya koyulan parlaklık ve $\log(NDP)$ ilişkisinden bağımsız kabul edilebileceğinden GŞÇ şiddeti ve parlaklık değişim genliği arasında ilişki aramak için uygundur.

Tablo 2. Geniş soğurma çizgilerinin şiddetine göre oluşturulan alt örneklemelerin kıyaslanması. Görünen ve mutlak parlaklıklar, parlaklık değişim genliği, soğurma EG değişimi ve kesirsel EG değişimi ortalamaları ve uygulanan testlerin istatistik sonuçları verilmiştir.

	Kriter	Sayı	m_i (kadir)	M_i (kadir)	$\log(NDP)$	ΔEG (\AA)	ΔKEG (%)
Zayıf GŞÇ	$EG \leq 15 \text{ \AA}$	284	18.66	-27.66	-0.549	2.481	6.96
Şiddetli GŞÇ	$EG \geq 30 \text{ \AA}$	80	18.71	-27.78	-0.674	3.509	2.30
t-test P			%53.2	%83.7	%99.7	%99.5	>%99.9
KS-test P			%28.2	%95.3	%98.3	%97.2	>%99.9

Şiddetli GŞÇ yapısına sahip kuazarların parlaklık değişim genliklerinin ortalaması, zayıf GŞÇ yapısına sahip kuazarlara göre daha küçüktür. Bu iki alt örneklemin $\log(NDP)$ dağılımları için uygulanan t ve KS-test sonuçları, dağılımların farklı yapılara sahip olduğu önermesi için sırasıyla %99.7 ve %98.3 güvenilirlik değerlerini vermiştir. Elde edilen sonuçlara göre, şiddetli GŞÇ’ye sahip kuazarların daha küçük değişimler gösterdiği önerilebilmektedir.



Şekil 3. Rüzgâr şiddetine göre gruplandırılan kuazarların parlaklık değişim genliği parametresi $\log(NDP)$ 'nin dağılımlarının kıyaslanması. Mavi dağılım, zayıf rüzgâra sahip kuazar örneklemini, kırmızı dağılım ise şiddetli rüzgâra sahip kuazar örneklemini temsil etmektedir. Kesikli siyah dağılım, ana örnekleme de yer alan tüm kuazarları temsil etmektedir.

GSÇ yapılarının zamana bağlı değişimler gösterdiği ayrıntılı çalışmalarla ortaya koyulmuştur [örneğin; 14, 12]. Soğurma çizgilerinin zamana bağlı değişimlerini tanımlamak için kullanılan; iki farklı zamanda gözlenen tayflardan ölçülen eşdeğer genişlik farkları; EG, ilk tayftan ölçülen EG ile bağıntılıdır. Bu bağıntılığı daha açıkça ortaya koyabilmek için tanımlanan kesirsel EG değişimi parametresi olan $\Delta EG / \langle EG \rangle$; bir anlamda kuazar tayfında bulunan soğurma çizgisinin yüzdelik olarak değişimini tanımlamaktadır. Filiz Ak vd. [13] çalışmasında ortaya koyulan sonuçlar, zayıf GSÇ yapılarının daha değişken olduğunu göstermiştir. Bu çalışma için seçilen alt örneklemlerin kıyaslanması, [13] çalışmasının sonuçları ile benzer olarak, büyük eşdeğer genişliğe sahip olan GSÇ yapılarının daha az şiddet değişimi gösterdiğini ortaya koymaktadır.

İkinci yaklaşım olarak ele alınan bu gruplandırmadan elde edilen sonuçlar, şiddetli ve az değişen GSÇ yapıları barındıran kuazarların ışık eğrilerindeki parlaklık değişimlerinin daha küçük olduğunu önermektedir.

3.3. Rüzgâr özelliklerine göre gruplandırma

Kuazarların tayfları incelendiğinde, bazı rüzgâr yapılarının yalnızca C IV soğurması oluşturduğu, bazı kuazarların ise C IV yanı sıra aynı hız aralığına sahip Si IV, Al III ve Mg II soğurmalarını da oluşturabildiği görülmüştür [13]. Bu durumun, rüzgâr ile taşınan soğurucu gazın iyonlaştırma potansiyel enerjisi ile ilişkili olduğu bilinmektedir [18, 1, 13, 24].

[13] çalışmasında tayflarda belirlenen GSÇ yapıları; yüksek iyonlaşmaya sahip (yalnızca C IV soğurması), orta iyonlaşmaya sahip (C IV ve Si IV soğurması) ve düşük iyonlaşmaya sahip (C IV, Si IV ve Al III soğurması) şeklinde sınıflandırılmıştır. Bu iyonlaşma durumları dikkate alınarak, benzer bir gruplandırma bu çalışma için yapılmıştır. Buna göre, C IV, Si IV ve Al III GSÇ yapısı gösteren 84 kuazar; düşük iyonlaşma, C IV ve Si IV GSÇ yapısı gösteren 212 kuazar; orta iyonlaşma ve yalnızca C IV GSÇ yapısı gösteren 95 kuazar; yüksek iyonlaşma gruplarına alınmıştır. Seçilen örneklemlerin sınırlarının net olarak ortaya koyulması ve yalnızca rüzgâr kaynaklı soğurmaların (bkz Bölüm 2) dikkate alınabilmesi için C IV soğurma yapısına karşılık gelen hız aralığı içinde Si IV ya da Al III geçişlerine ait 2000 km s^{-1} den daha dar soğurma gösteren 233 kuazar iyonlaşma durumuna göre yapılan gruplandırmanın dışında bırakılmıştır.

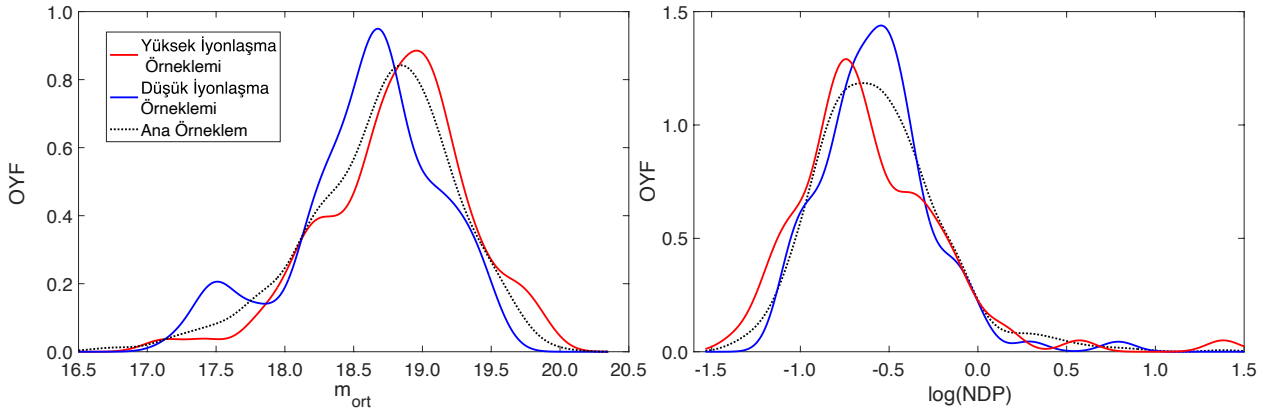
Bu üç grupta yer alan kuazarların, görünen parlaklık, parlaklık değişim genliği ve GSÇ eşdeğer genişliklerinin ortalamaları Tablo 3'de verilmiştir. Yüksek ve düşük iyonlaşma grupları için parametrelerin dağılımlarına uygulanan testlerin istatistik sonuçları Tablo 3'de sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar, yüksek iyonlaşma ve düşük iyonlaşma gruplarında yer alan kuazarların parlaklık dağılımlarının farklı olduğunu önermektedir. Grupların $\log(NDP)$ dağılımları arasında istatistiksel anlamlı bir farklılık bulunamamıştır. Bu iki grupta yer alan kuazarların eşdeğer genişlik ve kesirsel eşdeğer genişlik dağılımları arasında ise yüksek güvenirlilikle farklılıklar bulunmuştur. EG ve $\Delta EG / \langle EG \rangle$ dağılımları için bulunan belirgin farklılık, [13] çalışmasının sonuçları dikkate alındığında beklenen bir durumdur.

Tablo 3. İyonlaşma durumuna göre yapılan gruplandırmalar için görünen parlaklık, parlaklık değişim şiddeti, eşdeğer genişlik ve kesirsel eşdeğer genişlik değişimi ortalamaları. Yüksek ve düşük iyonlaşma gruplarının dağılımları için yapılan t-test ve KS-test sonuçlarının güvenilirlik parametreleri son iki satırda yer almaktadır.

Grup	Kriter	Sayı	m_{ort} (kadir)	$\log(NDP)$	EG (Å)	ΔKEG (%)
Yüksek İyonlaşma	C IV GŞÇ	95	18.60	-0.568	10.643	7.55
Orta İyonlaşma	C IV ve Si IV GŞÇ	212	18.65	-0.554	22.424	5.13
Düşük İyonlaşma	C IV, Si IV ve Al III GŞÇ	84	18.81	-0.607	33.609	2.15
t-test P			%99.3	%51.6	>%99.9	>%99.9
KS-test P			%99.4	%82.9	>%99.9	>%99.9

Şekil 4'de Yüksek, orta ve düşük iyonlaşma gruplarında yer alan kuazarlar için m_{ort} ve $\log(NDP)$ dağılımları için hesaplanan OYF'ler kıyaslanmıştır. $\log(NDP)$ dağılımları için istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunamamasının altında yatan sebebin, gruplarda yer alan kuazarların parlaklık farklılıkları olduğu düşünülmektedir. Bölüm 3.1'de elde edilen sonuçlar, parlaklık ve $\log(NDP)$ arasındaki güçlü ilişkinin, $\log(NDP)$ ve EG arasındaki olası ilişkinin belirlenmesini baskıladığı göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4. İyonlaşma derecesine göre yapılan gruplandırmanın örneklemi için ortalama parlaklık ve $\log(NDP)$ dağılımları için olasılık yoğunluk fonksiyonları kıyaslanmıştır. Kesikli siyah dağılım, ana örnekleme yer alan tüm kuazarları temsil etmektedir.

Kuazarların $\log(NDP)$, m_{ort} ve GŞÇ EG'leri arasındaki dejenere ilişkinin daha iyi analiz edilebilmesi için bu parametrelerden bir tanesinin sınırlandırılması gerekmektedir. Bir başka ifade ile $\log(NDP)$ ve EG arasında ilişkinin belirlenebilmesi için kıyaslanan dağılımlarının benzer m_{ort} değerlerine sahip olması gerekmektedir. Bunun için yüksek, orta ve düşük iyonlaşma gruplarında yer alan kuazarlardan, m_{ort} değeri belirli bir aralıkta olanlar için yapılacak testler bu üç parametre arasındaki dejenere ilişkinin anlaşılmasını sağlayabilecektir.

Ana örneklem içinde yer alan tüm kuazarların m_{ort} değerlerinin ortalaması $18^m.7$ olarak bulunmuştur. Ana örneklemdaki tüm kuazarlar için iyonlaşma durumuna göre yapılan gruplandırmalar, $18^m.7$ 'den daha parlak olan kuazarlar için yinelenildiğinde; $m_{ort} < 18^m.7$ şartını sağlayan toplam 271 kuazardan 53 tanesinin yüksek, 102 tanesinin orta ve 30 tanesinin düşük iyonlaşma grubunda olduğu görülmüştür. Tablo 4'de bu yeni gruplandırma için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

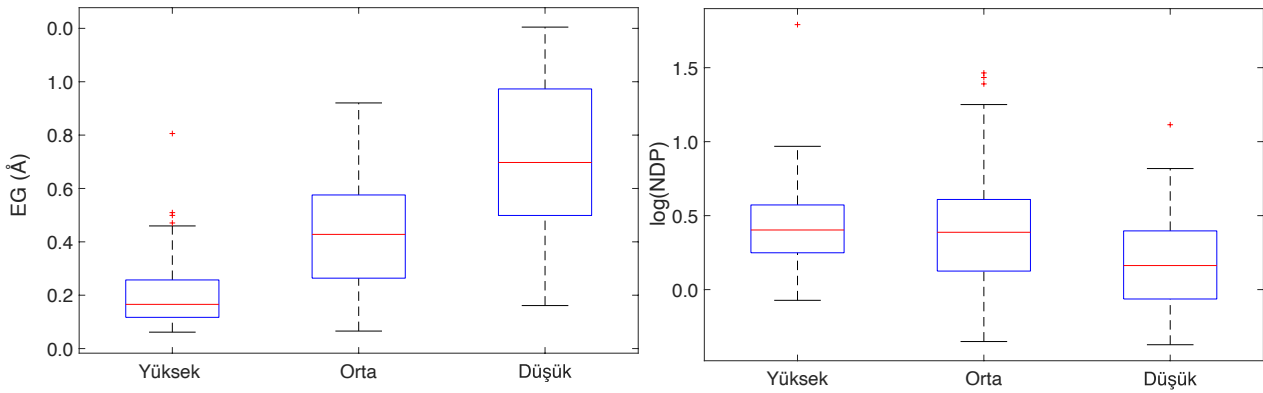
Tablo 4. Ana örnekleme yer alan 271 parlak kuazardan iyonlaşma durumuna göre yapılan gruplandırmalar için görünen parlaklık, parlaklık değişim şiddeti, eşdeğer genişlik ve kesirsel eşdeğer genişlik değişimi ortalamaları. Yüksek ve düşük iyonlaşma gruplarının dağılımları için yapılan t-test ve KS-test sonuçlarının güvenilirlik parametreleri son iki satırda yer almaktadır

Grup	Kriter $m_{ort} < 18^m.7$	Sayı	m_{ort} (kadir)	$\log(NDP)$	EG (Å)	ΔKEG (%)
Yüksek İyonlaşma	C IV GŞÇ	53	18.25	-0.572	10.680	7.25
Orta İyonlaşma	C IV ve Si IV GŞÇ	102	18.20	-0.612	21.473	5.09
Düşük İyonlaşma	C IV, Si IV ve Al III GŞÇ	30	18.26	-0.799	36.316	1.97
t-test P			%7.3	%99.7	>%99.9	>%99.9
KS-test P			%6.3	%99.8	>%99.9	>%99.9

Kuazarların parlaklıkları için yapılan $m_{ort} < 18.7$ sınırlandırması, beklendiği üzere parlaklık dağılımlarının benzer hale gelmesini sağlamış ve böylece parlaklık ve $\log(NDP)$ arasındaki bilinen ilişki etkisi en aza indirgenmiştir. Düşük ve yüksek iyonlaşma gruplarında yer alan kuazarların $\log(NDP)$ dağılımları için uygulanan testler yüksek güvenilirlikle bu iki dağılımın farklı olduğunu işaret etmektedir. Benzer şekilde EG ve KEG dağılımlarının da farklı olduğu yüksek güvenilirlikli istatistik sonuçlara dayanılarak belirlenmiştir.

Bu yaklaşım için elde edilen sonuçlar, yüksek iyonlaşmaya sahip kuazarların parlaklık değişim genliğinin büyük ve bu kuazarların GSÇ yapılarının daha zayıf olduğunu göstermektedir. Benzer olarak, düşük iyonlaşmaya sahip kuazarların daha az parlaklık değişimi gösterdiği ve daha şiddetli GSÇ yapılarına sahip olduğu görülebilmektedir.

Şekil 5’de yüksek, orta ve düşük iyonlaşma gruplarında yer alan kuazarlar için GSÇ eşdeğer genişlikleri (EG, sol panel) ve parlaklık değişim genliği ($\log(NDP)$, sağ panel) kıyaslaması boxplot olarak verilmiştir. Mavi dikdörtgenlerin alt ve üst kenarları, dağılımın ikinci ve üçüncü çeyreklerini, dikdörtgenin yüksekliği ise çeyrekler açıklığını temsil etmektedir. Mavi dikdörtgenlerin ortasındaki kırmızı çizgi, dağılımların medyan değerini vermektedir. Dağılımların 1.5 çeyrekler açıklığı sınırları siyah çizgilerle belirtilmiş ve bu sınırlar dışında kalan veri noktaları uç değerler olarak kırmızı artılarla gösterilmiştir. Yüksek orta ve düşük iyonlaşma sıralamasına göre, dağılımların medyan değerlerinin EG için giderek arttığı, $\log(NDP)$ için giderek azaldığı görülmektedir.



Şekil 5. Yüksek, orta ve düşük iyonlaşma gruplarında yer alan kuazarlar için GSÇ eşdeğer genişlikleri (EG, sol panel) ve parlaklık değişim genliği ($\log(NDP)$, sağ panel) kıyaslaması boxplot olarak verilmiştir.

Bu gruplama yaklaşımında yapılan analizler, kuazarların parlaklıkları ile parlaklık değişim genlikleri arasındaki ilişkinin diğer olası ilişkileri baskılayacak kadar güçlü olduğu görülmüştür. Parlaklığın etkilerini en aza indirmek için yapılan sınırlama sonrasında, parlaklık değişim genliği ve GSÇ şiddeti arasında ilişki olduğu görülmüştür. Yalnızca C iv GSÇ yapıları gösteren yüksek iyonlaşmaya sahip kuazarların, parlaklık değişim genliklerinin görece daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu kuazarların daha zayıf GSÇ yapılarına sahip olduğu ve zayıf GSÇ yapılarının da görece daha büyük eşdeğer genişlik değişimleri gösterdiği bilinmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Rüzgâr yapısına sahip kuazarların ışık eğrilerinde görülen parlaklık değişimleri ile rüzgâr parametreleri arasında ilişkilerin arandığı bu çalışmada, tayflarında rüzgâr belirteci olan geniş soğurma çizgisi gösteren 624 kuazar ana örneklem olarak seçilmiştir. Ana örneklemdeki tüm kuazarların, SDSS tarafından en az iki tayf verisine sahip olması, CSS ile elde edilmiş ışık eğrilerinin olması ve rüzgâr parametrelerinin sistematik olarak belirlenmiş olması kriterleri aranmıştır.

Işık eğrilerindeki parlaklık değişim genlikleri ve tayfsal verilerden ölçülen rüzgâr parametreleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi için üç farklı yaklaşımla gruplandırılmalar yapılmıştır. Birinci yaklaşımda, parlaklık değişim genliği büyük ve küçük olan kuazarların GSÇ özellikleri incelenmiş ancak istatistiksel anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. Sonuçlarda, [11] çalışmasında ayrıntıları ortaya koyulan, kuazar parlaklığı ve parlaklık değişim genliği arasındaki baskın ilişkinin etkisi olduğu düşünülmüştür.

İkinci yaklaşımda, rüzgâr şiddetine göre gruplandırma yapılmış ve iki farklı grubun parlaklık değişim genlikleri kıyaslanmıştır. Sonuçlar, şiddetli rüzgâra sahip kuazarların daha az parlaklık değişimi gösterdiğini önermiştir. Rüzgâr şiddetlerinin değişimi de dikkate alındığında bu öneri, şiddetli ve durağan rüzgâr yapısına sahip olan kuazarların küçük genlikli parlaklık değişimleri gösterdiği şeklinde genişletilmiştir.

Üçüncü yaklaşımda, kuazarların rüzgârları tarafından taşınan soğurucu gazın iyonlaşma durumunu dikkate alan bir gruplandırma yapılmıştır. İlk yaklaşıma benzer olarak kuazar parlaklıklarının değişim genliği için belirleyici bir faktör olduğu görülmüştür. Bu faktörün en aza indirgenebilmesi için gruplarda yer alan kuazarların parlaklıkları için $m_{ort} < 18^m.7$ kriteri aranmış ve analizler tekrar edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, parlaklık için getirilen sınırlandırmanın, [11] çalışmasında ortaya koyulan baskın etkinin en aza indirgenmesi için yeterli olduğunu göstermiştir. Test sonuçları, düşük iyonlaşma durumunda rüzgârlara sahip olan kuazarların daha şiddetli ve daha az değişen rüzgâr yapıları gösterdiğini ve ışık eğrilerinde daha küçük genlikli değişimlere sahip olduklarını ortaya koymuştur.

Farklı gruplandırmalar dikkate alınarak yapılan analizlerde, Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3'de elde edilen bulguların ortak bir sonuca işaret ediyor olması, rüzgâr kuazarlar için şu genellemelerin ortaya koyulmasında etkin olmuştur: (1) Tüm kuazarlarda olduğu gibi rüzgârlı kuazarlarda da ışık eğrilerindeki parlaklık değişim genlikleri, kuazarın parlaklığı ile ters orantılıdır. (2) Rüzgâr şiddeti ve parlaklık değişim genliği arasında ters ilişki vardır. Şiddetli rüzgârların daha az değişim gösterdiği de dikkate alındığında; durağan ve şiddetli rüzgârlara sahip kuazarların daha az parlaklık değişimi gösterdiği görülmüştür.

Kuazarların ışınım kaynağı, merkezi karadelik üzerine madde yığılmasıdır. Ancak bu yığılmanın gerçekleşebilmesi için karadeliğin etrafındaki yığılma diskinde bulunana maddenin açısız momentum kaybına uğraması gereklidir. Diskteki maddenin açısız momentum kaybını sağlayan mekanizmanın istikrarlı olması durumunda, kuazarın büyük parlaklık değişimleri göstermemesi beklenmektedir. Rüzgârlar, diskten açısız momentum kaybının gerçekleşmesini sağlayacak en olası mekanizmalardandır. Güçlü ve hızlı rüzgârların diskten dışarıya doğru taşıdığı madde ve açısız momentum, diskteki maddenin merkeze yaklaşabilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle daha kararlı, daha şiddetli rüzgâr yapısına sahip kuazarların parlaklık değişimleri az olmalıdır. Bu çalışmada elde edilen bulgular, teorik çalışmalara dayanan bu beklentiler ile uyumlu sonuçlara işaret etmektedir. Kuazarların parlaklık değişimlerinin yığılma diskindeki kararsızlıklara bağlı olduğu yaklaşımı, disk kararsızlıklarını azaltan şiddetli rüzgârlara sahip kuazarların daha az parlaklık değişimi gösterdiğinin ortaya koyulması ile güçlenmiştir.

Rüzgâr yapılarının farklı iyonlaşma durumlarına sahip olması, [13] çalışmasında ayrıntılı olarak incelenmiş ve gözlemcinin bakış doğrultusunun baskın bir etken olabileceği sonucuna varılmıştır. Buna göre, diske daha yakın bir bakış doğrultusuna sahip olduğumuz kuazarların daha şiddetli rüzgâr belirteçleri gösterdiği savunulmuştur. Bu bakış açısı dikkate alındığında, daha az parlaklık değişimi gösteren rüzgârların daha diske yakın bir doğrultuda (daha küçük açılarla) gözlemlendiği görüşü de alternatif olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumda, diskin etrafında bulunan toz yapının olası etkileri de dikkate alınmalıdır.

Yukarıda ele alınan iki görüş birbiri ile çelişkili değildir. Her iki görüş de büyük genlikli parlaklık değişimi gösteren kuazarların daha zayıf rüzgâr yapılarına sahip olmasını gerektirmektedir. Bu görüşler arasında belirgin bir ayrıma varabilmek için daha çok sayıda örneklem için daha hassas verilerin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma için seçilen örneklem ve yapılan ölçümler bazı kısıtlamalar içermektedir. Örneğin; CSS parlaklık ölçümleri büyük hatalara sahiptir. Kuazarların tayflarında rüzgârların belirlenmesi için kullanılan yöntemde, salma ve soğurma çizgilerinin üst üste binmesi durumunda GŞÇ eşde er genişlikleri do ru olarak ölçülememektedir. Bu etkilerden kaçınmak için v_{mak} ve v_{min} hızları belirli bir maksimum ve minimum için sınırlandırılmıştır. Hem örneklem sayısı azalmış hem de örneklem içerisinde EG gibi parametreler alt sınır olarak hesaplanmıştır.

Kuazarların parlaklık değişimlerinin artmasına ya da azalmasına neden olan mekanizmaların incelenmesinde, optik bölgedeki gözlemlere ek olarak x-ışın ve radyo bölgelerdeki gözlemler de dikkate alınmalıdır. X-ışın gözlemleri, diskin en iç kısımlarından veri sağlayabilmekte ve radyo gözlemleri ise diske dik doğrultudaki jet yapıları hakkında bilgi verebilmektedir. Gelecekte elde edilecek daha kapsamlı ve hassas gözlemlerin kuazarların yapısı hakkında daha fazla bilgi edinmemizi sağlaması beklenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Sayılı (2019) [25] tez çalışmasının bir bölümünden üretilmiştir. Çalışmanın ve tezin ortaya koyulmasında finansal desteği için TÜBİTAK 115F037 numaralı projeye teşekkür ederiz. Hakemlere değerli katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynakça
 Cabson, R. R., Jiang, L., Brandt, W. N., Hall, P. B., Shen, Y., Wu, J., Anderson, S. F., Schneider, D. P., Vanden Berk, D., Gallagher, S. C., Fan, X., York, D. G. 2009. A Catalog of Broad Absorption Line Quasars in Sloan Digital Sky Survey Data Release 5. The Astrophysical Journal, 692, 758-777. DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/1/758>

- [2] Weymann, R. J., Morris, S. L., Foltz, C. B., Hewett, P. C. 1991. Comparisons of the Emission-Line and Continuum Properties of Broad Absorption Line and Normal Quasi-stellar Objects. *The Astrophysical Journal*, 373, 23. DOI: <https://doi.org/10.1086/170020>
- [3] Pâris, I., Petitjean, P., Ross, N. P., Myers, A. D., Aubourg, É., Streblyanska, A., Bailey, S., Armengaud, É., Palanque-Delabrouille, N., Yèche, C., Hamann, F., Strauss, M. A., Albareti, F. D., Bovy, J., Bizyaev, D., Niel Brandt, W., Brusa, M., Buchner, J., Comparat, J., Croft, R. A. C., Dwelly, T., Fan, X., Font-Ribera, A., Ge, J., Georgakakis, A., Hall, P. B., Jiang, L., Kinemuchi, K., Malanushenko, E., Malanushenko, V., McMahon, R. G., Menzel, M.-L., Merloni, A., Nandra, K., Noterdaeme, P., Oravetz, D., Pan, K., Pieri, M. M., Prada, F., Salvato, M., Schlegel, D. J., Schneider, D. P., Simmons, A., Viel, M., Weinberg, D. H., Zhu, L. 2017. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog: Twelfth data release. *Astronomy and Astrophysics*, 597, A79. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527999>
- [4] Lyke, B. W., Higley, A. N., McLane, J. N., Schurhammer, D. P., Myers, A. D., Ross, A. J., Dawson, K., Chabanier, S., Martini, P., Busca, N. G., Mas des Bourboux, H. du., Salvato, M., Streblyanska, A., Zarrouk, P., Burtin, E., Anderson, S. F., Bautista, J., Bizyaev, D., Brandt, W. N., Brinkmann, J., Brownstein, J. R., Comparat, J., Green, P., de la Macorra, A., Muñoz Gutiérrez, A., Hou, J., Newman, J. A., Palanque-Delabrouille, N., Pâris, I., Percival, W. J., Petitjean, P., Rich, J., Rossi, G., Schneider, D. P., Smith, A., Vivek, M., Weaver, B. A. 2020. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog: Sixteenth Data Release. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 250, 8-32. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aba623>
- [5] Trump, J. R., Hall, P. B., Reichard, T. A., Richards, G. T., Schneider, D. P., Vanden Berk, D. E., Knapp, G. R., Anderson, S. F., Fan, X., Brinkman, J., Kleinman, S. J., Nitta, A. 2006. A Catalog of Broad Absorption Line Quasars from the Sloan Digital Sky Survey Third Data Release. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 165, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1086/503834>
- [6] Timlin, J. D., Brandt, W. N., Zhu, S., Liu, H., Luo, B., Ni, Q. 2020. The frequency of extreme X-ray variability for radio-quiet quasars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498, 4033-4050. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2661>
- [7] Kaspi, S., Brandt, W. N., Maoz, D., Netzer, H., Schneider, D. P., Shemmer, O. 2007. Reverberation Mapping of High-Luminosity Quasars: First Results. *The Astrophysical Journal*, 659, 997-1007. DOI: <https://doi.org/10.1086/512094>
- [8] Yang, G., Brandt, W. N., Luo, B., Xue, Y. Q., Bauer, F. E., Sun, M. Y., Kim, S., Schulze, S., Zheng, X. C., Paolillo, M., Shemmer, O., Liu, T., Schneider, D. P., Vignali, C., Vito, F., Wang, J.-X. 2016. Long-term X-Ray Variability of Typical Active Galactic Nuclei in the Distant Universe. *The Astrophysical Journal*, 831, 145. DOI: <https://doi.org/10.3847/0004-637X/831/2/145>
- [9] Simm, T., Salvato, M., Saglia, R., Ponti, G., Lanzuisi, G., Trakhtenbrot, B., Nandra, K., Bender, R. 2016. Pan-STARRS1 variability of XMM-COSMOS AGN. II. Physical correlations and power spectrum analysis. *Astronomy and Astrophysics*, 585, A129. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527353>
- [10] Vanden Berk, D. E., Wilhite, B. C., Kron, R. G., Anderson, S. F., Brunner, R. J., Hall, P. B., Ivezić, Z., Richards, G. T., Schneider, D. P., York, D. G., Brinkmann, J. V., Lamb, D. Q., Nichol, R. C., Schlegel, D. J. 2004. The Ensemble Photometric Variability of ~25,000 Quasars in the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal*, 601, 692-714. DOI: <https://doi.org/10.1086/380563>
- [11] Filiz Ak, N. ve Sayılı, Ö. 2022. Rüzgâr Yapısı Gösteren Kuazarların Fotometrik İncelenmesi - I: Parlaklık Değişim Genliği ve Fiziksel Parametreler Arasındaki İlişkiler. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 8,2, 149-162, Basım aşamasında. DOI: <https://doi.org/10.28979/jarnas.917261>
- [12] Filiz Ak, N., Brandt, W. N., Hall, P. B., Schneider, D. P., Anderson, S. F., Hamann, F., Lundgren, B. F., Myers, A. D., Pâris, I., Petitjean, P., Ross, N. P., Shen, Y., York, D. (2013). Broad Absorption Line Variability on Multi-year Timescales in a Large Quasar Sample. *The Astrophysical Journal*, 777, 168-196. DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/777/2/168>
- [13] Filiz Ak, N., Brandt, W. N., Hall, P. B., Schneider, D. P., Trump, J. R., Anderson, S. F., Hamann, F., Myers, A. D., Pâris, I., Petitjean, P., Ross, N. P., Shen, Y., York, D. (2014). The Dependence of C IV Broad Absorption Line Properties on Accompanying Si IV and Al III Absorption: Relating Quasar-wind Ionization Levels, Kinematics, and Column Densities. *The Astrophysical Journal*, 791, 88-109. DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/791/2/88>
- [14] Filiz Ak, N., Brandt, W. N., Hall, P. B., Schneider, D. P., Anderson, S. F., Gibson, R. R., Lundgren, B. F., Myers, A. D., Petitjean, P., Ross, N. P., Shen, Y., York, D. G., Bizyaev, D., Brinkmann, J., Malanushenko, E., Oravetz, D.

- J., Pan, K., Simmons, A. E. ve Weaver, B. A. (2012). Broad Absorption Line Disappearance on Multi-year Timescales in a Large Quasar Sample. *The Astrophysical Journal*, 757, 114–133. DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/757/2/114>
- [15] De Cicco, D., Brandt, W. N., Grier, C. J., Paolillo, M., Filiz Ak, N., Schneider, D. P., Trump, J. R. 2018. C IV broad absorption line disappearance in a large SDSS QSO sample. *Astronomy and Astrophysics*, 616, A114. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732497>
- [16] Rogerson, J. A., Hall, P. B., Ahmed, N. S., Rodríguez Hidalgo, P., Brandt, W. N., Filiz Ak, N. 2018. Emergence and Variability of Broad Absorption Line Quasar Outflows. *The Astrophysical Journal*, 862, 22. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabfe5>
- [17] Grier, C. J., Brandt, W. N., Hall, P. B., Trump, J. R., Filiz Ak, N., Anderson, S. F., Green, P. J., Schneider, D. P., Sun, M., Vivek, M., Beatty, T. G., Brownstein, J. R., Roman-Lopes, A. 2016. C IV Broad Absorption Line Acceleration in Sloan Digital Sky Survey Quasars. *The Astrophysical Journal*, 824, 130. DOI: <https://doi.org/10.3847/0004-637X/824/2/130>
- [18] Hall, P. B., Anderson, S. F., Strauss, M. A., York, D. G., Richards, G. T., Fan, X., Knapp, G. R., Schneider, D. P., Vanden Berk, D. E., Geballe, T. R., Bauer, A. E., Becker, R. H., Davis, M., Rix, H.-W., Nichol, R. C., Bahcall, N. A., Brinkmann, J., Brunner, R., Connolly, A. J., Csabai, I., Doi, M., Fukugita, M., Gunn, J. E., Haiman, Z., Harvanek, M., Heckman, T. M., Hennessy, G. S., Inada, N., Ivezić, Ž., Johnston, D., Kleinman, S., Krolik, J. H., Krzesinski, J., Kunszt, P. Z., Lamb, D. Q., Long, D. C., Lupton, R. H., Miknaitis, G., Munn, J. A., Narayanan, V. K., Neilsen, E., Newman, P. R., Nitta, A., Okamura, S., Pentericci, L., Pier, J. R., Schlegel, D. J., Snedden, S., Szalay, A. S., Thakar, A. R., Tsvetanov, Z., White, R. L., Zheng, W. 2002. Unusual Broad Absorption Line Quasars from the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 141, 267-309. DOI: <https://doi.org/10.1086/340546>
- [19] Janiuk, A., Misra, R., Czerny, B., Kunert-Bajraszewska, M. 2012. Stability of black hole accretion disks. *European Physical Journal Web of Conferences*, 39, 06004. DOI: <https://doi.org/10.1051/epiconf/20123906004>
- [20] Drake, A. J., Djorgovski, S. G., Mahabal, A., Beshore, E., Larson, S., Graham, M. J., Williams, R., Christensen, E., Catelan, M., Boattini, A., Gibbs, A., Hill, R. ve Kowalski, R. (2009). First Results from the Catalina Real-Time Transient Survey. *The Astrophysical Journal*, 696, 870–884. DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/696/1/870>
- [21] Shen, Y., Richards, G. T., Strauss, M. A., Hall, P. B., Schneider, D. P., Snedden, S., Bizyaev, D., Brewington, H., Malanushenko, V., Malanushenko, E., Oravetz, D., Pan, K. ve Simmons, A. (2011). A Catalog of Quasar Properties from Sloan Digital Sky Survey Data Release 7. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 194, 45. DOI: <https://doi.org/10.1088/0067-0049/194/2/45>
- [22] Wall, J. V. 1996. Practical Statistics for Astronomers - II. Correlation, Data-modelling and Sample Comparison. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 37, 519. Erişim adresi: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1996QJRAS..37..519W>
- [23] Silverman, B. W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis, Monographs on Statistics and Applied Probability*. London: Chapman and Hall. ISBN: 0-412-24620-1. Erişim adresi: <https://ned.ipac.caltech.edu/level5>
- [24] Yi, W., Brandt, W. N., Hall, P. B., Vivek, M., Grier, C. J., Filiz Ak, N., Schneider, D. P., McGraw, S. M. 2019. Variability of Low-ionization Broad Absorption-line Quasars Based on Multi-epoch Spectra from the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 242, 28. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab1f90>
- [25] Sayılı, Ö. (2019). *Geniş Soğurma Çizgili Kuazarların Fotometrik İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>

Investigation of Risk Perception of Employees Using Clustering Analysis: A Case Study of Iron-Steel Industry

Bennur Bulut¹, Filiz Ersöz¹

¹Department of Industrial Engineering, Karabük University, KARABÜK, TURKEY

(Alınış / Received: 29.10.2022, Kabul / Accepted: 20.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Iron and Steel
Industry, Risk
Perception,
Work Safety,
Two-Step
Clustering

Abstract: Iron and steel sector is a heavy industry sector and its contribution to the country's economy is quite high. However, the exposure of sector employees to heavy and dangerous materials during the production stage reveals the importance of risk perception and highlights occupational safety and risk management. In this research, risk perception and awareness of the employees of an iron and steel enterprise were determined according to their social and demographic data. The results of the research were presented using descriptive and inferential statistical analyzes. In the modeling part of the study, the two-stage clustering method, which is one of the multivariate statistical methods, was used. The similarities and differences in risk perception of the characteristics of the employees in the iron and steel enterprise were revealed. According to the results of the research, it has been determined that the education and age status of the employees are important in risk perception awareness.

Çalışanların Risk Algısının Kümeleme Analizi ile İncelenmesi: Demir-Çelik Endüstrisi Örneği

Anahtar Kelimeler

Demir-Çelik Sektörü,
Risk Algısı,
İş sağlığı ve Güvenliği,
İki Aşamalı Kümeleme

Öz: Demir-çelik sektörü ağır bir sanayi sektörü olup, ülke ekonomisine katkısı oldukça yüksektir. Ancak sektör çalışanlarının üretim aşamasında ağır ve tehlikeli malzemelere maruz kalması, risk algısının önemini ortaya koymakta ve iş güvenliği ve risk yönetimini ise ön plana çıkarmaktadır. Bu çalışmada bir demir-çelik işletmesinin çalışanlarının sosyal ve demografik verilerine göre risk algı ve farkındalıkları tespit edilmiştir. Araştırmada sonuçlar tanımlayıcı ve çıkarımsal istatistiksel analizler kullanılarak ortaya konulmuştur. Çalışmanın modelleme bölümünde çok değişkenli istatistiksel yöntemlerden olan iki aşamalı kümeleme yönteminden faydalanılmıştır. Demir-çelik işletmesinde çalışanların özelliklerinin risk algı benzerlik ve farklılıkları ortaya konulmuştur. Araştırma sonucuna göre çalışanların eğitim ve yaş durumunun risk algısı farkındalığında önemli olduğu tespit edilmiştir.

*Corresponding Author, email: bennurbulutt@gmail.com

1. Introduction

It is seen that there is a direct relationship between the development of the industry and the economic growth of the countries. Developed and developing countries use industry as a development tool by increasing their production capacities. Countries that can meet their own needs can get rid of foreign dependency and take great steps in terms of social development. Many different sectors such as defense, mining, iron and steel, construction, textile and food are growing rapidly by renewing themselves with the development of the industry. Countries and companies that want to produce the most products in the shortest time with the lowest cost compete. This competition also enables improvement studies in terms of quality and efficiency [1]. Since the industrial revolution, which started with the transition to mechanical production, improvement studies have been carried out in the industry. Creating ergonomically appropriate conditions and making improvements to prevent occupational accidents increase production and productivity [1, 2]. Between the years 1760-1830, the industrial revolution was experienced with the replacement of coal and steam machines by factory production. The replacement of human power by steam machines has provided diversity in production [3]. With the industrial revolution, lifestyles have changed and many important transformations have been experienced in daily life. It has paved the way for international trade, labor relations, legal structure and political structure and has been effective in the development of engineering sciences. It also paved the way for new revolutions by enabling the development of social and health sciences. As a result of the urban migration that occurred as a result of the first industrial revolution, there was a change in the social structure [4].

From the beginning of the twentieth century, the second industrial revolution has been experienced with assembly lines and the use of electricity in industries. In the 1960s, the third industrial revolution was experienced with the use of microchip technologies, automation and computers. With communication technologies and new production systems, the limits of capitalist production systems have been pushed. In the three industrial revolutions that took place, there were differences in the structure and form of production and the need for labor [5]. Businesses like artificial intelligence, robot technology and 3D printers etc. They have started to transition to Industry 4.0 with technologies. The transformation process started with the introduction of the Industry 4.0 concept at the Hannover Fair in Germany in 2011. Industry 4.0 differs from the other three revolutions in that production technologies are more efficient and faster. Countries such as Germany, the United States and Japan, which have determined their strategies for increasing productivity on a global scale, have made remarkable progress with clear and rapid changes. Countries that want to get their share from the developing economy have started to conduct research showing the current situation for this transformation process. Studies have been started to determine the current situation in order to determine which sectors primarily need new technologies, which sectors have these technologies, and the financial situation and infrastructure required for the transition to these technologies [6, 7]. In today's globalizing world, the fact that there are many competitive criteria such as efficiency and quality brings low cost superiority to the fore. Countries and businesses that want to achieve this superiority are working with the aim of raising themselves to a higher category by maintaining sustainable production and flexible competitive power [8].

The industrial revolution causes a radical change in all industrial areas. With the production technologies that can respond flexibly to the disruptions and malfunctions that occur in the production processes, there are great developments in the communication, transportation, trade and manufacturing sectors [9]. In parallel with the developments in the manufacturing sector, sub-sectors related to iron and steel are developing. When the major developments in the iron and steel industry and the development process of the countries are examined, it is seen that iron and steel are effective in the development of all sectors that provide raw materials economically [10]. Developments in the manufacturing sector increase the quality of life by providing superior quality and productivity [11]. In order to increase the efficiency of the enterprise, the human factor should be given more importance by the enterprises and serious measures should be taken for the safety of the employees in the work environment [12]. However, employees who are aware of the risks in the business environment and trust the workplace can add value to the company they work for [13]. The risk factors that may cause occupational accidents should be examined and the awareness of the employees against these risks should be measured. Elimination or minimization of the measured risks is possible with the correct management of the risk [14].

The risk expression is a probability of loss of an event that occurs under certain conditions and occurs materially and morally. It is also stated that the risk is equal to the potential losses [15]. The concept of danger can be defined as a harm that affects the employees in the enterprise. Every possible situation is defined as a risk and arises from danger [16]. The risk of a business could be production, sales, finance, marketing, etc. As a result of avoiding these

risks, the profit and loss situation of the enterprise occurs [17]. Risks are considered as internal risks if they can be predicted, prevented or the damage to be caused can be minimized according to their source. External risks, on the other hand, are uncontrollable risks, generally related to changes in the market or government policies. It is possible to identify these risks with risk assessment studies and turn them into opportunities. If it is not possible, it is necessary to eliminate the risks or to minimize the damage it may cause. It is of great importance that the necessary care is taken in the workplaces and that the employer and employee have knowledge about risk [18].

The risk perception of everyone working in the enterprise may be different, such as working conditions, workload, education, experience, age, employer attitude and physical characteristics. Each employee's perception of risk is also different. This may be due to differences such as gender. It can be defined as not knowing, trivializing and ignoring occupational health and safety, ignoring the dangers and risks that may occur in the workplace. Occupational Health and Safety Law No. 6331 (İSGK) aims to prevent possible dangers and risks in public and private workplaces. Within the scope of this law, responsibilities imposed on both employers and employees, regardless of their field of activity, have been determined. The most important of the responsibilities within the scope of this law is to carry out occupational health and safety training of employees in the form of continuous training and to ensure that they are informed about possible accidents, dangerous situations and all kinds of risks in the workplace [19-21].

1.1 Current Situation of Iron and Steel Industry in the World and in Türkiye

The main input of durable consumer goods of countries is iron and steel production. In many sectors such as automotive, defense, transportation and construction, raw material input, iron and steel production and consumption are also increasing. Approximately 95.6 million people work in the sector and create an added value of 2.9 trillion dollars for the country's economy. The development of the iron and steel industry is directly proportional to the development of all the industries it provides inputs, and it is of strategic importance for the countries [22, 23]. Steel, one of the strongest materials in the world, consists of an alloy of iron and carbon [24]. In the iron-steel industry, crude steel is produced with scrap and ore, and long and flat steel is produced with this crude steel [25]. It is the most recyclable material with 71% recycling rate. The slag produced by steel production can be used as a raw material in the cement factory [24]. Steel was produced in the periods before the Renaissance and became widespread with the development of new production methods in the 17th century. Mass production was achieved with the invention of the Bessemer Modifier. Today, iron, which is the most common metal used with other industrial activities, has the quality of being an increasingly important material over time [26]. In 2020, crude steel production in the world decreased by 0.9 percent compared to 2019. It was observed that crude steel production in the world contracted in all regions except Asia and the Middle East in 2019 [27].

There are three big companies as iron and steel factories in Türkiye. Among them, Kardemir is the first integrated iron and steel factory of the country and the first national brand in railway rail production, and is Türkiye's twenty-fifth largest industrial company. Kardemir, which has a capacity of 3.5 million/year, employs 4123 people according to October 2021 data [28]. Erdemir, on the other hand, is a company that brings organic wastes into production as iron and carbon inputs. It is an important company in the automotive sector with its metal forming laboratory. The capacity of the enterprise is 3.85 million/year and employs 5400 people according to the latest data of 2020 [29]. According to the latest data of 2020, İsdemir is Türkiye's largest iron and steel factory, employing 4702 people. It has the only integrated facility that produces long and flat products at the same time. Türkiye produces 154.4 million tons of steel with these three integrated facilities and is the seventh in the world and the leader in Europe with this production [30].

1.2 Occupational Health and Safety in the Iron and Steel Industry

The improvements made in order to produce the best steel in the sector at the least cost and to increase the quality within the countries continue at an increasing pace day by day. However, in the iron and steel industry, where millions of people work in the world, the occupational health and safety of employees is an important issue. It is the responsibility of the enterprise to use personal protective equipment, to apply to local and general ventilation, to prevent work accidents and occupational diseases that may occur in the sector. Businesses should have departments related to occupational health and safety, and the work to be done for occupational health and safety should not be seen as unnecessary costs [31]. One of the most dangerous sectors in industrial enterprises is the iron and steel sector. The most common occupational accidents in iron and steel enterprises; Occupational accidents may occur in cases such as failure to comply with the warnings of occupational health and safety rules, failure of the safety system, unsuitability of the working environment, insufficient ventilation and insufficient

lighting. In order to prevent occupational accidents, it is necessary to examine the accident records, eliminate the problems and provide the necessary trainings [32, 33].

1.3 Concept of Risk

According to the Turkish Language Association, risk is defined as the danger of being harmed [34]. According to the Occupational Health and Safety Law No. 6331, 27 losses due to danger are expressed as the possibility of injury or other harmful consequences [35]. Risk in the field of insurance; While it is defined as the existence of the risk of loss, probability of loss, uncertainty, the possibility that the actual result will be different from the expected result, the possibility of the emergence of any situation other than the expected situation, risk in banking; means the probability of failure in the collection or fulfillment of a loan given or a commitment made. In decision theory, risk refers to situations where the decision maker cannot determine the consequences of an event. In the field of finance, risk; It is the probability of deviation in the occurrence of any planned or expected situation related to the financial aspect of the enterprise [36]. Occupational accident risk in the enterprise can also be expressed as a combination of probability and severity [37]. Risk can be evaluated with the concept of opportunity. As the profit of the business increases, the acceptability of high-level risks can also increase. Thus, profit can be obtained from a risky activity. If there is no real opportunity, it is necessary not to continue the activity because the opportunity cannot be obtained from the risky activity [38].

Risk is any uncertain situation that will prevent the business from realizing its future goals and objectives, or factors that can contribute positively to the business and can be evaluated as an opportunity. The fact that the risk is uncertain does not mean that the risk cannot be managed. If the risk is predicted very well, this uncertainty can be eliminated and turned into a positive factor that will contribute to the business [39]. In today's world, which is globalizing and developing every day, it is important for businesses that develop themselves to manage risks and turn them into opportunities. In order for the business to gain value, especially in terms of quality and efficiency, risks must be identified, measured and eliminated. It is possible to draw a roadmap to minimize the risks that cannot be eliminated or to benefit the business from these risks [40].

Today, with the increasing institutionalization activities, different risk factors have started to emerge. Risks are divided into two main groups as systematic and non-systematic risks. There are operational risks in the iron and steel enterprise operating in the province of Karabük, where this study was conducted.

1.4 Risk Assessment and Analysis Methods

Risk assessment is defined as the probability of occurrence of a certain accident or hazard, and it is the evaluation of how much it affects the business in case of risk occurrence [41]. Risk assessment is the process of measuring the risks in the working environment, estimating the unmeasurable risks, controlling the measures taken for the risks and deciding which risks are acceptable or not. Risk assessment according to the Occupational Health and Safety Law No. 6331, it is stated as the studies that need to be carried out in order to determine the hazards that exist in the workplace or that may come from outside, the factors that cause these hazards to turn into risks, and the analysis and grading of the risks arising from the hazards, and to decide on control measures [42]. It is one of the risk duties imposed on the employer with the Law No. 6331. Every work environment has risks and it is the right of all employees to know these risks. Risk assessment employees aim to protect the business, individuals and organizations that may be adversely affected by the activities of the business. For the risk assessment, the opinion of the employees should be taken. Occupational diseases and work accidents may occur as a result of not making a risk assessment in an enterprise [43].

There are many risk assessment methods, but they can be grouped into two main groups. Risk assessment methods, which are classified as qualitative and quantitative methods, differ from each other in terms of calculating and defining risk. Qualitative methods are a method of estimating and verbally classifying risks using verbal logic. In the qualitative method, which is evaluated subjectively such as high or very high risk, the knowledge and ability of the specialist who performs risk assessment is important. In the quantitative risk assessment method, numerical logic methods are used. The severity of the risk and the probability of an accident are calculated to determine whether the risks are acceptable and what precautions should be taken for unacceptable risks [44]. Risk analysis is the process of identifying all uncertain situations and possible outcomes for specified objectives. Risk analysis is to determine the size, probability of occurrence and impact of the risk [45].

1.5 Perception of Risk

Calculation of risk with scientific methods gives objective results. Another dimension of risk that complements these objective results is the subjective expression of risk. Risk studies reveal the subjective aspect of risk. Perception of risk refers to individuals' subjective judgments of the magnitude, impact, and significance of risk

[46]. The way each employee perceives, manages and lives with risk differs. In the fact that the risk perception differs in each employee; Various factors such as social, cultural, economic, education, age and gender are effective. Employees who do not know the risks in their workplace have little attention for work. In this case, it reduces the work efficiency in the working environment. It also prevents the business from achieving its goals. In enterprises that want to prevent this situation, the risks to which the employees are exposed should be measured, measures should be taken for these risks and the risks they are exposed to should be explained to the employees. In addition, in the event of a risk, what needs to be done should be determined in advance so that employees are not affected by this situation or are least affected by it. Risk can be transformed into a positive factor in businesses where necessary precautions are taken and awareness of risks is created [47].

In this research, risk perception and awareness of the employees of an iron and steel enterprise were determined according to their social and demographic data.

2. Literature Review

In the literature study; risk in the manufacturing sector, risk in the iron and steel sector, risk method, risk perception, occupational health and safety studies were examined.

This study by Alkış and Taşpınar (2012) was carried out to measure the occupational safety and health perceptions of workers working in the metal sector operating in Konya. A survey was conducted with 150 randomly selected workers. However, data from 120 workers were evaluated. Statistical methods such as frequency distribution, arithmetic mean, standard deviation and descriptive statistics were used by using the SPSS program. It has been concluded that the education level of the workers is low, they belong to the young or middle age group, they have low work experience, and about half of them have had a work accident. It has been determined that older workers have lower security perceptions than younger workers, and those who have worked for many years in the workplace have higher security perceptions [49].

Gulhan et al. (2012) conducted this study to determine the causes of accidents in a heavy metal industry in Ankara. In the study, a survey was conducted with 201 participants. The status of being affected by accidents according to age, marital status, education, working hours and income level was investigated. While occupational accident was chosen as the dependent variable in the study conducted using the SPSS analysis method, as independent variables; age, marital status, education level, income level, smoking and alcohol use, duty, department and shift status. As a result of the research, it was concluded that the accidents were mostly caused by the lack of use of protective equipment and the lack of education. It has been determined that health surveillance should be done on an ongoing basis [50].

Gerami (2014) conducted this study to predict future accidents in the steel industry. It has been stated that the effect of future accidents in a workplace is predictable and managers who anticipate the risk can reduce the number of occupational accidents by taking precautions against hazards. In this study conducted with the help of Weka software, 2396 events were recorded between 2011 and 2013 in Isfahan-Mobarakeh Steel Complex, one of the largest steel producers in the Middle East. With the applied method, predictions were made for future accidents [51]. Topaloglu et al. (2015) examined the risks posed by blast furnaces on occupational safety in a company and investigated the causes of occupational accidents with the appropriate risk assessment method. Hazard and Workability Analysis (HAZOP) has been used. As a result of the research, it was stated that there were no fatal accidents in the company examined since 2002 [52].

Aytac et al. (2015) conducted a survey consisting of 52 questions with 1750 people in order to raise awareness for women working in the metal industry and to measure the risk perceptions of women workers. Data were evaluated with SPSS analysis and factor analysis, reliability analysis, correlation analysis and Stepwise regression analysis were applied. It has been determined that female workers with high security awareness have a high level of risk perception, there is a negative relationship between the perception of fatalism and the perception of safety precautions awareness, and there is a strong positive relationship between the perception of security awareness and awareness of security measures. It has been concluded that the occupational health and safety rules applied in the workplaces should be adopted and implemented by the employees and that the trainings should be continued continuously [53].

This study by Arpat (2015) was carried out to determine the relationship between safety culture and work accidents in the metal sector in Denizli. A survey method consisting of 17 questions was applied in 27 workplaces. 854 valid questionnaires were obtained. SPSS analysis method was used for quantitative data and content analysis method was used for qualitative data. While analyzing the quantitative data, reliability analysis, normality test,

frequency distribution, Chi-square test, factor analysis, Mann-Whitney U test, one-way analysis of variability Sperman correlation analysis were used. Analyzes were made in two stages. In the first stage, the survey analysis was done, and in the second stage, the open-ended questions in the survey were analyzed. As a result of the research, it has been determined that the characteristics of the enterprise, the working environment, occupational accident exposures and management systems strongly affect the safety culture, but the demographic components are ineffective [54].

Aytac et al. (2017) conducted a survey consisting of 51 questions with 1918 female employees working in the metal sector in Bursa. With the Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Conformity Test, female employees' perceptions of fatalism in occupational health and safety culture and their perception of risk factors in the workplace were measured. As a result of the study, it was determined that there is a significant relationship between safe behavior, which is a precursor to the establishment of a safety culture, and risk perceptions, and that the perception of fatalism negatively affects the risks in the working environment [55].

Karadal and Merdan (2017) conducted this study in order to determine the relationship between the safety climate and accident causes in the foundry industry in Kırıkkale and Kırşehir. A survey was conducted with 283 employees. Obtained data were tested with Anova test, t test, correlation and regression analysis. The results showed that the safety culture is effective in workplace accidents. It was concluded that training should be done frequently, ergonomic risk factors should be considered, workplace protective equipment should be used, managers should be in contact with employees and occupational health and safety audits should be carried out [56].

Kukhar et al. (2018) conducted this study to analyze the effectiveness of introducing international methods in the field of health safety and to evaluate the effectiveness of the safety management system in Metinvest, an iron and steel factory located in Mariupol, Ukraine. The risk assessment matrix was made with the HAZID method, the evaluation of the working capacity of the technological processes with the HAZOP method and the safety evaluation of the works with the JSA method. A specific list of hazards has been compiled by assigning a separate number to each technological item. In the second stage, the current risk level for each element was calculated with the help of the health safety engineering, occupational safety and environmental engineering risk assessment matrix. In the third stage, the probability of occurring the predicted results was calculated by giving points from one to five. As a result of the study, technical and organizational measures to reduce the production risks of the rail fasteners workshop of the enterprise in the energy sector reduced the remaining total risk level to an "Acceptable level" (74 points) by 61% [57].

Aytac et al. (2018) aimed to determine the ergonomic risk factors affecting women working in the metal industry. In this study, which was conducted with 2549 female employees working in 23 different workplaces, the data obtained by the survey method were analyzed by using SPSS analysis, correlation and t tests. As a result of the study, it was determined that the risk perception levels of the female employees who work the night shift are higher than those who do not, and that the risk perception levels of the female workers who work longer hours are higher than those who work less. It has been determined that correct posture and musculoskeletal problems are highly effective and affect productivity in the working environment [58].

Akarsu and Tükenmez (2018) conducted this study in order to determine the risks that may occur in the acid regeneration section of an enterprise operating in the iron and steel field. A risk assessment matrix was created by ordering the risks according to their priority status with the HAZOP method. It has been determined that the most important factor that can cause an accident is equipment damage and this can be controlled with the help of computers. It has been determined that the use of barriers in the enterprise is necessary for the prevention of explosion, fire and toxic gases, 13 out of 30 accident factors. It was concluded that the cost of stopping the whole system would be high and preventive actions should be carried out according to the order of importance of the risks [59].

Büyükyılmaz et al. (2018) investigated the organizational health perceptions of Kardemir A.Ş., which operates in the iron and steel industry. The questionnaire technique was applied to 500 employees, but 450 questionnaires were valid. The data obtained by Anova and t test were tested. Leadership dimension was found to be higher among female employees. In terms of age, it has been found that there are differences in the organizational identity dimension of employees aged 30 and below and those aged 31-40 and over. Perception levels of employees with bachelor's and master's degrees were found to be lower than those who graduated from vocational school and high school. As a result of the study, it was determined that the stress in the workplace should be controlled and a satisfactory working environment should be created [60].

Ayanoğlu and Kurt (2019), in the study conducted in 165 metal sector workplaces, handled the accident data set and determined dangerous risks with a data set consisting of 192 accidents and 39 variables. In addition, after it was understood that the most suitable mining method was artificial neural networks, a double-layer feedforward accident prediction model artificial neural network was developed by teaching the data set. With 90% accuracy, it has been revealed that overlooked hazards in the metals industry pose a major risk [61].

This study by Nasution (2019) was conducted to evaluate the safety system in a foundry company that manufactures cast iron products such as wheel pans and fan blowers. Job Hazard Analysis (JHA) method was used to systematically identify potential hazards in the foundry company. The analysis covered the work process, work phases, hazard, sources, risks, impacts and current management. It was determined that the risk reduction average in the metal casting process was 19.02%, the highest value was 21.67% and the lowest value was 12.86%. The most dangerous of the seven stages of production; finishing and iron metal melting process. Interviews were held with the workers, who were all male and whose average age was 27, in charge of these two stages. As a result of the study, based on the basic risk and current risk calculation, it was concluded that the highest risk working process was the molten metal pouring process with 14.44%. It has been determined that the workers on the production lines do not have the habit of using personal protective equipment in the working environment [62].

Kahya et al. (2019) evaluated the physical conditions and use of personal protective equipment for 92 workers in eight metal enterprises operating in Eskişehir with an observation registration form. It has been determined that the most important factor causing occupational disease is noise and it reduces productivity by distracting workers. While it was determined that glasses were not used in more than half of the 21 benches observed, and there were workers who did not use gloves even if they were very few, it was determined that the use of special shoes was common. It has been concluded that the trainings to be given will have a positive effect on the reduction of occupational accidents [63].

Karadal et al. (2019) conducted this study to determine the effect of safety behaviors on workplace injuries. Data were obtained by survey method from 309 employees working in metal casting industry in Kırıkkale and Kırşehir. The obtained data were analyzed with the IBM SPSS Amos statistical program. It has been concluded that as safety culture increases, safe behaviors increase and there is a decrease in occupational accidents [64].

Keskin et al. (2020) identified 83 risks in an underground mine in Gümüşhane using the decision value matrix method. Eight of the risks were found to be unacceptable risk, 37 high risk, 35 medium risk, and three low risk. With this study, which has a risk score of 14, it is aimed to prevent occupational accidents. This risk analysis was made according to the physical conditions of the enterprise, and suggestions were made to the enterprise, such as continuing the trainings, making gas measurements, continuing the scavenging of the poplars and building a pig roof in order to manage the risks [65].

Köse and Ersöz (2020) conducted this study with the aim of estimating real events in an enterprise operating in the field of iron and steel. Data of 205 occupational accidents were analyzed with SPSS according to accident severity and demographic situation. It was determined that CRT (Classification and Regression Trees) among the decision tree techniques gave the highest accuracy rate. As a result of the study, it was determined that the subcontracted personnel had frequent and severe accidents and that the inspections should be increased in order to reduce these accidents. It has been found that the most important cause of workplace accidents is the workplace and age is a very important accident factor [66].

Korkmaz (2020) conducted this study in order to determine the risks in a business that produces magnesium metal. Using the Fine-Kinney risk method, 14 different primary risks were identified. As a result of the study, it was determined that the most accident was the result of combustion, therefore more information was needed on this subject, the working hours of the workers should be regulated and a magnesium fire team should be established for emergencies [67].

Yussof et al. (2021) conducted this study to determine the relationship between strategic communication, leadership roles, organizational design and employee. Questionnaire method was applied to 379 people. The findings of this study, which used stratified sampling, showed that all variables were significant. It has been determined that institutional-wide risk management and improvement studies should be carried out in the workplace [68].

Durmaz and Atalay (2021) conducted a safety climate study on occupational accidents in the metal sector. Two sub-dimensions, the safety climate scale and a form with 18 questions, were used for data collection. Chi-square and regression analysis were used to determine the relationships with occupational accidents. Correlation analysis

was performed between the scale total score and its sub-dimensions. In this study, which was conducted with 289 workers, the survey results showed that 28.4% of the workers in the current workplace had at least one work accident, married workers had 3.24 times more work accidents than unmarried workers, and monitoring the safety of workers was associated with a safe environment and work accidents [69].

Ersöz and Bulut (2021) conducted a risk study in the metal sector in order to measure the way employees perceive risk according to their socio-demographic characteristics. The data were obtained by questionnaire technique and cluster analysis was performed. In the research, risk perception levels of employees in a high-risk business in the iron and steel sector were determined according to their socio-demographic status. As a result of the study, it was determined that the risk perceptions of the employees were mostly affected by the level of education, length of service, occupation and age [48].

3. Material and Method

The research on risk perception in the iron and steel enterprise was applied to the employees of an iron and steel enterprise operating in the center of Karabük. The target audience of the survey is employees. The survey questions were asked to the participants determined by the random sampling method from the employees working in the enterprise by face-to-face interview method. It was assumed that all the participants participating in the study correctly perceived and answered the questionnaire questions.

The population of the research conducted on the risk perception in the Iron-Steel enterprise is all employees of an iron-steel enterprise operating in the center of Karabük. According to the data of 2021, there are a total of 400 employees in the iron and steel company. The data of the research were obtained from 106 participants working in the iron and steel plant between April and July 2021, using the questionnaire method, which is one of the quantitative research techniques.

In the risk perception survey of the employees in the iron and steel enterprise; There are socio-demographic questions including gender, age, marital status, educational status, occupation, status in the company, length of service in the company, working time in the same unit and leave periods used in the last year. In the second part, there are closed-ended questions consisting of four sub-dimensions (Concepts Related to Occupational Safety and Risk, Occupational Safety and Risk Studies in the Workplace, Risk Awareness and Health Risk Status) and a total of 45 statements about occupational safety, occupational accidents and risk perceptions. A five-point Likert scale, one of the metric scale types, was used as an evaluation scale. In scale; 1 represents "Strongly Disagree", 2 "Disagree", 3 "Undecided", 4 "Agree", 5 "Strongly Agree". In addition, the statement "I Have No Idea" was also included in the scale. While the "I have no idea" option was included in the analysis only as a percentage, it was not included in the analysis when calculating the mean values.

The results of the research were presented using descriptive and inferential statistical analyzes. In the modeling part of the study, the two-stage clustering method, which is one of the multivariate statistical methods, was used. The similarities and differences in risk perception of the characteristics of the employees in the iron and steel enterprise were revealed.

4 Findings

4.1. Descriptive Statistics Results

The socio-demographic characteristics and employment status of the participants are given in Table 1.

Table 1. Descriptive statistics of the research

Variables	Subgroup Variables	n	(%)	Values Defining Variables	
				Mode	Median
Gender	Male (1)	104	98.1	1	
	Female (2)	2	1.9		
	Total	106	106.0		
Age	15-17 (1)	0	0.0		4
	18-25 (2)	9	8.5		

	26-33 (3)	9	8.5		
	34-41 (4)	37	34.9		
	42-49 (5)	29	27.4		
	50-57 (6)	18	17.0		
	58-64 (7)	3	2.8		
	65 + (8)	1	0.9		
	Total	106	100.0		
Marital Status	Single (1)	13	12.3	2	
	Married (2)	87	82.1		
	Divorced (3)	4	3.8		
	Widow/Widower (4)	2	1.9		
	Total	106	100.0		
Education Status	Illiterate (1)	0	0.0	4	
	Who Can Read and Write but Does Not Finish a School (2)	2	1.9		
	Primary School (3)	3	2.8		
	Elementary Education (4)	34	32.1		
	Secondary School and Equivalent Education (5)	19	17.9		
	General High School (6)	12	11.3		
	High School Equivalent Vocational School (7)	22	20.8		
	Associate Degree (8)	6	5.7		
	Bachelor's Degree (9)	7	6.6		
	Master's degree (10)	1	0.9		
	PhD Degree (11)	0	0.0		
	Other (12)	0	0.0		
Total	106	100.0			
Status at Company	Employer (1)	1	0.9	2	
	Employee (2)	104	98.1		
	Unpaid Family Worker (3)	0	0.0		
	Intern (4)	0	0.0		
	Other (5)	1	0.9		
	Total	106	100.0		
Working Time in the Company	0-5 years (1)	43	40.6	1	
	6-10 years (2)	32	30.2		
	11-15 years (3)	11	10.4		
	16-20 years (4)	5	4.7		
	21 years and above (5)	15	14.2		
	Total	106	100.0		
Working Time in the Same Department	0-5 years (1)	43	40.6	1	
	6-10 years (2)	32	30.2		
	11-15 years (3)	11	10.4		
	16-20 years (4)	8	7.5		
	21 years and above (5)	12	11.3		
	Total	106	100.0		
Weekly Working Hours	0-10 (1)	0	0.0		5
	11-20 (2)	0	0.0		

	21-30 (3)	0	0.0		
	31-40 (4)	5	4.7		
	41 hours or more (5)	101	95.3		
	Total	106	106.0		
Working Time	0-4 (1)	0	0.0	3	
	5-8 (2)	8	7.5		
	8 hours or more (3)	98	92.5		
	Total	106	100.0		
Number of Permits used in the Last Year	0 (1)	39	36.8	2	
	1-5 (2)	22	20.8		
	6-11 (3)	14	13.2		
	12-17 (4)	8	7.5		
	18-22 (5)	13	12.3		
	Over 23 Days (5)	10	9.4		
	Total	106	100.0		

According to the research results;

- In terms of gender, 98.1% of the participants are male,
- In terms of age, 34.9% of the participants are between the ages of 34-41,
- In terms of marital status, 82.1% of the participants are married,
- In terms of education level, 32.1% of the participants are primary school graduates,
- In terms of professional status, 4.3% of the participants are engineers,
- In terms of the situation at work, 98.1% of the participants are paid or daily wage earners,
- In terms of position at work 94.3% of the participants are workers,
- In terms of service period, 40% of the participants are employees between 0-5 years,
- In terms of weekly working hours, 95.3% of the participants work 41 hours or more,
- In terms of Working time, 92.5% of the participants work eight hours or more, and
- It was determined that 36.8% of the participants did not take leave in the last year.

4.2. Inferential Statistical Results

Hypothesis tests were used to compare the dimensions of interest in the study according to their socio-demographic information. However, since the data were not normally distributed, non-parametric statistical techniques were used for statistical group comparisons. In the study, Kruskal-Wallis H tests were used to determine whether the answers given about the dimensions of risk showed a significant difference in terms of socio-demographic characteristics of the employees. In this framework, hypotheses have been developed for the purpose of the study. The accepted hypotheses are given below. It was taken as $p < 0.05$.

The Kruskal-Wallis H test was performed to determine whether the answers given to the concepts related to occupational safety and risk differ significantly according to the marital status of the employees, and the results are shown in Table 2.

Table 2. Comparison of the answers given to the concepts related to occupational safety and risk according to the marital status of the employees.

Dimension	Marital Status	n	M.R.	Chi-Square	p
Concepts Related to Occupational Safety and Risk	Single	13	44.04	8.316	0.040*
	Married	87	53.64		
	Divorced	4	91.63		
	Widow/Widower	2	32.75		

* $p < 0.05$

The knowledge level of the participants about the concepts related to occupational safety and risk shows a significant difference in terms of their marital status. ($\chi^2=8.316$; $p < 0.05$). Considering the weight averages of the groups; It is seen that the answers given by the divorced people to the concepts related to occupational safety and

risk are the most positive, and the answers given by the spouses of the deceased are the most negative. Therefore, the H_1 hypothesis of the research was accepted.

The Kruskal-Wallis H test was performed to determine whether the responses given to the statements regarding health risk status and perception differ significantly in terms of the age of the employees, and the results are shown in Table 3.

Table 3. Comparison of responses regarding health risk status and perception according to age status of employees.

Dimension	Age	n	M.R.	Chi-Square Value	p
Health Risk Status and Perception	15-17	0	-	13.255	0.039*
	18-25	9	32.39		
	26-33	9	31.94		
	34-41	37	53.68		
	42-49	29	56.60		
	50-57	18	66.67		
	58-64	3	70.33		
	65 +	1	53.50		

* $p < 0.05$

The level of knowledge of the participants in the questions about their health risk status and perception differs significantly according to their age ($\chi^2=13.255$; $p < 0.05$). Therefore, the H_1 hypothesis of the study was accepted.

The Kruskal-Wallis H test was performed to determine whether the responses to health risk status and perception differ significantly according to the marital status of the participants, and the results are shown in Table 4.

Table 4. Comparison of the responses regarding health risk status and perception according to the marital status of the employees

Dimension	Marital Status	n	M.R.	Chi-Square Value	p
Health Risk Status and Perception	Single	13	29.96	11.698	0.008*
	Married	87	56.46		
	Divorced	4	76.38		
	Widow/Widower	2	32.00		

* $p < 0.05$

The level of knowledge of the questions about the health risk status and perception of the participants shows a significant difference in terms of their marital status. ($\chi^2=11.698$; $p < 0.05$). Considering the weight averages of the groups; It is seen that the answers given by the divorced people to the concepts related to occupational safety and risk are the most positive, and the answers given by the spouses of the deceased are the most negative. Therefore, the H_1 hypothesis of the study was accepted.

The Kruskal-Wallis H test was performed to determine whether the responses to health risk status and perception differ significantly according to the leave periods they have used in the last year, and the results are shown in Table 5.

Table 5. Comparison of the responses given regarding the health risk status and perception according to the leave duration of the employees in the last year

Dimension	Number of Permits used in the Last Year	n	M.R.	Chi-Square	p
Health Risk Status and Perception	0	39	45.17	14.796	0.011*
	1-5	22	62.18		
	6-11	14	52.61		
	12-17	8	29.69		
	18-22	13	67.00		
	Over 23 Days	10	69.65		

*p<0.05

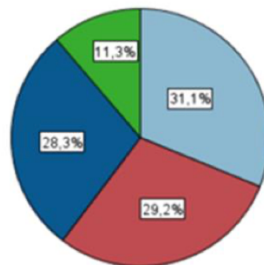
The level of knowledge of the participants to the questions about their health risk status and perception differs significantly according to the leave periods they have used in the last year. ($\chi^2=14.796$; $p<0.05$). In this context, the H_1 hypothesis of the research was accepted.

4.3. Two-Stage Clustering Results

In this part of the study, multivariate statistical methods were used. "Two-Step Clustering" clustering analysis was applied to investigate the similarities of the answers given regarding the risk perception of the employees according to the socio-demographic information. Cluster analysis model result is given in Figure 1.

**Figure 1.** Silhouette indexed clustering performance.

When Figure 1 is examined, it has been evaluated that the performance of the two-stage clustering model is good and its results can be used. In Figure 2 the distribution percentages of the clusters related to the concepts related to occupational safety and risk are given.

**Figure 2.** Distribution percentages of clusters.

When Figure 2 is examined; It was determined that the distribution of the 1st cluster was 31.1%, the 2nd cluster was 29.2%, the 3rd cluster was 28.3% and the 4th cluster was 11.3%. In Figure 3, the order of importance of the variables related to the level of knowledge regarding the socio-demographic characteristics of the concepts related to occupational safety and risk is given.

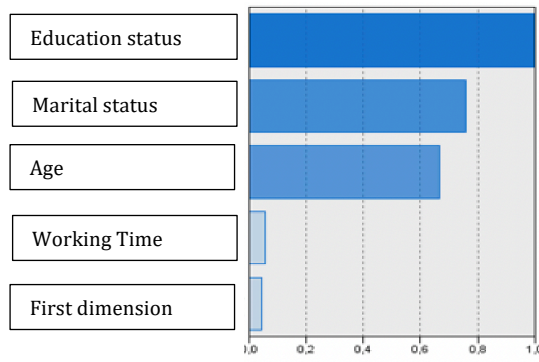


Figure 3. Significance level of variables in two-stage clustering method.

When Figure 3 is examined; It has been determined that the most influencing factor on the level of knowledge about occupational safety and risk concepts is “Educational status” and the least influencing factor is “Working time”. Since the Working time in the enterprise are the same for all participants, it was not included as an important variable in the model. The distribution of socio-demographic characteristics within the cluster is given in Figure 4.

Cluster	1	2	3	4
Label				
Description				
Size	31,1% (33)	29,2% (31)	28,3% (30)	11,3% (12)
Inputs	educationstatus maritalstatus married (87,9%) age 50-57 (33,3%) dailyworkinghours 8 and above (84,8%) Firstdimension 3,50	educationstatus primary education(100,0%) maritalstatus married (96,8%) age 42-49 (48,4%) dailyworkingabove 8 and above (100,0%) Firstdimension 3,90	educationstatus maritalstatus married (93,3%) age 34-41 (86,7%) dailyworkinghours 8 and above (96,7%) Firstdimension 3,89	education status undergraduate education maritalstatus single(100,0%) age 18-25 (58,3%) dailyworkinghours 8 and above (83,3%) Firstdimension 3,52

Figure 4. Intra-cluster distributions.

The following summary results were obtained as a result of the two-stage clustering analysis of the knowledge levels of the employees on the concepts related to occupational health and risk.

- In the 1st cluster, the marital status of the participants is married, their age is between 50-57, and the working time are 8 hours or more,
- In the 2nd cluster, the education level of the participants is primary education, the marital status is married, the age is between 42-49 and the working time are 8 hours or more,
- The marital status of the participants in the 3rd cluster is married, their age is between 34-41, and the working time are 8 hours or more,
- In the 4th cluster, it was determined that the education level of the participants was undergraduate, the marital status was single, the age was between 18-25, and the working time were 8 hours or more.

As a result of the second dimension of the study, it was seen that the level of knowledge about occupational safety and risk studies in the workplace consisted of three different clusters because of two-stage clustering. The Silhouette indexed clustering quality regarding the concepts related to occupational safety and risk studies in the workplace is given in Figure 5.



Figure 5. Silhouette indexed clustering performance.

It is seen that the performance result of the two-stage clustering model given in Figure 5 is good. It has been evaluated that the model results can be used. In Figure 6, the distribution percentages of the clusters related to the concepts related to occupational safety and risk studies in the workplace are given.

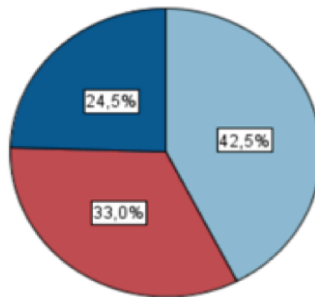


Figure 6. Distribution percentages of clusters.

When Figure 6 was examined, it was determined that the 1st cluster was 42.5%, the 2nd cluster was 33.0% and the 3rd cluster was 24.5%. In Figure 7, the order of importance of the variables related to the concepts of socio-demographic characteristics, occupational safety at work and risk studies is given.

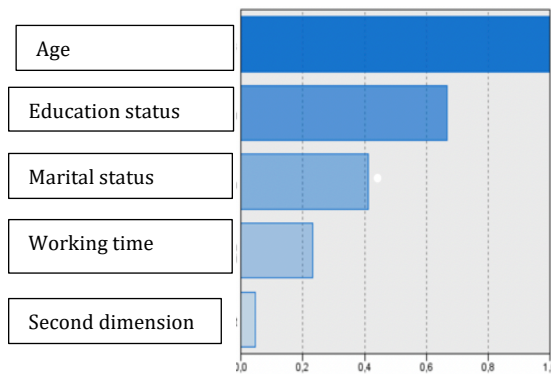


Figure 7. Significance level of variables in two-stage clustering method.

When Figure 7 is examined, it has been determined that the factor affecting the level of knowledge about the concepts related to occupational safety and risk studies in the workplace the most is "Age" and the least affecting factor is "Working time". Since the Working time in the enterprise are the same for all participants, it was not included as an important variable in the model. The distribution of socio-demographic characteristics within the cluster is given in Figure 8.

Cluster	1	2	3
Label			
Description			
Size	42,5% (45)	33,0% (35)	24,5% (26)
Inputs	age 42-49 (46,7%)	age 34-41 (48,6%)	age 50-57 (69,2%)
	educationstatus primaryeducation (53,3%)	educationstatus generalthighschool (31,4%)	educationstatus
	maritalstatus married (100,0%)	maritalstatus married (60,0%)	maritalstatus married (80,8%)
	dailyworkinghour 8 and above (100,0%)	dailyworkinghour 8 and above (77,1%)	dailyworkinghour 8 and above (100,0%)
	seconddimension 3,99	seconddimension 3,68	seconddimension 4,02

Figure 8. Intra-cluster distributions.

According to the results of the two-stage clustering model, the knowledge levels regarding occupational safety and risk studies in the workplace are summarized below.

- The education level of the 1st cluster is primary education, the marital status is married, and the working time are 8 hours or more,
- The education level of the 2nd cluster is general high school, the marital status is married, and the working time are 8 hours or more,
- It was determined that in the 3rd cluster, the marital status was married, the age was between 34-41, and the working time were 8 hours or more.

As a result of the third dimension of the study, it was seen that the level of knowledge on risk awareness consisted of three different clusters in two-stage clustering. Silhoutte indexed clustering quality regarding risk awareness is given in Figure 9.

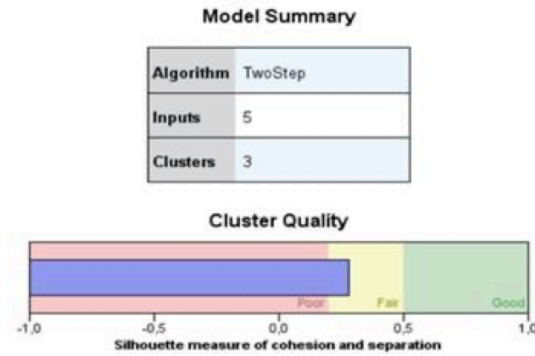


Figure 9. Silhoutte indexed clustering performance.

When Figure 9 is examined, it is evaluated that the performance of the two-stage clustering model is good and its results can be used. Distribution percentages of clusters regarding risk awareness are given in Figure 10.

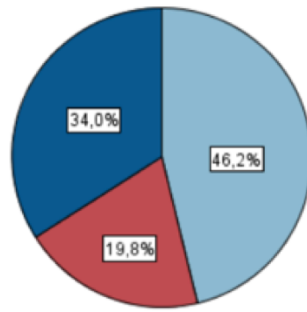


Figure 10. Distribution percentages of clusters.

When Figure 10 is examined, it was determined that the 1st cluster was 46.2%, the 2nd cluster was 34.0% and the 3rd cluster was 19.8%. In Figure 11, the order of importance of the variables related to the level of knowledge about risk awareness of socio-demographic characteristics is given.

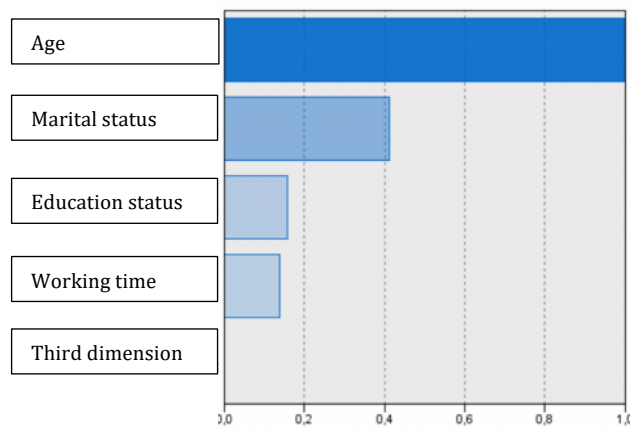


Figure 11. Significance level of variables in two-stage clustering method.

When Figure 11 is examined, it has been determined that the factor affecting the level of knowledge regarding risk awareness the most is "Age" and the least affecting factor is "Working time". Since the working time in the enterprise were the same for all participants, it was not included as an important variable in the model. The distribution of socio-demographic characteristics within the cluster is given in Figure 12.

Cluster	1	3	2
Label			
Description			
Size	46,2% (49)	34,0% (36)	19,8% (21)
Inputs	age 42-49 (53,1%) maritalstatus married (89,8%) educationstatus primaryeducation (49,0%) dailyworkinghour 8 and above (100,0%) thirddimension 4,14	age 34-41 (97,2%) maritalstatus married (100,0%) educationstatus dailyworkinghour 8 and above (94,4%) thirddimension 4,14	age 18-25 (42,9%) maritalstatus single (61,9%) educationstatus dailyworkinghour 8 and above (71,4%) thirddimension 4,13

Figure 12. Intra-cluster distributions.

When Figure 12 is examined, the risk awareness knowledge levels as a result of two-stage clustering are summarized below.

- In the 1st cluster, age status is between 42-49, marital status is married, education level is primary school and working time are 8 hours or more,
- The age status of the 2nd cluster is between 34-41, the marital status is married, the working time are 8 hours or more,
- It has been determined that the age status of the 3rd cluster is between 18-25, the marital status is single, and the working time are 8 hours or more.

As a result of the fourth dimension of the study, it was seen that the level of knowledge about health risk status and perception consisted of three different clusters in two-stage clustering. Silhouette indexed clustering quality regarding health risk status and perception is given in Figure 13.

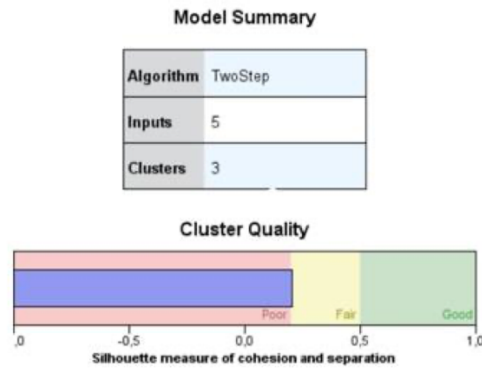


Figure 13. Silhouette indexed clustering performance.

When Figure 13 is examined, it is evaluated that the performance of the two-stage clustering model is good and its results can be used. Distribution percentages of clusters related to health risk status and perception are given in Figure 14.

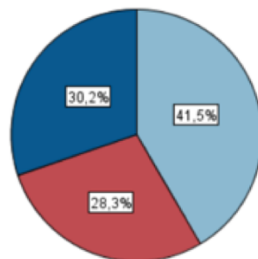


Figure 14. Distribution percentages of clusters.

When Figure 14 was examined, it was determined that the 1st cluster was 41.5%, the 2nd cluster was 30.2% and the 3rd cluster was 28.3%. In Figure 15, the order of importance of the variables related to the health risk status and perception of socio-demographic characteristics is given.

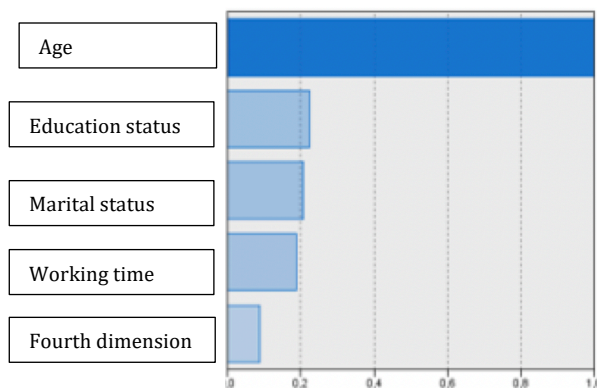


Figure 15. Significance level of variables in two-stage clustering method.

When Figure 15 is examined, it has been determined that the most influential factor on the level of knowledge regarding health risk status and perception is "Age" and the least affecting factor is "Working time". Since the Working time in the enterprise are the same for all participants, it was not included as an important variable in the model. The distribution of socio-demographic characteristics within the cluster is given in Figure 16.




Cluster Label	1	3	2
Description			
Size	 41,5% (44)	 30,2% (32)	 28,3% (30)
Inputs	age 42-49 (52,3%)	age 34-41 (100,0%)	age 18-25 (30,0%)
	educationstatus primaryeducation (52,3%)	educationstatus	educationstatus
	varitalstatus married (93,2%)	varitalstatus married (93,8%)	varitalstatus married (53,3%)
	dailyworkinghour 8 and above (100,0%)	dailyworkinghour 8 and above (100,0%)	dailyworkinghour 8 and above (73,3%)
	fourthdimension 2,98	fourthdimension 2,74	fourthdimension 2,30

Figure 16. Intra-cluster distributions.

As a result of two-stage clustering, the knowledge levels regarding health risk status and perception are summarized below.

- In the 1st cluster, age status is between 42-49, education level is primary school, marital status is married and working time are 8 hours or more,
- The marital status of the 2nd group is married, the working time are 8 hours or more,
- Marital status of the 3rd cluster was found to be married, and the working time were 8 hours or more.

5. Discussion and Conclusion

The iron and steel industry are a dangerous industry where heavy and extremely large and dangerous materials are used. Occupational diseases that can be caused by molten metals and heat and noise up to 1800 degrees pose a risk in terms of occupational health and safety. As in other industrial sectors, the establishment of the safety and working environment of the workers in the iron and steel sector, the protection of the welfare and health of the workers have positive effects on increasing the efficiency, quality and continuity of production.

In this study, occupational accidents, risk awareness and risk perception levels of employees were measured on an iron and steel enterprise operating in Karabük province, and the differences of these perceptions according to socio-demographic conditions were investigated. Two dimensions (Concepts Related to Occupational Safety and Risk, Health Risk Status and Perception) were examined according to non-parametric statistical hypothesis test results. According to the two dimensions, the age, marital status and leave status of the employees in the last year differed. As a result of the studies of Büyükyılmaz et al. and Ersöz and Bulut, age and education factors were found to be important in risk perception. In this study, which was conducted to determine the risk perception levels of iron and steel workers, a two-stage clustering technique was used to reveal socio-demographic situations with the same risk perception. According to the two-stage clustering results, it has been determined that the most effective factor in the level of knowledge about the concepts of occupational safety and risk is "educational status". It has been determined that the factor affecting the level of knowledge about workplace safety and risk studies the most is "age". It has been determined that the knowledge level of employees in the age range of "50-57" regarding occupational safety and risk studies at the workplace is higher than that of other employees. It may be due to the experience of employees in this age group over time. It has been observed that risk awareness is high among employees between the ages of "34-41". Employees outside this age group should be informed about risk awareness through trainings that can positively affect risk awareness. Age factor was found to be the most influential factor on the level of knowledge about the concepts related to occupational safety and risk studies in the workplace. It has been determined that the least affecting factor is "Working time". Since the Working time in the enterprise are the same for all participants, it was not included as an important variable in the model.

Employees in the iron and steel industry are exposed to heavy workloads, long working hours, harsh conditions, and dangers arising from the working environment that will endanger the health and safety of the employee. There is a risk dimension for every hazard and this needs to be estimated and checked beforehand as a precaution. It is impossible to completely eliminate the risks involved in the sector. However, it is possible to reduce these risks. When the safety of every employee, manager and employer in the enterprise becomes a priority, risks will be brought under control when hazard analyzes and risk assessments are carried out periodically.

Acknowledgment: This article was produced from a master's thesis [70].

References

- [1] Korkmaz, O. 2011 IAş Kazaları ile Verimlilik Arasındaki İlişki: Türkiye Taşkömürü Kurumu Araştırma ve Uygulama Dergisi, 6(23), 3805-3813.
- [2] Aydın, E. 2018. Türkiye’de Teknolojik İlerleme ile İstihdam Yapısındaki Değişme Projeksiyonu: Endüstri 4.0 Bağlamında Ampirik Analiz. Yönetim Bilimleri Dergisi, 16(31), 461-471.
- [3] Çelik, N., Can, E. 2019. Endüstri 4.0 Sisteminde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi Muhtemel Problemleri ve Çözüm Önerileri. Ohs Academy, 2(3), 119-126.
- [4] Özsoylu, A. F. 2017. Endüstri 4.0. Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 21(1), 41-64.
- [5] Günaydın, D. 2019. Türkiye’de Dördüncü Sanayi Devrimini Beklerken: Çerezköy Organize Sanayi Bölgesi’nde bir Araştırma. İstanbul Üniversitesi İşletme İktisadi ve Enstitüsü Yönetim Dergisi, 29(85), 73-106.
- [6] Carvalho, A. C. P., Carvalho, A. P. P., Carvalho, N. G. P. 2020. Industry 4.0- Current Status And Future Trends. Hamilton Ortiz, London, 29-44.
- [7] Yiğitöl, B., Sarı, T. 2020. Küresel Salgınlar ile Mücadelede Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Rolü. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 41, 53-73.
- [8] Demirkan, S., Coşun Arslan, M. 2019. Endüstri 4.0 ve Muhasebe Sistemi Etkisi Üzerine Kuramsal bir Analiz. Enderun, 3(1), 40-56.
- [9] Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., Gorecky, D. 2015. Towards Industry 4.0- Standardization as the Challenge For Highly Modular, Multi- Vendor Production System. 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Kaiserslautern, 579-584.
- [10] Ersöz, T., Düğenci, M., Ünver, M., Eyiöl, B. 2016. Demir Çelik Sektörüne Genel Bir Bakış ve Beş Milyon Ton Üstü Demir Çelik İhracatı Yapan Ülkelerin Kümeleme Analizi ile İncelenmesi. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4(2), 75-90.
- [11] Prisecaru, P. 2017. The Challenges of The Industry 4.0. Global Economic Observer, 5(1), 66-72.
- [12] Karamık, S., Şeker, U. 2016. İşletmelerde İş Güvenliğinin Verimlilik Üzerine Etkilerinin Değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri dergisi, 3(4), 575-584.
- [13] Efe, Ö. F., Efe, B. 2019. Tekstil Sektöründe İş Kazalarına Sebep Olan Risk Faktörlerinin Dematel Yöntemiyle Analizi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(3), 1162-1175.
- [14] Ceylan, H. 2011. Türkiye’deki İş Kazalarının Genel Görünümü ve Gelişmiş Ülkelerle Kıyaslanması. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 3(2), 18-24.
- [15] Uludağ, S. 2017. Değişen Risk Algısı ve İç Denetim. Muhasebe ve Denetime Bakış, 16(51).
- [16] Özcan, N. 2018. Sağlık Kurumlarında Risk Yönetimi. Sağlık Hizmetleri ve Eğitimi Dergisi, 2(1), 15-24.
- [17] Yarız, A. 2012. Bankacılıkta Risk Yönetimi: Risk Matrisi Uygulaması. E-journal of Banking and Insurance Institute, 1(1), 1-33.
- [18] Demir Pali, Ç., Adiloğlu, B. 2019. Kontrol Edilebilen Riskler ve Risk Yönetimi Açıklamaları: Borsa İstanbul Uygulaması. Çözüm Dergisi, 30(157), 77-102.

- [19] 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (2012).
- [20] Yılmaz, A. İ. 2013. İş Sağlığı ve Güvenliğinde Kaza Zinciri Teorisinin Önemi ile Açık İşletmelerdeki Tehlikeli Hareket ve Tehlikeli Durumlar. *MT Bilimsel*, 3, 27-39.
- [21] Yılmaz, Ş, Bilici, M. 2020. Mühendislik Fakültesi Bünyesinde Bulunan Laboratuvarlarda İş Sağlığı ve Güvenliği. *Ohs Academy*, 102-113.
- [22] Başkol, M. O., Bektaş, S. 2021. Türkiye Demir-Çelik Sektörünün Ürün Haritalaması: Widodo Yöntemiyle Bir Analiz. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 19(özel sayı), 57-84.
- [23] Turkmen, C., Turkmen, B. 2017. An Attempt for Applying The Lcr and Car Requirements to Turkish Iron and Steel Sector. *PressAcademia Procedia*, 3(1), 222-228.
- [24] Mondol, S. S. 2017. A Review of Steelmaking Technologies. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(2), 282-286.
- [25] Gökcecik, G., Dulkadiroğlu, H. 2021. Elektrik Ark Ocağı ile Üretim Yapan Bir Demir- Çelik Tesisinin Mevcut En İyi Teknikler Kapsamında Değerlendirilmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(2), 465-471.
- [26] Ersöz, F., Ersöz, T., Erkmek, İ. N. 2016. Dünyada ve Türkiye’de Ham Çelik Üretimine Bakış. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 32(2), 0-0.
- [27] T.C. Sanayi Bakanlığı. <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sector-raporlari/mu1406011405> (Accessed 25.12.2021).
- [28] Kardemir. <https://www.kardemir.com/> (Accessed on 06.12.2021).
- [29] Erdemir. <https://www.erdemir.com.tr> (Accessed on 06.12.2021).
- [30] İsdemir. <https://www.isdemir.com.tr/> (Accessed on 06.12.2021).
- [31] Karabay, M. 2007. Teknik Bilirkişi Gözü ile İş Kazalarının Değerlendirilmesi. *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 9(2), 97-102.
- [32] Güyagüler, T., 1990. İş Kazaları ve Meslek Hastalıklarının Önemi, Nedenleri ve Öneriler. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 29(4), 31-34.
- [33] Ulusal IASG Politika Belgesi. 2014. Ankara.
- [34] Sözlük. <https://sozluk.gov.tr/> (Accessed on 27.09.2021).
- [35] T.C. Resmî Gazete, 29 Aralık 2021, sayı: 28512.
- [36] Emhan, A. 2009. Risk Yönetim Süreci ve Risk Yönetimde Kullanılan Teknikler. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Üniversitesi Dergisi*, 23(3), 209- 220.
- [37] Kalkan, M. E., Deniz, V. 2018. Risk Kavramı Üzerine. *TBB Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi*, 13(48), 43-48.
- [38] Balıkcı Y. 2005. Risk Yönetimi ve Metal Sektöründe Faaliyet Gösteren İşletmelerde bir Uygulama. *Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Yönetim ve Organizasyon Bilim Dalı, Yayınlanmış Doktora Tezi, İstanbul.*
- [39] Çelik, B., Altan, M. F. 2017. Evaluation of Risk in Turkish Construction Sector. *Journal of Sustainable Construction Materials And Technologies*, 2(2), 120- 131.
- [40] Mandacı, P. E. 2003. Türk Bankacılık Sektörünün Taşıdığı Riskler ve Finansal Krizi Aşmada Kullanılan Risk Ölçüm Teknikleri. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 67-84.

- [41] İstanbul Üniversitesi. https://cdnacikogretim.istanbul.edu.tr/auzefcontent/20_21_Guz/is_sagligi_ve_guvenligi/14/index.html (Accessed on 24.12.2021).
- [42] Ceylan, H. 2011. Türkiye'deki İş Kazalarının Genel Görünümü ve Gelişmiş Ülkelerle Kıyaslanması. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 3(2), 18-24.
- [43] Akçın, H., Uzun, A. H., Atalay, C. ve Şekertekin, A. 2015. Endüstriyel Alanlarda Risk Haritalarının Oluşturulması. "TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası", 15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- [44] Birgönül, M. T., Dikmen, IA. 1996. İnşaat Projelerinin Risk Yönetimi. Teknik Dergi, 7(34), 1305-1326.
- [45] Zabun, A. OA 2012. Proje Yapım Sürecinde Risk Yöntemi Üzerine Örnek Olay İncelemeleri. İstanbul Teknik Ü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [46] Akçakanat, Ö 2016. Kurumsal Risk Yönetimi ve Kurumsal Risk Yönetim Süreci. Süleyman Demirel Ü Üniversitesi Vizyoner Dergisi, 4(7), 30-46.
- [47] Önen, L. 2012. İş Kazası Riski Yüksek Yerlerde Çalışanlarla İş Kazası Riski Az Yerlerde Çalışanlar Arasındaki Psikolojik Özellikler. Psikoloji Çalışmaları, 20(0), 137-150.
- [48] Ersöz, T., Bulut, B. 2021. Risk Perception and Data Mining in the Iron and Steel Industry. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 5 (2), 313-325.
- [49] Alkış, H., Taşpınar, Y. 2012. İşçi Sağlığı ve İş Güvenliğinde Yeni Yaklaşımlar, Demir Çelik Sektöründe Çalışanlarının İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Algısı: Konya Örneği, Karabük.
- [50] Gülhan, B., IAlhan, M. ve Civil, E. F. 2012. Ankara'da Bir Metal Sanayi Fabrikasında İş Kazaları ve Etkileyen Faktörler. Türkiye Halk Sağlığı Dergisi, 10(2), 76-85.
- [51] Gerami, F. 2014. Human Incidents Analysis By Knowledge Discovery Method in a Steel Maker Company. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 1(5), 327-333.
- [52] Topaloğlu, G., Koç, A., Öztürk, N. 2015. Yüksek Fırınların İşletilmesinde Risk Değerlendirmesinin Yapılması ve Geliştirilmesi. Mühendis ve Makine, 56(661), 55-63.
- [53] Aytaç, S., Özok, A. F., Yamankaradeniz, N., Akalp, G., Çankaya, O., Gökçe, A., Tüfekçi, U., Parçali, A. & Snaet, C. 2015. Metal Endüstrisinde Çalışan Kadın İşçiler Arasında Algılanan Risk Faktörleri. Journal of Engineering Sciences and Design, 3(3), 141-148.
- [54] Arpat, B. 2015. İş Güvenliği Kültürünün İş Kazalarına Etkileri: Metal Sektörü – Denizli ili Örneği. Sakarya Ü Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmış Doktora Tezi, Sakarya.
- [55] Aytaç, S., Özok, A. F., Yamankaradeniz, N., Akalp, G., Çankaya, O., Gökçe, A., Tüfekçi, U. 2017. İşg Kültürü Oluşmasında Metal Sanayinde Çalışan Kadınların Risk Algısı Üzerine bir Araştırma, Özel Sayı: 22. Ulusal Ergonomi Kongresi, 5, 59-67, Mühendis Bilimleri ve Tasarım Dergisi.
- [56] Karadal, H., Merdan, E. 2017. İşyeri Yaralanmaları Üzerinde Güvenlik İklimi ve Güvenlik Kültürünün Rolü. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi, 136(13), 912-919.
- [57] Kukhar, V., Yelistratova, N., Burko, V., Nizhelska, Y. & Aksionova, O. 2018. Estimation of Occupational Safety Risks at Energetic Sector of Iron and Steel Works. International Journal of Engineering & Technology 7(2.23), 216-220.
- [58] Aytaç, S., Özok, A. F., Yamankaradeniz, N., Gökçe, A., Akalp, G., Çankaya, O., Tüfekçi, U. 2018. Metal Sanayiinde Çalışan Kadınların Ergonomik Risk Algısı: Bir Araştırma. Ergonomi, 1(1), 29-38.
- [59] Akarsu, H. Tükenmez, İ., 2018 Demir Çelik Endüstrisinde bir Asit Rejenerasyon Reaktöründe Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi. Ohs Academy, 1(1), 1-11.
- [60] Büyükyılmaz, O., Yurdasever, E., Horuzoğlu, K. 2018. Kardemir A.Ş. Çalışanlarının Örgüt Sağlığı Algılarını Belirlemeye Yönelik Bir Araştırma. Balkan Sosyal Bilimler Dergisi, 7(14), 60-79.

- [61] Ayanoğlu, C. C., Kurt, M. 2019. Metal Sektöründe Veri Madenciliđi Yöntemleri ile bir IAş Kazası Tahmin Modeli Önerisi. *Ergonomi*, 2(2), 78-87.
- [62] Nasution, S. R., Sa, H. & Valencia, F. 2020. Improving Employees Safety Behaviour on the Production Process by Designin Occupational Health And Safety System. *International Joint Conference on Science and Technology*, 1(1), 155-164.
- [63] Kahya, E., Ulutaş, B., Özkan, N. F. 2019. Metal Endüstrisinde Kişisel Koruyucu Donanım Kullanımının Analizi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik. Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 420-433.
- [64] Karadal, H., Merdan, E., Abubakar, M. 2019. Güvenlik İklimi ve Güvenlik Kültürünün İşyeri Yaralanmaları Üzerine Etkisinde Güvenlik Davranışlarının Aracılık Rolü: Döküm Sanayisinde bir Araştırma. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(6), 341-351.
- [65] Keskin, M. Ö. Doğan, O., Ersoy, S. 2020. Metalik Bir Maden IAşletmesi, Cevher Çıkarma, Üretim ve Nakliyat Aşamalarında Risk Değerlendirmesi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 9(2), 84-98.
- [66] Köse, N., Ersöz, F. 2020. Veri Madenciliđinde Karar Ağacı Algoritmaları ile Demir Çelik Endüstrisinde İş Kazaları Üzerine bir Uygulama. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 397-407.
- [67] Korkmaz, A. V. 2020. Endüstriyel Kaza Araştırmaları ve Düzenleyici Müdahaleler; Magnezyum Metal Üretimi. *Çalışma ve Toplum*, 4(67), 2271-2294.
- [68] Yussof, K., Idris, S. M., Ayob, M., Mohd Shahren, N. 2021. Risk Management: Safe Work Culture in Manufacturing Industry. *International Journal of Accounting, Finance and Business (IJAFB)*, 6(34), 9-18.
- [69] Durmaz, S., Atalay, S. 2021. The Relationship Between Occupational Accidents and the Safety Climate of Blue-Collar Workers In The Metal Industry. *Medical Science and Discoverry*, 8(6), 384-388.
- [70] Bulut, B. 2022. Demir Çelik Sektörü Çalışanlarının Risk Algısı. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

U Biçimli İki Farklı Tip Metalik Sönümleyicinin Aksel Kuvvet Altında Yapısal Davranışı ve İki Yeni Metalik Sönümleyici Tasarımı

Enes Yurteri¹, Oğuz Düğenci^{*2}

¹ Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, KAYSERİ

^{*2} Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, KAYSERİ

(Alınış / Received: 25.08.2022, Kabul / Accepted: 29.11.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

Metalik sönümleyiciler,
Histeretik davranış,
Sonlu elemanlar yöntemi,
Sismik kontrol sistemleri,
Eksenel yükleme

Öz: Deprem etkilerine karşı sismik sönümleyici kullanımı, yapıları bu tip etkilerden korumada yenilikçi ve etkili bir yöntemdir. Yapı güvenliğini sağlayan ve yapım maliyetini düşüren bu sönümleyiciler gerek kullanım yeri gerekse üretildikleri malzeme bakımından çok çeşitlidir. Bunlardan biri olan metalik sönümleyici sistemler, kararlı histeretik davranışa sahip olmaları, sıcaklıktan ve yükleme hızından bağımsız pozitif davranış göstermeleri ve diğer sönümleme sistemlerine göre çok düşük maliyetli olmaları nedeniyle tercih edilen sönümleme sistemleridir. Bu çalışma, iki farklı U şeklinde metalik sönümleyici sistemini (H tipi- yatay kalınlıklı ve V tipi- düşey kalınlıklı) geliştirmeyi ve aksel doğrultuda yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Öncelikle tek parçalı biçimde metalik sönümleyicilerde modellemeler yapılmıştır. Sönümleyici parçalarının kalınlık, kol uzunluğu, kol genişliği ve toplam derinlik parametreleri değişken tutularak 228 farklı geometride sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Modelleme sonucu elde edilen histeretik özellikleri kıyaslanmış ve optimum boyutlar belirlenmiştir. Her iki tip sönümleyici tipinden ideal ölçülerle iki farklı U biçimli dört parçalı bütünleşik metalik sönümleyiciler dizayn edilmiş ve yapısal performansları ortaya konulmuştur. Yeni tip sönümleyicilerin literatürdeki diğer sönümleyiciler ile yapısal parametrelerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Structural Behaviour of Two Different Types of U-Shaped Metallic Dampers Under Axial Force and Two New Metallic Damper Designs

Keywords

Metallic dampers,
Hysteretic behaviour,
Finite element method,
Seismic control systems,
Axial loading

Abstract: Using seismic dampers against earthquake effects is an innovative and effective method to protect structures from such effects. These dampers, which provide building safety and reduce construction costs, are very diverse in terms of the place of use and the material produced. Metal damping, one of these systems, is the preferred damping system because they have stable hysteretic behavior, show positive behavior independent of temperature and loading speed, and are meagre cost compared to other damping systems. This study aims to develop two different U-shaped metallic damper systems (H type - horizontal thickness and V type - vertical thickness) and to determine their load carrying capacities in the axial direction. First, one-piece metallic dampers were modelled. Finite element models with 228 different geometries were created by keeping the thickness, bracket length, bracket width and total depth parameters of the damper parts variable. The hysteretic properties obtained as a result of the modelling were compared and the optimum dimensions were determined. Two different U-shaped 4-piece integral metallic dampers were designed with ideal dimensions from both types of dampers and their structural performances were demonstrated. Structural parameters of new type dampers were compared with other dampers in the literature.

*İlgili Yazar, email: dugenci@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Taşıyıcı sistem tasarımında geleneksel yaklaşım, yüklere dayanabilecek kadar dayanıklı ve sünek bir davranış sergileyerek deforme olacak veya enerji sönümleyecek şekilde tasarım yapmaktır. “Bu tür bir tasarımla dizayn edilmiş yapılar -1- dinamik enerjiyi sönümlemek için düşük malzeme sönümü -2- sınırlı deplasman kapasitesi ve -3-yük taşıma kapasite için gerekli yüksek rijitlik talebi gibi üç ana unsurdan dolayı sınırlı kapasiteye sahiptirler.” Yapısal malzemelerin sönüm oranları (ξ) betonda %5, çelikte %2’den az ahşapta %12 ve tuğlada %5-7 aralığındadır [1]. Bu özelliklerinden ve sınırlı kapasitelerinden dolayı deprem ve kuvvetli rüzgarlara bağlı yatay kuvvetler etkisinde ekonomik tasarımlar zor olmaktadır. Bu bakımdan sismik sönümleyici kullanımı yapıları bu tip etkilerden korumada yenilikçi ve etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sismik sönümleyici sistemler yapı üzerinde depremin veya rüzgârların neden olduğu titreşimi sönümleyerek ya da izole ederek göçmeye varan yapısal davranışı ve olası hasarları azaltmaktadır. Sismik kontrol sistemlerinin temel çalışma prensibi basit bir tek serbestlik dereceli sistem üzerinde anlatılmak istendiğinde öncelikle deprem etkisine maruz kalan tek serbestlik dereceli bir sistem için hareket denge denklemi Denklem (1)’de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

Burada “m” yapının kütlesi, “c” yapı sönüm katsayısı ve “k” yapının lineer elastik rijitliğidir. Tek serbestlik dereceli sistemde, deprem yer hareketi ivmesi $\ddot{x}_g(t)$ ’ye maruz kaldığında, zeminde görelilik olarak $x(t)$ yatay yer değiştirme oluşur. “ ξ ” sönüm oranı ve “ ω_n ” ise radyan/sn cinsinden sistemin doğal frekansı Denklem (2) ve Denklem(3)’te gösterildiği şekilde alınarak Denklem (1) yeniden düzenlenmesiyle tek serbestlik dereceli bir sistemde zeminden yapıya iletilen ivmenin bir ifadesi olarak iletkenlik (transmissibility) fonksiyonu Denklem (4) ile ifade edilebilir.

$$\xi = \frac{c}{c_r} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (2)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

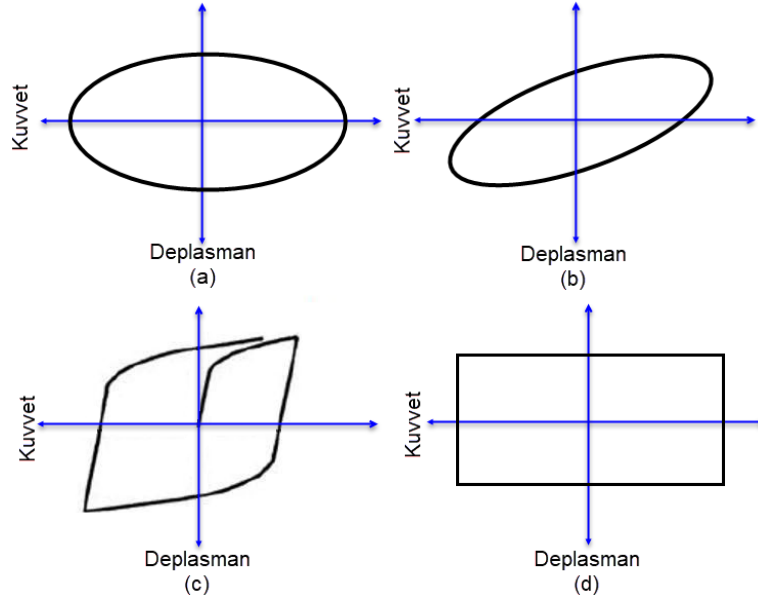
$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

Bu formüle göre sismik etkilerin yapılar üzerindeki etkilerinin azaltılmasının matematiksel olarak üç yolu bulunmaktadır. Bunlardan ilki deprem yer hareketinden kaynaklı ivmeyi azaltmak, ikincisi sönüm oranı “ ξ ” ’yı artırmak ve üçüncüsü doğal frekans “ ω_n ” ile “ θ ” farkını artırarak rezonanstan kaçınmaktır. Bu matematiksel yaklaşımlar, çeşitli sismik yalıtımlı yapılar açısından değerlendirildiğinde (1)- taban izolasyon sistemleri yapı ve deprem yer hareketi arasındaki enerji geçişine engel olmasına (2)-viskoz davranış ve plastik davranışla malzemelerin enerji sönümleme özelliklerinden faydalanılmasına ve (3)-yapının doğal titreşim periyodunu, deprem yer hareketinin hâkim frekansından farklı tutulmasına neden olan sismik sistemlerin geliştirilmesi sağlanmıştır.

Sismik sistemler izolatör ve sönümleyiciler olarak iki grupta sınıflandırılabilir. Zemin titreşimlerinin yapıya iletilmesini engelleyen sistemler taban izolasyonlu sistemlerdir [2]. Bunlar doğal kauçuk malzemelerine çelik plakalarla birlikte katmanlı olarak üretildiği elastomer mesnetler [3,4], kurşun çekirdekli elastomer mesnetler [5,6] ve yatay ötelenmeyi azaltmaya yönelik küresel iç bükey kayma düzlemlili sürtünmeli sarkaç izolatörlü [7, 8] sistemlerdir.

Taban izolatörlü sistemlerden başka üst yapıya yerleştirilmiş pasif sönümleyici sistemler de kullanılmaktadır. Pasif sönümleyici sistemler yapısal girdi enerjisinin sönümlemesi, dolayısıyla yapısal davranışın ve hasarın azaltılması için mekanik sistemlerin kullanıldığı sönümleyici tipidir. Bu sistemler aktif sistemlerden farklı olarak bir dış kuvvet gereksinimi olmadan enerji sönümleyebilen sistemler olmakla birlikte bazı çeşitleri sınırlı kapasiteye sahiptirler.

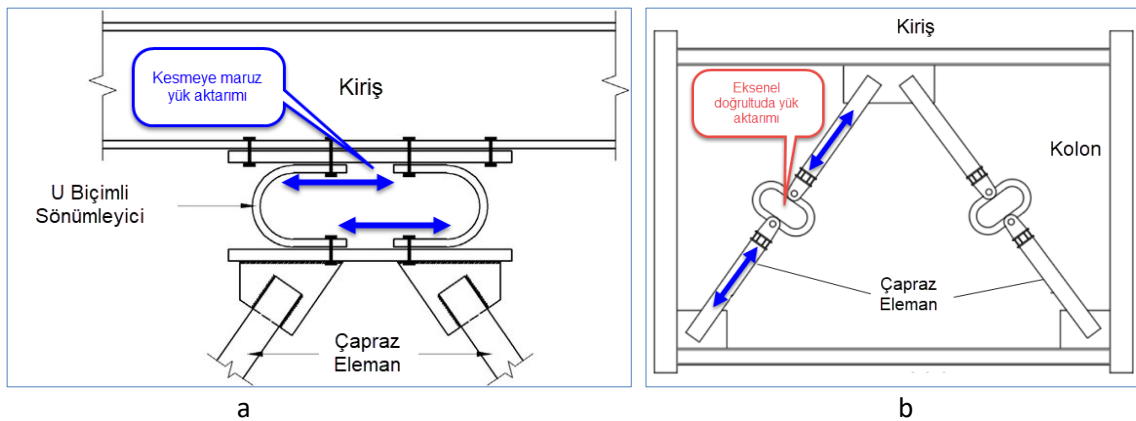
Pasif enerji sönümleme sistemleri genel yapı davranışını etkilemekten ziyade, sistemin bulunduğu yer yani yapı üzerindeki yerel bölgelerin davranışını etkilemekte daha etkili sistemlerdir [9,10]. Kendi içerisinde ayarlı kütle sönümleyiciler (TMD, tuned mass dampers) [9,11,12], ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD, tuned liquid dampers) [13,14], sürtünme yüzeyli sönümleyiciler [9,15,16], metalik sönümleyiciler [13,14,15], viskoelastik sönümleyiciler [9,20] ve viskoz sıvı içeren sönümleyiciler [9,21] olarak ayrılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu sistemlerine ait histerik eğriler Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Pasif enerji sistemlerine ait histeretik eğriler
a) Viskoz sıvı içeren b) Viskoelastik c) Metalik d) Sürtünme yüzeyli [10]

Yukarıda kısaca tariflenen sönümleyici tiplerinden pasif sönümleyici kategorisindeki metalik sönümleyiciler bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Metalik sönümleyiciler üzerine yapılan literatür çalışmalarının çoğunlukla sönümleme elemanlarının geometrilerinin ve bu geometrilerdeki değişken uzunlukların histeretik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek üzerine olduğu literatür incelemesi sonunda anlaşılmaktadır. Çalışmalarda metallerin, çevrimsel yüklemeler altındaki davranışını modellemek amaçlı farklı malzeme modelleri ve bunların gerçek davranışa yakınlığı irdelenmiştir.

Numerik çalışmalarla, histeretik özelliklerden yola çıkarak yapılan boyut idealleştirme kabulleri üzerine yapılan çalışmalar ve numerik modellemelerdeki yapılan kabullerin gerçek davranışla olan ilişkisi bir diğer çalışma konusudur. Çalışmalarda kullanılan geometriler farklılık göstermektedir. Sönümleyiciler Yang ve ark. [22] çalışmasında olduğu gibi petek biçimli boşluk geometrisinde, Varzaneh ve Hosseini [23] çalışmasındaki gibi oval geometride ve Guo ve ark. [24]'da olduğu gibi birbiri içine geçen plakalar veya ızgara şeklinde [25] şeklinde modellemeler bulunmaktadır. Bunun yanı sıra U biçimli metalik sönümleyicilerle de ilgili [26, 27, 28,29], iç içe geçen silindir formunda [30] ve elips biçiminde [31, 32] birçok çalışma bulunmaktadır. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda Şekil 2.'de gösterildiği gibi biçim geometrisi fark etmeksizin sönümleyicinin "kesmeye" maruz kalmasına bağlı enerji sönümlemesi ve yapısal parametre değişimleri incelenmiştir [33]. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran en büyük unsur, Şekil 2-b'de gösterildiği gibi U şekilli sönümleyicinin "eksenel yük etkisinde" sönümleme yapmasını sağlayarak kapasitesinin artırıldığı araştırılmasıdır [34].



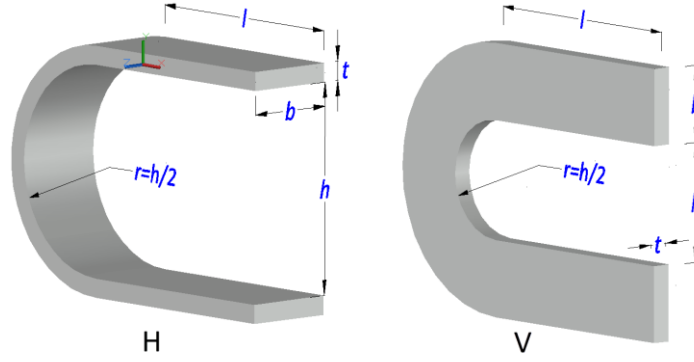
Şekil 2. a) Kesmeye çalışan U Biçimli Metalik sönümleyici bağlantısı [33], b) çalışma kapsamında düşünülen bağlantı [34]

Araştırma için belirlenen parametrelere göre sonlu elemanlar modeli ABAQUS [22,43] programda oluşturulmuştur. Farklı parametreler (kalınlık, genişlik, kol uzunluğu ve yükseklik) kullanılarak oluşturulan kombinasyonlardaki metalik sönümleyicilerin tekil performansları ortaya konularak optimum kesit özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Daha sonra ise belirlenen optimum enkesit kullanılarak ekonomik bir bütünleşik (çok parçadan oluşan) sistem oluşturulmuş ve performansı değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Başlangıç Model Geometrisi

Çalışma kapsamında iki farklı derinliğe sahip U biçimde türetilen sönümleyici modelleri analiz edilmiştir. Bunlara ait ölçü sembolleri ve üç boyutlu görünüşleri Şekil 3’de verilmiştir. Çelik sönümleyicinin kalınlığının aksel yükü karşıladığı yatay şekilli olanı “H tipi” ve çelik sönümleyicinin genişliğinin aksel yükü karşıladığı dikey şekilli “V tipi” olarak adlandırılmaktadır. Her iki tip sönümleyicide de kalınlık, kol genişliği, kol uzunluğu ve sönümleyici yüksekliği değişken tutulmuştur. H tipi ve V tipi sönümleyiciler için Tablo 1’de verilen değerlerden kullanılarak oluşturulan kombinasyonlarda modellemeler yapılmıştır



Şekil 3. Kesmeye çalışan U Biçimli Metalik sönümleyici bağlantısı [33]

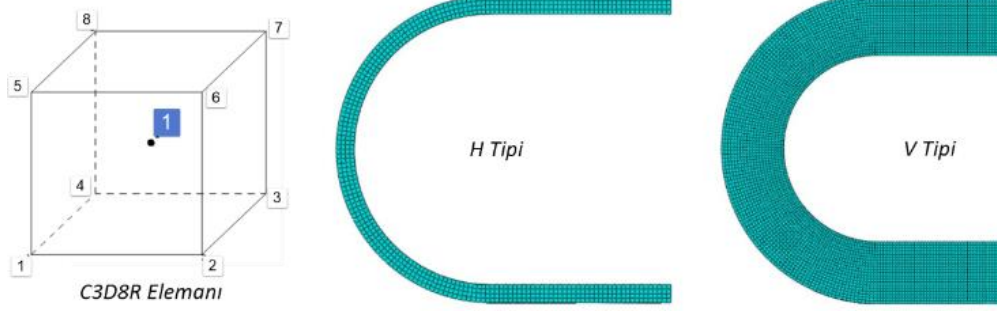
Tablo 1. Model ölçü parametreleri

Tip	Kalınlık t (mm)	Genişlik b (mm)	Kol Uzunluğu l (mm)	Yükseklik $h=2r$ (mm)
V veya H	5	30	100	100
V veya H	10	50	200	200
V veya H	15	80	300	300
V veya H	20	100		

Etiketlendirme Tarifi		
	<p>Yükseklik Kol Uzunluğu Genişlik Kalınlık Tip</p>	<p>V 20 30 1 10</p> <p>x10 x100 x10 x1</p>

2.2. Modelde Eleman Türü, Sınır Koşulları ve Model ağının Oluşturulması

U şekilli parçalarının analizi için Chaboche [36] malzeme modeli ve Krolo ve ark. [37] tarafından S275 çelik sınıfı için önerilen malzeme parametreleri kullanılmıştır. Chaboche tarafından önerilen, çevrimsel yükler altında plastikleşme durumunda model sonuçlarının eldesi için ABAQUS 2018 [35, 43] programı tercih edilmiştir. Modelleri oluşturmada kullanılacak eleman için literatür taramaları sonucundan deplasman değerlerinin doğruluğu açısından C3D8R tipi eleman uygun görülmüştür. C3D8R elemanı [43] Şekil 4.’de gösterildiği gibi 8 noktalı küp biçimli, eğilme altında yeterince rijit davranabilen sürekli katı bir elemandır. Gerilme ve gerinim değerleri eleman noktalarının düzgün çıkışacağı bir yapı oluşturulması halinde modellemeye en doğru sonucu ulaşılabilir [43]. Bu sebeple oluşturulan modellerdeki sönümleyici parçaları Şekil 4.’de gösterildiği gibi düzgün ağlama biçimleri oluşacak şekilde bölümlere ayrılmıştır. Ağ biçimi ölçüleri bütün parçalar için 5mm×5mm’dir.

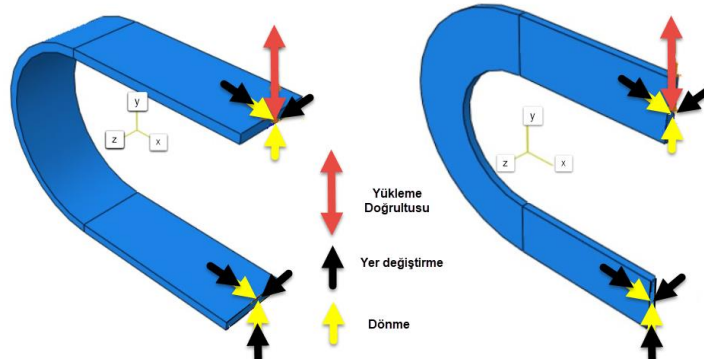


Şekil 4. C3D8R elemanın görünümü [43] ve H ve V tipi için oluşturulan ağ biçimleri

Oluşturulan H tipi ve V tipi modeller için sınır koşulları Tablo 2.'deki gibidir. Pekleşme bölgelerinin U biçimin eğri bölgesinde oluşması için yüklem ve mesnet olacak uçlar Şekil 5. ve Tablo 2.'de gösterildiği gibi Z eksenini etrafında dönmeye serbest bırakılmıştır. Pekleşme davranışına bir katkısı olmadığı için mesnet kısımları modellemelere dahil edilmemiştir.

Tablo 2. Sönümleyicileri için sınır koşulları

	U_x	U_y	U_z	R_x	R_y	R_z
Üst Uç	0	1 (yükleme)	0	0	0	Serbest
Alt Uç	0	0	0	0	0	Serbest



Şekil 5. Sönümleyicilere tanımlanan uç nokta sınır koşulları

2.3. Çevrimsel Yüklemelerde Plastisite Davranışı için Malzeme Modeli

Mühendislik uygulamalarında malzemelerin plastik davranışı genelde süneklik, akma durumu, enerji sönümleme, anizotropi olarak değerlendirilir. Eğer bir malzeme plastik davranış sergiliyorsa bu lineer davranışlı malzemelere göre, daha karmaşık bir gerilim-gerinim ilişkisinin olduğunu gösterir. Doğrusal davranmayan malzemelerde rijitlik, gerilim seviyesinin bir fonksiyonudur [44]. Lineer davranış gerilme değeri (σ), elastisite modülü (E) ve gerinime (ϵ) bağlı olarak Denklem (5) ile, kuvvet (F) ise rijitlik (k) ve yer değiştirmeye (u) bağlı olarak Denklem (6) ile tanımlanır. Nonlineer davranış için gerilim değeri Denklem (7)'de gösterildiği gibi ifade edilirken, kuvvet ise Denklem (8) vasıtasıyla hesaplanır. Buradaki E_{ij} ve k_{ij} ifadeleri her bir adımdaki değişken elastisite modülü ve rijitlik değerleridir. Buradaki ij indisleri asal yönlere yönlendirilmiş eksenlere sahip bir koordinat sisteminde normal gerilmelerin değişimlerini simgelemektedir.

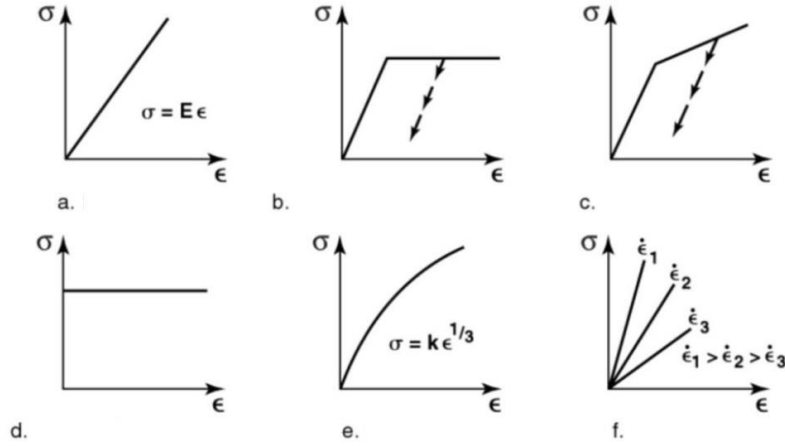
$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (5)$$

$$F = k \cdot u \quad (6)$$

$$\sigma_{ij} = E_{ij} \cdot \epsilon \quad (7)$$

$$F_{ij} = k_{ij} \cdot u \quad (8)$$

Sonlu elemanlar modeli için modelleme yapılırken Şekil 6'da verilen malzeme modelleri dikkate alınır. Genel olarak gerilme ve yük değerlerinin yukarıdaki denklemlerle ifade edildiği biçimde her bir yüklem adımında malzemenin gerçek davranışını yansıtacak tanımlamaların yapılması önemlidir.



Şekil 6. Malzeme davranışı kabulleri a) Lineer elastik b) İdeal elasto-plastik c) Pekleşen elasto-plastik d) Rijit-ideal plastik e) Eğrisel lineer elastik f) Viskoelastik [45]

Sonlu elemanlar modellemesi çözümlemesinde sonuç verilerin gerçek davranışı yansıtabilmesi adına model malzemesinin “akma kriterlerinin” (Rankine, Saint-Venant, Tresca, Beltrami ve Von Mises), “pekleşme durumlarının” (izotropik, kinematik) ve ayrıca çevrimsel yüklemeler olması durumunda da “Bauschinger etkisi” gibi parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekli ve son derece önemlidir.

Çoğu yapılan nümerik hesaplama, tek eksenli yüklenme durumundaki standart çekme testi ve genellikle gerilme-gerinim durumunu tek eksenli veya çok eksenli durumlarda tanımlamak için kullanılır. Bu tür test sonuçları yalnızca basit elastik problemler ve düşük plastik deformasyon yapan elastoplastik problemler için elverişlidir [38]. Plastik davranışta, kinematik pekleşme modelini temel alan elastoplastik malzemelerin çevrimsel davranışını modellemek amacıyla Armstrong ve Frederick (1966) [39] bir önerme sunmuştur. Chaboche (1979) [40] tarafından sunulan model ise Armstrong ve Frederick’in modelinde bulunan öteleme faktörünün her adımda sabit kabul edilmesinden kaynaklı hataları minimuma indirmek amaçlı toplam öteleme faktörü ile ilgili bir düzeltme içermektedir. Chaboche modeli, Armstrong ve Frederick modelinin aksine kinematik pekleşme değil, izotropik ve kinematik pekleşmenin bir kombinasyonunu kullanır ve malzemelerin histeresis davranışını belirlemek için uygun bir modeldir [41]. Chaboche malzeme modeli akma yüzeyi tanımlamada Denklem (9)’da gösterildiği üzere Von Mises akma kriterini temel almıştır.

$$f = J_2(\sigma - \alpha) - \sigma^0 = 0 \quad (9)$$

Burada “ σ^0 ” akma dayanımı, “ $J_2(\sigma - \alpha)$ ” Von Mises gerilmesi, “ α ” ise malzemenin iç yapısının değişiminden kaynaklı oluşan ötelenme faktörüdür. Başlangıç denklemi esas alınarak gerilme ve şekil değiştirme yüzeylerindeki düzeltmelerinde dikkate alındığı formüller kullanılarak herhangi bir malzemenin Chaboche malzeme modeli ve parametreleri oluşturulabilir. Bunun için Krolo ve ark. [37] S275 ve S355 çelik sınıflarından imal edilen 33 adet plaka numune üzerinde değişken gerinim durumlarını modellemek ve Chaboche malzeme modeli parametrelerini kalibre etmek için 9 adedi monotonik 24 adedi ise SAC2000 [42] protokolüne göre standart çevrimsel yüklemelere tabi tutulan plaka numuneler üzerinde deplasman kontrollü bir dizi test gerçekleştirmiştir. Monotonik testler EN ISO 6892-1:2009’a göre metal malzemeler için tek eksenli çekme testleri oda sıcaklığında 9 adet numunede yapılmıştır ve mekanik özellikleri elde edilmiştir [46]. İlk adımda, pekleşme parametrelerinin kalibrasyonu, tekrarlı davranışı tanımlamak için Chaboche [36] prosedürünü takiben değişken gerinim aralıkları ile tekrarlı yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçları doğrulamak için, ABAQUS [43] programı kullanılarak modellenen değişken gerinim aralıklarına sahip pekleşme parametrelerinin doğruluğu deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda gerçek değerler kullanılarak ve daha sonrasında malzeme modeli için kalibre edilen değerler Tablo’3’de verilmiştir. Modellemede Krolo ve ark. [37] tarafından kalibre edilen S275 çelik sınıfına ait parametreler dikkate alınmıştır. Böylelikle daha önceden de denenmiş ve kendini kanıtlamış malzeme parametreleri bu çalışmadaki modellere tanımlanmıştır.

2.4. Yükleme Prosedürü

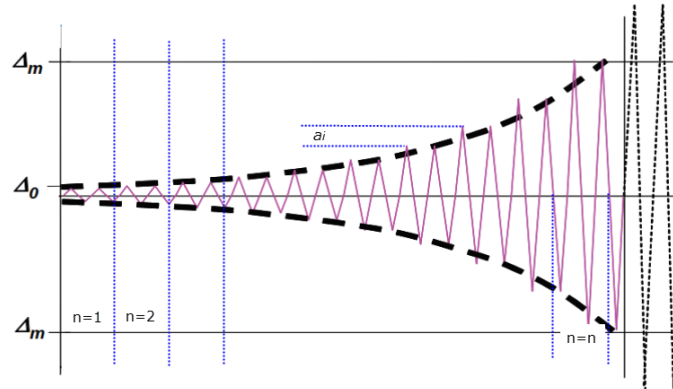
Yapısal elemanların deneysel ve numerik çalışmalarında yük kontrollü ve yer değiştirme kontrollü olmak üzere iki farklı şekilde yükleme prosedürü kullanılabilir. Yükleme prosedürlerinin en çok kullanılanları ECCS [47], ATC-24 [48], FEMA-461 [41], JISF [50] ve ANSI/AISC 341-16 [51] gibi farklı ülkelerin yönergeleridir.

Tablo 3. S275 çelik sınıfının kalibre edilmiş ve modellemede kullanılan Chaboche parametreleri [37]

<i>Malzeme</i>	<i>Eğri Davranışı</i>	<i>Parametreler</i>			
S275	Elastik Davranış	E	207000	MPa	
		ν	0.3		
	Plastik Davranış	Kinematik Davranış	$\sigma _0$	285	MPa
			C_1	13921	MPa
			γ_1	765	
			C_2	4240	MPa
		İzotropik Pekleşme	γ_2	52	
			C_3	1573	MPa
			γ_3	14	
			Q_∞	25.6	MPa
		b_p	4.4		

Bu çalışmadaki gibi bütünlük sistemleri oluşturmak için U biçimlerin histeretik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılacak analizlerde daha çok FEMA-461 (2007) [49] ve Suzuki ve Saeki [52] tarafından geliştirilen yükleme protokolleri kullanılmaktadır. Her iki yükleme protokolü deplasman kontrollü yükleme protokolüdür.

İlk olarak bütünlük sistemleri oluşturmak adına tekil modeller için daha az yükleme adımı ve pratik olması bakımından Suzuki ve Saeki [52] protokolü kullanılmıştır. Tekil modellemelerde kalınlık, genişlik ve uzunluk değişkenlerinden oluşan tüm kombinasyonların değerlendirilmesi sonucunda en elverişli tekil parçadan oluşturulan H ve V tipi için bütünlük sistemler oluşturulmuştur. Bütünlük modellerin oluşturulmasından sonra FEMA-461'e [49] göre deplasman kontrollü yükleme protokolüne geçilmiştir. Şekil 7'de şematik olarak gösterilen bu protokol, akma yükünün belirlendiği sistemlerde akma deformasyonunu içeren ikişer döngülü ve en az 10 adımda çalışmanın tamamlanmasını amaçlanmaktadır [49,50].



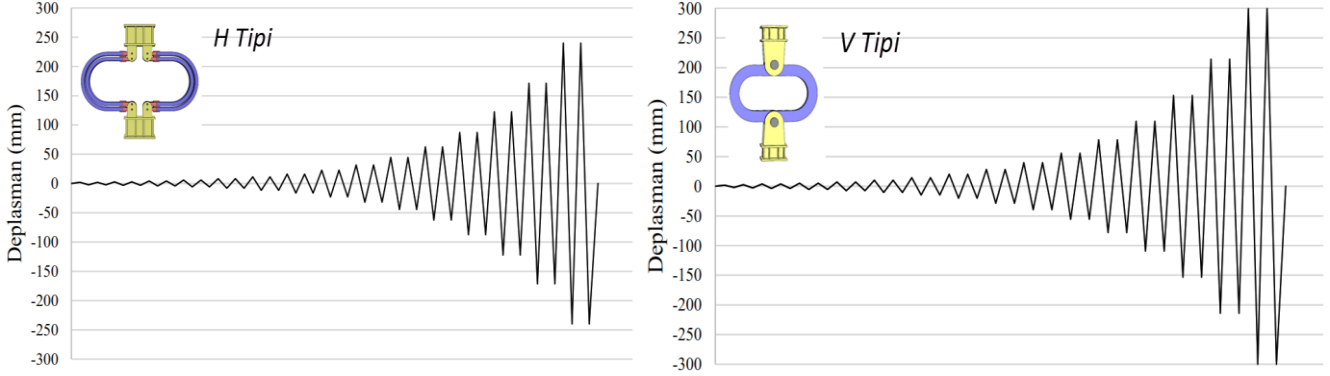
Şekil 7. FEMA-461'deki deplasman kontrollü yükleme durumunun grafik gösterimi [49]

Yükleme adımları artan genliklerin tekrarıyla oluşmaktadır ve her genlik iki döngüden oluşmaktadır. Grafik üzerinde gösterilen " Δ_0 " yükleme protokolünün en küçük deformasyon genliği, " Δ_m " ise yükleme protokolünün hedeflenen maksimum deformasyon genliğidir. " n " yükleme protokolündeki adımların sayısıdır, genellikle 10 ve yukarıdadır. " a_i " ise döngülerin genliğidir. En az 10 döngünün numune üzerinde geçmeden uygulanması gerekmektedir. Prosedürün oluşturulabilmesi için akma deformasyonu, başlangıç modelinde monotonik (tek yönlü) yükleme deneyi veya modeli yapılarak belirlenir. Bu tarifile H ve V tipi parçalar için monolitik yüklemeler yapılmış ve akma deformasyon değerleri oluşturulan grafikler üzerinde belirlenerek Tablo 4'de verilmiştir. Akma deformasyonuna göre her iki tip için oluşturulan

ve en az 10 adımlı yükleme prosedürü Şekil 8'de sunulmuştur. Bu yükleme protokolü tek tek tüm değişken ölçülerde denenmiş ve optimum kalınlığın belirlenmesi adına histeretik eğrilerin oluşturulması için kullanılmıştır.

Tablo 4. Monolitik yüklemelerde belirlenen akma deformasyonu ve akma yükü değerleri

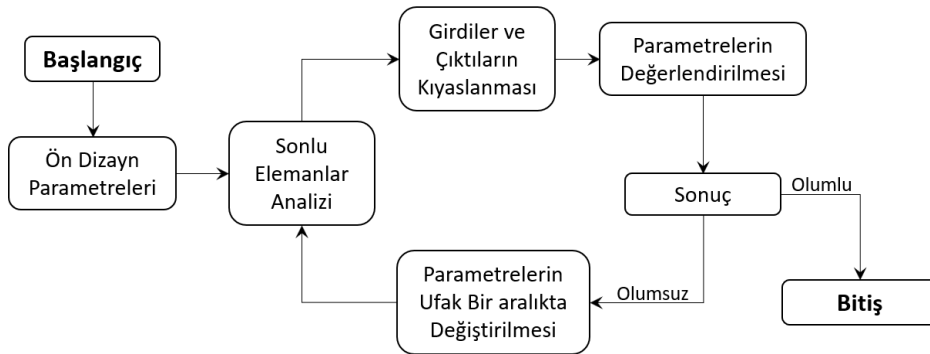
Model Tipi	Akma Deformasyonu Δ_y (mm)	Akma Yükü P_y (kN)
H tipi	10.77	41.07
V Tipi	4.42	53.68



Şekil 8. Bütünleşik sistemler için oluşturulan deplasman genliği grafikleri (H ve V tipi)

2.4. Tekil Sönümleyicilerde Optimum Kesitin Belirlenmesi

Optimum şekillerin belirlenmesinde Şekil 9'da gösterilen iş-akış şeması kullanılmıştır. İlk adımda en küçük ölçülerden başlanarak bir model oluşturularak, ardından bu model ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar ile girdiler kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonrasında bir sonraki adımda boyutlarda ufak değişiklikler yapılarak adımlar tekrarlanmıştır. Yapılan küçük değişikliklerdeki amaç modelleme sonuçlarının daha hassas olarak değerlendirebilmektir. Son aşamada ise elde edilen sonuçlar ve boyutların değişimi hakkında çıkarımlar yapılarak sonuçlar arasından optimum boyutlar elde edilmiştir. Bu tariflerle oluşturulan 228 adet modelde yapılan analizler sonucunda H ve V tipi U şekilli sönümleyiciler için optimum kesitler elde edilmiş ve bu kesitlerden bütünleşik çok parçalı sistemler oluşturularak en optimum kesitte ve parça sayısında bütünleşik sisteme ulaşılmıştır.



Şekil 9. Optimum boyutların belirlenmesinde kullanılan iş-akış şeması

Tablo 1'de verildiği gibi dört farklı parametre dikkate alınarak oluşturulan kombinasyonları gruplandırmak gerekirse kalınlık parametreleri dikkate alınarak bir gruplandırma yapılırsa sonuçların bu bağlamda değerlendirilmesi daha kolay olacaktır.

3- Bulgular

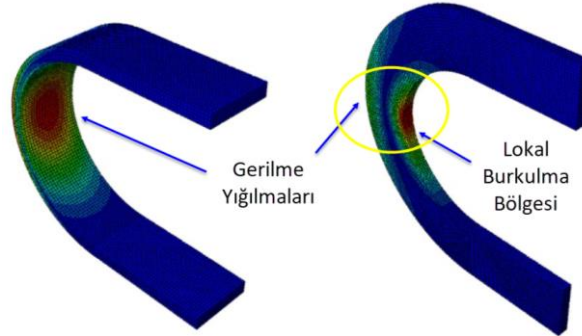
3.1. Tekli Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bir önceki bölümde açıklandığı gibi oluşturulan 228 adet model üzerinde yapılan analizlerden elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular maksimum kuvvet (P_{max}), plastik şekil değiştirme enerjisi (ALLPD), eşdeğer rijitlik (k_{eff}), maksimum deplasman (δ_{max}), eşdeğer plastik gerinim (PEEQ), döngüde sönümlenen enerji (E_D) ve eşdeğer viskoz sönüm (ζ_{eq}) şeklinde olup karşılaştırmalar bu parametrelere göre yapılmıştır.

H ve V tipi sönümleyiciler için 5mm kalınlık değerinde döngü başına sönümlenen enerjiler de çok kayda değer bir artış gözlenmemiştir ve histeretik özellikler çok küçük değerlerde kalmıştır. Buna bağlı olarak toplam sönümlenen enerji ve maksimum kuvvet yönünden de verimli olamayan 5mm kalınlık değerinde ıraksaklık problemleri ile de karşılaşmıştır. Bu nedenlerden dolayı 5mm kalınlık değeri verimsiz bulunmuştur. Diğer kalınlıklar için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara ve kombinasyonlardaki parametre değişimlerinin nasıl yapıldığına örnek teşkil etmesi bakımından her iki tipi sönümleyicinin 10 mm kalınlık sabit alınarak oluşturulan kombinasyon sonuçları Tablo 5.'de verilmiştir.

Kalınlık değeri t ve toplam genişlik b değerlerinin artması ile maksimum kuvvet, plastik şekil değiştirme enerjisi, eşdeğer rijitlik ve ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ oranında artış gözlenmiştir. H tipi için ideal kalınlık değeri 20 mm ve ideal genişlik değeri 100 mm olarak belirlenmiştir. V tipi sönümleyicide ise 10 mm ve 15 mm kalınlık değerleri için yapılan analizlerde genişlik değerinin ve yükseklik değerinin artması ile pekleşme bölgesindeki burkulma davranışından kaynaklı kapasitede kayıplar gözlenmiştir. Bu durum kalınlığın 20 mm'ye çıkarılması ile kısmen ortadan kalkmıştır. V tipinde genişlik ölçüsü yükleme yönü ile paralel olduğu için 100 mm genişlik değerindeki olası burkulma problemlerine karşı bu değer 95 mm olarak belirlenmiştir.

Kol uzunluğu l değerinin pekleşme bölgesine ve kapasiteye direk olarak bir etkisi gözlenmemiştir. Kol uzunluğu kuvvet etkileyen uçtan pekleşme bölgesine bir moment kolu görevi görmektedir. Aynı kuvvet değerinde, kol uzunluğunun artması pekleşme bölgesindeki eğilme momentinde bir artışa sebep olur. Bu nedenden dolayı kol uzunluğunun artması maksimum kuvvet, eşdeğer rijitlik ve ALLPD değerlerinde bir azalmaya sebep olsa da ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ değerinde artışa neden olmuştur. H ve V tipi sönümleyicilerin pekleşme bölgeleri Şekil 10.'de gösterilmektedir.



Şekil 10. H tipi ve V tip sönümleyicilerde pekleşme bölgeleri

Kalınlık (t) ve genişlik (b) ölçülerinde ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ değeri maksimuma gidecek şekilde bir tercih yapıldığı için eşdeğer rijitlik, maksimum kuvvet ve ALLPD değerlerinin yüksek olması adına ideal kol uzunluğu H tipinde 100 mm belirlenmiştir. H tiplerinde burkulma davranışı gözlenmediği için bu bulgular geçerlidir. V tipinde kol uzunluğunun kısılmasından kaynaklı rijitlik artışıyla PEEQ $_{max}$ değeri küçük bir değerde kalmıştır. Kol uzunluğu 100 mm olan V2010130 isimli sönümleyicinin, kol uzunluğu 200 mm olan sönümleyiciye göre ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ değerinin küçük kalmasından dolayı ideal kol maksimum uzunluğu 200 mm olarak belirlenmiştir.

İki sönümleyici tipinde de yükseklik (h) değerinin artması, deplasman kapasitesinin artması anlamına gelir. Yüksekliğin artması sönümleyici narinliğini artırdığı için maksimum kuvvet ve eşdeğer rijitlik değerlerinde düşmeye neden olsa da toplam deplasmanın artması ve pekleşme bölgesi alanında artış sağlamıştır. ALLPD ve ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ değerleri yükseklikle doğru orantılıdır, yani yükseklik artışı bu değerlerde bir artışa neden olduğu için toplam yükseklik değeri iki tip için de 300 mm olarak belirlenmiştir.

H ve V sönümleyici tipinde belirlenen geometrik ölçüler belirlenmesinde Tablo 5'deki gibi elde edilen sonuçlar kullanılırken davranışı belirsiz modeller hariç tutulmuştur. Tablo 6'da özetlenen orantı durumları ve açıklanan bulgular dikkate alınarak bu geometrik ölçüler Tablo 7.'deki gibidir. En uygun model seçiminde kutu sonuç çıktıları kullanılarak kutu grafikler çizdirilmiştir (Şekil 11). H tipi ve V tipi için en uygun modeller Şekil 12. ve Şekil 13.'de gösterilmiştir.

Her iki sönümleyici tipi için levha kalınlık parametresine göre histeretik eğrilerden elde edilen sonuçlardan üretilen maksimum kuvvet (P_{max}) ve eşdeğer rijitlik (k_{eff}) değişimleri grafikleri H tipi için Şekil 14 ve 15’de, V tipi için ise Şekil 16 ve 17’de gösterilmiştir

Tablo 5. Kalınlığı 10 mm olan H tipi (20 adedi) ve V tipi (20 adedi) sönümleyicinin sonuçları

N	İsim	t	b	l	h	P_{max} (kN)	d_{max} (mm)	k_{eff} (N/mm)	ζ_{eq}	E_D (kNm)	ALLPD (kNm)	PEEQ _{max}	ALLPD/PEEQ ^{0.6} _{max} (kNm)
1	H 10 3 1 10	10	30	100	100	1.992	95.448	21.230	0.641	0.812	0.800	0.189	4.235
2	H 10 3 1 20	10	30	100	200	1.454	198.732	8.842	0.580	1.276	1.259	0.184	6.829
3	H 10 3 1 30	10	30	100	300	1.108	299.669	5.683	0.574	1.824	1.803	0.194	9.293
4	H 10 3 2 10	10	30	200	100	0.993	94.165	10.158	0.457	0.275	0.264	0.058	4.577
5	H 10 3 2 20	10	30	200	200	0.838	194.032	4.454	0.517	0.552	0.537	0.073	7.393
6	H 10 3 2 30	10	30	200	300	0.710	294.456	2.684	0.622	0.909	0.890	0.090	9.893
7	H 10 3 3 10	10	30	300	100	0.643	96.402	6.764	0.262	0.100	0.086	0.019	4.502
8	H 10 3 3 20	10	30	300	200	0.587	198.188	2.996	0.382	0.285	0.269	0.036	7.480
9	H 10 3 3 30	10	30	300	300	0.523	289.020	1.880	0.511	0.512	0.492	0.050	9.846
10	H 10 5 1 10	10	50	100	100	3.334	99.198	34.526	0.633	1.324	1.306	0.182	7.196
11	H 10 5 1 20	10	50	100	200	2.498	199.939	14.935	0.572	2.144	2.115	0.196	10.786
12	H 10 5 1 30	10	50	100	300	1.894	299.711	9.533	0.576	3.094	3.058	0.207	14.774
13	H 10 5 2 10	10	50	200	100	1.726	99.361	17.536	0.434	0.458	0.439	0.059	7.445
14	H 10 5 2 20	10	50	200	200	1.455	198.611	7.534	0.498	0.927	0.901	0.076	11.902
15	H 10 5 2 30	10	50	200	300	1.225	298.090	4.527	0.610	1.533	1.501	0.092	16.318
16	H 10 5 3 10	10	50	300	100	1.126	96.402	11.372	0.254	0.174	0.150	0.020	7.486
17	H 10 5 3 20	10	50	300	200	1.004	197.552	5.171	0.370	0.460	0.434	0.036	12.068
18	H 10 5 3 30	10	50	300	300	0.892	294.576	3.165	0.495	0.846	0.814	0.050	16.274
19	H 10 8 1 10	10	80	100	100	5.510	99.720	56.916	0.619	2.170	2.140	0.189	11.321
20	H 10 8 1 20	10	80	100	200	4.016	197.399	23.074	0.587	3.340	3.296	0.192	17.184

N	İsim	t	b	l	h	P_{max} (kN)	d_{max} (mm)	k_{eff} (N/mm)	ζ_{sq}	E_D (kNm)	ALLPD (kNm)	PEEQ _{max}	ALLPD/PEEQ ^{0.6} _{max} (kNm)
1	V 10 3 1 10	10	30	100	100	6.378	97.728	67.563	0.801	3.307	3.289	0.857	3.838
2	V 10 3 1 20	10	30	100	200	4.693	198.558	28.444	0.727	5.150	5.123	0.823	6.224
3	V 10 3 1 30	10	30	100	300	3.594	299.096	17.943	0.744	7.501	7.469	0.890	8.392
4	V 10 3 2 10	10	30	200	100	3.590	97.463	36.439	0.683	1.521	1.502	0.310	4.846
5	V 10 3 2 20	10	30	200	200	3.081	198.473	16.233	0.695	2.802	2.776	0.355	7.818
6	V 10 3 2 30	10	30	200	300	2.617	299.966	9.898	0.806	4.441	4.408	0.424	10.396
7	V 10 3 3 10	10	30	300	100	2.384	99.059	23.868	0.561	0.829	0.810	0.160	5.063
8	V 10 3 3 20	10	30	300	200	2.200	197.425	11.220	0.630	1.751	1.725	0.210	8.212
9	V 10 3 3 30	10	30	300	300	1.981	298.730	6.974	0.770	3.005	2.972	0.265	11.213
10	V 10 5 1 10	10	50	100	100	17.335	99.772	181.310	0.837	9.495	9.455	1.489	6.350
11	V 10 5 1 20	10	50	100	200	12.684	199.966	77.265	0.788	15.199	15.143	1.584	9.560
12	V 10 5 1 30*	10	50	100	300	9.910	299.988	41.275	0.735	17.104	17.052	1.140	14.958
13	V 10 5 2 10	10	50	200	100	10.279	99.789	103.112	0.758	4.862	4.823	0.631	7.644
14	V 10 5 2 20*	10	50	200	200	8.698	196.728	46.435	0.757	8.639	8.566	0.678	12.634
15	V 10 5 2 30*	10	50	200	300	25.008	299.783	86.662	0.465	22.748	22.591	0.818	27.617
16	V 10 5 3 10	10	50	300	100	6.952	95.528	70.251	0.664	2.797	2.757	0.340	8.108
17	V 10 5 3 20	10	50	300	200	6.459	196.325	32.861	0.709	5.735	5.679	0.42	13.521
18	V 10 5 3 30*	10	50	300	300	5.395	298.130	19.806	0.775	8.514	8.439	0.460	18.345
19	V 10 8 1 10*	10	80	100	100	39.505	99.997	396.286	0.673	16.644	16.563	1.686	9.824
20	V 10 8 1 20*	10	80	100	200	28.162	199.081	149.463	0.466	17.299	17.201	1.127	15.262

*Burkulma Gözlenen Modeller

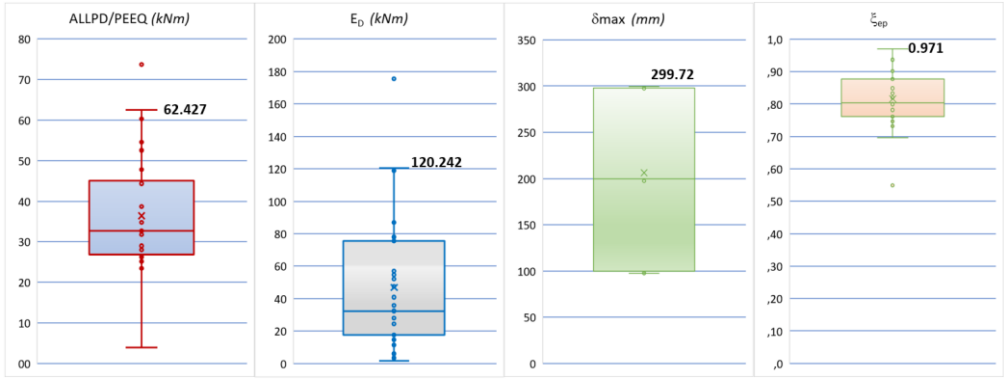
Tablo 6. H ve V tipi sönümleyicilere ait orantı tablosu

Orantı Durumu					
		t mm	b mm	l mm	h mm
H Tipi	P_{max}	+	+	-	-
	k_{eff}	+	+	-	-
	ALLPD	+	+	-	+
	ALLPD/PEEQ ^{0.6} _{max}	+	+	+	+
V Tipi	P_{max}	+	+	-	-
	k_{eff}	+	+	-	-
	ALLPD	+	+	-	+
	ALLPD/PEEQ ^{0.6} _{max}	+	+	+	+

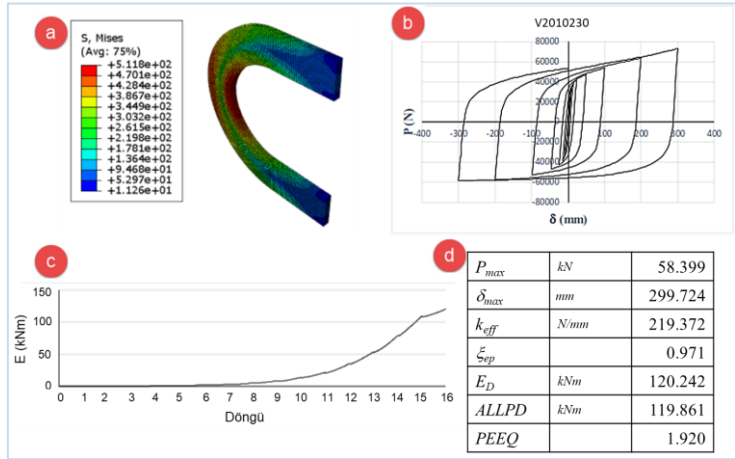
Tablo 7. Sönümleyiciler için belirlenen optimum ölçüler

		t mm	b mm	l mm	h mm
H Tipi	Dış	20	100	100	300
	İç	20	100	100	240
V Tipi		20	95	200	300

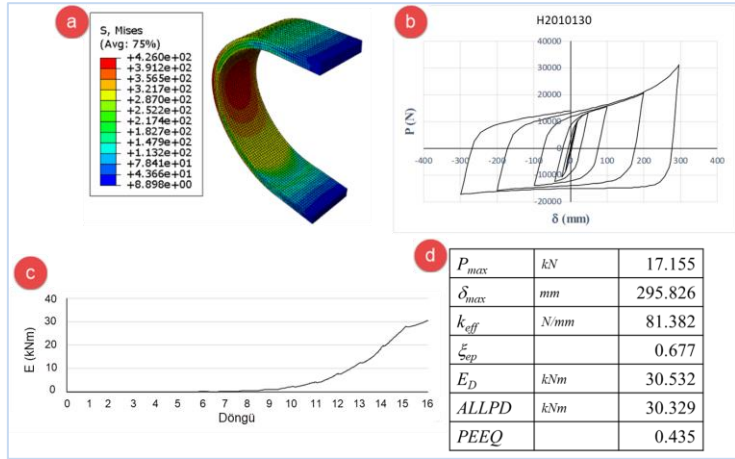
Bu grafiklerde görüldüğü üzere H tipi sönümleyicilerde burkulma oluşmadığı için elde edilen eğriler Tablo 6. ile uyumludur. V tipinde bazı ölçülerde ise yerel burkulma/buruşma gözlenmiştir. Bu durum erken oluştuğu için beklenen kapasiteden daha düşük yük değerlerinde göçme gerçekleşmiştir. Özellikle 10 mm ve 15 mm kalınlıklar değerlerinde pekleşme bölgesinde burkulma davranışı oluştuğu için bu eğriler H tipindeki eğrilere göre daha dalgalı biçimdedir. H tipinde belirlenen ölçülere ait model adı H2010130 ve V tipinde belirlenen ölçülere ait model adı V2010230'dur. Bu grafiklerde, bulgular ve elde edilen orantı tablosunun doğruluğu açıkça görülmektedir. V tipi için V2010230 modelinin en uygun olduğu kutu grafiklerdir Şekil 11.'de sunulmuştur. Özellikle ALLPD/PEEQ oranına bağlı olarak bu oranın en yüksek olduğu değerde seçim yapılmıştır.



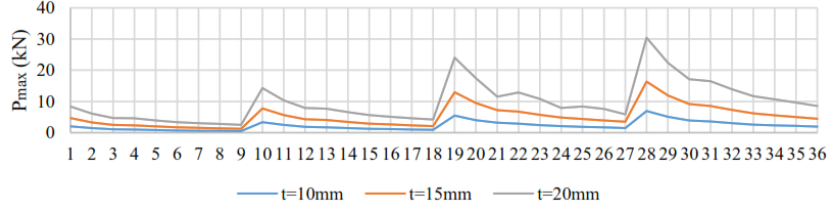
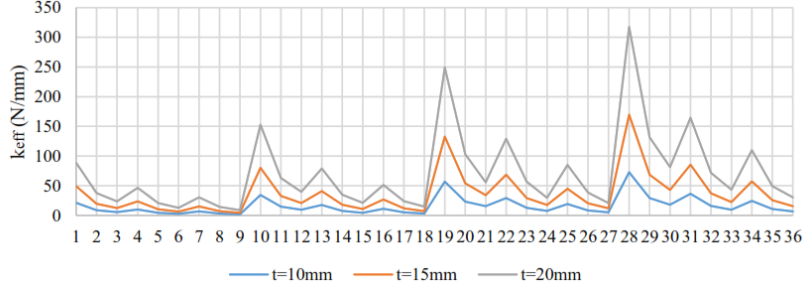
Şekil 11. V tipi modellerin sonuç çıktıklarına göre en elverişli model seçimi için kullanılan kutu grafikler



Şekil 12. V2010230 için a) Gerilme dağılımı b) Histeretik eğri c) Kümülatif enerji eğrisi d) Elde edilen sonuçlar (ALLPD/PEEQ^{0,6}_{max} =62.427)

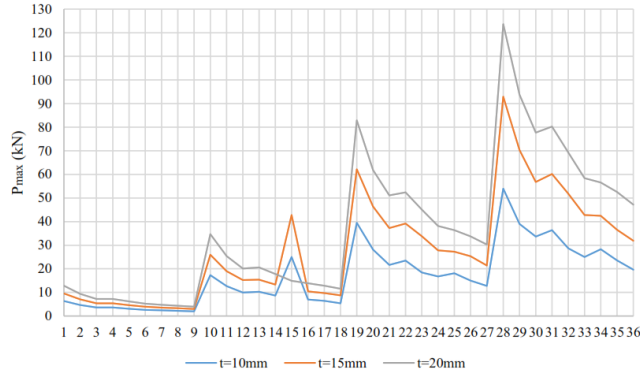
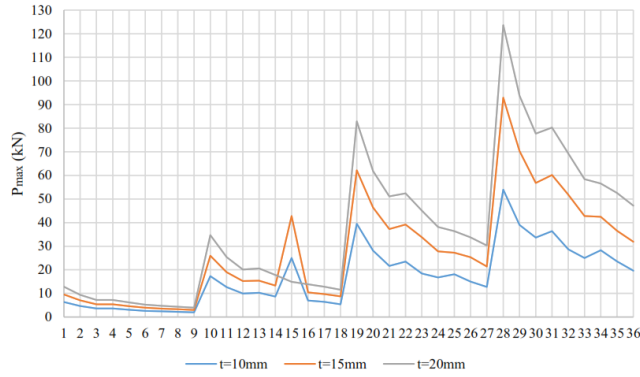


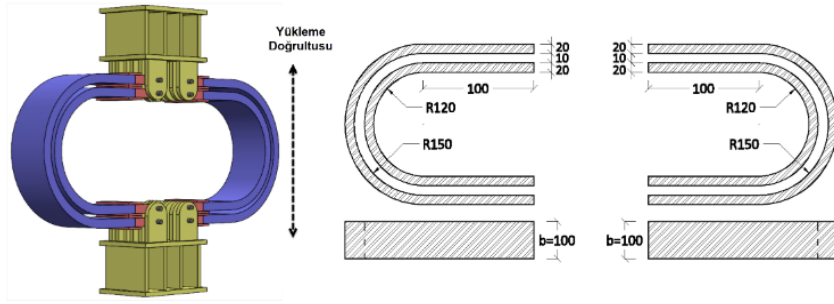
Şekil 13. H2010130 için a) Gerilme dağılımı b) Histeretik eğri c) Kümülatif enerji eğrisi d) Elde edilen sonuçlar (ALLPD/PEEQ^{0,6}_{max} =69.721)

Şekil 14. H tipi modellere ait P_{max} grafiğiŞekil 15. H tipi modellere ait k_{eff} grafiği

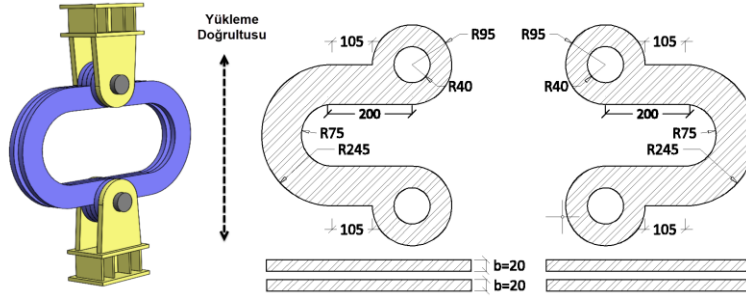
Tablo 7.'de belirtilen optimum ölçülere göre H tipi için oluşturulan dört parçalı bütünleşik model, yükleme yönü ve ölçüler Şekil 18'de, V tipi için oluşturulan dört parçalı bütünleşik model, yükleme yönü ve ölçüleri ise Şekil 19'de verilmiştir.

Verilen ölçülerde ABAQUS programında modellenen bütünleşik sistemdeki sönümleyicilerin her ikisine de Bölüm 2.4. de tariflenen FEMA 461'e [49] göre oluşturulan tekrarlı çevrimsel yüklemeler uygulanmıştır. H ve V tiplerine ait elde edilen Von Mises gerilme dağılımları sırasıyla Şekil 20'de maksimum eşdeğer plastik gerinim dağılımları ise Şekil 21'deki görsellerde verilmiştir.

Şekil 16. V tipi modellere ait P_{max} grafiğiŞekil 17. V tipi modellere ait k_{eff} grafiği



Şekil 18. H tipi bütünlük sistem için oluşturulan 4 parçalı model ve geometri detayları (mm)

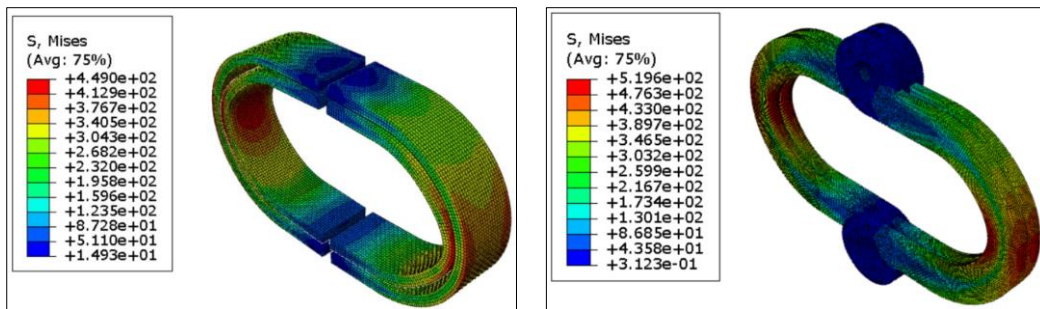


Şekil 19. V tipi bütünlük sistem için oluşturulan 4 parçalı model ve geometri detayları (mm)

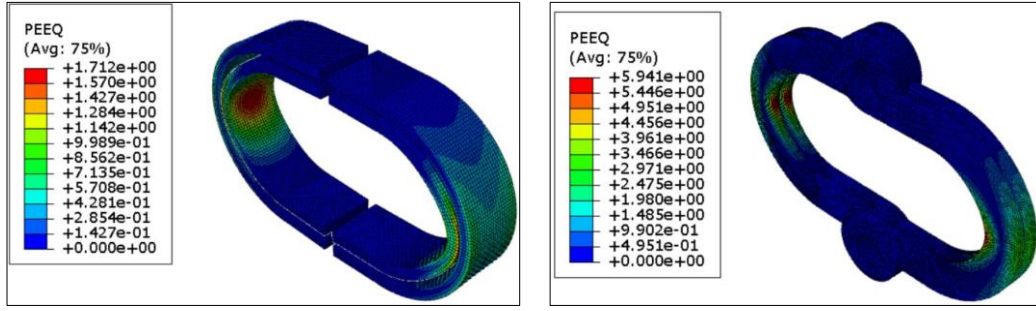
ABAQUS modelinde tanımlanan tersinir tekrarlı çevrimsel yüklemeye prosedürüne göre sönümleyicilerin maksimum yük taşıma kapasitelerinin, enerji sönümleme karakteristiklerinin ve yer değiştirme sınırlarının rahatlıkla değerlendirilebilmesine imkan sağlayan histerisis eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler H tipi ve V tipi için Şekil 22.'de gösterilmiştir. Bu modellere ait elde edilen mekanik özelliklerin sayısal değerleri Tablo 8'de sunulmuştur.

Modelleme sonuçlarına göre 4 adet U biçim kullanılarak oluşturulan, V tipi sönümleyici H tipine göre daha yüksek kuvvet kapasitesi, daha yüksek deplasman yeteneği, daha düşük akma kuvveti ve daha düşük akma deplasmanına sahiptir. Düşük akma deplasmanı daha yüksek eşdeğer rijitlik değerine sahip olmasının bir sonucudur. Plastik sönüm enerjisi bakımından, eşdeğer viskoz sönüm ve toplam süneklik açısından da V tipi sönümleyicinin daha iyi bir alternatif olduğu Tablo 8.'den elde edilecek bir çıkarımdır. Üretimdeki zorluklar düşünüldüğünde H tipi sönümleyicinin üretimi hem kesim hem de büküm maliyeti içermektedir. V tipi sönümleyici de ise sadece kesim maliyeti bulunmaktadır. H tipi daha çok bağlantı parçasına ihtiyaç duyarken V tipinde tek bir bağlantı mili gereklidir ama onun da büyük çapta olması gerekir. Bu bakımda V tipi sönümleyicinin üretimi daha kolay ve ekonomik olduğu düşünülmektedir.

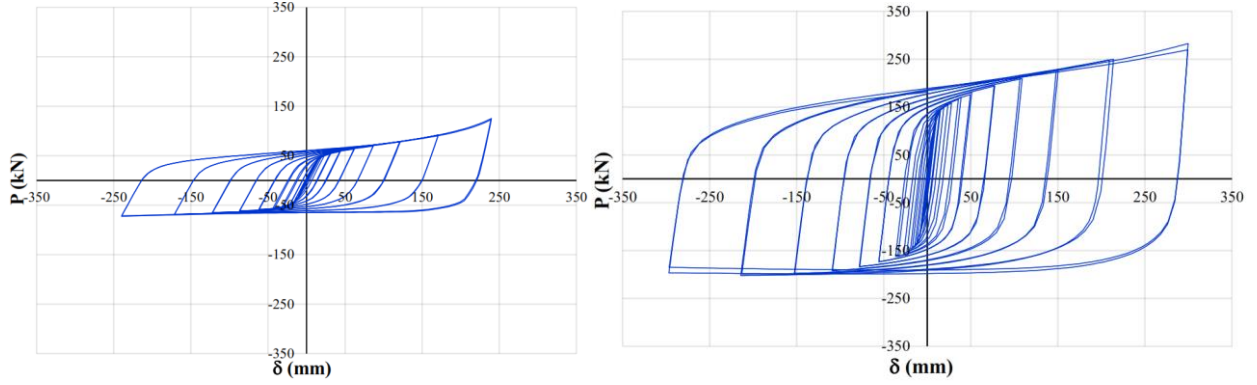
Tasarımı gerçekleştirilen ve tersinir tekrarlı yüklemelerle yapısal performansları ortaya konulan dört parçalı H ve V tipi metalik sönümleyicilerin daha önce çalışmalarda sunulmuş kendi kategorisindeki metalik sönümleyicilerle kıyaslanması yapılmıştır. Bu kıyaslama değerleri Tablo 9'da sunulmuştur.



Şekil 20. Sönümleyicilerin Von Mises Gerilme dağılımları (N/mm^2)



Şekil 21. Sönümleyicilerin maksimum eşdeğer plastik gerilme dağılımları (N/mm^2)



Şekil 22. H tipi (solda) ve V tipi (sağda) 4 parçalı sönümleyiciye ait histeretik eğriler

Tablo 8. Dört parçalı H ve V tipi 4 parçalı sönümleyicilere ait mekanik özellikler

Tip	P_{max}	δ_{max}	P_y	δ_y	E_D	$ALLPD$	k_{eff}	ξ_{ep}	$PEEQ_{max}$	$\frac{ALLPD}{PEEQ_{max}^{0.6}}$	μ
	kN	mm	kN	mm	kNm	kNm	N/mm				
H	125.47	240	41.07	10.770	287.2	286.39	413.04	1.92	1.712	207.42	22.29
V	282.63	300	53.68	4.420	1211.5	1210.14	812.89	2.66	5.941	415.45	67.87

Tablo 9. Literatürdeki metalik sönümleyicilerin mekanik özellikleri ve H4U ile V4U mekanik özellikleri kıyaslaması [53]

	PD	DPD	IPD	TADAS	SD	SPD	HD	CSYB	DFMDX	BSSD	BFD	H4U	V4U
Akma	2.5-	1.6-	0.80-		0.3-	0.7-					1.9-		
deplasmanı (mm)	4.0	2.1	3.20	1.1-5.8	0.49	5.2	-	4.5	1.5	0.51	3.17	10.77	4.77
Eşdeğer sönüm oranı	0.4	0.45	0.36	0.46	0.3-	0.1-	0.45	0.41	0.46	0.34	0.6	1.92	2.67
Toplam sönümlenen enerji (kJ)	-	49.2	242	-	6.9-	5.8-	-	-	-	-	11.7	287.20	1211.49
Toplam deplasman (mm)	-	1130	2100	-	500	400	-	1888	353.3	-	458-	240	300
Süneklik	20	20	27.8	22	29-40	8.5	6	8.7	17.1	60	17.1	22.29	67.87
Kütle (kg)	0.7-	2.1-			2.2	1.6	10.4	-	1.3	17	0.17-	41.16	8.11
Yükseklik (mm)	114-	110-	220	304	162	120	135	-	180	80	158-	300	300
Maliyet	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Düşük
Kurulum	Kolay	Kolay	Kolay	Zor	Kolay	Kolay	Kolay	Zor	Kolay	Kolay	Kolay	Orta	Kolay
Değiştirilebilirlik	Orta	Orta	Zor	Zor	Orta	Orta	Orta	Zor	Orta	Orta	Kolay	Orta	Kolay

H4U ve V4U sönümleyicilerinin güçlü ve zayıf yönlerini karşılaştırmak adına Tablo 9.'da Aghlara ve Tahir [53] tarafından sunulan, metalik sönümleyiciler açısından önemli parametrelerde yapılan kıyaslama kullanılmıştır. Bu kıyaslama temel parametreler dikkate alındığında H4U ve V4U sönümleyicilerinin diğer sönümleyicilere göre nasıl bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir. Bu iki tip sönümleyici de toplam sönümlenen enerji, eşdeğer sönüm oranı ve süneklik açısından diğer metalik sönümleyicilere göre oldukça büyük avantaja sahiptir. Diğer sönümleyicilerle kıyaslandığında V4U tipi sönümleyici H4U'ya göre akma deplasmanı yönünden daha elverişlidir. V4U tipi daha az parçalı olması ve daha hafif olması nedeniyle maliyet, kurulum ve değiştirilebilirlik yönünden H4U tipinden ve bazı diğer modellerden daha avantajlıdır.

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında iki farklı yönde derinliğe sahip tekil U biçimli sönümleyici parçalarının kalınlık, genişlik, kol uzunluğu ve yükseklik değişken tutularak sonlu elemanlar yöntemi ile histeretik özellikleri kıyaslanmıştır. U şekillerin optimum ölçüleri elde edildikten sonra iki adet 4 er U biçimden oluşan bütünleşik sistem üretilmiştir. Üretilen H4U ve V4U metalik sönümleyicilerin histeretik özellikleri belirlenerek literatürdeki diğer sönümleyiciler ile karşılaştırması yapılmıştır.

Tekli modelleme sonuçlarına ilişkin en önemli bulgular şu şekildedir.

- Her iki U şekil için de 5 mm kalınlık değeri burkulma problemleri ve ıraksaklık sorunlarından dolayı verimsiz bulunmuştur.
- Toplam genişliğin ve kalınlığın artmasının iki farklı tipteki U şekil için de bütün histeretik özelliklere olumlu katkıları vardır.
- H tipi ve V tipi için optimum kalınlık değeri 20 mm, yükseklik değeri 300 mm seçilmiştir. Toplam genişlik ve kol uzunluğu değerleri H tipinde 100 mm seçilmiştir. V tipinde ise olası burkulma davranışlarından dolayı genişlik 95 mm ve kol uzunluğu ortalama bir değer 200 mm uygun görülmüştür.
- Her iki sönümleyici de belirlenen geometrik özelliklerde kararlı histeretik davranış sergilemektedirler.
- Kol uzunluğunun artmasının pekleşme durumuna ve buna bağlı plastik sönüm enerjisine doğrudan bir etkisi yoktur. Kol uzunluğu, pekleşme bölgesi ile kuvvet uygulanan nokta arasında bir moment kolu görevi yapmaktadır. Kol uzunluğunun artması, aynı kuvvet değerinde, pekleşme bölgesindeki eğilme momentinde bir artışa neden olduğu için, H tipinde kol uzunluğu mümkün olduğunca kısa seçilmiştir. Kol uzunluğu rijitlik ile ters orantılıdır. Rijitlik artışı V tipinde pekleşme bölgesinde davranış belirsizliklerine neden olduğu için ve ALLPD / PEEQ^{0.6}_{max} değerinin kol uzunluğu 100mm olan modelin 200mm olan modele göre belirgin olarak düşük kaldığından dolayı, V tipinde kol uzunluğunun ortalama bir değer "200 mm" seçilmesi daha uygun görülmüştür.
- U şekillerin toplam yükseklik değerinin artması rijitlik ve maksimum kuvvette bir azalmaya neden olsa da pekleşme bölgesinin alanını artırdığından dolayı plastik sönüm enerjisine katkısı olumludur. İki model için de 300 mm yükseklik değeri yapılan analizlerde histeretik davranışta bir belirsizliğe neden olmadığı için uygun bulunmuştur.

Bütünleşik modelleme sonuçlarına ilişkin bulgular şu şekildedir.

- V4U bütünleşik sönümleyicinin eşdeğer rijitlik değeri, H4U bütünleşik sönümleyicinin eşdeğer rijitlik değerinden 1.96 kat daha fazladır. Eşdeğer rijitlik değerindeki artış daha erken döngülerde enerji sönümlemeye sebep olmaktadır. V4U 4.42 mm deplasmanda enerji sönümlemeye başlarken H4U'da ise bu değer 10.77 mm'dir.
- V4U'nun toplam sönümlediği enerji H4U'nun sönümlediği enerji değerinin 4.21 katı fazladır.
- V4U bütünleşik sönümleyici yaklaşık 3 kat fazla süneklik kapasitesine sahiptir.
- V4U bütünleşik sönümleyici yaklaşık 2 kat fazla maksimum kuvvet kapasitesine sahiptir.
- Deplasman kapasiteleri V4U için 300 mm ve H4U için 240 mm'dir.
- V4U'nun ALLPD / PEEQ^{0.6}_{max} değeri 203.7 iken, H4U'nun 167.285'tir. Bu açıdan sönümleyici verimi olarak V4U daha yüksek verime sahiptir.
- Literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında V4U sönümleyici, sönümlenen enerji bakımından oldukça büyük bir avantaja sahiptir. Büküm gerektirmeden imal edildiği için ve S275 yapısal çelik kullanıldığı için H4U'ya göre maliyet olarak düşük olmaktadır.

Kaynakça

- [1] Duggal, S. K., 2007. Earthquake resistant design of structures. New Delhi: Oxford university press, 448 pp.

- [2] Symans, M. D., Cofer, W. F., & Fridley, K. J., 2002. Base isolation and supplemental damping systems for seismic protection of wood structures: Literature review. *Earthquake Spectra*, 18(3), 549-572.
- [3] Sanchez, J., Masroor, A., Mosqueda, G., & Ryan, K., 2013. Static and dynamic stability of elastomeric bearings for seismic protection of structures. *Journal of structural engineering*, 139(7), 1149-1159.
- [4] Roeder, C. W., & Stanton, J. F., 1983. Elastomeric bearings: state-of-the-art. *Journal of Structural Engineering*, 109(12), 2853-2871.
- [5] Robinson, W. H., 1982. Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 10(4), 593-604.
- [6] Weisman, J., & Warn, G. P., 2012. Stability of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings. *Journal of Structural Engineering*, 138(2), 215-223.
- [7] Fenz, D. M., & Constantinou, M. C., 2008. Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), 1011-1028.
- [8] Mokha, A., Constantinou, M. C., Reinhorn, A. M., & Zayas, V. A., 1991. Experimental study of friction-pendulum isolation system. *Journal of Structural Engineering*, 117(4), 1201-1217.
- [9] Cheng, F. Y., Jiang, H., & Lou, K., 2008. *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC press, 627 pp.
- [10] Shanmuga Priya, D., Cinitha, A., Umesha, P. K., & Nagesh, R. I., 2014. Enhancing the seismic response of buildings with energy dissipation methods—An overview. *Journal of Civil Engineering Research*.
- [11] Fujino, Y., & Abé, M. (1993). Design formulas for tuned mass dampers based on a perturbation technique. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 22(10), 833-854.
- [12] Luft, R. W., 1979. Optimal tuned mass dampers for buildings. *Journal of the Structural Division*, 105(12), 2766-2772.
- [13] Bauer, H. F. (1984). Oscillations of immiscible liquids in a rectangular container: a new damper for excited structures. *Journal of Sound and Vibration*, 93(1), 117-133.
- [14] Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Wakahara, T., & Kohsaka, R., 1995. Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation. *Engineering structures*, 17(9), 609-621.
- [15] Ghorbani, H. R., & Rofooei, F. R., 2020. A novel double slip loads friction damper to control the seismic response of structures. *Engineering Structures*, 225, 111273.
- [16] Jaisee, S., Yue, F., & Ooi, Y. H., 2021. A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Engineering Structures*, 235, 112022.
- [17] Skinner, R.J., Kelly, J.M., and Heine, A.J., Hysteresis dampers for earthquake resistant structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43, 287.
- [18] Eldin, M. N., Dereje, A. J., & Kim, J., 2020. Seismic Retrofit of Framed Buildings Using Self-Centering PC Frames. *Journal of Structural Engineering*, 146(10), 04020208.
- [19] Tyler, R.G., 1985. Further notes on a steel energy-absorbing-element for braced frameworks, *Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 18, 270.
- [20] Xie, L., Zhang, L., Pan, C., Zhang, R., & Chen, T., 2020. Uniform damping ratio- based design method for seismic retrofitting of elastoplastic RC structures using viscoelastic dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105866.
- [21] Constantinou, M. C., & Symans, M. D., 1993. Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(2), 93-132.
- [22] Yang, T. Y., Li, T., Tobber, L., & Pan, X., 2020. Experimental and numerical study of honeycomb structural fuses. *Engineering Structures*, 204, 109814.
- [23] Varzaneh, M. N., & Hosseini, M., 2019. Cyclic performance and mechanical characteristics of the oval-shaped damper. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(11), 4747-4757.
- [24] Guo, W., Ma, C., Yu, Y., Bu, D., & Zeng, C. (2020). Performance and optimum design of replaceable steel strips in an innovative metallic damper. *Engineering Structures*, 205, 110118.
- [25] Qiu, C., Zhang, Y., Qu, B., Dai, C., Hou, H., & Li, H., 2019. Cyclic testing of seismic dampers consisting of multiple energy absorbing steel plate clusters. *Engineering Structures*, 183, 255-264.

- [26] Jiao, Y., Kishiki, S., Yamada, S., Ene, D., Konishi, Y., Hoashi, Y., & Terashima, M., 2015. Low cyclic fatigue and hysteretic behavior of U-shaped steel dampers for seismically isolated buildings under dynamic cyclic loadings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(10), 1523-1538.
- [27] Maleki, S., & Mahjoubi, S., 2013. Dual-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 85, 81-91.
- [28] Qu, B., Dai, C., Qiu, J., Hou, H., & Qiu, C., 2019. Testing of seismic dampers with replaceable U-shaped steel plates. *Engineering Structures*, 179, 625-639.
- [29] Deng, K., Pan, P., Su, Y., & Xue, Y., 2015. Shape optimization of U-shaped damper for improving its bi-directional performance under cyclic loading. *Engineering Structures*, 93, 27-35.
- [30] Maleki, S., & Mahjoubi, S., 2014. Infilled-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 98, 45-58.
- [31] Gullu, A., Smyrou, E., Khajehdehi, A., Ozkaynak, H., Bal, I. E., Yuksel, E., & Karadogan, F., 2019. Numerical modelling of energy dissipative steel cushions. *International journal of steel structures*, 19(4), 1331-1341.
- [32] Shirinkam, M. R., & Razzaghi, J., 2020. Experimental and analytical investigation on the behavior of metallic Box-Shaped Dampers (BSD). In *Structures* (Vol. 23, pp. 766-778).
- [33] Bagheri, S., Barghian, M., Saieri, F., & Farzinfar, A., 2015. U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper. In *Structures* (Vol. 3, pp. 163-171).
- [34] E. Yurteri, 2021. U Şekilli İki Farklı Metalik Sönümleyicinin Histeretik Davranışlarının Nümerik Olarak İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri,
- [35] Halama, R., Sedláč, J., & Šofer, M., 2012. Phenomenological modelling of cyclic plasticity. *Numerical Modelling*, 1, 329-354.
- [36] Chaboche, J. L., 1986. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of plasticity*, 2(2), 149-188.
- [37] Krolo, P., Grandić, D., & Smolčić, Ž., 2016. Experimental and numerical study of mild steel behaviour under cyclic loading with variable strain ranges. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- [38] Logan, D. L., 2000. *A first course in the finite element method using Algor*. Brooks/Cole Publishing Co., 696 pp.
- [39] Armstrong, P. J., & Frederick, C. O., 1966. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect (Vol. 731). Berkeley: Central Electricity Generating Board [and] Berkeley Nuclear Laboratories, Research & Development Department.
- [40] Chaboche, J. L., Van, K. D., & Cordier, G., 1979. Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel.
- [41] Fırat, M., 2004. Çevrimsel Malzeme Deformasyonlarının Modellenmesi Bölüm I Plastisite Bünye Modelleri. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 6(1), 1-11.
- [42] Protocol for Fabrication, Inspection, Testing and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Experimental Specimens, 1997. FEMA, SAC-Steel Project, Oakland, Calif, USA,
- [43] Abaqus, F.E.A 2018. Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA.
- [44] Jones, R. M., 2009. *Deformation theory of plasticity*. Blacksburg, Va: Bull Ridge Pub, 622 pp.
- [45] Çapan, L., & Güven, E., 2014. *Plastisite Teorisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, 256 s.
- [46] C. European Standard, EN ISO 6892-1: Metallic Materials Tensile Testing-Part1: Method of Test at Room Temperature, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2010.
- [47] ECCS, 1986. ECCS Technical Committee 1 – Structural Safety and Loadings – Technical Working Group 1.3 – Seismic Design Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads”. 1st Edition, Brussels.
- [48] ATC-24, 1992. “Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures for Buildings,” Report No. ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- [49] FEMA, 2007. “Interim Protocols for Determining Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components Through Laboratory Testing,” FEMA 461 Draft document, Federal Emergency Management Agency.

- [50] Düğenci, O., 2022. Çelik basınç çubuklarında bazı güçlendirme türlerinin basınç dayanımı kapasitelerine katkısının deneysel araştırılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(1), 136-147.
- [51] ANSI/AISC 341-16, 2016. Seismic provision for structural steel building, American Institute of Steel Construction, Inc. 480 pp.
- [52] Suzuki, K., Saeki, E., & Watanabe, A., 1999. Experimental study of U-shaped steel damper. Part 1: Test of single U-shaped damper. Part 2: Test of U-shaped dampers with rubber bearings. In Proceedings of Architectural Institute of Japan (AIJ) Annual Conference, B (Vol. 2, pp. 665-668).
- [53] Aghlara, R., & Tahir, M. M., 2018. A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures. Engineering structures, 159, 185-197.

Bi Katkılamanın Al-B İkili Alaşımının Hidrojen Üretim Performansına Etkisinin İncelenmesi

Harun EROL*¹

*¹ Kayseri Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, KAYSERİ

(Alınış / Received: 24.07.2022, Kabul / Accepted: 29.11.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

Hidrojen Üretimi,
Al-B-Bi alaşımı,
Al Hidrolizi

Öz: Dünyada yaygın enerji kaynağı olarak kullanılmakta olan fosil yakıtlar giderek tükenmekte ve bu kaynakların maliyetleri de artmaktadır. Bu durum enerjinin alternatif, temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir sistemlerden elde edilmesini zorunlu hale getirmiştir. Alternatif ve temiz enerji kaynağı olarak hidrojen, geleceğin yakıtı olarak kabul edilmektedir. Aynı zamanda hidrojen yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, farklı şekilde ve amaçlarda kullanılabilirliği gibi alternatif enerji kaynaklarının genel özelliklerine uyan ikincil bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Alüminyum metali veya bu metalin alaşımı hidroliz yolu ile hidrojen gazı üretiminde sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilebilmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada alkali çözelti içerisinde Al-B ikili ve Al-B-Bi üçlü alaşımlarının farklı sıcaklıklarda hidrojen üretim performansı araştırılmıştır. Alaşımların döküm işlemleri argon atmosferi altında indüksiyon fırınında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ikili ve üçlü alaşımlardaki alüminyumun oranı ağırlık %99 civarındadır. Bi katkılı üçlü Al alaşımına ait hidroliz deneylerinden elde edilen sonuçlar ikili Al-B alaşımının sonuçları ile kıyaslandığında çok yüksek hidrojen üretim hızları gözlenmiştir. Maksimum akış hızı değeri 40 °C'de Al-B ikili alaşımı için 1.65 ml/dk iken Al-B-Bi üçlü alaşımı için 135.75 ml/dk değerine yükselmiştir. Gaz salınım oranı Al-B ikili alaşımı için 40 °C'de 0.77 ml/dkcm² iken Al-B-Bi üçlü alaşımı için çok yüksek bir artış ile 63.58 ml/dkcm² değeri elde edilmiştir.

Effect of Bi Doping on Hydrogen Production Performance of Al-B Binary Alloy

Keywords

Hydrogen Generation,
Al-B-Bi Alloy,
Al Hydrolysis

Abstract: Fossil fuels, which are used as a common energy source in the world, are gradually depleting and the costs of these resources are increasing. This situation has made it necessary to obtain energy from alternative, clean, renewable and sustainable systems. As an alternative and clean energy source, hydrogen is accepted as the fuel of the future. At the same time, hydrogen is seen as a secondary energy source that fits the general characteristics of alternative energy sources such as having high energy density and usability in different forms and purposes. Aluminum metal or its alloy is used to develop sustainable energy systems in the production of hydrogen gas by hydrolysis. In this study, hydrogen production performance of Al-B binary and Al-B-Bi ternary alloys in alkaline solution at different temperatures was investigated. The casting processes of the alloys were carried out in an induction furnace under an argon atmosphere. The ratio of aluminum in the obtained binary and ternary alloys is around 99 wt.%. When the results obtained from the hydrolysis experiments of the ternary Al alloy are compared with the results of the binary Al-B alloy, very high hydrogen production rates were observed. While the maximum flow rate value was 1.65 ml/min for Al-B binary alloy at 40 °C, it increased to 135.75 ml/min for Al-B-Bi ternary alloy. While the gas evolution rate was 0.77 ml/mincm² at 40 °C for the Al-B binary alloy, a very high increase was obtained for the Al-B-Bi ternary alloy to 63.58 ml/mincm².

*İlgili Yazar, mail: harunerol@kayseri.edu.tr

1. Giriş

Dünya nüfusunun artması ve teknolojinin gelişerek daha uygun maliyetle geniş kitlelere ulaşması toplumların daha fazla enerji tüketimine yol açmaktadır. Fosil yakıtların tükeneceği göz önünde bulundurulursa yakın gelecekte insanlığın alternatif enerji kaynaklarına ihtiyaç duyacağı aşikardır. Fosil yakıtların çevre sorunlarına sebep olduğunu da değerlendirdiğimizde, yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına olan ihtiyacımızın gün geçtikçe arttığını görmekteyiz. Yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları arasında Hidrojen diğer yakıtlar ile kıyaslandığında yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle fosil yakıtlara en iyi alternatif olarak düşünülmektedir [1]. Hidrojen ekonomi konseptine göre gelecekteki küresel enerji taleplerinin esas olarak fosil yakıtlar yerine hidrojen yakıtı ile karşılanacağı öngörülmektedir [2]. Hidrojen ekonomisine başarılı bir geçiş için, bu teknolojinin sürdürülebilir, temiz ve ekonomik bir şekilde uygulanabilmesi adına öncelikle hidrojen üretim süreçleri geliştirilmeli ve iyileştirilmelidir [3].

Kimyasal reaksiyonlar ile hidrojen açığa çıkaran belirli metal reaktanları arasında alüminyum ve alaşımları, gelecekteki hidrojen üretimi için geçerli en uygun metallerden biri olarak kabul edilmektedir. Son yıllarda alüminyum ve alaşımlarını bir enerji malzemesi olarak kullanma eğilimi artmıştır. Ayrıca hidrojen kaynağı olarak metal malzeme kullanılması bu malzemenin hidrojen üretimi ve enerji depolanması adına etkili, kullanıcı dostu ve güvenli olduğunu göstermiştir [3].

Hidrojen üretimi için hafif metaller ve bunların hidritlerinin su ile etkileşimine (hidroliz reaksiyonu) dayanan bir yöntem giderek daha fazla ilgi çekmektedir. Hidroliz reaksiyonu günümüzde perspektif ve pratik olarak uygulanabilirlik açısından çok uygun kabul edilmektedir [4]. Alüminyumun hidroliz reaksiyonları CO₂ salınımı yapmayan minimum oranda zararlı çevresel etkiye sahiptir. Al-H₂O hidroliz reaksiyonu esnasında alüminyum oksit (Al₂O₃) ve alüminyum hidroksit (Al(OH)₃) bileşikleri oluşmaktadır. Halle-Heroult süreci ile oluşan Al₂O₃ bileşiminden Al elde edilerek geri dönüşüm yapmak mümkündür [5]. Ayrıca, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan Li-iyon pillerin kapasite problemlerinden dolayı menzil problemleri bulunmaktadır [5]. Bu problemi aşmak için yakıt hücreleri iyi bir alternatif olabilir. Sadece 4 kg ağırlığında bir alüminyum yakıt hücresi ile elektrikli bir aracın 400 km menzile ulaşması mümkündür [6].

Alüminyum, hidroliz reaksiyonları için çok uygun bir metal olmasına rağmen [3], alüminyumun su ile reaksiyonu, yüzeyinde bir oksit film oluşumu ile engellenir. Bunun üstesinden gelmek için reaksiyonun gerçekleştiği ortam koşulları düzenlenmeli ve/veya alüminyum aktivitesi farklı yöntemlerle iyileştirilmelidir (alaşımlandırma vb.). Bu yöntemler Al hidroliz performans iyileştirme işlemlerinde avantaj sağlayabileceği gibi dezavantajları da olabilir [7]. Ortam koşullarını düzenlemek için hidrojen reaktörlerinde sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) sulu çözeltileri gibi alkali ortamlar kullanılabilir. Güçlü alkali çözeltilerdeki hidroksit iyonları (OH⁻), alüminyum yüzeydeki koruyucu oksit filmini yok ederek AlO₂⁻ oluşturabilir. Bu nedenle alüminyum ve alaşımları alkali ortamda kolayca çözünür ve hidrojen üretimini sağlar [7]. Farklı alkali çözeltiler arasında hidroliz reaksiyonları için en çok tercih edilen alkali çözelti NaOH çözeltisidir [3]. Alkali çözücünün NaOH olması durumunda alüminyum ile reaksiyonu aşağıdaki gibidir.



şeklinde reaksiyon serisi gerçekleşmektedir [3, 8, 9].

Reaksiyonun 1. adımında hidrojen oluşumu için tüketilen NaOH, 2. adımda NaAl(OH)₄ ayrışımı yoluyla yeniden üretilecektir. Böylece, aslında uygun şartlarda kontrollü bir reaksiyonda hidrojen üretimi için kullanılan hammadde Al ve su olacaktır (3.adım).

Alüminyum yüzeyinde oluşan oksit tabakayı engellemek ve aktivitesini artırmak için bir diğer seçenek alüminyuma uygulanan çeşitli iyileştirme işlemlerdir. Alüminyumun içeriğini iyileştirme işlemlerinde alüminyumun tuzlarla veya seramiklerle bilyeli öğütülmesi pasif film oluşumunu azaltmak için kullanılmaktadır. Ancak, öğütme işlemi, karmaşık üretim sürecinin yanı sıra uzun zaman almaktadır. Ayrıca alüminyum yüzeyindeki tuzların su içinde çözünmesi gerektiği için aktif alüminyum tozlarının ilk evrede suyla reaksiyona girmesi zaman almaktadır [10]. Bir diğer iyileştirme çalışması ise alüminyum metale farklı elementler katılarak alüminyum alaşımı yapmaktır. Diğer metaller ile alüminyumun katılması alüminyumun kimyasal olarak aktivitesini artırıp hidroliz performansını iyileştirmek ve yüzeyinde oluşan oksit tabakayı parçalamak için farklı elementlerin

katalitik etkilerinden faydalanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu katkılama işlemlerinde sıklıkla alüminyuma kıyasla düşük erime sıcaklığına sahip Ga, In, Sn, Zn, Bi, Mn, Sb and Mg gibi metaller kullanılmıştır [1, 11-21]. Bu çalışmalardan birinde Wang ve ark. oda sıcaklığında nötr suda gerçekleştirdikleri çalışmalarında, Al-Ga-In-Sn elementlerini kullanarak ürettikleri üçlü ve dördü alaşımların hidrojen üretim performanslarını incelemişlerdir. Elde ettikleri Al-Ga-In ve Al-In-Sn üçlü alaşımları için hidrojen verimlerini gözlemişlerdir. Al-In-Sn alaşımlarının daha hızlı bir hidrojen üretim hızına ve Al-Ga-In alaşımlarından daha yüksek verime sahip olduğunu gözlemişlerdir. Üçlü Al-Ga-In ve Al-In-Sn sistemine göre elde ettikleri dördü Al-Ga-In-Sn alaşımı ile hidrojen üretim özelliğini büyük ölçüde iyileştirmişlerdir [1]. Diğer bir çalışmada Parmuzina ve ark. elde ettikleri Ga-In (70:30) ve Ga-In-Sn-Zn (60:25:10:5) ötektik alaşım numuneleriyle yaptıkları çalışmalarında ötektik bileşime, reaksiyon sıcaklığına ve toz partikül boyutuna bağlı olarak alüminyum alaşımlarının aktivitesini ve suyun oksidasyon oranını incelemişlerdir. 20°C, 40 °C, 60 °C ve 80 °C ortam(reaktör) sıcaklığında yaptıkları deneylerde farklı elementlerle aktive edilen ve toz formunda kullanılan alüminyumdan üretilen hidrojen gazı miktarını zamana bağlı olarak ölçmüşlerdir. Böylece, alüminyum metalinin galyum temelli sıvı ötektiklerle aktifleştirilmesinin, alüminyumun tane sınırlarında kristaller arası temasların tahrip olmasına ve ötektik ince film tarafından çevrelenerek alüminyum monokristal tozların oluşumuna yol açtığını göstermişlerdir. Bu şekilde aktif hale getirilen alüminyum tozları, düşük ve orta sıcaklıktaki yakıt hücrelerini beslemek için kullanılabilen hidrojeni açığa çıkaran su ile yoğun olarak oksitlendiği sonucuna varmışlardır [20]. Bir diğer çalışmada ise Zhang ve ark. farklı bileşimlere sahip Al-Sn bazlı alaşımları yüksek basınçlı bir torsiyon (HPT) yöntemi ile sentezlenmiştir. Farklı alaşım elementlerinin ve işlem basamaklarının alaşımların hidrojen üretim performansına etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlardan çinkonun, çukur (piting) korozyonunu teşvik ederek hidrojen üretim hızını ve verimini artırabildiğini göstermişlerdir. Ayrıca sudaki en yüksek reaktivite değerini ağırlıkça Al-%30Sn-%10Zn alaşımı için elde etmişlerdir. Al-%30Sn-%10Zn alaşımının ayrıntılı analizlerini yaptıklarında; alaşımda oluşan ultra ince taneciklerin ve faz karışımının hem nanogalvanik hücrelerin hem de çukur korozyonunun etkisiyle hidrojen üretim hızını arttırdığını göstermişlerdir [21]. Yine Zhang ve ark. tarafından yapılan bir başka çalışmada ise farklı oranlardaki Al-Bi alaşımları ve Al-Bi-C bileşiklerini HPT yöntemi ile elde etmiş ve saf su içerisinde gerçekleştirdikleri hidroliz deneylerinde Bi elementini ağırlıkça %5-10-20-30 ve 40 oranlarında katkılamışlardır. Elde ettikleri sonuçlardan Bi ve C elementlerinin bileşik içerisindeki nanogalvanik hücrelerin etkisini artırılmasına, bileşikte çukur korozyon oluşumunun teşvik edilmesine ve kolay parçalanma ile aktif yüzey alanının artırılmasına sebep olduklarını ve bu sayede bileşiklerin hidrojen üretim performanslarının artmasına katkı sağladıklarını göstermişlerdir. En iyi hidrojen üretim performansını 10 dakikadan kısa bir sürede 333 K ortam sıcaklığında yaklaşık %100 bir verimle dakikada gram başına 270 ml hidrojen üretimi aldıkları Al-ağ.%30Bi-ağ.%10C bileşiğinden elde etmişlerdir [15].

Alüminyuma göre düşük ergime sıcaklığına sahip metallerin dışında yüksek ergime sıcaklığına sahip Cu, B, Si, Ni, Co gibi metaller de kullanılarak katkılama çalışmaları alüminyumun hidroliz performansını iyileştirmek amacıyla araştırmacılar tarafından çalışılmıştır [5, 7, 9, 22-24]. Bu çalışmalardan Kaya ve ark. Al-ağ.%2Zn alaşımına eser miktarda (ağ.%0.1-0.3 ve 0.5) metalik B katkılanması yapmış ve farklı sıcaklık (25, 50 ve 80 °C) ve farklı alkali ortamlarda(1, 3 ve 5M NaOH) hidroliz deneyleri yapmışlardır. 5M NaOH çözeltisinde 50 °C de sırası ile Al-2Zn-xB (x=0, 0.1, 0.3, 0.5) alaşımları için korozyon oranlarını sırası ile 3.92-4.78-5.29-5.97 mgdk⁻¹cm⁻² olarak bulmuşlardır. En iyi hidrojen üretim performansını 80 °C sıcaklıkta, 5M NaOH alkali çözelti içerisinde ağırlıkça Al-%2Zn-%0.5B alaşımından 13.48 mgdk⁻¹cm⁻² olarak elde etmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmada B elementinin katkılanması ile Al yüzeyinde oluşan pasif oksit filmin daha kırılğan ve daha gözenekli hale gelerek hidrojen üretim hızını artırdığı sonucuna varmışlardır [5]. Bir diğer çalışmada Kahveci, ikili Al-Sb ve üçlü Al-Sb-B(ağ.%0.5-1-2-3B) alaşımlarının hidrojen üretim performanslarını alkali ortamda (NaOH) farklı sıcaklıklarda incelemiştir. Al-Sb ikili alaşımına farklı oranlarda B katkılanmasının sonucunda elde ettiği üçlü Al-Sb-B alaşımlarının hepsinde farklı sıcaklık değerlerinde ikili Al-Sb alaşımına göre daha yüksek hidrojen üretim potansiyeli elde etmiştir. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre en yüksek hidrojen akış oranı 50, 60 ve 70 °C sıcaklık değerleri için sırası ile 13.04-33.69 ve 47.97 ml/dk değerlerinde Al-Sb-1B alaşımı için elde edilmiştir. Benzer şekilde bu bileşime ait ortalama gaz salınım oranları sırası ile 4.98-9.82 ve 16.78 ml/dkcm² olarak elde edilmiştir. Kahveci hidrojen akış oranının saf alüminyuma göre artmasında alaşımda oluşan Al-Sb ve Al-B intermetalik yapılarının etkisinin olduğunu göstermiştir[7]. Bu çalışmalardan görülüyor ki alaşım elementlerinin etkisi ile alüminyumun hidrolizi sırasında akış hızının arttığı ve buna bağlı olarak reaksiyon süresinin kısaldığı görülmektedir. Alaşım çalışmalarının hidroliz üzerindeki olumlu sonuçları pasif film yapısının değişimi, intermetalik bileşiklerin oluşumu ve aktif yüzey alanındaki artış gibi etkilere bağlanmaktadır.

Tüm bu çalışmalardan Al metaline B ve Bi elementleri ile alaşım oluşturulmasının hidrojen üretim performansı üzerinde olumlu etkileri olduğu görülmektedir. Ancak B elementinin hidrojen üretim çalışmalarında Bi ile birlikte katkılanıldığında ne gibi etkilerinin olduğu bilinmemektedir. Bu konuda bilimsel çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu çalışmada Al ile intermetalik bileşik oluşturabilen B elementi Al metaline katkılanarak elde edilen ikili Al-ağ.%0.1B alaşımı ve ikili Al-B alaşımında Al ve B oranı değiştirilmeden ağ.%1Bi katkılanarak elde edilen üçlü (Al-ağ.%0.1B+ağ.%1Bi) alaşımı elde edilmiştir. Bütün alaşımlar argon atmosferi altında çalışan vakum

indüksiyon fırınında döküm yapılarak üretilmiştir. Elde edilen bu alaşım numunelerinin hidrojen üretim performansları alkali ortamda (3M NaOH) ve farklı sıcaklık değerlerinde (40-50-60 °C) incelenmiştir. Alaşım numunelerinin bileşim analizleri ve görüntü alma işlemleri Alan Etkili Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı olarak hidrojen üretim miktarları farklı çözelti sıcaklıklarında ölçülmüştür. Elde edilen verilerden alaşımlara ait Gaz Salınım Oranı (GSO), Korozyon Oranı (KO) ve Maksimum Akış Hızı (MAH) parametreleri hesaplanmıştır.

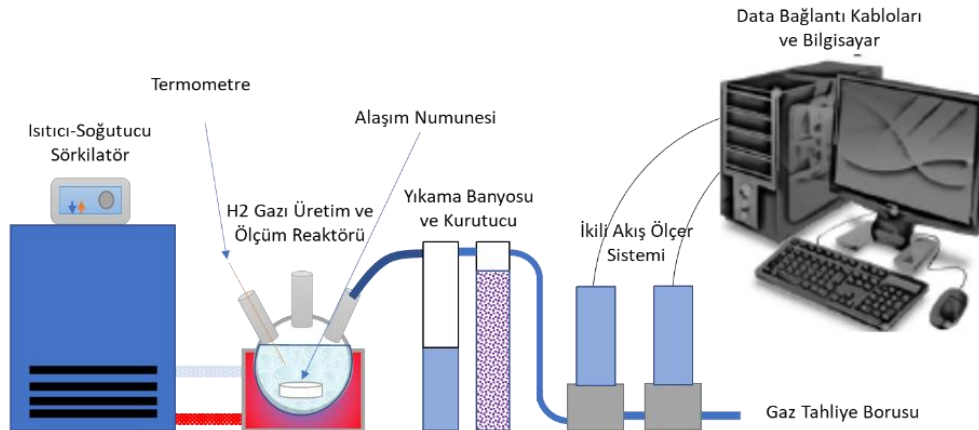
2. Materyal ve Metot

2.1. Numune Hazırlama Süreci

Al alaşımlarını oluşturan elementlerin kütleleri alaşımdaki oranlarına uygun olacak şekilde hassas terazi yardımı ile tartılmıştır. Tartılan yüksek saflıktaki alaşım elementleri kuartz tüp içerisinde argon atmosferi altındaki vakum indüksiyon fırınında eritilmiştir. Al alaşımına katılan B ve Bi elementleri çok az miktarda olduğu için alaşımın homojenliğinin sağlanması amacıyla eriyik alaşım yaklaşık 5 dk boyunca 700 °C'ye ayarlanan vakum indüksiyon fırınında oluşan manyetik alan etkisiyle karıştırılmıştır. Alaşım numunelerini oluşturmak ve eriyik alaşımı dökmek için 10 mm çapında ~150 mm uzunluğunda grafit döküm kalıbı hazırlanmıştır. Hazırlanan eriyik alaşım daha sonra vakumlu sıcak döküm fırınında alaşımın boşluksuz bir şekilde akması için 700 °C'ye kadar ısıtılan grafit döküm kalıbına dökülmüştür. Döküm işleminden sonra grafit döküm kalıbının kapağı kapatılarak döküm kalıbı oda sıcaklığında bulunan bir mermer blok üzerine bırakılarak serbest olarak doğrusal katılaştırılmıştır. Katılaştırma sonucunda kütlesi ~21 g, uzunluğu ~ 100 mm ve çapı 10 mm olan alaşımlar elde edilmiştir. Katılaştıran alaşım numuneleri kalıptan çıkartılarak Struers Minitom marka hassas kesme cihazında ~1.8 mm kalınlığında olacak şekilde eşit parçalara ayrılmıştır. Son olarak kesilen bu parçalar sırasıyla 1200-2400-4000 grid SiC zımpara kağıtları ile her iki yüzeyi de sulu zımparalama işleminden geçirilerek parlatılmıştır. İşlem sonrası her bir parçanın kütlesi ~0.37 g olacak şekilde tartılmış, ardından etanol ve ultrasonik banyoda ultra saf su ile temizlenerek hidroliz deneyleri için hazır hale getirilmiştir.

2.2. Hidrojen Gazı Ölçüm Sistemi

Alaşımların hidrojen gazı üretim ölçümleri Şekil 2.1'de gösterilen hidrojen gazı üretim sisteminde gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde hidroliz reaksiyonunun gerçekleştirildiği ve üretilen hidrojen miktarının ölçüldüğü 4 boyunlu ve 100 ml kapasiteye sahip ceketli yuvarlak tabanlı bir şişe kullanılmıştır. Her bir ölçümde ceket içerisine 80 ml 3M NaOH çözeltisi kullanılmış ve her bir deney sonrasında çözelti yenilenmiştir. Ceket içerisindeki çözelti sıcaklığını istenilen ölçüm sıcaklığına getirmek için Polyscience marka bir ısıtıcı soğutucu sistem kullanılmıştır. Hidroliz reaksiyonu sırasında açığa çıkan gaz öncelikle yıkama banyosunda bulunan ultra saf suda yıkanmış ve ardından bir gaz kurutma sistemi yardımı ile kurutulmuştur. Çıkan hidrojen gazı miktarının anlık ve toplam ölçümleri Line Tech marka 2 l/dk ve 50 ml/dk'lık ikili akış ölçer sistemi ile ölçülmüş ve ölçülen değerler kaydedilmiştir. B ve Bi katkılı alaşım numunelerindeki anlık hidrojen üretim miktarları arasındaki fark çok büyük olduğundan akış ölçer sistemlerinin limitlerinin üstündeki ve altındaki değerleri herhangi bir veri kaybına uğramaksızın ölçebilmek amacıyla ikili kütle akış ölçer sistemi kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Hidrojen üretim deneylerinin gerçekleştirildiği deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi

2.3. Alaşım Karakterizasyonu

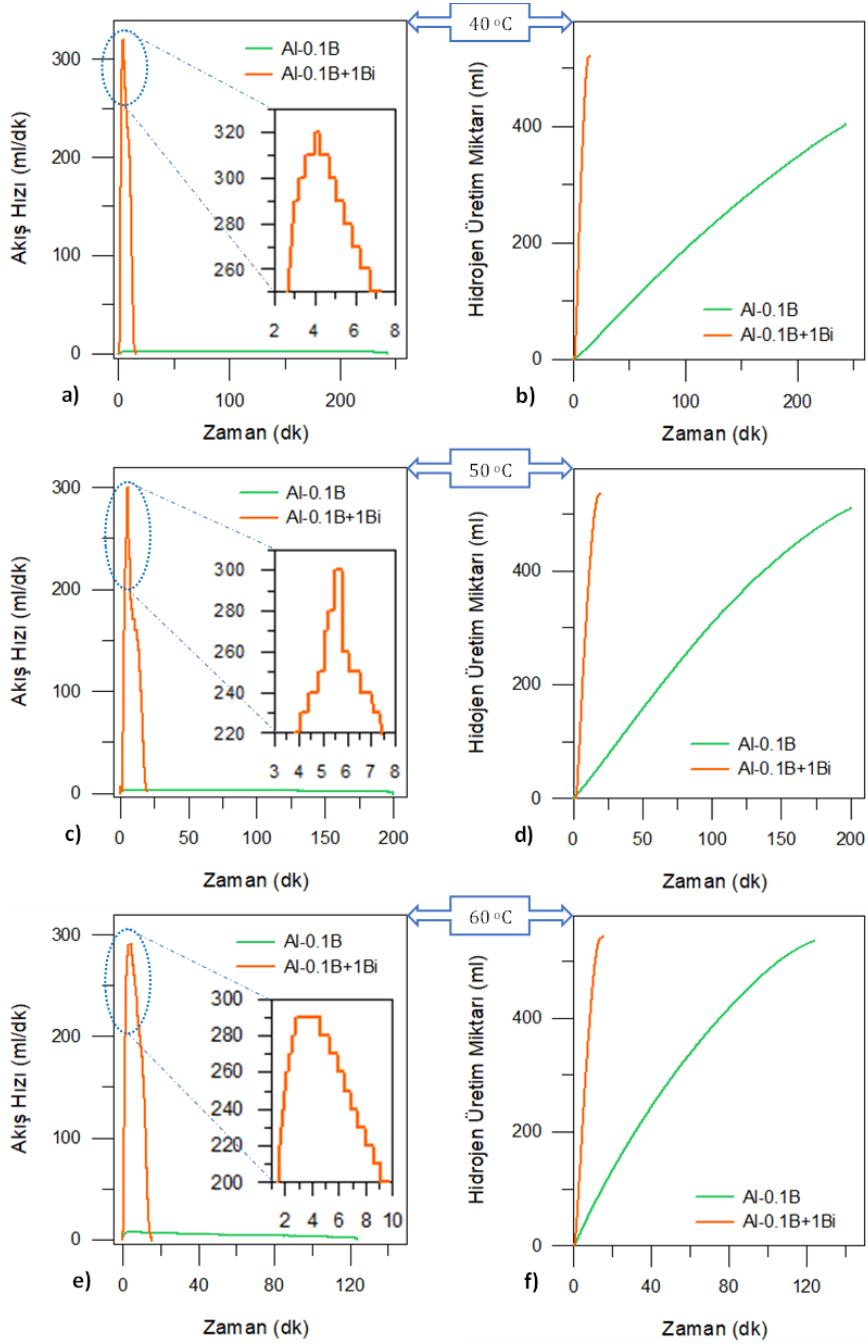
Hidrojen gaz ölçümleri gerçekleştirilen numunelerin korozyon sonrası yüzey yapılarının ve kimyasal bileşimlerinin saptanabilmesi için numuneler 40 °C'de yaklaşık 120 s boyunca 3M NaOH çözeltisinde korozyona uğratılmıştır. Korozyon sonrası numuneler ultra saf su ile temizlenerek kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin yüzey yapılarını gözlemek ve kimyasal bileşimlerini tespit etmek için FE-SEM (Zeiss Gemini 500) ve FE-SEM-EDX (EDAX Inc.) analizleri gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

3.1. Alaşımların Hidrojen Üretim Performansı

Al-ağ.%0.1B ikili ve Al-ağ.%0.1B+ağ.%1Bi üçlü alaşımlarının hidrojen üretim performansları 3M NaOH alkali çözelti içerisinde araştırılmıştır. Hazırlanan alaşım numunelerinin kalınlıkları 1.8 ± 0.01 mm, çapları 10 ± 0.01 mm ve yüzey alanları 2.135 ± 0.04 cm² olacak şekilde hazırlanmıştır. 3M NaOH sulu çözelti içerisindeki deneyler 40 °C, 50 °C ve 60 °C olacak şekilde 3 farklı ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her iki alaşıma ait zamana bağlı hidrojen akış hızı ve üretilen toplam hidrojen miktarları Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Alaşım numunelerinin a) 40 °C, c) 50 °C ve e) 60 °C’deki hidrojen akış hızı grafikleri, b) 40 °C, d) 50 °C ve f) 60 °C’deki üretilen hidrojen miktarı grafikleri

Şekil 2.1a, c ve e’de görüleceği üzere artan sıcaklık değerleri ile Al-B ikili alaşımının akış hızı değerleri sıcaklık artışı ile doğru orantılı olarak artmış ve sırasıyla 40 °C, 50 °C ve 60 °C sıcaklık değerleri için maksimum 2.07 ml/dk-3.35 ml/dk ve 7.51 ml/dk olarak elde edilmiştir. Burada görüldüğü üzere 40 °C sıcaklık değerinden 60 °C sıcaklık değerine çıkıldığında hidrojen akış hızı değeri 3.63 kat artmıştır. Aynı zamanda 40 °C sıcaklık değerinde yaklaşık 250 dk süren reaksiyon 60 °C sıcaklık değerine gelindiğinde yaklaşık 120 dk sürerek reaksiyon süresi neredeyse yarı yarıya kısalmıştır. Üçlü Al-B+Bi alaşımında ise Bi katkılananın Al-B ikili alaşımına göre akış hızında ve reaksiyon süresinde şaşırtıcı etkisi yine aynı grafiklerden görülmektedir. Üçlü alaşımda en yüksek akış hızı ve en kısa reaksiyon süresi 40 °C sıcaklık değeri için sırası ile 320 ml/dk ve 15.3 dk olarak elde edilmiştir. Bu değer 40 °C sıcaklık değerinde ikili Al-B alaşımına göre en yüksek akış hızında yaklaşık 155 kat artış ve reaksiyon süresinde ise yaklaşık 16 kat bir azalma sağlamıştır. Al-Bi alaşımlarda Bi elementinin reaksiyonu hızlandırıcı etkisi, Al-Bi nano boyutlu galvanik hücrelerin çözelti içerisinde hidroliz reaksiyonu esnasında yapı içerisinde oluşumu ve aktif yüzey alanındaki artış gibi nedenlerden kaynaklandığı literatürde yer almaktadır [15]. Bi katkısının sıcaklık artışı ile maksimum akış hızında azalmaya, hidrojen üretim miktarında ve reaksiyon süresinde ise artmaya sebep olduğu görülmektedir. Şekil 2.1 b, d ve f’de ise sırasıyla 40 °C, 50 °C ve 60 °C sıcaklık değerleri için zamana bağlı olarak her iki alaşıma ait üretilen toplam hidrojen miktarları görülmektedir. Her üç sıcaklık değerinde gerçekleşen reaksiyon sonuçlarına göre üçlü Al-B+Bi alaşımından üretilen toplam hidrojen miktarı hemen değişmemekle birlikte reaksiyon süresi sıcaklık artışı ile artmaktadır. İkili Al-B alaşımında ise 40 °C sıcaklık değeri için üretilen toplam hidrojen gazı miktarı 402.2 ml elde edilmişken 60 °C sıcaklık değerinde bu miktar 535 ml değerinde elde edilmiştir. Muhtemelen bu artış akış ölçerinin ölçüm sınırları ile ilgilidir. 40 °C sıcaklık değerinde hidrojen akış hızı zamanla oldukça yavaşlamaktadır ve bu akış hızı değerleri akış ölçerinin ölçüm sınırlarının (1 ml/dk-50 ml/dk) altına düştüğünden dolayı ölçülememektedir. Ancak 60 °C sıcaklık değerinde daha yüksek akış hızı elde edildiği için ölçülebilen toplam hidrojen miktarı daha fazla olmaktadır.

Elde edilen deneysel sonuçlardan her iki alaşıma ait GSO (Gaz Salınım Oranı), KO (Korozyon Oranı) ve MAH (Maksimum Akış Hızı) hesaplamaları yapılmıştır. Tablo. 2.1’ den görüldüğü üzere en yüksek GSO, KO ve MAH değerleri 40 °C sıcaklıkta üçlü Al-B+Bi alaşımından elde edilmiştir. 40 °C sıcaklık değerinde ikili alaşımda elde edilen KO değeri 0.53 ml/dkcm² iken Bi katkısı bu değeri 46.11 ml/dkcm² değerine çıkartıp korozyon oranında çok büyük bir artış sağlamıştır. Al-B ikili alaşımında ise en yüksek GSO, KO ve MAH değerleri 60 °C sıcaklık değerinde elde edilmiştir. Saf alüminyuma çok düşük oranda katkılanan (ağ.%0.1) B elementinin saf alüminyuma göre pozitif etkisi, Tablo 2.1’de verilen saf Al için 4M NaOH çözeltisinde 50 °C ve 60 °C sıcaklık değerlerinde elde edilmiş GSO ve MAH değerleri ile karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir [7]. Tablo 2.1’de görüldüğü gibi 50 °C ve 60 °C sıcaklık değerlerinde saf Al için GSO değerleri sırası ile 0.91 ml/dkcm² ve 1.68 ml/dkcm² olarak elde edilmişken bu çalışmada Al-B ikili alaşımı için GSO değerleri sırası ile 1.19 ml/dkcm² ve 2 ml/dkcm² olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde 50 °C ve 60 °C sıcaklık değerlerinde saf Al için elde edilen MAH değerleri sırası ile 2.27 ml/dk ve 4.03 ml/dk iken bu çalışmada Al-B ikili alaşımı için sırası ile 2.27 ml/dk ve 4.03 ml/dk şeklinde elde edilmiştir.

Tablo 2.1. Alaşım numunelerinin farklı sıcaklık değerleri için elde edilen gaz salınım oranları, korozyon oranları ve maksimum akış hızları ve bu değerlerin literatür ile kıyaslanması.

Alaşım	Çözelti Türü (NaOH)	Gaz Salınım Oranı (ml/dkcm ²)			Korozyon Oranı (mg/dkcm ²)			Maksimum Akış Hızı (ml/dk)		
		40 °C	50 °C	60 °C	40 °C	50 °C	60 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Saf Al	4M	-	0.91[7]	1.68[7]	-	-	-	-	2.27[7]	4.03[7]
Al-0.1B	3M	0.77	1.19	2	0.53	0.82	1.39	1.65	2.54	4.27
Al-0.1B+1Bi		63.58	57.87	53.45	46.11	40.53	37.58	135.75	123.55	114.13

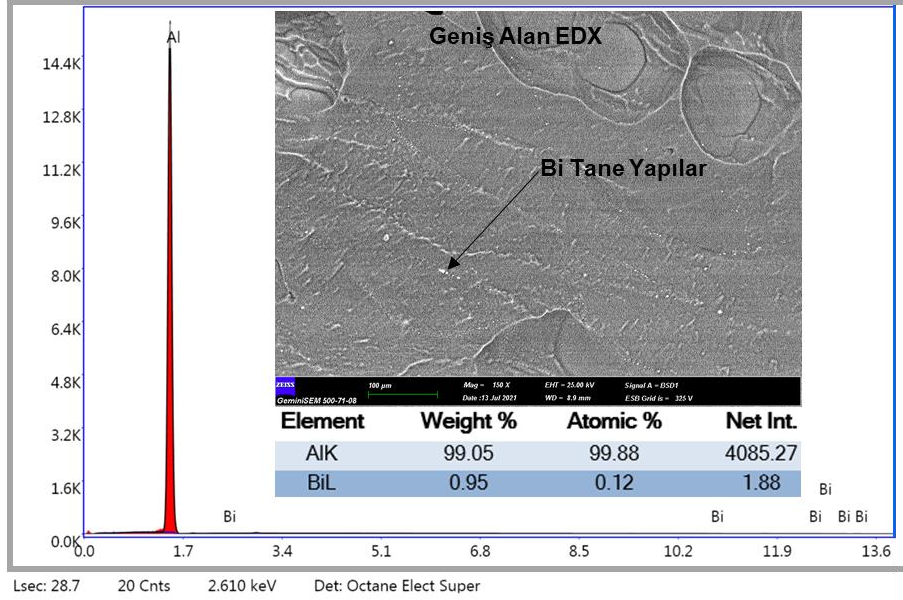
Al-0.1B alaşımına Bi katkılananın her üç sıcaklık değerinde de GSO ve KO’daki artışa etkileri muhtemelen hidroliz reaksiyonu esnasında yapı içerisinde Al-Bi galvanik hücrelerin oluşumu ve hidroliz esnasında aktif yüzey alanındaki artışlardan kaynaklanmış olabilir [15].

3.2. Alaşımların Yüzey Analizleri

Korozyon sonrası yüzeyin yapısı ve kimyasal analizi için Al-ağ.%0.1B+ağ.%1Bi üçlü alaşımı 180 s süresince 3M NaOH sulu çözeltisinde 40 °C sıcaklık değerinde korozyona uğratılmıştır. Yüzey görüntüsü 150 kat büyütülerek FE-SEM cihazıyla alınmıştır. Ayrıca FE-SEM-EDX analizleri de gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1’de Al-0.1B+1Bi üçlü alaşımına ait yüzey görüntüsü, elementel analiz sonuçları ve pik şiddetlerinin dağılımını gösteren grafik yer almaktadır.

FE-SEM görüntüsü incelendiğinde Bi tane yapıları (beyaz renkli) Al matris içerisinde gözlenmektedir. Ayrıca Bi tanelerinin yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilediği gözlenmektedir. Geniş alan EDX analiz sonucuna göre

ağ.%0.95Bi tespit edilmiştir ve bu sonuç alaşımdaki deneysel Bi bileşimini yaklaşık olarak doğrulamaktadır. Fakat eser miktarda B elementi katkılı olduğu ve B elementinin atomik boyutunun oldukça küçük olduğu için FE-SEM-EDX analizinde B piki gözlenmemiştir. Bu durum muhtemelen B pik şiddetinin diğer elementler ile karşılaştırıldığında çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca numune yüzeyinde derin korozyon oyukları gözlemlenmemiştir. Genel olarak numunenin yüzeyi homojen bir şekilde korozyona uğramıştır. Ancak Bi tanelerinin çevresinde yüzey hafif derinleşerek taneler belirgin hale gelmiştir. Bu durum Bi tanelerinin muhtemelen numunenin aktif yüzey alanında ilave bir artış sağladığını düşündürmektedir. Bu analiz sonuçları üçlü alaşımın akış hızının yüksek olmasını destekler niteliktedir.



Şekil 2.1. Al-ağ.%0.1B+ağ.%1Bi alaşımına ait FE-SEM görüntüsü ve FE-SEM-EDX analiz sonuçları

4. Tartışma ve Sonuç

Vakum indüksiyon fırını içerisinde döküm yöntemi ile üretilen ikili Al-B ve üçlü Al-B+Bi alaşımlarının hidrojen üretim performansları 3M NaOH alkali çözelti içerisinde farklı sıcaklık değerleri için incelenmiştir. Öncelikle ikili Al-B alaşımında B katkısının hidrojen üretim performansına (GSO ve MAH değerlerine) etkisi literatürde neredeyse benzer şartlar altında elde edilmiş saf alüminyuma ait GSO ve MAH değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda B katkısının hidrojen üretim performansına olumlu etkisi açıkça görülmektedir. Sıcaklık artışı ile B katkılı ikili alaşımın hidrojen üretim performansları da beklenildiği gibi artmıştır. Bu artış hem akış hızı değerlerinde hem de hidrojen üretim miktarı değerlerinden görülmektedir.

İkili Al-B alaşımına Bi katkılamanın pozitif etkisi de elde edilen sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir. Al-B alaşımının 40 °C'de korozyon oranı 0.53 mg/dkcm² iken bu değer Bi katkısı ile 46.11 mg/dkcm² değerine çıkmış ve korozyon oranını çok yüksek bir oranda artırmıştır. Bu artış üç sıcaklık değeri için de yüksek bir oranda gerçekleşmiştir. Bu artışın nedenleri hidroliz reaksiyonu esnasında yapı içerisinde Al-Bi galvanik hücrelerin oluşumu ve hidroliz esnasında aktif yüzey alanındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Sıcaklık artışı ile hidrojen üretim miktarının yaklaşık 519 ml değerinden 542 ml değerine çıkması da sıcaklık artışı ile hidrojen üretim miktarının artabileceği gerçeğini göstermektedir.

Al-ağ.%0.1B ikili alaşımına ağ.%1Bi oranında katkı yapılarak yüksek akış hızı gerektiren hidrojen enerjisi uygulamalarında kullanılabilir alaşımlar oluşturulabilir. Sonuç olarak bu çalışmada Bi elementinin hidrojen üretim performansına olumlu katkısı görülmüş olup ileriki çalışmalarda daha geniş bir katkı aralığında performans değerlendirmesi için deneysel çalışmalar planlanmaktadır.

Kaynakça

- [1] H. Wang, Y. Chang, S. Dong, Z. Lei, Q. Zhu, P. Luo, Z. Xie, Investigation on hydrogen production using multicomponent aluminum alloys at mild conditions and its mechanism, International journal of hydrogen energy 38(3) (2013) 1236-1243.
- [2] W. Lattin, V.P. Utgikar, Transition to hydrogen economy in the United States: A 2006 status report, International Journal of Hydrogen Energy 32(15) (2007) 3230-3237.

- [3] H. Wang, D.Y. Leung, M. Leung, M. Ni, A review on hydrogen production using aluminum and aluminum alloys, *Renewable and sustainable energy reviews* 13(4) (2009) 845-853.
- [4] B. Tarasov, V. Burnasheva, M. Lototskiy, V. Yartys, Methods for hydrogen storage and metallic hydrides application, *Int Sci J Alternative Energy Ecol ISJAEE* 12(32) (2005) 14-37.
- [5] M.F. Kaya, O. Kahveci, H. Erol, A. Akkaya, Effect of low B addition on Al-Zn alloy's hydrogen production performance, *international journal of hydrogen energy* 46(29) (2021) 15192-15202.
- [6] L. Schlapbach, A. Züttel, Hydrogen-storage materials for mobile applications, *Materials for sustainable energy: a collection of peer-reviewed research and review articles from nature publishing group*, World Scientific 2011, pp. 265-270.
- [7] O. Kahveci, Antimony and boron support to aluminum's hydrolysis performance and an application of PEM fuel cell, *Fuel* 324 (2022) 124782.
- [8] M.q. Fan, L.x. Sun, F. Xu, Experiment assessment of hydrogen production from activated aluminum alloys in portable generator for fuel cell applications, *Energy* 35(7) (2010) 2922-2926.
- [9] L. Soler, J. Macanás, M. Munoz, J. Casado, Aluminum and aluminum alloys as sources of hydrogen for fuel cell applications, *Journal of power sources* 169(1) (2007) 144-149.
- [10] T. Huang, Q. Gao, D. Liu, S. Xu, C. Guo, J. Zou, C. Wei, Preparation of Al-Ga-In-Sn-Bi quinary alloy and its hydrogen production via water splitting, *international journal of hydrogen energy* 40(5) (2015) 2354-2362.
- [11] M.-q. Fan, L.-x. Sun, F. Xu, Study of the controllable reactivity of aluminum alloys and their promising application for hydrogen generation, *Energy Conversion and Management* 51(3) (2010) 594-599.
- [12] Y. Liu, J.c. An, W.z. Jin, J. Cui, W. Zhang, Insight into the effect of In addition on hydrogen generation behavior and hydrolysis mechanism of Al-based ternary alloys in distilled water—A new active Al-Ga-In hydrolysis hydrogen generation alloy, *International Journal of Energy Research* 43(15) (2019) 8973-8984.
- [13] D. Qiao, Y. Lu, Z. Tang, X. Fan, T. Wang, T. Li, P.K. Liaw, The superior hydrogen-generation performance of multi-component Al alloys by the hydrolysis reaction, *International Journal of Hydrogen Energy* 44(7) (2019) 3527-3537.
- [14] T. He, W. Chen, W. Wang, S. Du, S. Deng, Microstructure and hydrogen production of the rapidly solidified Al-Mg-Ga-In-Sn alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 827 (2020) 154290.
- [15] F. Zhang, K. Edalati, M. Arita, Z. Horita, Fast hydrolysis and hydrogen generation on Al-Bi alloys and Al-Bi-C composites synthesized by high-pressure torsion, *International Journal of Hydrogen Energy* 42(49) (2017) 29121-29130.
- [16] M.-Q. Fan, F. Xu, L.-X. Sun, Hydrogen generation by hydrolysis reaction of ball-milled Al- Bi alloys, *Energy & fuels* 21(4) (2007) 2294-2298.
- [17] Y. Liu, X. Liu, X. Chen, S. Yang, C. Wang, Hydrogen generation from hydrolysis of activated Al-Bi, Al-Sn powders prepared by gas atomization method, *International Journal of Hydrogen Energy* 42(16) (2017) 10943-10951.
- [18] T. Wang, F. Xu, L. Sun, L. Miao, L. Liao, S. Wei, Q. Yin, K. Zhang, Y. Li, Y. Wu, Improved performance of hydrogen generation for Al-Bi-CNTs composite by spark plasma sintering, *Journal of Alloys and Compounds* 860 (2021) 157925.
- [19] X. Liu, P. Zhang, J. Xue, C. Zhu, X. Li, Z. Wang, High energy efficiency of Al-based anodes for Al-air battery by simultaneous addition of Mn and Sb, *Chemical Engineering Journal* 417 (2021) 128006.
- [20] A. Parmuzina, O. Kravchenko, Activation of aluminium metal to evolve hydrogen from water, *International Journal of Hydrogen Energy* 33(12) (2008) 3073-3076.
- [21] F. Zhang, K. Edalati, M. Arita, Z. Horita, Hydrolytic hydrogen production on Al-Sn-Zn alloys processed by high-pressure torsion, *Materials* 11(7) (2018) 1209.
- [22] O. Kahveci, M.F. Kaya, Hydrogen production from Al-Cu alloy using electric vehicle's waste DC motor coils, *International Journal of Hydrogen Energy* 47(24) (2022) 12179-12188.
- [23] H.-S. Yoo, H.-Y. Ryu, S.-S. Cho, M.-H. Han, K.-S. Bae, J.-H. Lee, Effect of Si content on H₂ production using Al-Si alloy powders, *International journal of hydrogen energy* 36(23) (2011) 15111-15118.
- [24] H. Hu, M. Qiao, Y. Pei, K. Fan, H. Li, B. Zong, X. Zhang, Kinetics of hydrogen evolution in alkali leaching of rapidly quenched Ni-Al alloy, *Applied Catalysis A: General* 252(1) (2003) 173-183.

Correction and Compensation of Thermally-Induced Errors in CNC Milling via Integrated CAD / CAM and Finite Element Analysis for AL 7075(T6)

Saban Murat UNLU^{1*}, Eyup Sabri TOPAL², Omer Faruk ERGIN¹, Mustafa GUL¹

¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, KAYSERİ

² Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, ANTALYA

(Alınış / Received: 19.08.2022, Kabul / Accepted: 02.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Milling, Thermal Error
Compensation, Finite Element
Analysis(FEA), Computer Aided
Design (CAD)/ Computer Aided
Manufacturing (CAM)

Abstract: In this study, examining and correction thermal expansion induced errors on CNC milling machine is aimed. In this scope, workpiece thermal expansion attitude will be analysed with finite elements method on the CAD Model, and workpiece will be revised according to the results of analysis. For revision process, an interface software is developed, making a relation between computer aided analysis modul and CAD modul. Thanks to CAM process implemented on new CAD Model, a CNC part program that will correct the error is created. The reproducibility of the performance of the correction process was investigated by processing identical samples at different manufacturing environment temperatures. As a result of studies machining errors reduced with a success rate of 84% for Al 7075(T6). By the method developed, the workpiece's dimensional error which thermally induced can be minimized at any temperature without using climatized to ideal temperature and isolated machining shops.

AL 7075(T6) Malzemenin CNC Frezeleme İşleminde Oluşan Isıl Hataların CAD/CAM ve Sonlu Elemanlar Analizi ile Düzeltilerek İyileştirilmesi

Anahtar Kelimeler

Frezeleme, Isıl Hata
İndirgeme, Sonlu Eleman
Analizi(FEA), Bilgisayar
Destekli Tasarım(CAD),
Bilgisayar Destekli İmalat
(CAM)

Öz: Bu çalışmada CNC frezeleme işleminde ısıl değişimlerden kaynaklanan işleme hatasının incelenmesi ve düzeltilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla iş parçası CAD modelinin ısıl genleşme/büzülme davranışı sonlu eleman analizi (SEA) yöntemiyle analiz edilmiş ve iş parçası CAD modeli bu analiz sonuçlarına göre "imalat ortamı hangi sıcaklıkta olursa olsun işparçası tam boyutlarında işlenecek şekilde" revize edilmiştir. Revizyon işlemi için bilgisayar destekli analiz modülü ile CAD modülünü entegre eden yeni bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım ile ısıl analiz sonuçları dikkate alınarak işparçası CAD modeli yeniden yapılandırılmıştır. Revize edilmiş yeni CAD modeli üzerinde gerçekleştirilen CAM uygulaması ile hatayı düzeltecek alternatif CNC işleme kodları elde edilmiştir. Özdeş numuneler farklı imalat ortamı sıcaklıklarında işlenerek düzeltme stratejisinin performansının tekrarlanabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda Al 7075(T6) malzeme için %84 oranında başarı ile işleme hataları indirgenmiştir. Geliştirilen yöntemle talaşlı imalat sektöründe yüksek boyutsal kalitede parça üretebilmek için halen kullanılmakta olan, ortamın sürekli ideal sıcaklıkta (22°C) kalması için klimatize edilmiş ve yalıtılmış atölyeler oluşturulmasına ihtiyaç kalmayacaktır. İmalat ortamları hangi sıcaklıkta bulunursa bulunsun yüksek boyutsal tamlıkta ürünlerin üretimi ek maliyetlere katlanmaksızın mümkün olacaktır.

*Corresponding Author, email: smunlu@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Machining has an essential place among production techniques. The machining technique is used for the finished products, such as rolling and casting products which are brought into full production or brought to their final dimensions. Commonly used machining methods are milling, turning, grinding, drilling, and planing machine operations. Computerized Numerical Control (CNC) machine tools have been widely used in many industries including molding, automotive, marine, aviation, biomechanical systems, defense, and space industry since it increases the production speed and reduces the production costs. The CNC milling process has attracted researchers due to its common usage. Tolerances and production speed are related to each other. Therefore, it is very crucial to understand the relationship between these factors on product quality, production speed, and productiveness.

In modern manufacturing conditions, lowering production costs and developing methods in order to increase the dimensional accuracy of the workpiece are related to the machine tool errors [1]. The machine tool errors can be classified as geometric errors, kinematic errors, dynamic errors, and thermal errors. The machine components lead to the geometric errors. The relative movement of the machine components and mechanical or inertia moment of the components of the machine may cause the kinematic and dynamic errors [2]. Thermal errors occur because of deformation and expansion caused by the relative movement of the tool and the workpiece. There are several methods used to increase machining precision and quality. Using high precision machining is a successful way of high-quality machining but the main disadvantage of this method is to increase production costs. There are some techniques such as a quality control to fix the errors on the continuous measurement. This process is also an expensive way of production due to the processing time, raw material usage, and tool costs. Therefore, the error compensation methods (ECM) are used to minimize the manufacturing errors arising from the structure of the machine tool, processing conditions, and temperature differences [3].

Thermal errors, one of the most important sources of processing errors, make up 40% - 70% of the total error [4-6]. In recent years, researchers have resorted to optimization methods, thermally optimized structures to minimize thermal effects, place heat sources separately from the system, and use improved cooling techniques [7]. Three ways are used to improve the thermal performance of the machine tool; firstly, the structural improvement for the thermal characteristic is to be made. In their process, symmetric constructions with simple coefficients of thermal expansion must be constructed, and complex structures must be avoided [8]. The second is temperature control. By controlling the temperature values and distributions of specific points, the resulting thermal deformation of the working shaft is reduced. Temperature control can be done by installing a heating or cooling system on the machine bench. Both systems reduce the thermal deformation in the intended machine tool and compensate for the temperature distribution. A common method is to remove the heat generated by the spindle and the various coolants. The third is the modelling and compensation processes of thermal deformation. This method is used to increase machine accuracy during machining after completion of machine tool design and production. In the initial stage, the temperature distribution and thermal deformations of the machine tool are obtained by forming mathematical methods and thermal deformation model from experimental studies.

There are six sources of thermal effects: These are the heat released as a result of the cutting operation, the heat generated by the machine, cooling and warming caused by the cooling system, changes in ambient temperature, human interaction, the temperature of the previous process so all these effects described above make it difficult to achieve a perfect error model [3, 6]. Due to the non-homogeneous temperature distribution in the machine structure, thermal errors show a time-dependent nonlinear characteristic. The interaction between the location, intensity, thermal expansion coefficient of the heat source and the configuration of the machine system causes a complex thermal behavior to occur [9]. The most critical factor affecting the processing accuracy is the cutting operation. The accuracy is affected by the chip depth. While heat production is low in finishing operations, intensive heat production takes place as a result of course processing. This factor is more effective when the high volume of the chip is removed than any other heat generating source. To solve the problem, the use of coolant in high volume chip removal should be increased. Recently, high-speed machining and grinding techniques have been used to remove chips by transferring chips instead of heat. One of the methods used to solve thermal error problems is to use temperature-controlled chambers. However, keeping the temperature constant with this method is both challenging and costly [9].

In modern manufacturing conditions, lowering production costs and developing methods in order to increase the dimensional accuracy of the workpiece have great prospects. The various factors are geometrical and dimensional errors, tool deformation and workpiece errors, thermal distortions, tool wear, and tool errors. Two main approaches to improve workpiece metrology are used; modelling of workpiece-tool movements and interpolation of the cutting tool position to reduce dimensional errors or alternative tool path generation approach [1]. The limited amount of improvements in these methods has significantly increased production costs. Therefore, the

error compensation technique at low cost is of great importance in increasing the processing accuracy of CNC [7]. The math model dependent error compensation software is widely used. Although mathematical model seems successful, it may not be practical for every machining requirement. In other words, it is very difficult to construct a high-accuracy mathematical model that overcomes the deficiencies of thermal error correction techniques commonly used with these methods [3].

There are two limiting factors in error compensation operations; first, the thermal error model cannot provide sufficient accuracy between temperature changes. The correctness of the generated thermal error model is affected if high values of temperature changes are detected. These values must be eliminated. Significant temperature changes may also be perceived incorrectly. Second, non-linear thermal deformations arise in a continuously working machine tool, depending on the time, as processing conditions and environmental effects vary. This mechanism makes machine tool deformations very complex and therefore, makes it difficult to predict thermal source errors. As a result, the thermal improvement model is successful with the best indication of the relationship between key temperature changes and thermal imperfections, which vary according to the location of the heat source (such as motors, bearings, hydraulic system, ambient temperature) [10, 11]. Even though there are two thermal error modes as expansion and bending, the presence of many different structural elements in the machine tool and the different behaviors of these elements make it difficult to determine the thermal error mode of the system. The most important problems encountered in thermal error compensation processes are; the detection of the optimal temperature sensor position and the change in processing conditions can protect the accuracy of the resulting thermal error model [12].

In error compensation exercises, the shifts in the components of the machine tool are mostly examined. Factors affecting the accuracy of this process are the measurement of all relevant geometric error parameters, taking into account the working time, taking precise measurements sufficiently, the effect of temperature changes taking place within a short period [13].

Many researchers are mostly concentrated on real-time correction techniques because of the complexity of the processing conditions. Real-time measurement and instant real-time correction (or compensation) must be carried out for the detailed modelling of system behavior by the modification of G codes [14]. Most research including error compensation methods has not yet gone beyond the laboratory conditions since they require expensive hardware/software and the difficulty in adapting the methods to machine tool operating systems [15]. The disadvantage of real-time (direct) error compensation systems is the difficulty of taking and evaluating fast and frequent measurements to catch sudden temperature changes. Delay in intervention to the system reduces the accuracy of follow-up and correction of errors [16].

The existence and the continuous increase of many different types of CNC, with developing technology has resulted in a large number of error models, and consequently, the error compensation processes are complex and costly [17]. Alternatively, the climatization method reduces the influence of thermal errors to keep the environment at 22°C continuously by using various heating/cooling equipment such as air conditioning [16]. The climatization processes face with difficulties when a sudden increase occurs in temperature for cutting forces, machine tool, and components. Jianguo et al. [18] conducted thermal error compensation studies by using the CNC package optimization model to detect temperature-sensitive points in the error model by dividing the temperatures into two changing temperatures. The interactions of the errors during processing (heat source, thermal expansion coefficient, the shape of the machine's system, and changing ambient conditions) complicate machining process, which makes it challenging to estimate errors with mathematical models [19]. Zhang et al. [20] developed a simulation model of the vertical machining center by obtaining the temperature map and thermal deformation model of the machine tool to increase the accuracy of the machine tools by thermal simulation. After comparing the simulation and the experimental results, the validity of the finite element model has been proven. Wang et al. [5] examined the reduction of the geometrical and thermal errors on different types of workpieces. They also experimentally investigated the positioning errors in the three-axis machining center under different temperatures by means of Newton's interpolation method. Eksandrai et al. [14] investigated thermal errors by using linear regression, Artificial Neural Network (ANN), and Fuzzy Logic methods. In order to reduce the thermal error, the required data were obtained via laser interferometer. They calculated volumetric errors by considering rigid body kinematics and modification of G codes. They observed that the thermal errors were reduced by 41% on the workpieces. Miao et al. [21] identified the critical thermal points and measured the thermal errors in the z-direction of the workpiece. The critical thermal points were determined by employing the Fuzzy Logic and Gray Correlation methods. They experimentally measured the thermal errors at the critical thermal points at different ambient temperature and spindle speed. Ma et al. [22] minimized the thermal error of linear axis with fixed-fixed installation. They formulated the thermal error by considering the temperature of screw shaft and a trigonometric function with horizontal position as its independent variable. Based on their results, they were able to reduce the

repetitive positioning error by more than 45%. Fu et al.[23] proposed one K-means clustering and correlation analysis-based selection method to acquire the optimal temperature-sensitive point combination for thermal error modeling of machine tool spindle with the effects of different heat sources. They demonstrated that the prediction performance and the robustness of the thermal error model can be improved with in the consideration of the optimal temperature-sensitive point combination.

Despite many different points of view in error compensation operations, the work is usually designed for specific working conditions. Practical mathematical expressions are difficult to achieve in high-precision machining conditions [5]. The internal and external heating/cooling sources on the machine tool and the elements that make up the machine structure have different thermal expansion coefficients, causing thermal distortions [24]. The underlying reason for the difficulty in thermal error compensation is that thermal errors are complex and not linear [25]. In the offline model, which is commonly used in thermal error compensation processes, the relationship between thermal deformation and several experimental temperatures is considered. It exhibits substantial differences in thermal deformation due to temperature distribution and changing processing conditions. Being able to create a correct and robust thermal error forecasting model is the most crucial part of the compensation system [26]. Therefore, these errors should be modelled and reduced accordingly. Geometrical and positional errors are often modelled by kinematic modelling and transformation matrix methods, but modelling thermal errors is difficult [14]. The dimensional accuracy of a processed part depends on the accuracy of the machine tool that processes it. No matter how new a machine tool is, it does not guarantee that dimensional accuracy can be achieved over long runs. Positioning errors are dynamically dependent on factors such as operating conditions, cutting forces, ambient temperature, tool wear, record carrier wear, vibration. The extension of the processing time is changing these factors, and it is difficult to control the processing operations [27]. Establishing a correct mathematical model for the theoretical analyzes made to create the thermal error model in the CNC machine is very difficult because the factors in processing are in excess and continuous change. The thermal expansion coefficient of the machine elements and workpiece must be well known to reduce the thermal errors due to the ambient temperature. Choosing an appropriate measuring system for the error source is important. From external factors, the ambient temperature of the workbench changes slowly but this change completely affects volumetric performance. The local deformations caused by the slides and beds in the workbench partially affect the volumetric performance. It is difficult to estimate displacements resulting from internal heat sources, and they change much more rapidly than environmental conditions [13]. In order to eliminate the aforementioned issues above, a new approach must be developed to minimize the temperature change in the CNC milling process. In this study, it is aimed to improve the dimensional accuracy of the CNC milling process without using any additional equipment and decreasing the manufacturing speed. Also, the thermal expansion/contraction behaviour of the workpiece CAD model is analyzed by means of the finite element method (FEA). Moreover, the workpiece CAD model is modified based on the results acquired from the finite element analysis. Therefore, the manufacturing environment can be processed at a high precision of the workpiece at any temperature. A new software is developed to integrate the CAD module with the FEA module for the revision process. This software reconfigures the workpiece CAD model taking into account the thermal analysis results. The CAM application on the revised CAD model provides alternative CNC machining M-G codes to correct the error. Reproducibility performance of the compensation strategy is investigated by machining identical samples at different ambient temperatures. By using the recommended method, climatized and isolated workshops are not needed for a standard CNC machine to produce parts with high accuracy. Grinding and finishing operations are no longer required. Thus, the production speed is increased, and the production costs are reduced. The proposed method reduces dimensional errors depending on variable ambient temperature.

2. Material and Method

The total thermal expansion value at the work piece is calculated based on the temperature distribution along the beam as shown in Figure 1.

$$\Delta L = \int_0^L \alpha(\Delta T) dx \quad (1)$$

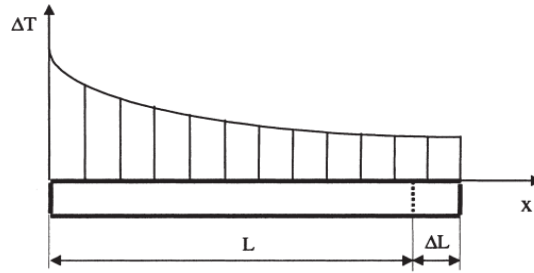


Figure 1. Thermal extension mode of a beam [12]

Air-conditioned (climatized) production environments are used to bring the operating temperature to the ideal temperature. As a result, the workpiece is manufactured which is larger or smaller than the required dimensions. In this work, an approach has been developed in the error correction method to ensure that the manufactured workpiece is at full dimensions regardless of the manufacturing ambient temperature. The first step is the thermal expansion/shrinkage analysis to be performed on the CAD model of the workpiece by the finite element analysis (FEA). This analysis determine whether the workpiece exhibits expansion or contraction behavior under the current temperature conditions in the environment. In the second stage, the CAD model of the workpiece is revised according to the FEA results. This revision is arranged on the new CAD model in a way that ensures that the workpiece is at the ideal temperature and in the desired dimensions at the end of the CAM application. Figure 2 shows the flowchart for the error correction method. FEA is performed at eight different ambient temperatures, except for the ideal temperature. FEA analysis is carried out by using ANSYS software, and the new workpiece model is obtained after the analysis. The new workpiece achieved from the FEA is converted into a solid model in the form of a point cloud with the help of Solidworks CAD program.

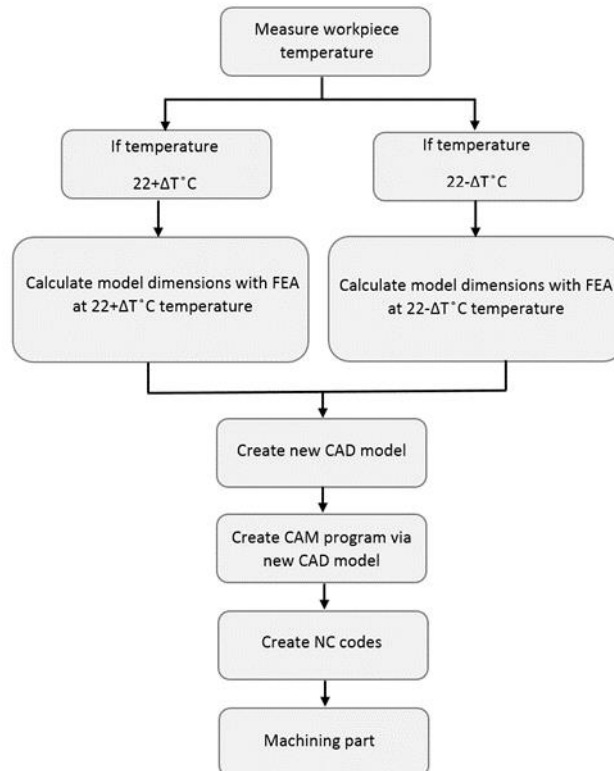


Figure 2. Error correction method

2.1. Finite Element Method (FEM)

The displacement fields of the workpiece are determined by using ANSYS, commercially available FE software. The workpiece is modelled by using a three dimensional 20-node SOLID 186 element (Fig. 3.)

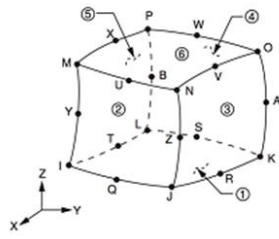


Figure 3. Element type SOLID186 used in FEM analyzes.

The geometrical description and finite element model of the workpiece are presented in Figures 4. and 5. The workpiece is fixed along its left edge while the remaining edges are free of traction. The entire part of the workpiece is subjected to a uniform temperature of varying from 2 to 42 °C. A smooth mesh structure was obtained for the model part. The model is divided into 28 elements in the X direction, 15 elements in the Z direction and 18 elements in the Y direction. Figure 5 shows the FE model of the workpiece which is constructed based on the convergence studies. Thus, the FE model of the work piece consists of 12,450 elements and 52,178 nodes.

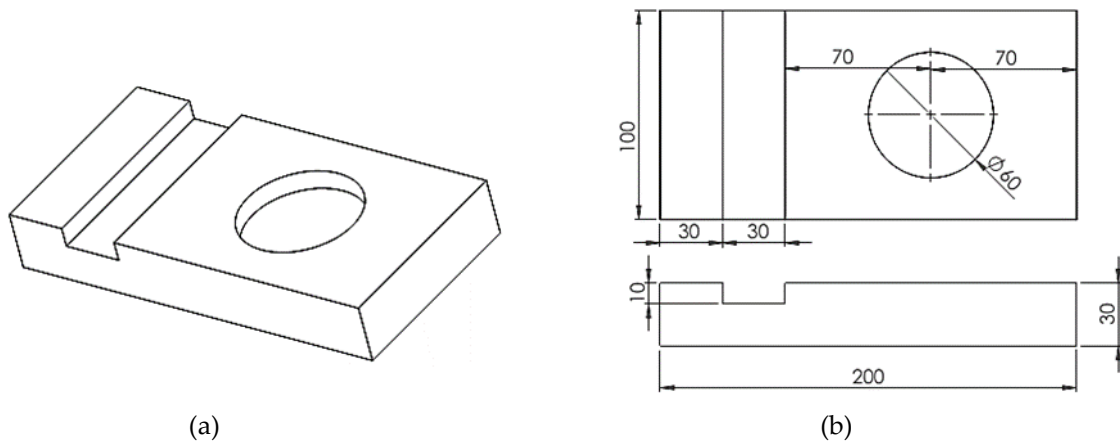


Figure 4. Model Part dimensions (a) full model (b)side and top view

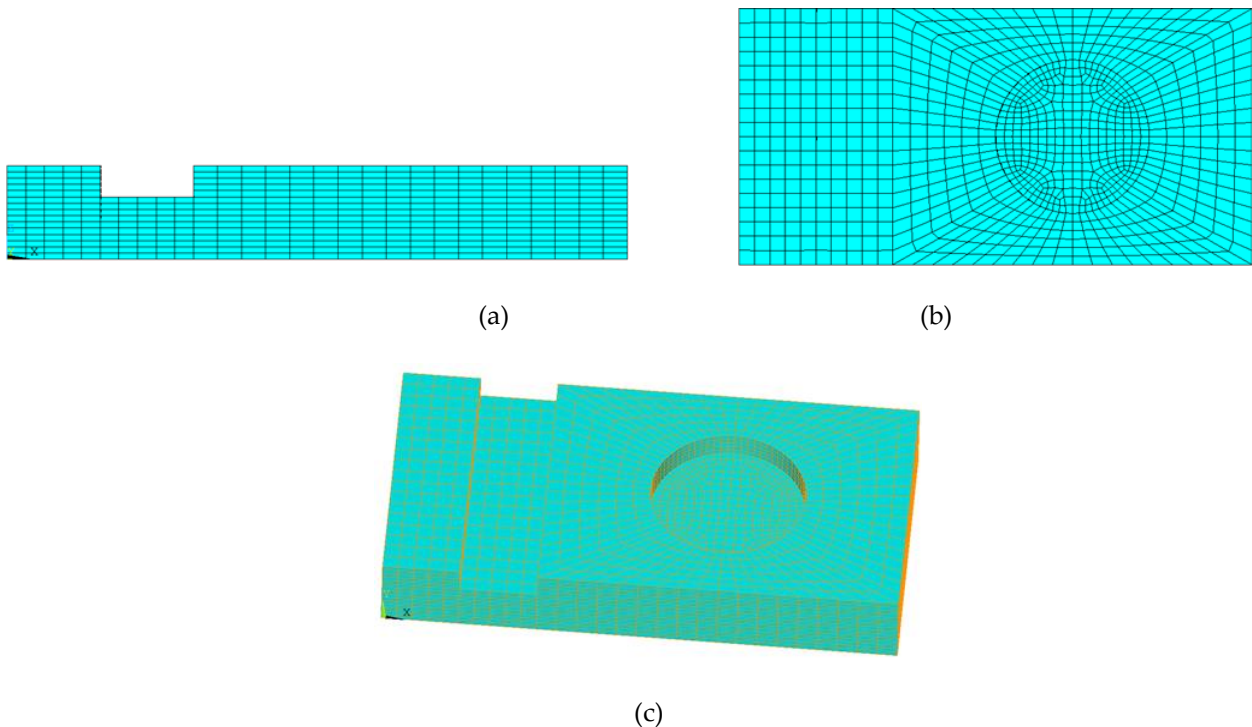


Figure 5. Model part mesh structure (a) side-view (b) top-view and (c) full model

2.2. The transition of Solid Model from Finite Element Analysis

The results of the thermal expansion/shrinkage deformation of the test sample deformed by the heat effect at the end of the thermal analyzes made in the ANSYS which are shown in Figure 6. The process to be performed after this step is to transfer the results of the finite element analysis to solid or shell models to produce CAM codes. This part establishes the most difficult phase of the developed method. For this reason, none of the commonly used analysis programs (ANSYS, ABAQUS, etc.) can output in the format of dwg, prt, sldprt as the analysis result. This problem has been solved using the Solidworks package program Scan to 3D and Prep Mesh Wizard. The thermal analysis results from the ANSYS program were obtained as nodal points (point cloud) in the form of "igs" (Figure 6).

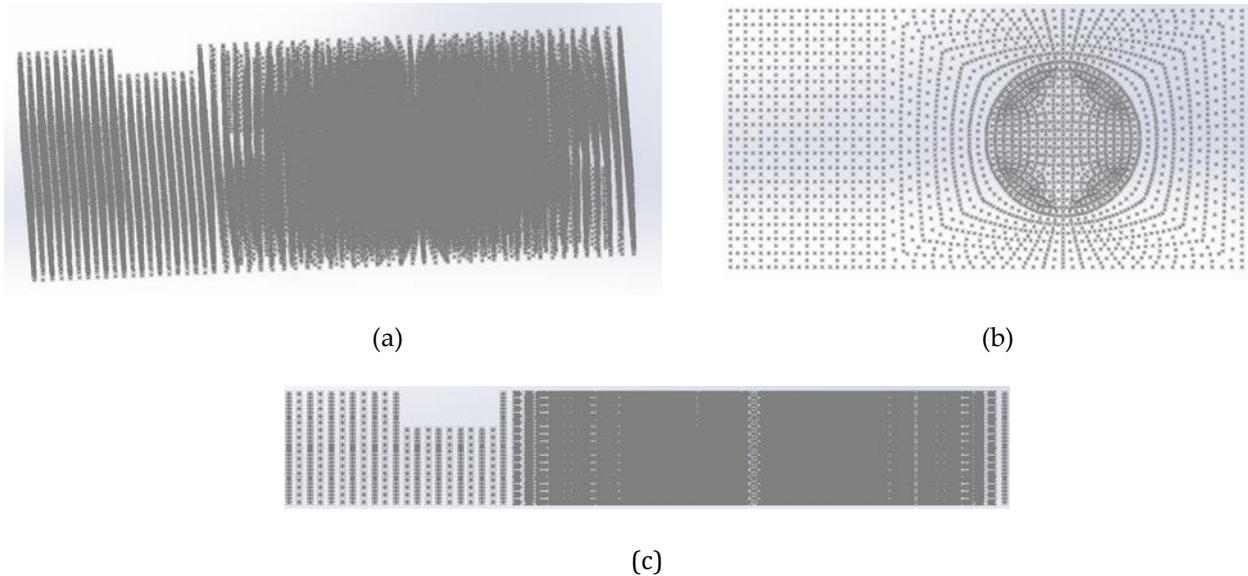


Figure 6. Temperature output of nodal point in igs format

It is crucial that there is no loss of data while switching to a solid model regarding error compensation in micron levels. While solid model programs cover node points, they form a shell by combining a node point with its closest neighbour. This method gives inaccurate results when working with the importance of dimensional accuracy. The problem mentioned in this study was solved by manually selecting the interior of the point cloud set (Figure 7.)

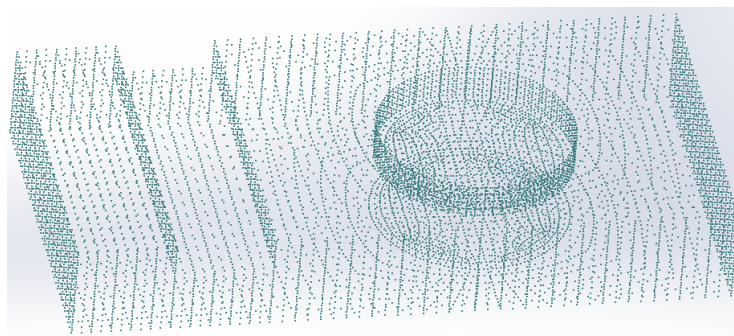


Figure 7. Obtained shell point cloud from the node points

In the next step, the final solid model is obtained without losing data by knitting through the obtained shell point cloud surfaces (Figure 8.). With the help of CAM session performed on this final solid model, the CNC part program to process the part in its full dimensions is obtained.

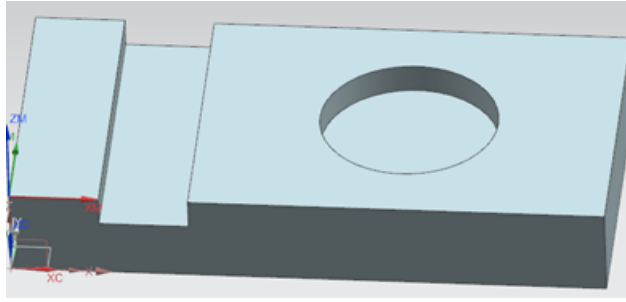


Figure 8. Final solid model for machining,

3. Experimental method and Results

3.1. Experimental equipment and application method

In experimental work, Fanuc O-M type control machine Taksan TMC-500V model CNC vertical machining center is used to milling the workpieces. To increase the efficiency of the experimental study, the length and diameter of the cutting tool are precisely measured with the Renishaw TS27R tool measuring probe on the CNC vertical machining work table. Tool dimension measurement is performed several times for each tool. The aim here is to capture the value of the tool received from the magazine with the least error. Workpieces are made of Al7075(T6) which is used widely in the aviation and automobile industry and has excellent surface quality. The general characteristics are given in Table 1.

Table 1. Material properties of the sample

Material properties of Al 7075(T6)	
Density	2.81 g/cm ³
Yield Strength	503 MPa
Poisson Ratio	0.33
Young's Modulus	72 GPa
Thermal Expansion Coefficient	$22.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

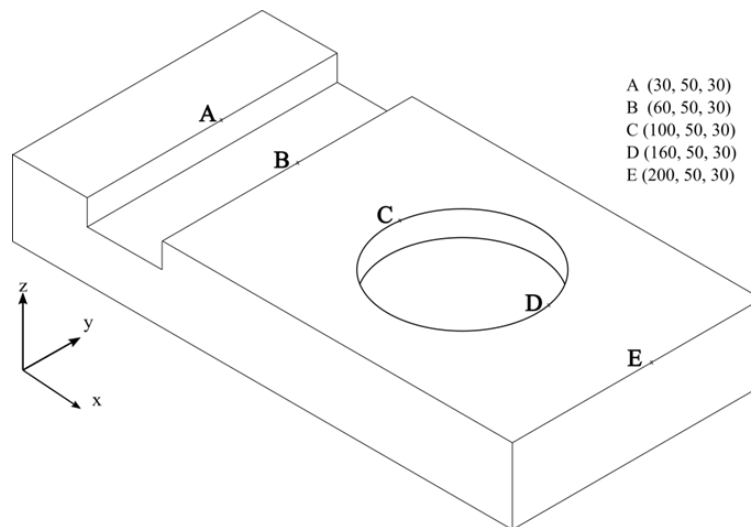
For the roughing of the test specimens, a \varnothing 18 mm cutting tool with two cutting edges were used (MBC tool holder and H490 E90AX-12 ISCAR double sided rectangular inserts with four helical cutting edges). For finish milling, the Al7075(T6) is machined with 3 flute carbide end mills to prevent tool-chip bonding and chip evacuation for the material (ECA-B-3 10-22C10-72 Model). Gewefa hydraulic tool holder is preferred to minimize misfire as a tool holder in finish milling. Machine tool and workpiece temperatures precisely measured with the Fluke 568 IR thermometer (Figure 9). This device can measure the temperature of materials with different emissivity properties. First, rough machining is applied to the workpiece (leaving 1mm chip margin on the side surfaces). Then the finishing process is done (once the appropriate temperature values are reached). Workpieces obtained as a result of roughing and finishing machining are shown in the Figure 10.



Figure 9. Infrared temperature gauge**Figure 10.** Manufactured sample work parts

3.2. Experimental studies

Aluminium 7075, which gives good surface quality after machining, is used as workpiece material in the experiments. The FEA analyzes for nine different temperature values have been rearranged, and the workpieces have been processed with these generated codes depending on the ambient temperature. The dimensions of the machined workpieces are measured precisely by the CMM (Coordinate Measuring Machine). Figure 11. The measurements are made for five selected critical points, and the results are evaluated. Success rate is presented by “%” taking the absolute value of the average of the three measurements performed under the same conditions.

**Figure 11.** CMM measurement points (A, B, C, D, E)

3.3. Error measurement due to temperature

The temperature-dependent error values for Al7075(T6) at measurement point A are shown in Figure 12. The mean error for the Al7075(T6) at the ideal temperature is measured as $7.5\mu\text{m}$. The most successful error correction for Al7075(T6) is $10\mu\text{m}$ in 12°C test and $21\mu\text{m}$ in 2°C worst-case error correction.

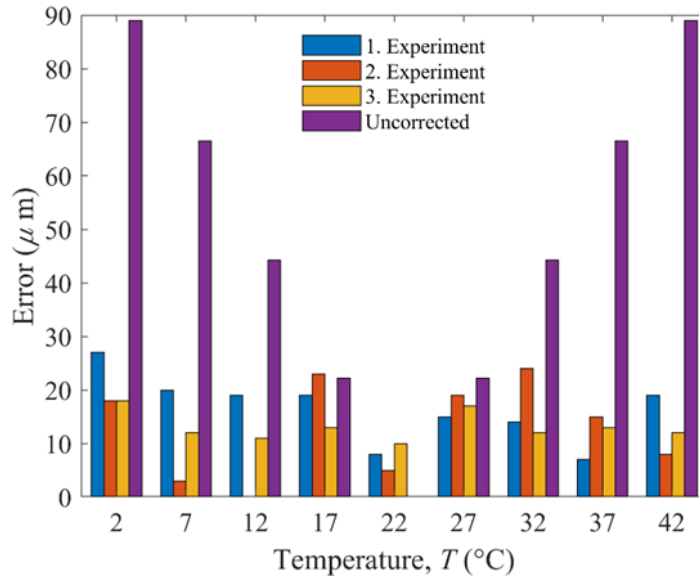


Figure 12. Error measurement due to Al7075(T6) temperature for x=30mm

The temperature-dependent error values for Al7075(T6) at measuring point B (60mm) are shown in Figure 13. The average error for the Al7075(T6) at the ideal temperature was measured at 9μm. The most successful error correction for the Al7075(T6) is 5.5μm in 7°C and 11.7μm in 2°C.

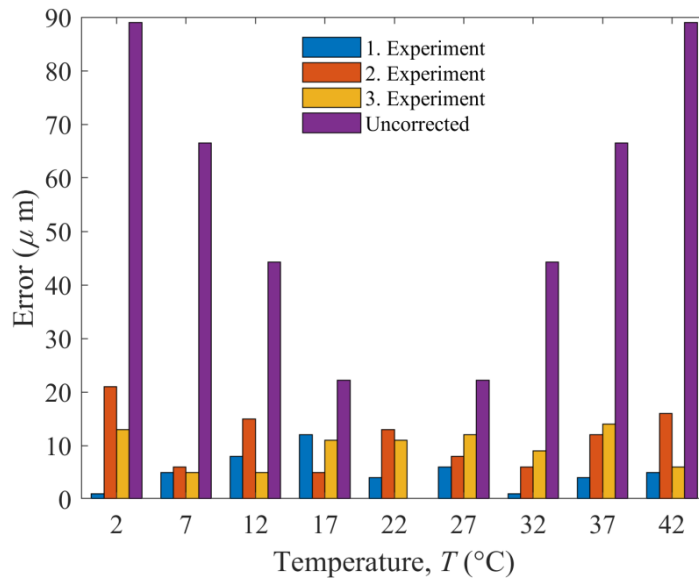


Figure 13. Al7075(T6) temperature-dependent error measurement for x=60mm

The temperature-related error values for Al7075(T6) at measuring point C are shown in Figure 14. The mean error for Al7075(T6) at the ideal temperature is measured to be 10.6μm. The most successful error correction for the Al7075(T6) is measured 4μm at 7 °C, the worst error correction at 32°C, 37°C and 42°C at 14μm.

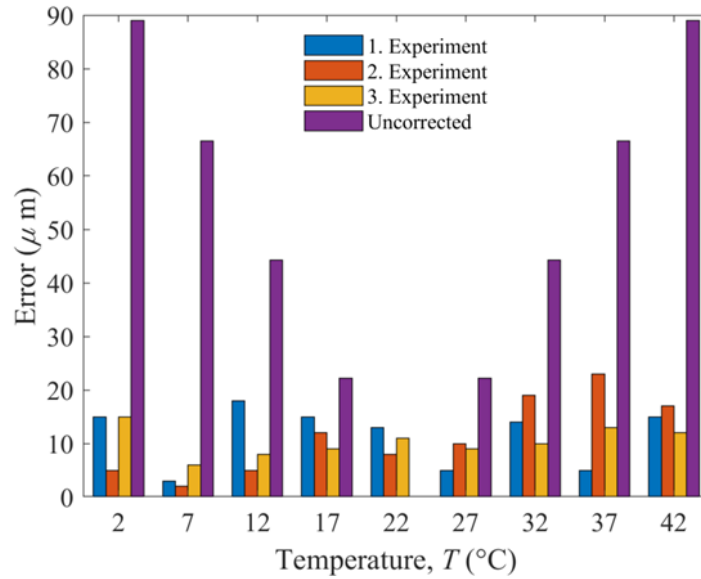


Figure 14. Al7075(T6) temperature-dependent error measurement for x=100mm

The temperature-dependent error values for Al7075(T6) at point D are shown in Figure 15. The mean error for the Al7075(T6) at the ideal temperature is measured to be 10 μ m. The most successful error correction for Al7075(T6) is 11.6 μ m at 27°C and the worst is 18.6 μ m at 7°C.

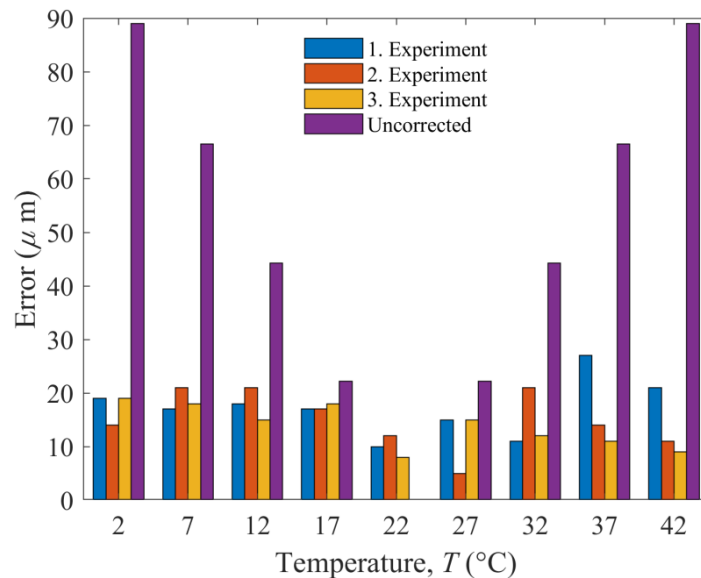


Figure 15. Error measurement due to Al7075(T6) temperature for x=160mm

The temperature-dependent error values for Al7075(T6) at measuring point E are shown in Figure 16. The average error for the Al7075 at the ideal temperature is 9.6 μ m. The most successful error correction for the Al7075(T6) is 4.3 μ m in the experiments at 27°C and 6.3 μ m at 32°C, and the worst error correction is measured at 12.6 μ m at 42°C.

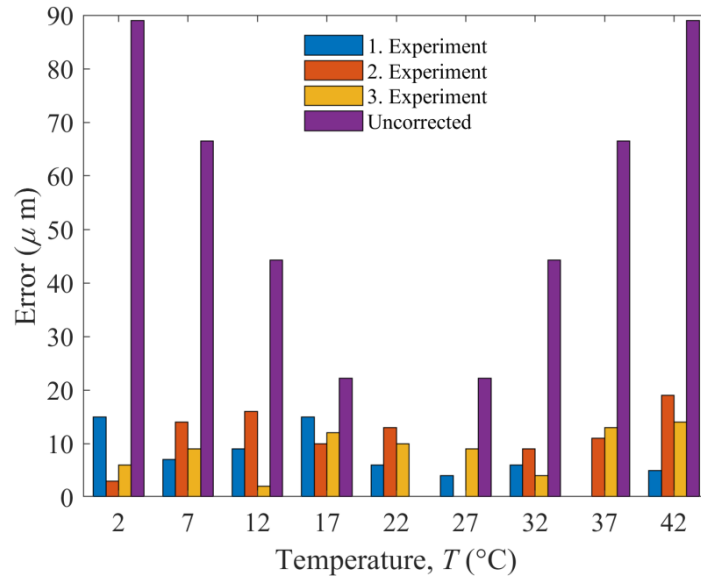


Figure 16. Error measurement due to Al7075(T6) temperature for $x=200\text{mm}$

4. Discussion and Conclusion

The thermal effects on the work piece during the manufacturing process have been investigated by using various devices and tools such as infrared cameras and computer software and hardware. In order to mitigate the influence of the temperature changes, the thermal expansion coefficients of the machine components should be calculated precisely a priori. The production of machine tools having different and complex geometries may be challenging since the use of distinct thermal expansion coefficients and the thermal deformations of these elements. Advanced microprocessors, various space systems, microscopes, and medical equipments play a major role to increase the machining precision and combustion efficiency as well as to reduce the friction. Recently, modern machine tools use advanced material technology to achieve approximately 0.005 mm precision. There are always limitations on the improvement of the machine accuracy regardless of the quality of the machine tools. Therefore, it is crucial to understand the error compensation process for the enhancement of the machine accuracy. For this process, the machine tool should be placed in the air-conditioned room to be able to control the ambient temperature at the desired levels.

In this study, G codes are modified by considering the ambient temperature at which the work piece is processed. The results show that the present approach for the thermal error measurement is in good correlation with the experimental predictions. The temperature of the workpiece can increase by 100°C or higher depending on the rough machining conditions in the milling operations, the cooling system, and the tool. This situation may lead to undesired expansions in the workpiece and reduce the dimensional accuracy. In addition to minimization of the machining errors, the present approach improves the dimensional accuracy of the workpiece by modifying the G codes based on the desired temperature levels during rough milling process. As a result of the experimental studies, the machining error is reduced from $88\mu\text{m}$ to $14\mu\text{m}$ with the success of 84% for Al7075(T6) material at 42°C . It is also noticed that the residual errors around $10\text{--}12\mu\text{m}$ are present for all experiments. This indicates that positioning errors in the machine axes are constant errors due to the servo motor errors and erosions in the slide system. The error is measured at different temperature levels between 2 and 42°C . It is observed that the mean error range was around $11\mu\text{m}$. The maximum error ($13.93\mu\text{m}$) is monitored at 2°C whereas the minimum error ($9.46\mu\text{m}$) levels are noted at the temperature level of 22°C .

The major advantage of this offline method is that it can be applied to all other milling machines without using any additional equipment while other special milling machines need sophisticated sensor and high-end software. Thus, it is obvious that the efficiency can be increased by applying the present approach to the milling machines.

Acknowledgment

The authors would like to acknowledge Erciyes University Scientific Research Projects Coordination Unit (Grant No: FBD-12-4062) for their support.

References

- [1] Sortino, M., Belfio, S., Motyl, B., Totis, G., 2014. Compensation of geometrical errors of CAM/CNC machined parts by means of 3D workpiece model adaptation. *Computer-Aided Design*, 48, 28-38.
- [2] Bosetti, P., Bruschi, S., 2011. Enhancing positioning accuracy of CNC machine tools by means of direct measurement of deformation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58, (5-8), 651-662.
- [3] Bryan, J., 1990. International Status of Thermal Error Research. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1 39 (2), 645-656.
- [4] Ni, J., 1997. CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real-Time Error Compensation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119 (4B), 717-725.
- [5] Wang, W., Zhang, Y., Yang, J., Zhang, Y., Yuan, F., 2012. Geometric and thermal error compensation for CNC milling machines based on the Newton interpolation method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 227 (4), 771-778.
- [6] Weck, M., McKeown, P., Bonse, R., Herbst, U., 1995. Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 44 (2), 589-598.
- [7] Wang, W., Zhang, Y., Fan, K., Yang, J., 2015. A Fourier Series-Neural Network Based Real-Time Compensation Approach for Geometric and Thermal Errors of CNC Milling Machines. *Advances in Mechanical Engineering*, 5 (0), 357920-357920.
- [8] Zhang, J., Feng, P., Chen, C., Yu, D., Wu, Z., 2013. A method for thermal performance modelling and simulation of machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68 (5-8), 1517-1527.
- [9] Ramesh, R., Mannan, M. A., Poo, A. N., 2000. Error compensation in machine tools - a review Part II: thermal errors. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40 (9), 1257-1284.
- [10] Kang, Y., Chang, C.-W., Huang, Y., Hsu, C.-L., Nieh, I. F., 2007. Modification of a neural network utilizing hybrid filters for the compensation of thermal deformation in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (2), 376-387.
- [11] Yuan, J., Ni, J., 1998. The real-time error compensation technique for CNC machining systems. *Mechatronics*, 8 (4), 359-380.
- [12] Yang, J., Yuan, J., Ni, J., 1999. Thermal error mode analysis and robust modeling for error compensation on a CNC turning center. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39 (9), 1367-1381.
- [13] Mayr, J., Jędrzejewski, J., Uhlmann, E., Alkan Donmez, M., Knapp, W., Härtig, F., Wendt, K., Moriwaki, T., Shore, P., Schmitt, R., Brecher, C., Würz, T., Wegener, K., 2012. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61 (2), 771-791.
- [14] Eskandari, S., Arezoo, B., Abdullah, A., 2012. Positional, geometrical, and thermal errors compensation by tool path modification using three methods of regression, neural networks, and fuzzy logic. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65 (9-12), 1635-1649.
- [15] Tseng, P.-C., Chen, S.-L., 2002. The neural-fuzzy thermal error compensation controller on CNC machining center. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 45 (2), 470-478.
- [16] Abdulshahed, A. M., Longstaff, A. P., Fletcher, S., 2015. The application of ANFIS prediction models for thermal error compensation on CNC machine tools. *Applied Soft Computing*, 27, 158-168.
- [17] Fan, K., Yang, J., Yang, L., 2015. Unified error model based spatial error compensation for four types of CNC machining center: Part I—Singular function based unified error model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60–61 (0), 656-667.
- [18] Qianjian, G., Jianguo, Y., Application of projection pursuit regression to thermal error modeling of a CNC machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 55: (5-8): 623-629.
- [19] Yao, X., Fu, J., Xu, Y., He, Y., 2013. Synthetic Error Modeling for NC Machine Tools based on Intelligent Technology. *Procedia CIRP*, 10, 91-97.
- [20] Zhang, J. F., Feng, P. F., Chen, C., Yu, D. W., Wu, Z. J., 2013. A method for thermal performance modeling and simulation of machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68 (5-8), 1517-1527.

- [21] Miao, E.-M., Gong, Y.-Y., Niu, P.-C., Ji, C.-Z., Chen, H.-D., 2013. Robustness of thermal error compensation modeling models of CNC machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69 (9-12), 2593-2603.
- [22] Ma, C., Liu, J., Wang, S., 2020. Thermal error compensation of linear axis with fixed-fixed installation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 175, 105531.
- [23] Fu, G., Tao, C., Xie, Y., Lu, C., Gao, H., 2021. Temperature-sensitive point selection for thermal error modeling of machine tool spindle by considering heat source regions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 2447-2460.
- [24] Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., Delbressine, F., 2008. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57 (2), 660-675.
- [25] Chen, B., Zhang, X., Zhang, H., He, X., Xu, M., 2014. Investigation of error separation for three-dimensional profile rotary measuring system. *Measurement*, 47, 627-632.
- [26] Yang, Z., Sun, M., Li, W., Liang, W., 2010. Modified Elman network for thermal deformation compensation modeling in machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54 (5-8), 669-676.
- [27] Fan, K.-C., Chen, H.-M., Kuo, T.-H., 2012. Prediction of machining accuracy degradation of machine tools. *Precision Engineering*, 36 (2), 288-298.

Halloysit Nanotüp (HNT) Destekli Polipropilen (PP) Nanokompozitlerin Karakterizasyonu

Esen Dağaşan Bulucu^{*1}, S. Abdulelah Mashkoor²

^{*1} Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, KAYSERİ
² Irak Cumhuriyeti Yüksek Öğretim Bakanlığı, BAĞDAT

(Alınış / Received: 01.09.2022, Kabul / Accepted: 02.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

Halloysit Nanotüp,
Polipropilen,
Nanokompozit,
Polimer Matris Kompozitler

Öz: Bu çalışmada HNT destekli PP matrisli nanokompozitlerin termal ve termomekanik özellikleri araştırılmıştır. Daha iyi bir dağılım elde etmek için HNT'lere iki farklı yüzey modifikasyon yöntemi uygulanmıştır. Daha sonra hem modifiye edilmiş hem de modifiye edilmemiş HNT, PP matris içerisine ekstrüzyon yöntemi ile dahil edilmiştir. Hazırlanan nanokompozitler ağırlıkça % 5, % 10 ve % 20 oranında HNT (modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş) içermektedir. Üretilen nanokompozitler morfolojik çalışmalar için FESEM ve X-RD yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Ayrıca, kompozitlerin termal ve termomekanik karakterizasyonu için termogravimetrik analizler (TGA) ve dinamik mekanik analizler (DMA) de gerçekleştirilmiştir. X-RD analizleri ayrıca yüzey modifikasyonu işlemlerinin HNT'lerin düzlemlerarası mesafe değerleri üzerindeki etkisini tespit edebilmek için de kullanılmıştır. FTIR analizleri ise takviye elemanı ile matris arasındaki olası etkileşimleri incelemek için uygulanmıştır. Sonuç olarak, yüzey modifikasyonu işlemlerinin HNT'ün PP matris içerisinde dağılması üzerinde olumlu etkisinin olduğu gözlenmiştir. Ek olarak, sonuçlardan HNT ilavesinin PP matrisin termal kararlılığını ve depolama modülünü artırdığı açıkça görülmektedir.

Characterization of Halloysite Nanotube (HNT) Reinforced Polypropylene (PP) Nanocomposites

Keywords

Halloysite Nanotube,
Polypropylene,
Nanocomposite,
Polymer Matrix
Composites

Abstract: This paper presents thermal and thermomechanical properties of HNT reinforced PP matrix nanocomposites. For providing a better distribution, two different surface modification processes were conducted on HNTs. Then both modified and unmodified HNTs were incorporated into the PP matrix by extrusion method. Prepared nanocomposites contain 5, 10, 20 wt. percentage of HNT (Modified and Unmodified). Nanocomposites were characterized by FESEM and X-RD for morphological study. Also, Thermogravimetric Analysis (TGA) and Dynamic Mechanical Analysis (DMA) were conducted for thermal and thermomechanical characterization of the composites. X-RD analysis were also used to investigate the effect of surface modification on layer spacing of HNTs. And FTIR analysis were conducted to explore possible interaction between the reinforcement and matrix. Finally, it is observed that surface modification processes have affirmative effect on the dispersion of HNTs in the PP matrix. Additionally, from the results it is clear that HNT addition increased thermal stability and storage modulus of PP matrix.

*İlgili Yazar, email: esendagasan@gmail.com

1. Giriş

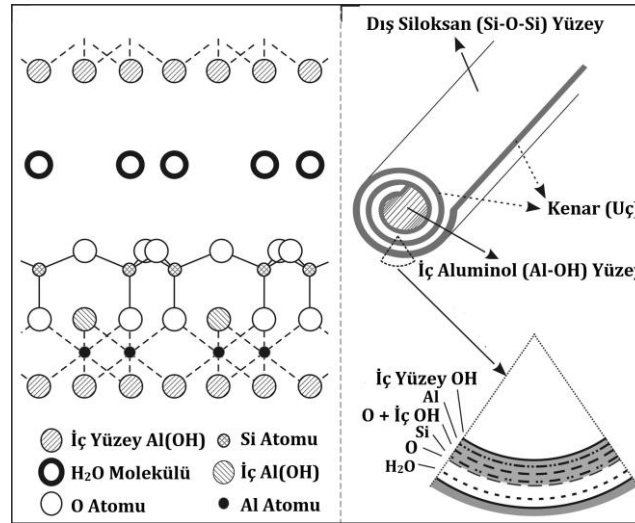
Polipropilen (PP) yarı kristal bir termoplastiktir ve düşük maliyetlerle işlenebilirliği nedeniyle ev eşyaları ve otomotiv parçaları gibi genel uygulamalar için yaygın olarak kullanılır. Polipropilen ayrıca yüksek nem emme direncine ve çözücülere karşı yüksek kimyasal dayanıma sahiptir [1]. Ancak, polipropilenin bir mühendislik

termoplastigi olarak uygulamaları, çekme oranı ve düşük darbe direnci nedeniyle sınırlıdır [2]. Bundan dolayı PP'nin termal, fiziksel, mekanik ve alev geciktiricilik gibi özelliklerini geliştirmek için farklı takviyeler kullanılmıştır. Aynı zamanda, nanoteknolojideki son gelişmeler, polipropilenin özelliklerini ve kullanım alanlarını çeşitli nanodolgu ekleyerek geliştirmeye imkan sağlamıştır [1-10].

PP matrisli nanodolgu takviyeli kompozitler üzerinde gerçekleştirilen önceki çalışmalar CaCO_3 [1, 3], küresel silika [4], boehmit [5] ve karbon nanotüp (CNT) [6, 7], Ti nanoparçacıklar [8], selüloz nanowhiskerlar [9] ve grafen nanotabakalar [10] gibi malzemeler üzerine odaklanmıştır. Bu nanodolguların tip, şekil, boyut, konsantrasyon gibi özellikleri nanokompozitin nihai özelliklerini doğrudan etkiler. Örneğin, mikron boyutlu küresel CaCO_3 'ün darbe mukavemeti üzerinde kayda değer bir etkisi olurken [11], nano boyutlu CaCO_3 'ün polipropilen matris içerisinde bir çekirdeklenme ajanı [12] veya bir darbe düzenleyici [13] olarak hareket edebileceği bildirilmiştir. Ayrıca, literatürde polar olmayan kimyasal yapısı nedeniyle polipropilenin polar dolgu malzemeleri ile zayıf etkileşim içerisinde olduğu da vurgulanmıştır [1].

Çalışılan nano dolgu malzemeleri arasında en öne çıkanları montmorillonit (MMT) ve kaolin gibi tabakalı killer veya karbon nanotüplerdir (CNT). Halloysit, kimyasal olarak kaolin ve montmorillonite benzer [14, 15, 16] ve CNT'e benzer tüp şeklinde bir geometriye sahiptir [15, 17]. MMT eklenmesinin polimer matrisin kırılma ve darbe mukavemeti üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı bildirilmiştir [18]. Bu durum, bir takviye elemanı olarak halloysiti daha avantajlı hale getirmektedir. Ayrıca halloysit doğal madenlerden elde edildiği için maliyeti daha yüksek olan CNT'e uygun maliyetli bir alternatif sağlar. Halloysit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4\text{H}_2\text{O}$) mikron altı ölçekte içi boş yapıya sahip iki katmanlı alüminilikattan oluşan doğal bir nanotüptür [19]. Halloysit partiküllerinin boyutu uzunluk olarak 1-15 μm ve iç çap olarak ise 10-150 nm aralığında değişir [19]. Halloysit nanotüpün iç silindirik çekirdeği çoğunlukla Al_2O_3 [20] ile ilişkiliyken, halloysite nanotüplerin (HNTs) dış yüzeyi SiO_2 'ye benzer özelliklere sahiptir (Şekil 1).

Polimer matris nanokompozitler (PMnC) dikkate alındığında, HNT'lerin benzersiz yapısı ve düşük hidroksil yoğunluğu, diğer nanokillere göre polimer matris içinde dağılmasını nispeten kolaylaştırır [21]. Ayrıca, HNT'ler biyoyumludur. Bildirildiği gibi, halloysit nanotüplerde tespit edilen ağır metaller Avrupa Birliği zararlı madde kısıtlama standartlarından çok daha düşüktür [22]. Tüm bu avantajları nedeniyle HNT, poliamid (PA) [17], PP/PA6 [23], LLDPE [24], EPDM [25], Stiren-Butadiene Kauçuk [26], Poliamid-612/Poly(Etilen-CO-Oktene) elastomer karışımları [27], Polilaktit [28], Naylon 6 [29], PA6 [30, 31, 32], PVA [33], Epoksi [34, 35], Poli (laktik) Asit [36], Poliüretan [37] ve PMMA [38] gibi birçok polimer içerisine eklenmiştir.



Şekil 1. (a) Halloysitin kristal yapısının (10 Å), (b) Halloysit nanotüpünün yapısal şematik diyagramı [20]

HNT takviyeli nanokompozitler üzerinde yapılan çalışmalar, diğer polimer kompozitlere kıyasla, HNT takviyeli polimer nanokompozitlerin düşük takviye elemanı oranlarında bile üstün termomekanik ve fiziksel özellikler sergilediklerini bildirmektedir [14]. Bu bulgulara dayanarak, bu çalışma esas olarak ağırlıkça daha yüksek oranlarda modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş HNT partikülleri içeren HNT/PP nanokompozitlerin özelliklerine odaklanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma için polipropilen (PP) matris halloysite nanotüp (HNT) takviyeli nanokompozitler ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiştir. HNT parçacıkları, PP matris içerisinde daha iyi bir dağılım sağlayabilmek için, iki farklı yöntem ile

yüzey modifikasyonuna tabi tutulmuştur. Yüzey modifikasyon işlemlerinin etkisini araştırmak için, modifiye edilmemiş HNT'ler de PP matrisine dahil edilmiş ve bu numuneler UM-HNT olarak kodlanmıştır.

2.1. Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalar sırasında, polipropilen (PP) matris olarak, halloysite nanotüpler (HNT) ise takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. HNT'ler Sigma Aldrich (685445) ürün kodu ile 30-70 nm×1-3 µm boyutlarında temin edilmiştir. Kullanılan HNT'lerin yüzey alanı ve yoğunluk değerleri sırasıyla 64 m²/g ve 2,53 g/cm³'tür. Granüler PP homopolimer ise Reliance Industries Limited'den temin edilmiştir. Kullanılan PP matrisinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [39].

Tablo 1. PP Homopolimerin Özellikleri [39].

Özellik	ASTM Test Methodu	Değer
Eriyik Akış İndeksi (230°C / 2.16kg)	D 1238	2.6 g/10 d
Akmada Çekme Dayanımı (50 mm/d)	D 638	34 MPa
Akmada Uzama (50 mm/d)	D 638	10 %
Eğilme Modülü (1% secant)	D 79 A	1700 MPa
Çentik İzod Darbe Direnci (23°C)	D 256	40 J/m
Isıl Bozunma Sıcaklığı (455 kPa)	D 648	104 °C
Ergime Sıcaklığı (DSC İkinci Isıtma)	D 3418	166 °C

Tablo 2 ise yüzey modifikasyonu işlemlerinde kullanılan kimyasalların özelliklerini vermektedir.

Tablo 2. Yüzey Modifikasyon İşlemleri için Kullanılan Kimyasalların Özellikleri.

Malzeme	Ürün Kodu	Safılık/Özellikler
PEI (Polietilenimin)	Sigma Aldrich-181978	Ağırlıkça % 50 sulu çözelti Mn=60,000 Mw=750,000
NaOH (Sodyum Hidroksit)	Sigma Aldrich-06203	% 98-100,5/Pellet Formunda
Etanol	Sigma Aldrich-32221	≥ % 99.8
(3-Aminopropil) trimetoksilan	Sigma Aldrich-281778	% 97
Asetik Asit	Sigma Aldrich-27225	% 99.8-100,5

2.2. Yüzey Modifikasyon Prosedürleri

Polimer matristeki dolgu maddelerinin ara yüzey etkileşimleri ve dağılım derecesinin nanokompozitin nihai özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmektedir [40]. Bu nedenle bu çalışmada temin edilen HNT parçacıklarına iki farklı yüzey modifikasyon prosedürü uygulanmıştır.

Yüzey modifikasyonu gerçekleştirilen HNT parçacıklar PP matris içerisine ekstrüzyon yöntemi ile ağırlıkça % 5, % 10 ve % 20 oranlarında eklenmiştir. Ekstrüzyon işlemi sırasında HNT parçacıklarının PP matris içerisinde daha homojen şekilde dağılımını sağlamak için ekstrüderın haznesine her defasında 300 gr HNT/PP karışımı beslenmesi gerekmektedir. Bu sebeple, nanokompozitlerin bileşen miktarlarının bütün hesaplamaları 300 g HNT/PP karışımı için yapılmıştır.

Nanokompozitlerin HNT ve PP bileşenlerinin miktarları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. HNT/PP Nanokompozit Bileşenlerinin Miktarları.

Ağ. % HNT	Toplam karışım ağırlığı (g)	PP Ağırlığı (g)	HNT Ağırlığı (g)
% 5	300	285	15
% 10	300	270	30
% 20	300	240	60

2.2.1. PEI (Polietilenimin) ile Yüzey Modifikasyonu

HNTler dış yüzeylerinde Van der Waals kuvvetlerine sahip oldukları için bu durum polimerler içerisinde dağılımlarını zorlaştıran agglomerasyona neden olabilmektedir [41]. Bu durumun üstesinden gelebilmek için HNTlere PEI gibi kimyasallarla yüzey modifikasyonu uygulanmaktadır [42]. HNT'ün PEI ile yüzey modifikasyonu esnasında pH değeri 8-9 arasında olmalıdır [42]. Çözelti pH'ını kontrol edebilmek için ise NaOH çözeltisi kullanılmıştır. HNTe PEI (Polietilenimin) ile uygulanan bu yüzey modifikasyon prosedürü literatürde açıklanan prosedürden adapte edilmiştir [43]. Bunun için öncelikle 15 gr HNT ve 600 ml saf su 60 °C'de 30 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra çözeltinin pH'ı NaOH (sodyum hidroksit) çözeltisi eklenerek 8,6'ya ayarlanmıştır. 0,18 gr PEI çözeltisi ekledikten sonra çözelti 60 °C'de ve sabit hızda 24 saat karıştırılmıştır. 24 saat karıştırılan çözelti daha sonra 20 dakika boyunca 4000 d/d hızla santrifüj edilmiştir. Elde edilen çökelti daha sonra 80 °C'de 24 saat boyunca vakumla kurutulmuştur. Özdeş modifikasyon adımları daha sonra kimyasal içeriği orantılı olarak artırılarak ağırlıkça % 10 ve % 20 oranında HNT içeren numuneleri üretmek için 30 ve 60 gr HNT için tekrarlanmıştır. PEI ile modifiye edilen numuneler SM-1 olarak kodlanmıştır.

2.2.2. Silan ile Yüzey Modifikasyonu

Bu modifikasyon yöntemi genellikle organosilasyon olarak adlandırılır ve organo kil yüzeylerinde bir modifikasyon yapmak için kullanılır. Temel olarak özellikle amin gibi organosilan yapıları kullanarak kil yüzeyleri işlevsel hale getirmektir. Organosilan yapısındaki organik fonksiyonel gruplar kil yüzeyindeki hidroksil grupları ile yüzey kimyasını değiştirirler [43]. Bu yüzey modifikasyon yöntemi için, etanole pH=5,0 olarak ayarlanana kadar yavaş yavaş asetik asit eklenmiştir. Daha sonra karışıma (3-Aminopropil) trimetoksilsilan yavaşça karıştırılarak eklenmiştir. Bu işlemden sonra 15 g HNT çözeltiye eklenmiş ve 20 dakika boyunca karıştırılmıştır. Son çözelti, çözücünün çoğu buharlaşana kadar havada tutulmuştur. Geriye kalan çözelti vakum altında, 70 °C'de 6 saat kurutulmuştur. Modifikasyon işlemi daha sonra kimyasallar orantılı olarak artırılarak 30 ve 60 g HNT için tekrarlanmıştır. Silan ile modifiye edilen numuneler SM-2 olarak kodlanmıştır.

2.3. HNT/PP Nanokompozitlerin Üretimi

PP/HNT nanokompozitlerinin hazırlanmasında ERNAM bünyesinde bulunan çift vidalı ekstruderden (GULNAR, L/D=42) faydalanılmıştır. Ekstruderin sıcaklık profili -hazneden kalıba kadar- 200/200/210/220/230/240 °C ve vida hızı ise 60 d/d'dir. Ekstruder tarafından üretilen PP/HNT nanokompozitler 2,5 mm kalınlığında levha şeklindedir. Yüzey modifikasyon süreçlerinin etkisini araştırmak için HNT içermeyen PP numuneleri de ekstrüzyon ile hazırlanmıştır.

2.4. X-RD (X-Işınları Kırınımı) Analizleri

Yüzey modifikasyon süreçlerinin morfolojik yapı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş HNT partiküllerine X-RD analizleri yapılmıştır. X-RD testleri 40 kV voltaj ve 40 mA akım kullanılarak Cu K α radyasyonlu ($\lambda=0,15406$ nm) BRUKER AXS D8 Advance tip analizör ile yapılmıştır. X-RD desenleri 0.02 ° adım ile 10-90° 2 θ aralığında kaydedilmiştir. X-RD analizleri ayrıca mikroyapısal değişimi gözlemlemek amacıyla PP/HNT nanokompozitler üzerinde de uygulanmıştır.

2.5. FESEM (Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu) ile Görüntüleme

Morfolojik çalışmalar için her iki yöntemle modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş HNT parçacıklarının ve PP/HNT kompozitlerinin FESEM görüntüleri ZEISS Gemini 500 tipi taramalı elektron mikroskobu ile 500X-10 KX olmak üzere farklı büyütme oranlarında alınmıştır.

2.6. TGA (Termogravimetrik) Analiz

HNT/PP nanokompozitlerin ısı kararlılık özelliklerinin karakterizasyonu için TGA, STA7300 tipi HITACHI TG analizörü tarafından yapılmıştır. TGA testleri oda sıcaklığından (25 °C) 600 °C'ye kadar, 10 °C/dk sabit ısıtma hızı ile yapılmıştır.

2.7. DMA (Dinamik Mekanik) Analiz

Dinamik mekanik analizler PP/HNT levhalarından alınan 25x5x2.5 mm³ boyutlu numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler -50 °C'den 120 °C'ye kadar 5 °C/dk sabit ısıtma hızı ile ısıtılmıştır. Bu amaçla DMA 8000 tipi Perkin Elmer dinamik mekanik analizörü kullanılmıştır.

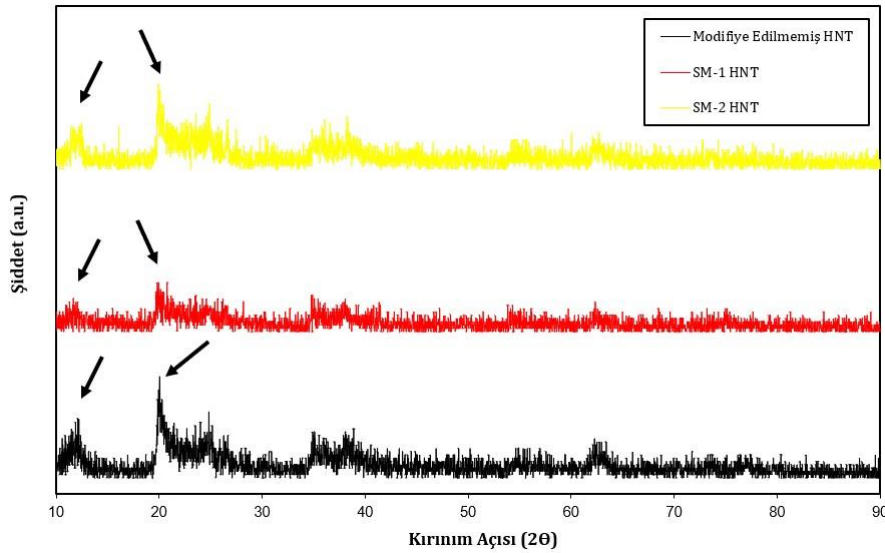
2.8. FT-IR (Fourier Transform Kızılötesi Spektrofotometre) Analizi

FT-IR analizleri, HNT'ler ve PP matrisleri arasındaki olası etkileşimi araştırmak için PERKIN ELMER 400 FT-IR/FT-IR spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. Spektra 450 cm⁻¹'den 4000 cm⁻¹'e kadar alınmıştır.

3. Bulgular

3.1. X-RD (X-Işınlari Kırınımı) Sonuçları

Yüzey modifikasyon işlemlerinden sonra, HNT'lerin düzlemlerarası mesafe değerlerini belirlemek için X-RD analizleri uygulanmıştır. Şekil 2, Modifiye edilmiş ve değiştirilmemiş HNT parçacıklarının X-RD desenlerini toplu olarak vermektedir.



Şekil 2. Modifiye Edilmiş ve Modifiye Edilmemiş HNTlerin X-RD Desenleri

Bu X-RD sonuçları Bragg yasasına göre değerlendirilerek (Eşitlik 1), yüzeyleri modifiye edilmiş ve edilmemiş HNT'lerin düzlemlerarası mesafe değerleri karşılaştırılmıştır. Düzlemlerarası mesafenin hesaplanması için en yüksek şiddete sahip pik (modifiye edilmemiş HNT'ler için $2\theta=20,06^\circ$) ve modifiye edilmemiş HNT için $2\theta=12,10^\circ$ 'de gözlemlenen en yüksek şiddetteki ikinci pik olmak üzere iki farklı pik dikkate alınmıştır.

$$\lambda = 2d \cdot \sin(\theta) \quad (1)$$

λ : Kullanılan Işığın Dalga Boyu (nm)

d : Düzlemler arası mesafe (nm)

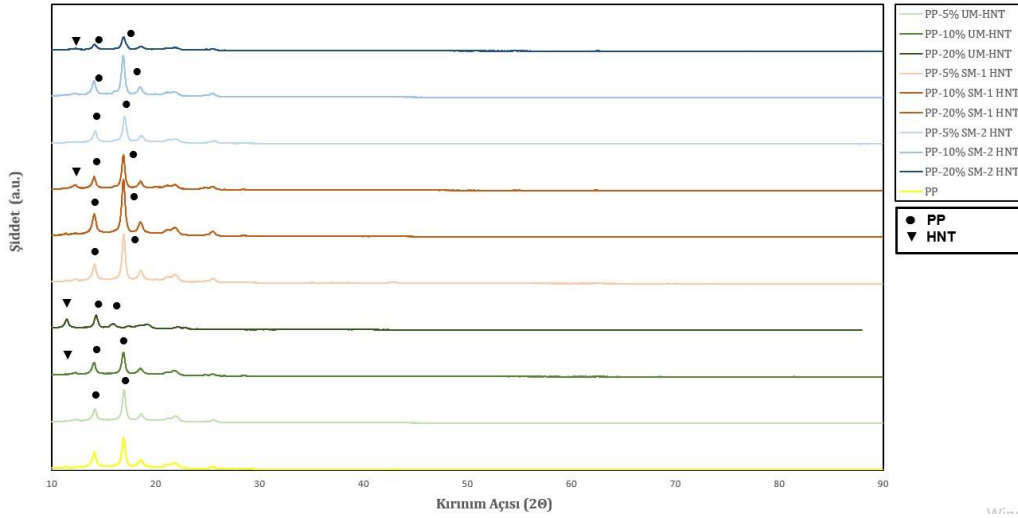
θ : Gelen X-ışını ile Kristal Düzlemi Arasındaki Aç (Kırınım Açısı) (°)

İlgili piklerden ilki SM-1 ve SM-2 HNT için sırasıyla $2\theta=19,82^\circ$ ve $2\theta=29,92^\circ$ değerlerinde gözlemlenmiştir. Tablo 4, yüzey modifikasyon işlemleri nedeniyle bu piklerin şiddetlerinde ve düzlemlerarası mesafelerinde meydana gelen değişimi göstermektedir.

Tablo 4. Numunelerin Bragg Kanunu ile Hesaplanan Düzlemlerarası Mesafe Değerleri.

Numune Tipi	Kırınım Açısı (2θ)	Şiddet (a.u.)	λ (nm)	d (nm)
UM HNT	20,06	31	0,15406	0,442
SM-1 HNT	19,82	15	0,15406	0,447
SM-2 HNT	19,92	26	0,15406	0,445
Numune Tipi	Kırınım Açısı (2θ)	Şiddet (a.u.)	λ (nm)	d (nm)
UM HNT	12,10	18	0,15406	0,73
SM-1 HNT	11,66	10	0,15406	0,75
SM-2 HNT	12,40	13	0,15406	0,73

Sonuçlara göre, özellikle PEI adımlarında yüzey modifikasyonunun HNT'lerin d, düzlemlerarası mesafe değerlerinde küçük bir değişikliğe neden olduğu söylenebilir. Ayrıca, SM-1 işleminden sonra ilgili piklerin yoğunluğu önemli ölçüde azalmıştır. Ek olarak, farklı tip ve miktarlarda HNT içeren PP/HNT kompozitlerin de X-RD testleri yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 3'te grafiksel olarak özetlenmiştir.

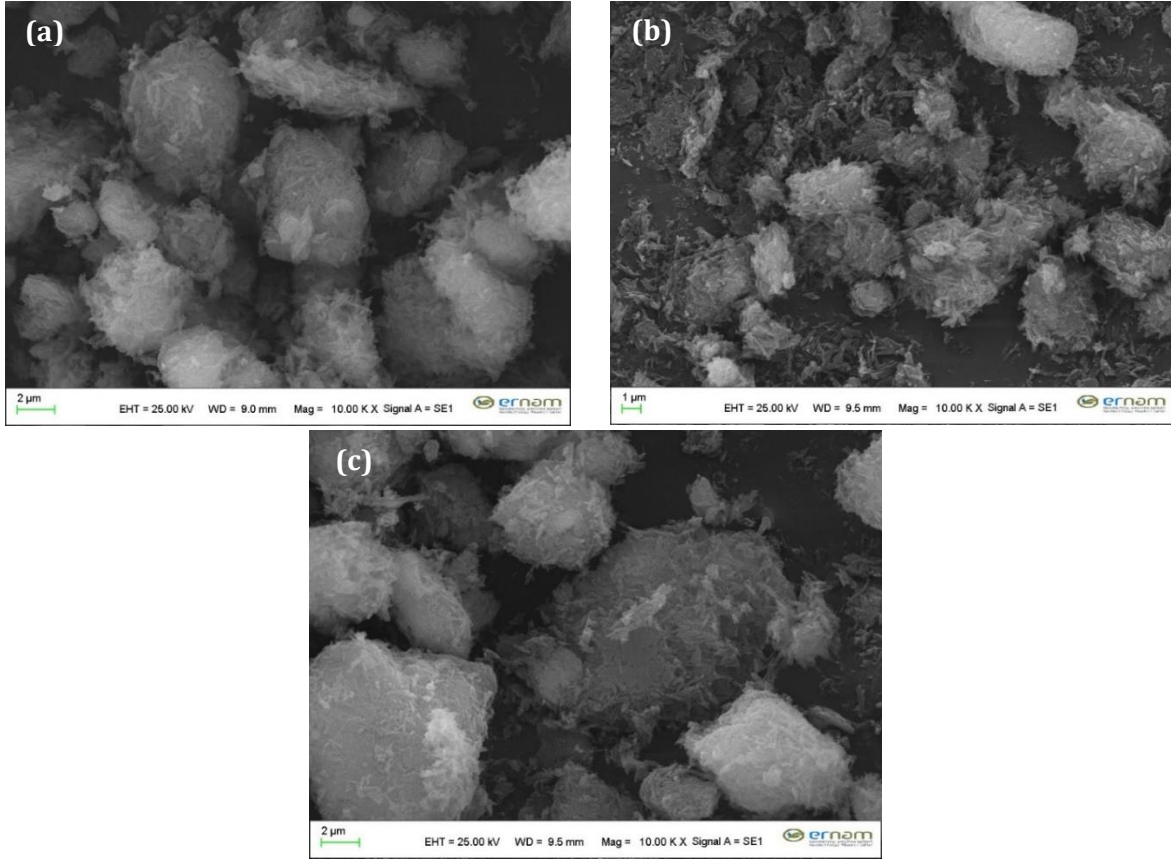
**Şekil 3.** PP/HNT Nanokompozitlerin X-RD Sonuçları

Nanokompozitlerin X-RD sonuçları baskın faz olarak PP piklerini vurgulamaktadır. Özellikle 16,93° kırınım açısıyla görülen ve en yüksek şiddete sahip olan ana PP piki bütün nanokompozitlerde görülmektedir. İlgili pikin şiddeti kompozit içerisinde artan HNT oranı ile azalmaktadır. Temel piklere ait kırınım açıları çok az değişmekle birlikte pik şiddetlerinin azaldığı bariz şekilde görülmektedir. Bunun nedeni katman ve tabakalar arasında bulunan kuvvetli hidrojen bağlarıdır. Bu bağlar nedeniyle halloysitin en üst katmanında yüzeyel modifikasyon gerçekleşmesidir. Elde edilen bu sonuçlar literatürle de uyum içerisindedir [43].

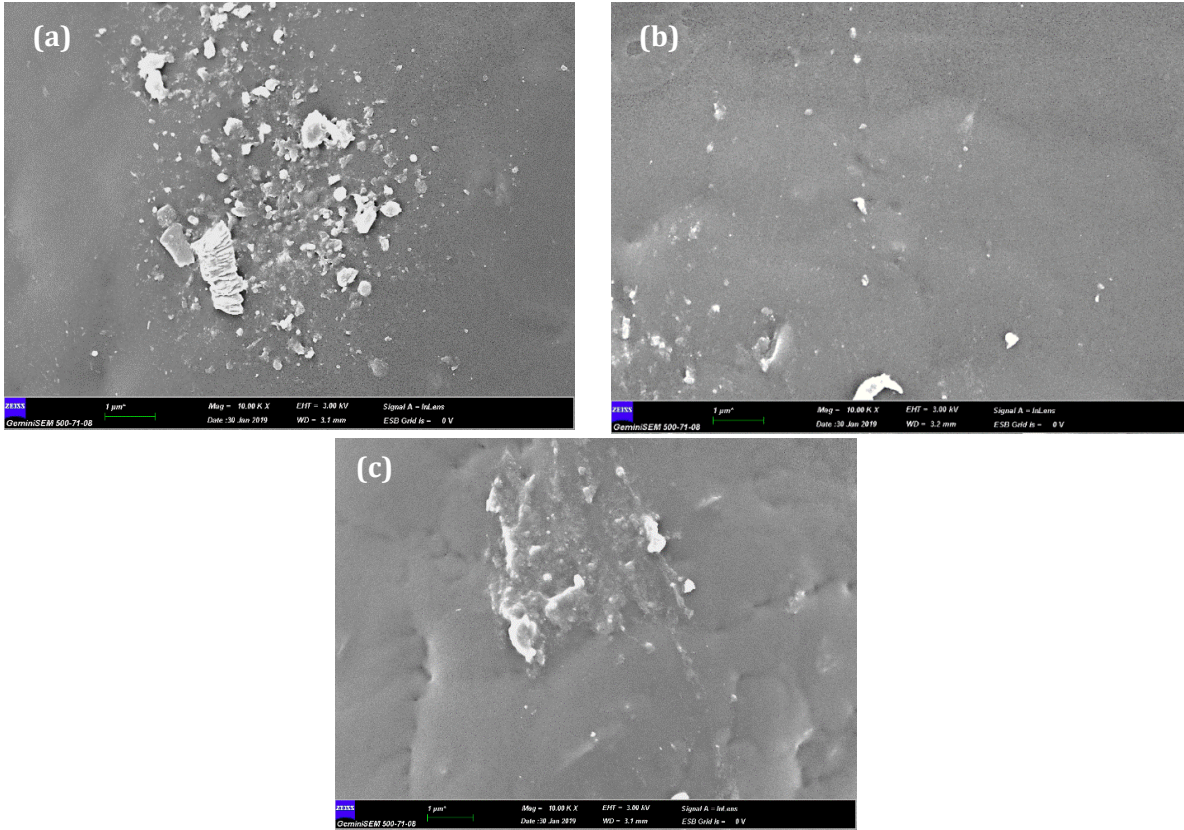
HNT'e ait temel pikler, artan HNT miktarına bağlı olarak ağırlıkça % 20 oranında HNT içeren kompozitlerin X-RD desenlerinde görülmeye başlamıştır. Hem PP hem de HNT ana pikleri, Silan ile modifiye edilen (SM-2 tipi numuneler) HNT içeren nanokompozitlerde en düşük değerleri almışlardır. Sonuçlardan ayrıca 21,79 ° kırınım açısında bir PP piki ile kırınım açısı 20,06 ° olan bir halloysite ait pikin çakıştığı görülmüştür. Bu çakışma daha düşük ağırlık yüzdelerinde HNT içeren nanokompozitler için daha belirgindir. Modifiye edilmemiş ve PEI ile modifiye edilmiş (SM-1) HNT içeren nanokompozitler için, maksimum PP pikinin kırınım açısı ($2\theta=16,93^\circ$ 'de görünen) artan HNT içeriği ile azalır.

3.2. FESEM (Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu) Sonuçları

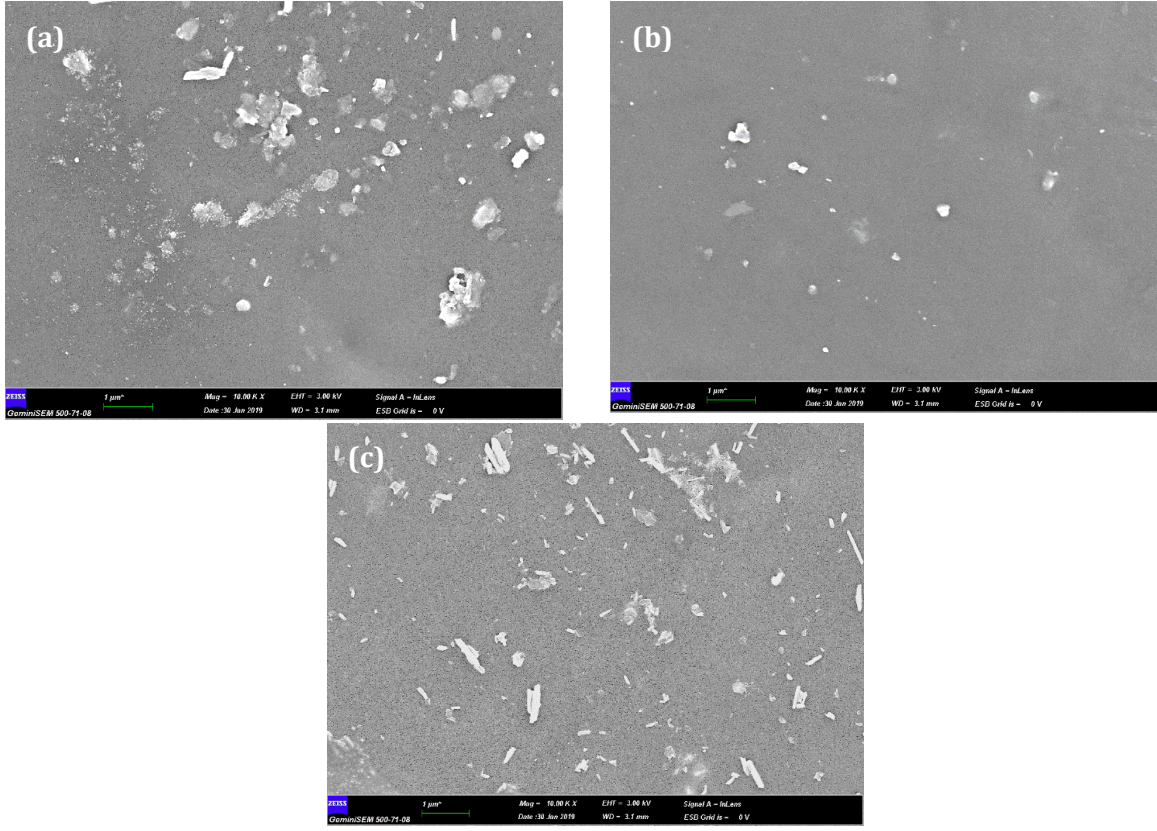
Şekil 4'te modifiye edilmemiş ve yüzeyi modifiye edilmiş HNT tozlarının FESEM mikrogramları verilmiştir. 10KX'te alınan mikrogramlara göre HNT'lerin görünümünde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Buna rağmen PEI (SM-1 ile kodlanmış örnekler) ile modifiye edilmiş HNT'lerin daha küçük parçacık boyutu ve daha lifli (bir tür dendritik) yapı sergiledikleri söylenebilir. PP matris içerisinde iyi dağılım gösteren HNT'lerin HNT/PP kompozitlere daha iyi özellikler kazandırdığı bilinmektedir. Bu nedenle morfolojik çalışmalar için nanokompozitlerin ekstrüzyon prosesinden sonra alınan FESEM görüntüleri de ayrıca Şekil 5-Şekil 7'de verilmiştir.



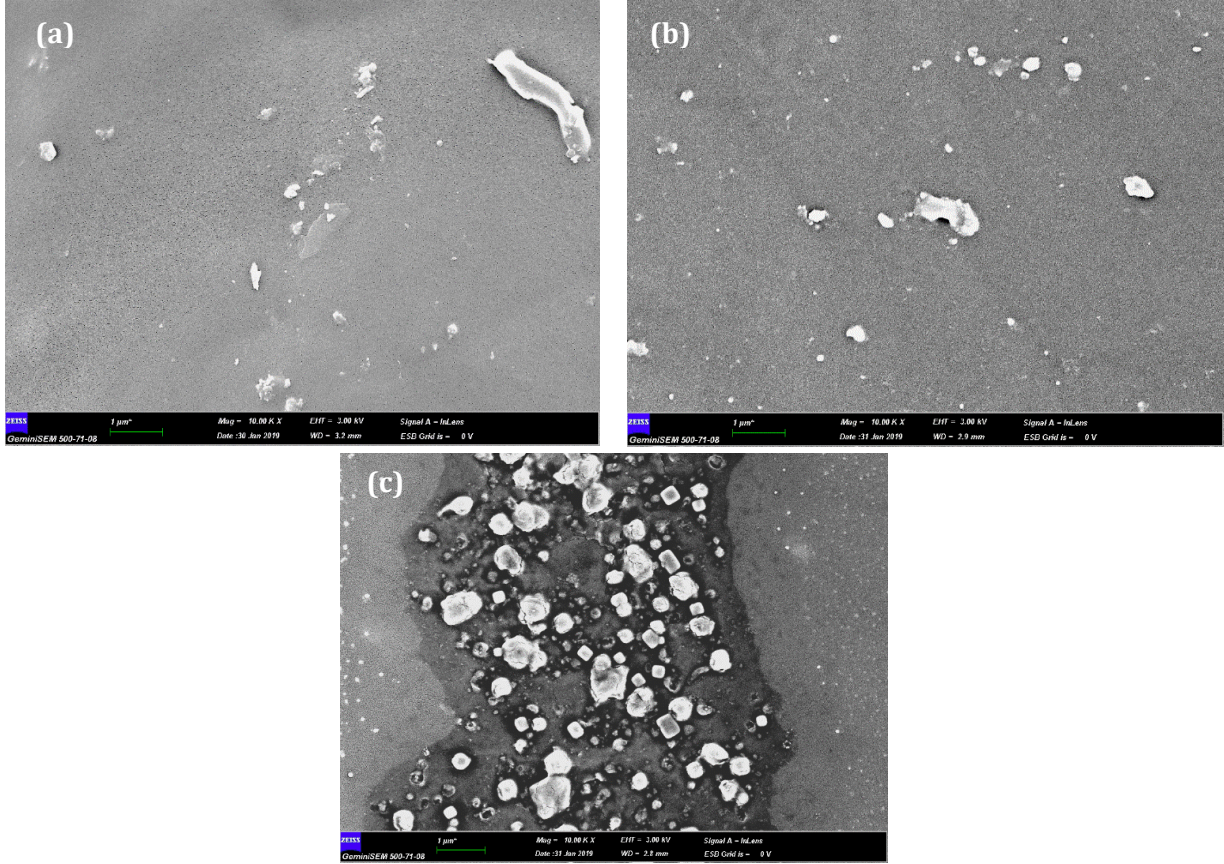
Şekil 4. (a) Modifiye Edilmemiş (b) SM-1 Yöntemiyle Modifiye Edilmiş (c) SM-2 Yöntemiyle Modifiye Edilmiş HNTlerin FESEM Görüntüleri



Şekil 5. Ağ. a) % 5, b) %10 ve c) % 20 Oranında UM-HNT İçeren HNT/PP Nanokompozitlerin FESEM Görüntüleri



Şekil 6. Ağ. a) % 5, b) %10 ve c) % 20 Oranında SM-1 HNT İçeren HNT/PP Nanokompozitlerin FESEM Görüntüleri



Şekil 7. Ağ. a) % 5, b) % 10 ve c) % 20 Oranında SM-2 HNT İçeren HNT/PP Nanokompozitlerin FESEM Görüntüleri

Nanokompozitlerin FESEM mikrogramları yüzey modifikasyon süreçlerinin PP matris içerisinde HNT dağılımı üzerinde olumlu etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle PEI ile yüzey modifikasyonu (X-RD sonuçları tarafından

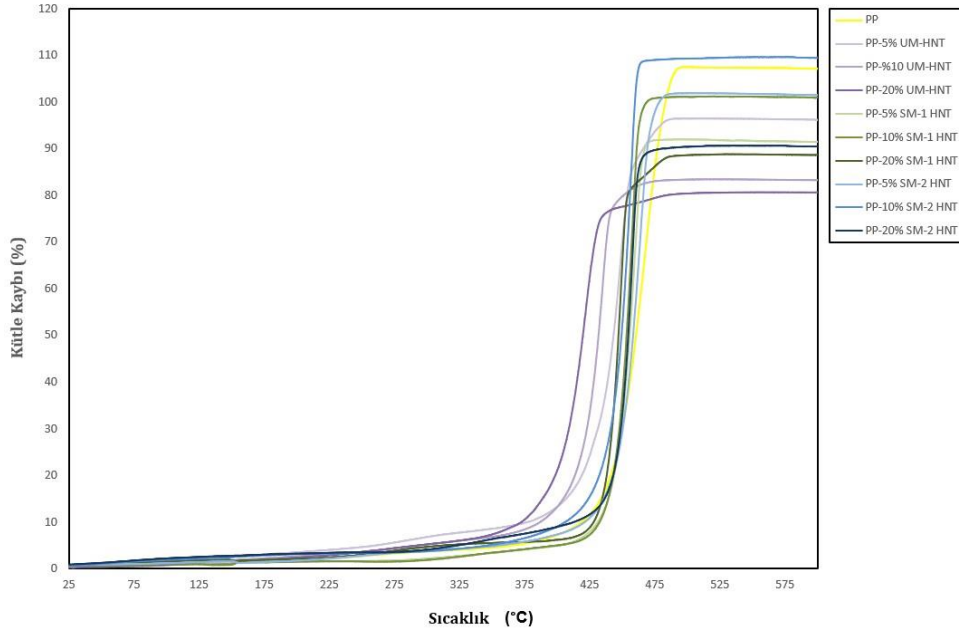
desteklendiği gibi) daha iyi bir dağılıma yol açmıştır. Ancak buna ek olarak, her türdeki HNT için HNT ağırlık yüzdesi arttıkça PP matris içerisinde homojen bir dağılım elde etmenin daha zor hale geldiği açıktır.

3.3. TGA (Termogravimetrik Analiz) Sonuçları

Nanokompozitlerin yüzde kütle kaybı değerleri TGA sonuçlarından belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 8'de sıcaklık ve yüzde kütle kaybı şeklinde özetlenmiştir. Sonuçlara göre tüm numunelerde önemli kütle kaybının 375-450 °C aralığında başladığı rahatlıkla söylenebilir. Ayrıca, % 20 oranında modifiye edilmemiş HNT içeren nanokompozit ilk önce bozulmaya başlarken, % 10 oranında PEI ile modifiye edilmiş HNT içeren nanokompozitin son olarak bozulmaya başladığı açıktır.

Modifiye edilmemiş HNT (UM-HNT) ile güçlendirilmiş nanokompozitler kütle kaybetmeye takviyesiz PP'den önce başlamıştır. Diğer taraftan yüzey modifikasyon süreçleri nanokompozitlerin termal dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle PEI (SM-1 kodlu numuneler) ile gerçekleştirilen yüzey modifikasyon işlemleri daha iyi ısı dayanım göstermektedir. Bu sonuç, SM-1 adımlarından sonra d aralığı değerlerinde bir artış olduğunu gösteren X-RD sonuçları tarafından da desteklenmektedir.

Ayrıca, tüm yüzey modifikasyon gruplarında, % 20 HNT oranına sahip nanokompozitler en düşük bozulma sıcaklığına sahiptir. Optimum sonuçlar % 10 oranında HNT içeren numunelerde gözlenmiştir. Bu sonuç, FESEM sonuçları tarafından da desteklenen dağıtım sorunlarına katkıda bulunabilir. Nanokompozitlerin % 10 (T_{10%}) ve % 50 (T_{50%}) kütle kaybı sıcaklıkları Tablo 5'te listelenmiştir.



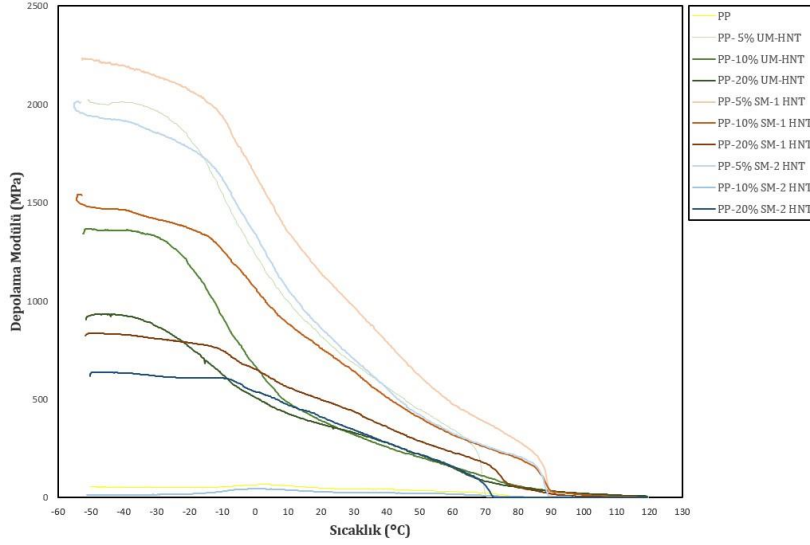
Şekil 8. PP/HNT Nanokompozitlerinin TGA Sonuçlarından Elde Edilen % Kütle Kaybı Değerleri

Tablo 5. Nanokompozitlerin TGA Sonuçları

Numune	T _{10%} (°C)	T _{50%} (°C)
Katkısız PP	411	458
Modifiye Edilmemiş HNT	485	-
PP- UM-HNT		
Ağ. % 5 HNT	435	455
Ağ. %10 HNT	424	446
Ağ. % 20 HNT	393	428,5
PP- SM-1 HNT		
Ağ. % 5 HNT	445	461
Ağ. %10 HNT	450	467
Ağ. % 20 HNT	440,5	454
PP- SM-2 HNT		
Ağ. % 5 HNT	428	467
Ağ. %10 HNT	446	465
Ağ. % 20 HNT	434	460

3.4. DMA (Dinamik Mekanik Analiz) Sonuçları

Şekil 9, numunelerin Depolama Modülü (SM)-Sıcaklık grafiklerini vermektedir.

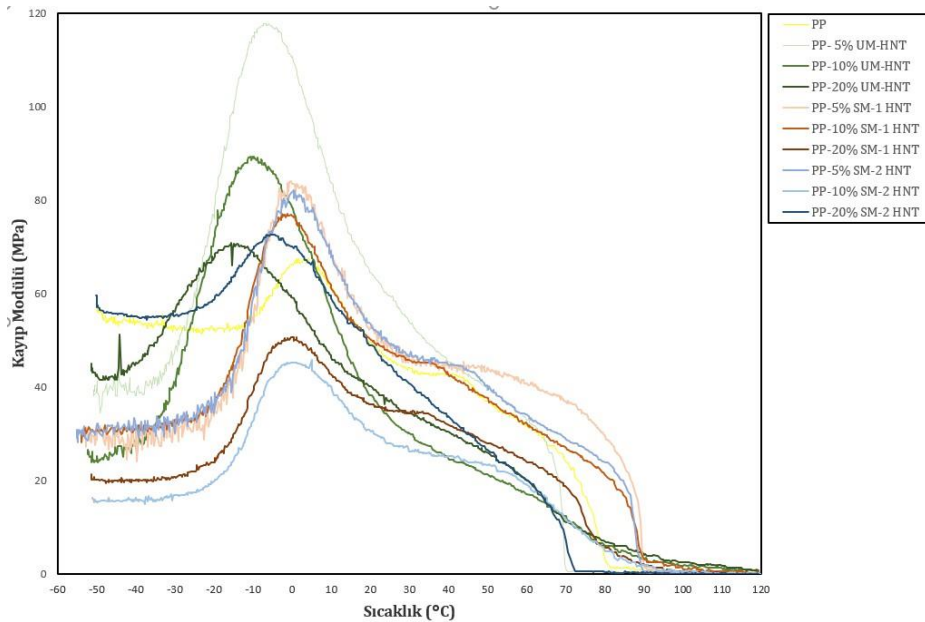


Şekil 9. Nanokompozitlerin Depolama Modülü (SM) – Sıcaklık Grafikleri

Elde edilen DMA verilerine bağlı olarak aşağıdaki sonuçlar vurgulanabilir;

- Numunelerin SM-T eğrileri aynı eğilimi izlese de SM değerleri farklıdır,
- %5 oranında HNT içeren nanokompozitler, desteklenmemiş PP'den daha yüksek depolama modülü değerlerine sahiptir. Bu sonucun dağılımdaki zorluklara bağlı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca silanla modifiye edilmiş HNT içeren numuneler için alifatik zincirlerin varlığının da elastik özelliklerde azalmaya neden olduğu söylenebilir.
- Nanokompozitlerde HNT'nin ağırlıkça oranı arttıkça, numunelerin depolama modülü azalmaktadır.
- X-RD ve TGA sonuçları ile uyumlu olarak en yüksek depolama modülü değerleri SM-1 numunelerinde gözlenmiştir.

Şekil 10 ise numunelerin Kayıp Modülü (LM)-Sıcaklık eğrilerini göstermektedir.



Şekil 10. Nanokompozitlerin Kayıp Modülü (LM) – Sıcaklık Grafikleri

Tablo 6, DMA ile elde edilen depolama modülü (E'), Kayıp Modülü (E'') ve Tg (Cam Geçiş Sıcaklığı) sonuçlarından oluşmaktadır. Numunelerden tespit edilen Tg (geçiş sıcaklığı) değerleri genellikle ağırlıkça % 10 ve 20'lik oranlarda modifiye edilmemiş HNT ile takviye edilmiş numuneler dışında takviye edilmemiş PP'e yakındır.

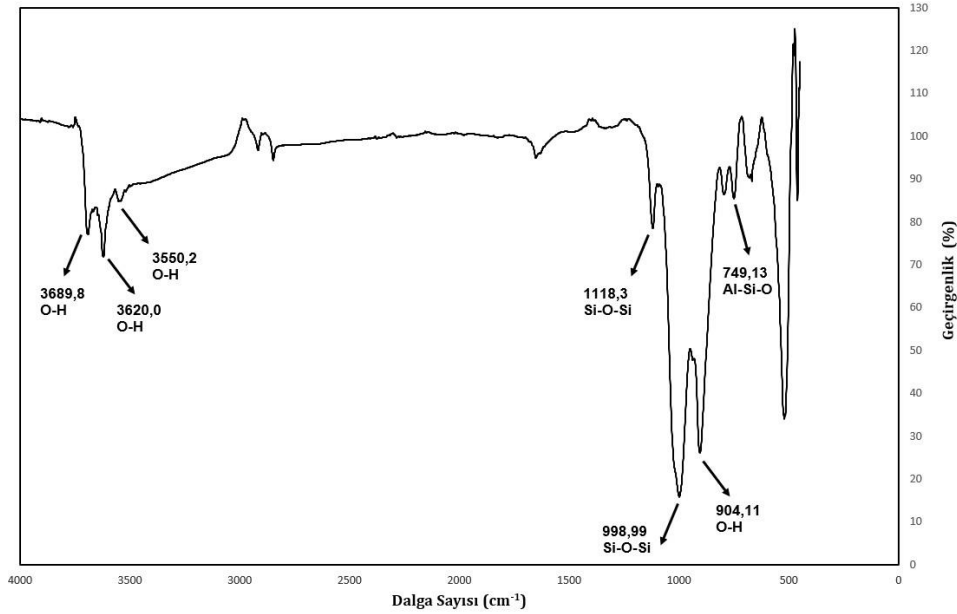
Tablo 6. Nanokompozitlerin Depolama Modülü, Kayıp Modülü ve Tg Değerleri

Numune	Depolama Modülü (E') (MPa)	Kayıp Modülü (E'') (MPa)	Tg* (°C)
Katkısız PP	1242,0	67,6	117,3
PP- UM-HNT	Ağ. %5 HNT	2024,7	117,9
	Ağ. %10 HNT	1369,1	89,4
	Ağ. % 20 HNT	934,6	70,9
PP- SM-1 HNT	Ağ. %5 HNT	2233,9	83,9
	Ağ. %10 HNT	1540,0	76,8
	Ağ. % 20 HNT	836,4	50,7
PP- SM-2 HNT	Ağ. %5 HNT	2014,6	82,2
	Ağ. %10 HNT	818,8	45,9
	Ağ. % 20 HNT	635,9	72,6

*Tan δ 'ya bağlı olarak hesaplanan değerlerdir.

3.5. FT-IR (Fourier Transform Kızılötesi Spektrofotometre) Sonuçları

FTIR, farklı Tip HNT'ler ile PP matris arasındaki yüzeylerarası etkileşimleri anlamak amacıyla modifiye edilmemiş toz HNT, ekstrüze edilmiş PP ve ekstrüze edilmiş HNT/PP nanokompozitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 11, modifiye edilmemiş toz HNT'nin FTIR sonuçlarını göstermektedir. Grafiğe göre halloysitin iç yüzeyindeki Al-OH bağlarından kaynaklanan hidroksil gruplarına ait gerilmeler 3689,8 ve 3620,0 cm^{-1} 'de görülmektedir. Ayrıca, 3550,2 cm^{-1} dalga sayısında bir hidroksil grubunun halloysitin nem emme özelliğini gösteren gerilme piki görülebilir.

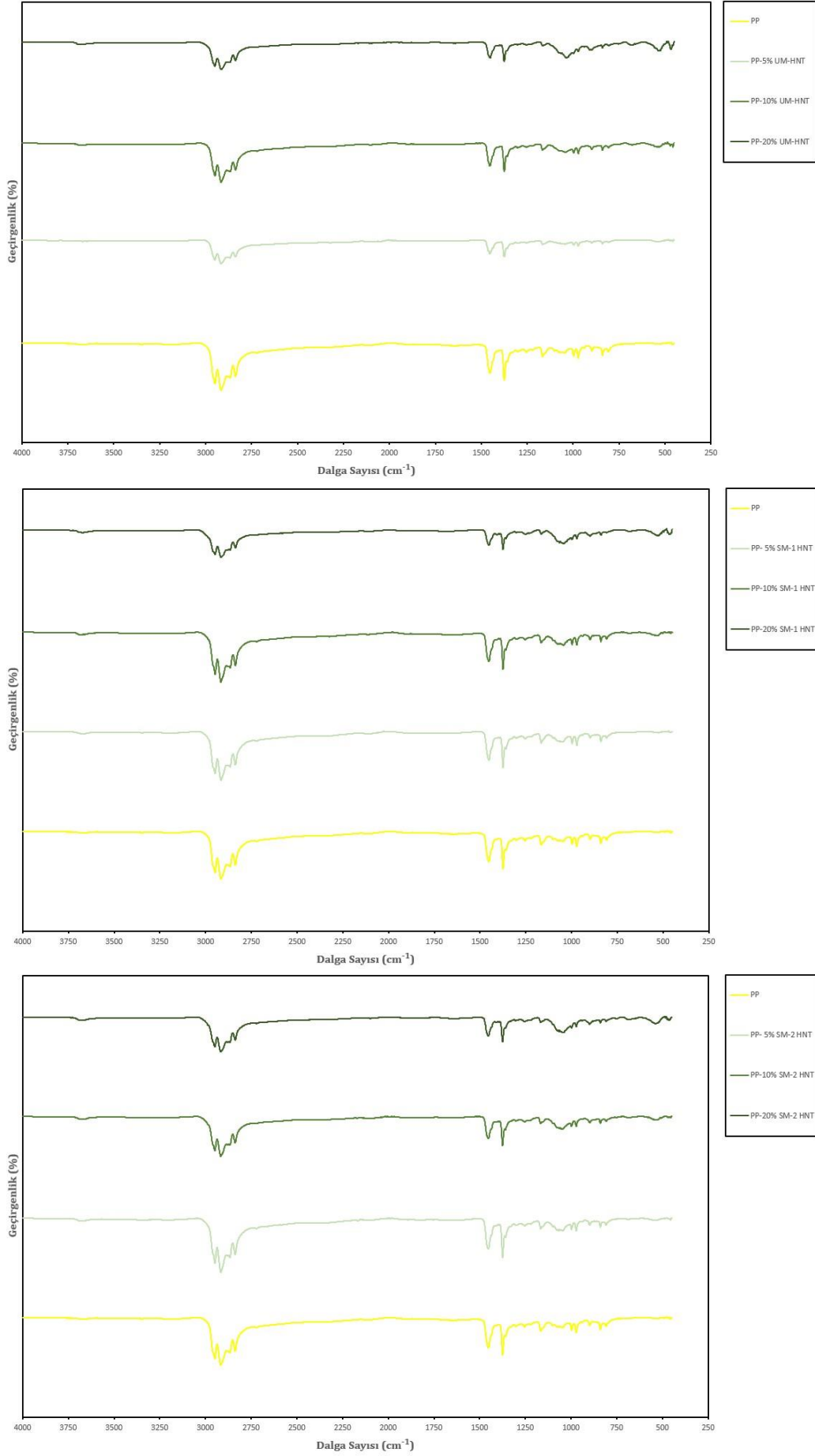


Şekil 11. Modifiye Edilmemiş HNT'ün FTIR Sonuçları

Temin edilmiş haliyle (modifiye edilmemiş) halloysitin silikadan kaynaklanan Si-O-Si gerilmeleri sırasıyla 998,99 ve 1118 cm^{-1} dalga sayılarında gözlemlenebilir. Sırasıyla 904 cm^{-1} ve 749 cm^{-1} dalga sayılarında gözlenen pikler ise halloysitin iç Al-OH gruplarının O-H deformasyon piklerine ve Al-Si-O deformasyon bandına aittir. Tablo 7, halloysit absorpsiyon bantlarını ve bunların açıklamalarını özetlemektedir. Bu temel FTIR pikleri literatürde belirtilen değerlerle uyum içerisindedir [43, 44]. Şekil 12'de ise nanokompozitlere ait FTIR sonuçları görülebilir.

Tablo 7. HNT Absorpsiyon Bantları ve Açıklamaları

HNT Absorpsiyon Bandı (cm^{-1})	Açıklama
749,13	Al-Si-O Deformasyon Piki
904,11	İç Hidroksil Gruplarının O-H Deformasyonu
998,99	İç Yüzeyin Si-O-Si Gerilmesi
1118,3	İç Yüzeyin Si-O-Si Gerilmesi
3550,2	Sudan Kaynaklanan O-H Gerilmesi
3620,0	İç Yüzey Hidroksil Gruplarının O-H Gerilmesi
3689,8	İç Yüzey Hidroksil Gruplarının O-H Gerilmesi



Şekil 12. (a) UM-HNT/PP (b) SM-1 HNT/PP (c) SM-2 HNT/PP Nanokompozitlerin FTIR Sonuçları

Bu grafiklere göre $1451,6 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayısında beliren katkısız PP'nin ana piklerinden birisi bütün nanokompozitlerin FTIR spektrasında görülmektedir. Bu pik CH_3 'ten kaynaklanan C-H bağlarının simetrik-asimetrik deformasyonuna işaret eder ve HNT'lerin PP matrix içerisinde dağılımını doğrular. Ayrıca, HNT'ün hidroksil gruplarından kaynaklanan pikin şiddeti nanokompozitteki HNT miktarının artmasıyla artış göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada yüzeyleri modifiye edilmiş HNT'ler PP matris içerisine ekstrüzyon yöntemi ile eklenmiş ve elde edilen şerit halindeki numuneler yapısal olarak karakterize edilmiştir. Öncelikle, morfolojik çalışmalar yüzey modifikasyon süreçlerinin PP matris içerisinde HNT tozların homojen dağılımına etki ettiğini göstermiştir. FESEM görüntüleri değerlendirildiğinde ağırlıkça % 10 HNT oranının PP matris içerisinde homojen dağılım için en uygun miktar olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara ek olarak, X-RD analizleri ile PEI kullanılarak yürütülen yüzey modifikasyon işleminin HNT'lerin kafes aralıklarında küçük bir değişikliğe neden olduğu gözlenmiştir. Nanokompozitlerin TGA ve DMA analizleri de bu sonucu doğrulamaktadır.

Nanokompozitlere uygulanan TGA sonuçlarından elde edilen $T_{%10}$ değerleri de morfolojik incelemelerle uyum içerisindedir. Kompozit içerisindeki HNT miktarının %10'dan %20'ye yükseltilmesi PP matris içerisinde homojen dağılımı daha zor hale getirmektedir.

Bu sonuçlar ışığında, sonraki çalışmalar için d aralığı değerlerini artırarak nanokompozitlerin özelliklerini geliştirecek farklı yüzey modifikasyon süreçlerine odaklanılması, ekstrüzyondan sonra PP/HNT nanokompozitlerin enjeksiyon ile kalıplanması ve nano dolgu ile güçlendirilmiş polipropilen matris kompozitlerinin alev geciktiricilik, mekanik dayanım gibi farklı özelliklerine odaklanılması tavsiye edilmektedir. Ayrıca PP için takviye elemanı olarak farklı bazı tabakalı killerin (boehmit vb.) kullanılması da tavsiye edilmektedir.

Teşekkür

Bu araştırma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (ERU- BAP) tarafından FYL-2017-7138 proje numarası ile desteklenmiştir. Yazarlar ayrıca Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) ve Erciyes Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'ne (ERNAM) nanokompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu esnasındaki katkılarından dolayı teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Shelesh-Nezhad, K., Orang, H. Motallebi M. 2012. The Effects of Adding Nano-Calcium Carbonate Particles on the Mechanical and Shrinkage Characteristics and Molding Process Consistency of PP/ CaCO_3 Nanocomposites. ss 357-368. Doğan, F., ed. Polypropylene, Intechopen, Croatia, 500 s.
- [2] Dai Lam, T., Hoang, T. V., Quang, D. T., et al. 2009. Effect of Nanosized and Surface-Modified Precipitated Calcium Carbonate on Properties of CaCO_3 /Polypropylene Nanocomposites. Materials Science and Engineering A, 501, 87-93.
- [3] Buasri, A., Chaiyut, N, Borvornchettanuwat, N, et al. 2011. Thermal and Mechanical Properties of Modified CaCO_3 /PP Nanocomposites. International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, 6, 689-692.
- [4] Bracho, D., Dougnac, V., Palza, H., et al. 2011. Functionalization of Silica Nanoparticles for Polypropylene Nanocomposites Applications. 11 Congresso Brasileiro de Polimeros, 16-20 Ekim, Campos do Jordao, Brezilya, 1477-1482.
- [5] Pedrazzoli, D., Khumalo, V., Karger-Kocsis, J., et al. 2014. Thermal, Viscoelastic and Mechanical Behavior of Polypropylene with Synthetic Boehmite Alumina Nanoparticles. Polymer Testing, 35, 92-100.
- [6] Funck, A., Kaminsky, W. 2007. Polypropylene Carbon Nanotube Composites by In Situ Polymerization. Composite Science and Technology, 67, 906-915.
- [7] Kashiwaga, T., Grulke, E, Hilding, J., et al. 2004. Thermal and Flammability Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Nanocomposites. Polymer, 45, 4227-4239.
- [8] Maharramov, A.M., Ramazanov, M.A., Ahmadova, A.B., et al. 2016. Thermal and Mechanical Properties of Polymer-Based Nanocomposites of Isotactic Polypropylene and Titanium Nanoparticles. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 11,365-372.

- [9] Bahar, E., Ucar, N., Onen, A., et al. 2011. Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene Nanocomposite Materials Reinforced with Cellulose Nano Whiskers. *Journal of Applied Polymer Science*, 125, 1-8.
- [10] Marceo, A.M., Gonzalez D., Quijada R., et al. 2013. Polypropylene/Graphene Nanosheet Nanocomposites by in Situ Polymerization: Synthesis, Characterization and Fundamental Properties. *Composite Science and Technology*, 84, 1-7.
- [11] DeBoest, J.F. 1995. Reinforced polypropylenes. ss 190-192. Lampman, S.R. ed 1995. *Engineered Materials Handbook*, ASM International, USA, 1300 s.
- [12] Avella, M., Cosco, S, Di Lorenzo, ML., et al. 2006. Nucleation Activity of Nanosized CaCO₃ on Crystallization of Isotactic Polypropylene in Dependence on Crystal Modification, Particle Shape and Coating. *European Polymer Journal*, 42, 1548–1557.
- [13] Yang, K., Yang Q. 2006. Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites. *Materials Letters*, 60, 805-809.
- [14] Prashanta, K., Soulestin, J., Lacrampe, M.F., Krawczack, P. 2009. Present Status and Key Challenges of Carbon Nanotubes Reinforced Polyolefins: A Review on Nano-Composites Manufacturing and Performance Issues. *Polymers & Polymer Composites*, 17, 205–245.
- [15] Marini, J., Bretas R.E.S. 2013. Halloysite Nanotubes as Reinforcing Fillers in Polymeric Nanocomposites. *Society of Plastic Engineers Plastics Research Online*.
- [16] Rawtani, D., Agrawal, Y.K. 2012. Multifarious Applications of Halloysite Nanotubes: A Review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 30, 282-295.
- [17] Bhuvana, S., Prabakaran, M. 2014. Synthesis and Characterisation of Polyamide/Halloysite Nanocomposites Prepared by Solution Intercalation Method. *Nanoscience and Nanotechnology*, 4(3), 44-51.
- [18] Deng, S., Zhang J., Ye L., et al. 2008. Toughening Epoxies with Halloysite Nanotubes. *Polymer*, 49, 5119-5127.
- [19] Prashanta, K., Lacrampe M.F., Krawczack P. 2013. Halloysite Nanotubes-Polymer Nano Composites: A New Class of Multifaceted Materials. *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, 1, 11-14.
- [20] Yuan, P., Southon P.D., Liu Z., et al. 0008. Functionalization of Halloysite Clay Nanotubes by Grafting with γ -Aminopropyltriethoxysilane. *The Journal of Physical Chemistry A*, 112, 15742-15751.
- [21] Marney, D.C.O, Russel, D.Y., Wu D.Y. 2008. The Suitability of Halloysite Nanotubes as a Fire Retardant for Nylon 6. *Polymer Degradation and Stability*, 93, 1971-1978.
- [22] Du, M., Guo B., Jia, D. 2010. Newly Emerging Applications of Halloysite Nanotubes: A Review. *Polymer International*, 59, 574-582.
- [23] Vahabi, H., Sonnier, R., Otazaghine, B., et al. 2013. Nanocomposites of Polypropylene/Polyamide 6 Blends Based on Three Different Nanoclays: Thermal Stability and Flame Retardancy. *Polimery*, 58, 350-360.
- [24] Pedrazolli, D., Pegoretti, A., Thomann, R., et al. 2015. Toughening Linear Low-Density Polyethylene with Halloysite Nanotubes. *Polymer Composites*, 36(5), 869-883.
- [25] Ismail, H., Pakbakhsh, P., Fauzi, M.N.A, et al. 2009. The Effect of Halloysite Nanotubes as a Novel Nanofiller on Curing Behaviour, Mechanical and Microstructural Properties of Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) Nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48, 313-323.
- [26] Uzan, G. 2014. İtakonik asitle modifiye edilmiş stiren - bütadien kauçuk / halloysit nanotüp nanokompozitleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99 s, İstanbul.
- [27] Kumar, S. 2015. Morphological, thermo-mechanical and fracture performance of polyamide octene) elastomer blends and their halloysite nanotube filled ternary nanocomposites. Hindistan Teknoloji Enstitüsü, Doktora Tezi, 199 s, Delhi.
- [28] Kaygusuz, İ. 2014. Halloysit nanotüplerin polilaktitin mekanik, kristallenme ve atmosferik yaşlanma davranışlarına etkileri. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 119 s, Ankara.
- [29] Daly, R.C., Fleischer, C.A., Wagner, A.L., et al. 2008. Halloysite Nanotubes in Polymers. *Technical Proceedings of the 2008 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show*, 1-44.
- [30] Fernandez, A., Muniesa, M., Gonzalez, J. 2013. Characterisation and Processing of Reinforced PA 6 with Halloysite Nanotubes (HNT) for Injection Molding. *Journal of Mechanical Engineering*, 59, 183-192.

- [31] Hedicke-Hochstotter, K., Alstadt, V. 2019. Halloysite Nanocomposites: Natural Occurring Silicate Nanotubes as Reinforcement in Polyamide 6. *Zeitschrift Kunststofftechnik*, 5, 72-86.
- [32] Prashanta, K., Schmitt, H., Lacrampe M.F., et al. 2011. Processing and Mechanical Behaviour of Halloysite Filled Polyamide-6 Nanocomposites. 18. International Conference on Composite Materials, Jeju Island, SOUTH KOREA, 21-26 Ağustos.
- [33] Gaaz, T.S., Sulong, E.B., Akhtar, M.N., et al. 2015. Properties and Applications of Polyvinyl Alcohol, Halloysite Nanotubes and Their Nanocomposites. *Molecules*, 20, 22833-22847.
- [34] Ramamoorthi, R., Sampath, P.S. 2015. Properties and Applications of Polyvinyl Alcohol, Halloysite Nanotubes and Their Nanocomposites. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 74, 685-689.
- [35] Komarov, P., Markina, A., Ivanov, V. 2016. Influence of Surface Modification of Halloysite Nanotubes on Their Dispersion in Epoxy Matrix: Mesoscopic DPD Simulation. *Chemical Physics Letters*, 653,24-29.
- [36] Tham, W.L., Poh, B.T., Ishak, Z.A.M, et al. 2016. Characterisation of Water Absorption of Biodegradable Poly(lactic Acid)/Halloysite Nanotube Nanocomposites at Different Temperatures. *Journal of Engineering Science*, 12, 13-25.
- [37] Gaaz T.S., Sulong E.B., Akhtar, M.N., et al. 2015. Morphology and Tensile Properties of Thermoplastic Polyurethane-Halloysite Nanotube Nanocomposites. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 12, 2844-2856.
- [38] Eser, N. 2010. Bazı halloysit-polimer nanokompozitlerin hazırlanması ve karakterizasyonu. Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92 s, Ankara.
- [39] Reliance Industries Limited. Properties of polypropylene http://www.ril.com/DownloadFiles/Polymers/re_H026SG.pdf (Erişim Tarihi: 10.30.2020).
- [40] Gupta, B., Lacrampe, M., Krawczak, P. 2006. Polyamide-6 Nanocomposites: A Critical Review. *Polymers & Polymer Composites*, 14,13-38.
- [41] Kamble, R., Ghag, M., Gaikawad, S., Panda, B.K., 2012. Halloysite Nanotubes and Applications: A Review, *Journal of Advanced Scientific Research*, 3(2), 25-29.
- [42] Kubada, P.R., Senanayake, R., 2022. Thermo-mechanical Properties of Polyethyleneimine (PEI) Modified HNTs Filled ABS/PVC Composites, *Materials Today: Proceedings*.
- [43] Üner G. 2017. 3-aminopropiltrioksilan (APTS) ile modifiye polimer/halloysit nanotüplerinin tasarımı, sentezi ve karakterizasyonu. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116 s, Ankara.
- [44] Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., Delvaux, B. 2005. Halloysite Clay Minerals – A Review, *Clay Minerals*, 40(4), 383–426.

Investigation Of Lake Water Level Forecasting Performances Of Subband Decomposition Techniques

Levent Latifoğlu^{*1}, Tefaruk Haktanır²

^{*1} Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ

² Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 10.08.2022, Kabul / Accepted: 29.11.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Forecasting of lake water level,
Artificial Neural Networks,
Empirical Mode Decomposition,
Singular Spectrum Analysis,
Discrete Wavelet Transform

Abstract: In this study, hybrid methods have been developed for the estimation of the monthly average water level of a natural lake in the coming months from the next one to the sixth month ahead. Lake water level data were preprocessed using Discrete Wavelet Transform (DWT), Empirical Mode Decomposition (EMD), Singular Spectral Analysis (SSA) techniques and these subband signals were applied to the input data of Artificial Neural Networks (ANN). Thus, three different hybrid models were obtained and the prediction performance of these models was analyzed. According to obtained results, it was observed that the hybrid approaches obtained with the preprocessing methods applied to the water level data improved the model performance and EMD-ANN and SSA-ANN hybrid models were found to better predict average monthly lake water levels for a forecast period of one to six months than the ANN and DWT-ANN model.

Göl Su Seviyesi Tahmininde Alt Bant Ayrıştırma Tekniklerinin Performanslarının İncelenmesi

Anahtar Kelimeler

Göl su seviyesi tahmini,
Yapay Sinir Ağları,
Ampirik Kip Ayrıştırma,
Tekil Spektrum Analizi,
Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Öz: Bu çalışmada, doğal bir gölde ortalama su seviyesinin bir aydan altıncı aya kadar olan aylık ileri tahmini için hibrit yöntemler geliştirilmiştir. Göl su seviyesi verileri Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT), Ampirik Kip Ayrıştırma (EMD), Tekil Spektrum Analiz (SSA) teknikleri kullanılarak ön işleme tabi tutulmuştur ve elde edilen bu alt bant sinyalleri Yapay Sinir Ağlarına (YSA) giriş verileri olarak uygulanmıştır. Böylece üç farklı hibrit model elde edilmiş olup bu modellerin tahmin performansı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, su seviyesi verilerine uygulanan ön işleme yöntemleri ile elde edilen hibrit yaklaşımların model performansını iyileştirdiği gözlemlenmiştir ve EMD-ANN ve SSA-ANN hibrit modellerinin bir ila altı aylık bir tahmin dönemi için ortalama aylık göl suyu seviyelerini ANN ve DWT-ANN modeline göre daha iyi tahmin ettiği görülmüştür.

*Corresponding Author, email: leventlatifoglu@gmail.com

1.Introduction

Information about the water-related events acquired from gauged data is important because these data are used to estimate their future magnitudes. Quantitative estimation of future hydrological phenomena is important for analyzing and predicting the behavior of the nature and also for the optimal utilization of water resources leading to a more productive water management. Lakes are one of the most important resource on the world. Therefore, accurate water level forecasting of natural lakes is crucial. Lake water level estimations are needed for planning of water supplies, hydropower plants, commercial navigation, fishing industry, design of hydraulic and other structures along the coasts, evaluation of the aquatic ecosystem, and monitoring and regulation of water quality [1, 2].

As an example for the significance of forecasting the lake water surface elevations in a couple of months ahead, we can mention the present situation of Lake Beyşehir and the man-made Beyşehir canal conveying irrigation water diverted from it. Lake Beyşehir is the largest freshwater lake in Türkiye having clear water suitable for irrigation and even for municipal purpose. At a northern edge of this lake there is a man-made canal known as Beyşehir Creek which discharges the lake with a flow rate as much as 30 m³/s into the land-locked Konya plain

provided that the lake water surface elevation is higher than 1123.35 m above mean sea level [3]. With the objective of releasing as much water as needed during the cultivation season, the Beyşehir Weir, which has 15 bays and 15 sluice gates, was contracted by the Ottoman Empire to a German company in 1908, and the construction was completed in 1914. Conveyance of water through Beyşehir Creek with the purpose of irrigating cultivated fields along the 60 km length until the canal joins the Suğla Lake has been provided in a controlled manner since 1914, and this practice is still operational today with further smaller diversions and subsidiary canals having been added along the way [3]. This irrigation activity has significantly increased the production of mainly chickpea and lintel in that portion of the fertile Konya plain. In short, the accurate prediction of the water surface elevation of Lake Beyşehir one, two, or three months ahead of the summer season would improve irrigation planning and management. As a second example of the significant effects of lake water level changes, the case of Lake Van can be mentioned. The excessive rising of Lake Van in 1996, the largest lake in Türkiye, which lies in the Eastern Anatolia Region, caused disruption of train services between Iran and Türkiye during that period, among other problematic issues. While the average water level of Lake Van over the period from 1944 through 2007 was around 1648.0 m above MSL, the water level reached an elevation of 1950.2 m in 1996 [4-6]. Because the train station was built along Lake Van's coast to transfer the Ro-Ro train from the ferry boat to the railway at the station, the unexpected rise of Lake Van that year caused inundation of the train station. There were problems with bus services, too. And, quite a few commercial and residential buildings and some agricultural fields nearby the coast of the lake were also inundated, causing considerable losses [4-6]. If the lake surface elevation could have been forecasted three months prior to the flooding, the transportation management to and from Iran would have been planned in another way, and precautionary measures in other sectors also could have been taken beforehand. Lake water level data, like other hydrological data, are inherently nonlinear and non-stationary. Many studies have been done to estimate and simulate these data. The early studies had been based on linear approaches such as parametric autoregressive and autoregressive moving average models, which had been introduced in the 1970s to analyze time series [7, 8]. These techniques assume that the time series is stationary and linear [9, 10]. The wavelet transform (WT), which is frequently used in the analysis of time series, enables the analysis of signals in both the time and frequency domains. WT is used in the estimation of the hydrological data as well because it makes the estimation easier by decomposing the signal at different resolution levels. Sifüzzaman analyzed the WT and Fourier Transform (FT) methods by detailed comparative studies and concluded that WT has several advantages over FT [11].

Wavelet analysis and short-time Fourier analysis have been designed for linear but non-stationary data analysis [12, 13]. Using wavelet analysis, Smith et al. carried out studies on the characterization and estimation of stream flows [14].

Yet, nonparametric models have also been used for hydrological time series analysis and estimation. Yakowitz, for example, presented a stochastic model for river flows [15]. In recent years, artificial intelligence (AI) techniques have been widely used in nonlinear hydrological applications and noisy data sets [16]. Artificial intelligence methods include mathematical optimization algorithms as well as logic, classification, statistical learning, and probability-based methods. The Artificial Neural Networks (ANN) approach, based on the principle of parallel processing of information by simulating the neuron structure in the human brain, has been used in many studies on the estimation of hydrological data. In the study conducted by the ASCE Task Committee, the place of ANN in hydrology has been investigated, and the strengths and limitations of the ANN methods have been compared to those of other approaches [17]. In general, an ANN model consists of three layers: (1) the input layer, into which the input data are loaded, (2) the hidden layer, to which the activation function is applied, and (3) the output layer, which produces the expected outcome. Hornik et al. have applied the forward feed-back propagation (FFBP) algorithm to ANN for the first time and used it for the modeling of hydrological data. This algorithm finds the error between the real and the estimated values by investigating the best link weights [18]. In relevant literature, many studies on flow estimation using different ANN structures and learning algorithms can be found [19]. Furthermore, hybrid models, Mamdani and Tagai Sugeno fuzzy system approaches, and ANN models for flow estimation have been introduced by combining Support Vector Machines (SVM), Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) models, and ANN models [20-22]. Partal (2008) developed a hybrid model for flow estimation by combining different ANN structures with WT [23]. The flow data were decomposed into periodic components in his model. The ANN structure was used to estimate the decomposed data. The result was a successful estimation obtained by the developed hybrid structure. As presented in the related literature, approaches based on artificial intelligence techniques such as ANN, SVM, and ANFIS, which are nonlinear models, have been used in the estimation of non-linear and non-stationary data. Hybrid approaches have been developed to improve the performance of these approaches. The most widely used hybrid approach is also the WT-ANN model [24]. The Empirical Mode Decomposition (EMD) technique is another approach for analyzing non-linear and non-stationary data [25]. Kişi et al (2014) and Rezaie-Balf et al. (2019) revealed in their studies the success of a hybrid approach using the EMD method in estimating flow data [26, 27]. Another important method that differentiates the signals with respect to time is the single-spectrum analysis (SSA) technique, which is one of the most powerful approaches among multivariate analysis schemes. This method has been widely used recently in the analysis of stationary and non-stationary data, because it is a non-parametric model and does not require

priority of the data as in the EMD technique [28, 29]. In another study, Latifoğlu et al. (2015) demonstrated the success of a hybrid approach using the SSA method in the estimation problem [30, 31]. According to relevant literature research, hybrid models have been used at an increasing rate in forecasting studies in recent years. In this study, for estimating the monthly water surface elevations of the natural lake of Eğirdir in Türkiye, a pre-processing treatment has been applied to the raw gauged data by separating them into subbands by each one of the EMD, SSA, and wavelet methods separately. Next, the estimation performance of the subband data has been analyzed by ANN using the pre-processed data. The lake water level data have been estimated by each of the hybrid models EMD-ANN, SSA-ANN, and WT-ANN. The performances of these hybrid models and of the conventional ANN model have been compared with each other. To the best of our knowledge, there is not a study in the literature analyzing and comparing the performances of the EMD-ANN, SSA-ANN, and WT-ANN hybrid models for forecasting lake water levels. Some meteorological factors, such as evaporation from the lake surface, wind speed, humidity, and temperature, affect the lake water level. Naturally, these happenings vary spatially from one region to another. Instead of inserting many inputs into the forecasting model, some of which may not even be gauged, forming a forecasting model that uses the recorded previous lake levels is obviously more advantageous. In this study, the lake water levels for the near future for periods from one month up to six months have been forecasted using past recorded data only by hybrid models, which have not been used before for lake level predictions using proposed models.

2. Material and Method

Recently, artificial intelligence techniques have been used as an alternative to classical approaches for estimation of hydrological data. Among them, ANN is quite common. In addition to the traditional ANN method, the relevant literature reveals that data pre-processing has recently been used for estimation calculations. The wavelet transform has been used in earlier attempts at pre-processing the hydrological data, which decomposed the data according to its frequency characteristics [23, 32, 33]. Because the hydrological data have a non-linear and non-stationary structure, the EMD scheme turns out to be one of the methods that can be used appropriately for the time-domain analysis of these data [26, 34]. Another suitable method of analysis for stationary/non-stationary and linear/nonlinear data is the SSA approach. This method is a multivariate analysis method that processes signals based on their time domain properties. Because there is no need for prior data, the EMD methods are widely used [28-31, 35]. In this study, the performance of a hybrid approach for estimation of lake water levels has been investigated. For this purpose, the gauged lake water level data have been divided into two segments as training and test data and further divided into subbands by the EMD, SSA, and DWT methods [30, 31]. The subband signals have been estimated using ANN. The flow chart of the study is shown below in Figure 1.

2.1 Lake water level data description

The monthly average water surface elevations of Lake Eğirdir had been continuously gauged from 1953 through 1999. Hence, this data consisting of 523 successive numbers has been used as the material for this study (Figure 2). 310 of these elements have been used for the training phase, and the rest, 213 values, have been used for the testing stage [31]. These data are normalized as shown in Figure 3.

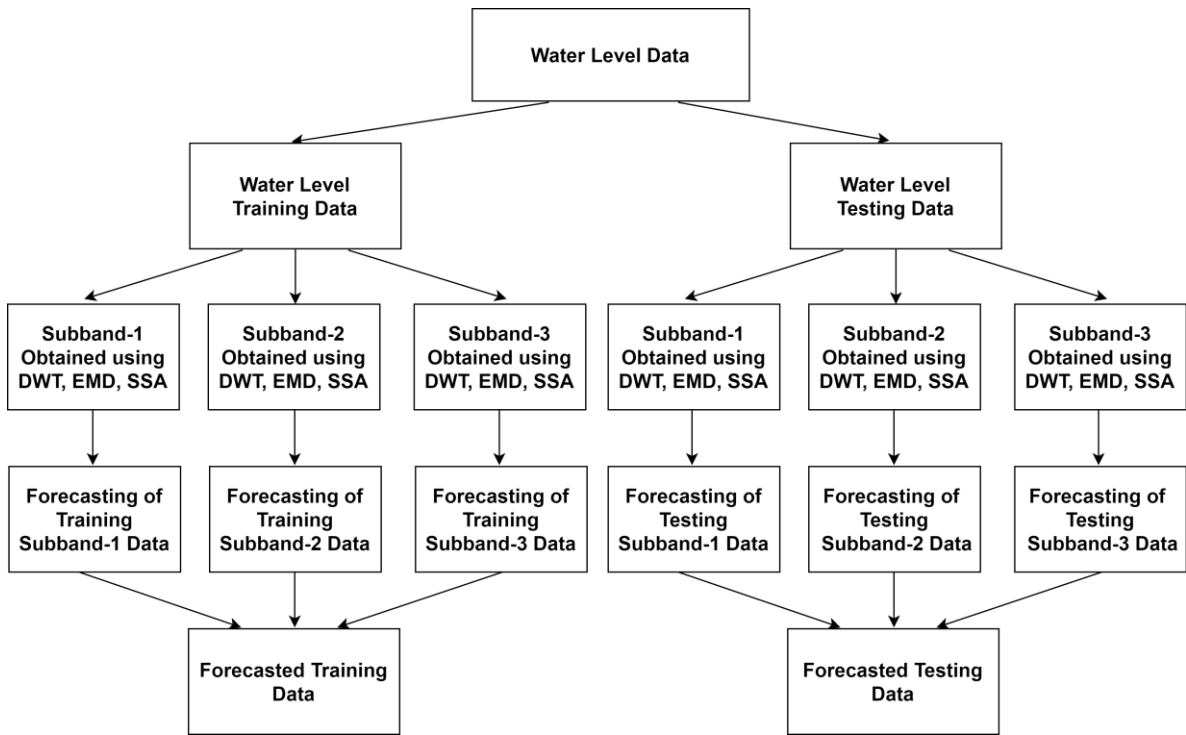


Figure 1. Flow chart for the proposed forecasting model

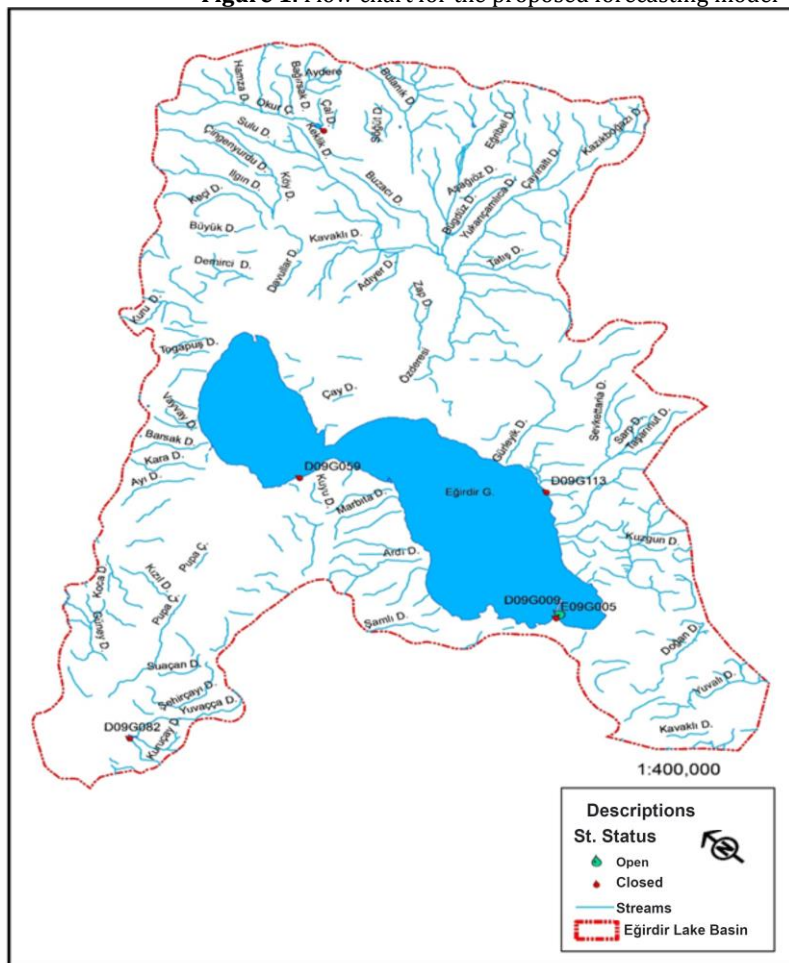


Figure 2. Basin of the Lake Eğirdir in Türkiye

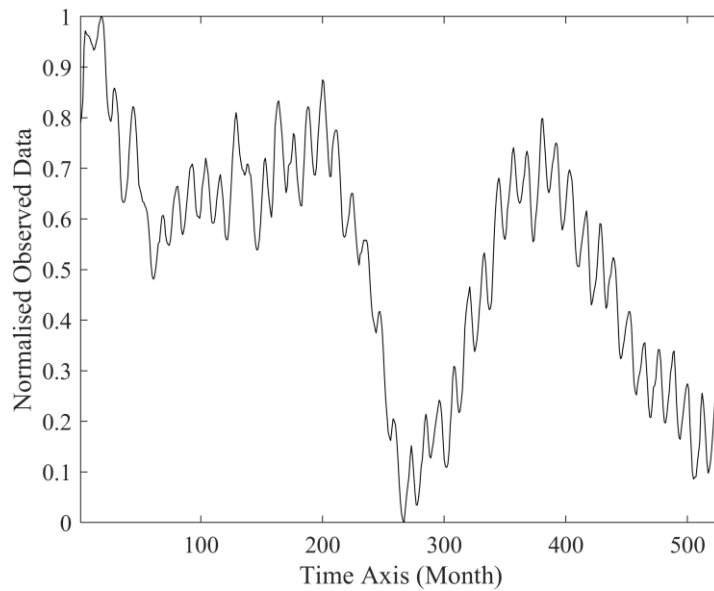


Figure 3a. Water level data measured on Lake Eğirdir

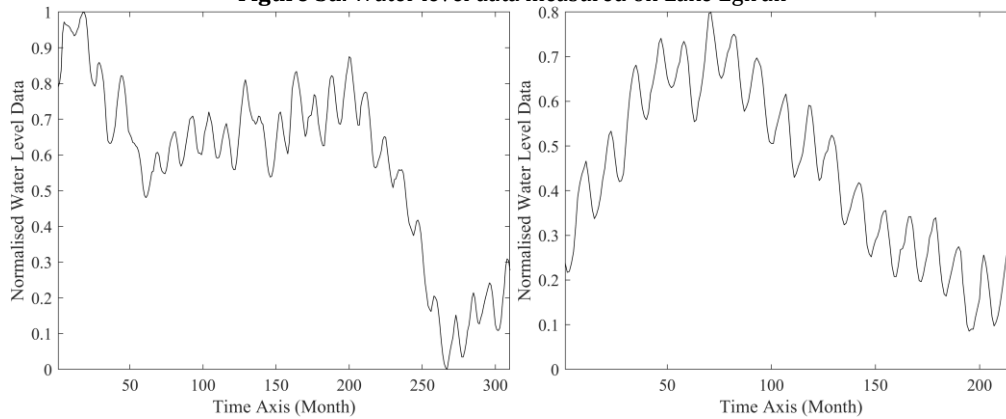


Figure3b. Train data for forecasting model

Figure3c. Test data for forecasting model

2.2 Empirical Mode Decomposition method

The Empirical Mode Decomposition (EMD) method has decomposed a signal into components called Intrinsic Mode Functions (IMF). The signal is defined as the sum of the IMF components and the residual signal, as depicted by Equation 1 below [25].

$$x(t) = \sum_{i=1}^k IMF_i + r(t) \quad (1)$$

The signal is subjected to the constraints defined below.

- The total number of maximum or minimum points and zero crossing points in the data set must be equal or differ by one element only.
- The average of the envelopes formed by local maximas at any position and the envelopes defined by local minimas should be zero.

This time-domain separation approach is simple to implement and incredibly efficient. The signals in the time axis are handled as a mix of repeating and original oscillations with a local mean of zero that are dispersed symmetrically around it in this technique.

The initial step is to identify the maxima and minima, as well as the zero crossing locations.

The upper and lower envelopes of the signals are obtained **in the second** step by treating both peaks and minima with cubic interpolations.

In the third stage, Equation 2 below computes the average of the upper and lower envelopes for the whole time period.

$$m1(t) = [z_{\max}(t) + z_{\min}(t)] / 2 \quad (2)$$

In the fourth step, the average signal is subtracted from the actual signal as given by Equation 3 below to obtain the detail signal, $d(t)$.

$$d(t) = x(t) - m(t) \quad (3)$$

The detail signal is processed as if it were a new original signal in **the fifth stage**, and the process steps are repeated until the terminate requirement is met.

The two-level decomposition approach was used in this study to obtain good estimation accuracy on both the training and testing parts of the lake water level data. As shown in Figure 4, three subsets were found, including two subsets of IMF and R [31]. In all data sets, the last value has to be neither maxima nor minima. The reason for this is; if the final values in the data are determined as maxima or minima, a limitation of the so-called boundary effect of the EMD method arises for estimation studies and makes the model dependent on the future [35, 36]. In order to prevent this, while the IMF values in the training data have been determined, the final values in the data have been chosen not including the extremum points [36, 37].

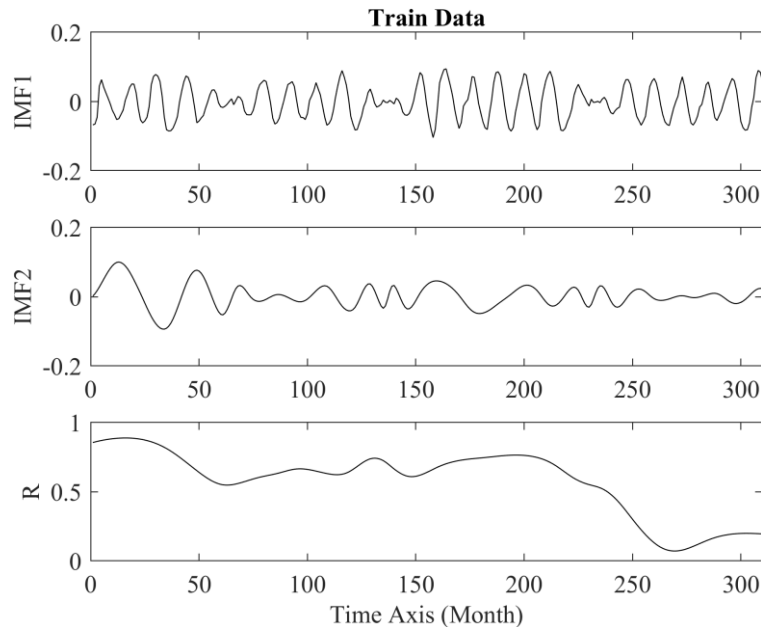


Figure 4a. Training subband signal decomposed by the EMD method

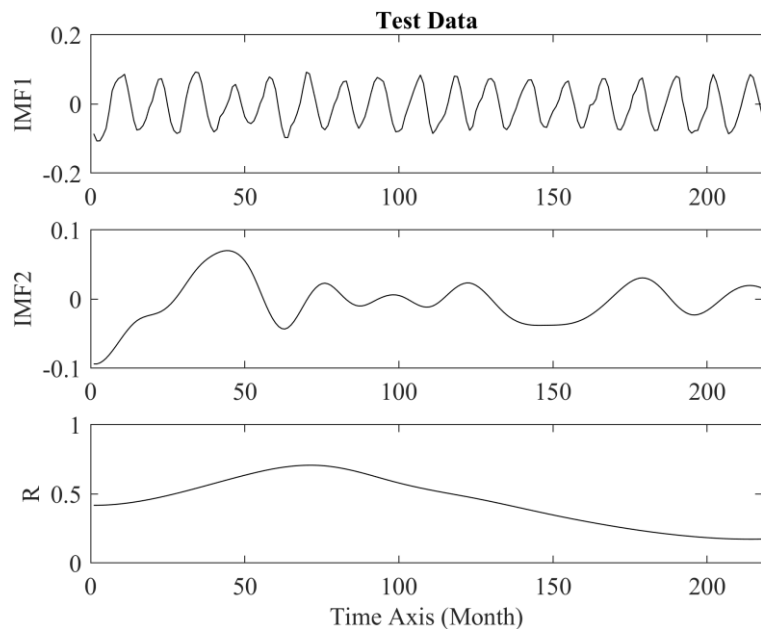


Figure 4b. Testing subband signal decomposed by the EMD method

2.3 Singular Spectrum Analysis method

Singular-spectrum analysis (SSA) is a decomposition method that uses the time information of the signal. SSA does not require any parametric model and does not call for a prerequisite. This method involves two main stages: decomposition and reconstruction. In the decomposition step, the embedding process and singular value decomposition (SVD) are applied, which express the signal as a matrix. In the reconstruction phase, there are grouping and diagonal averaging processes [28].

In the embedding process, which is the first step of the decomposition stage, the time series: $X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_N]$ is expressed as a matrix of K rows and L columns ($K \times L$) instead of a one-dimensional single row by taking the specified window length (L). The embedding process, expressed as the trajectory matrix of the signal, is also referred to as the Hankel matrix. The window length L is in the range of $1 < L < N$, N is the length of the signal and $K = N - L + 1$. In this case, the trajectory matrix T_x is defined as follows:

$$T_x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_L \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{L+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_K & x_{K+1} & \dots & x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_K \end{bmatrix} = X_1 + X_2 + \dots + X_K \tag{4}$$

The SVD process is carried out after the embedding process as a second step of the decomposition stage. Multiplications of T_x and T_x^T matrices yield three kinds of matrices called the eigen triple (U orthonormal unit matrix of $K \times K$ size and S diagonal matrix of $K \times L$ size from the $T_x^T T_x$ operation, and V orthonormal unit matrix of $L \times L$ size from the $T_x T_x^T$ operation). And, X_i 's are determined as follows:

$$X_i = U_i * S_i * V_i \tag{5}$$

Next, the second stage, the reconstruction stage including the grouping and averaging steps is executed. At the grouping step, the singular values obtained from SVD (S_i) are plotted, categorized according to their components such as monthly or seasonal components, white noise, trend. Equation 4 is rewritten with the number of categories determined based on the representation rate of eigenvalues.

$$\tag{6}$$

At the last step of this stage called averaging, the regrouped matrix T_x is transformed into a time serie by averaging the X_{ij} elements diagonally. The average of those X_{ij} elements for which the sum of the i and j indices is a constant yields the k th element of the new time series component, called the reconstructive component (RC) satisfying $i+j = k+2$. This procedure is said to be dehankelization of the matrix. At the end of this process, the new subband time series components (RC) are obtained.

Since the monthly lake water level data used in this study should reflect the nature's periodic structure, the window length is determined to be 12 in the embedding process. The data are divided into subbands according to the eigenvalues (1.), (2.) and (3-12.). These are the subband signals, which are expected to lead to the best estimates as seen in Figure 5 [31].

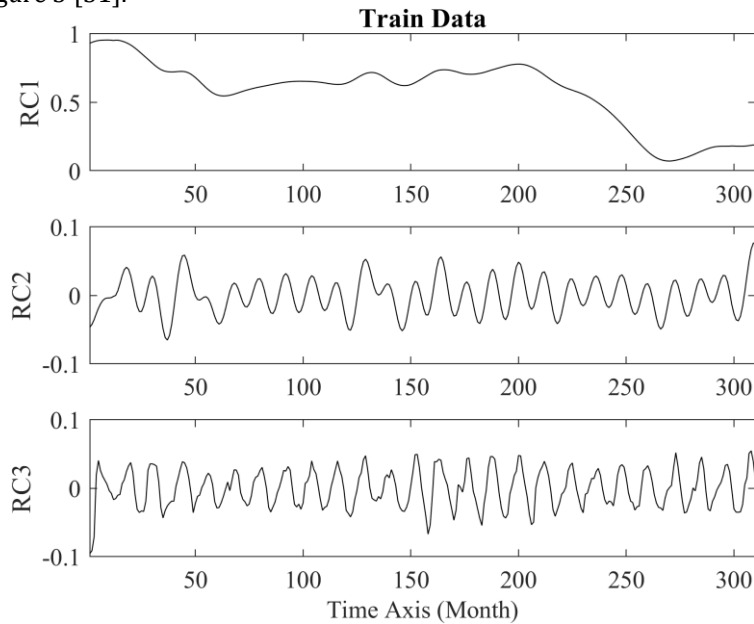


Figure 5a. Training subband signals decomposed by the SSA method

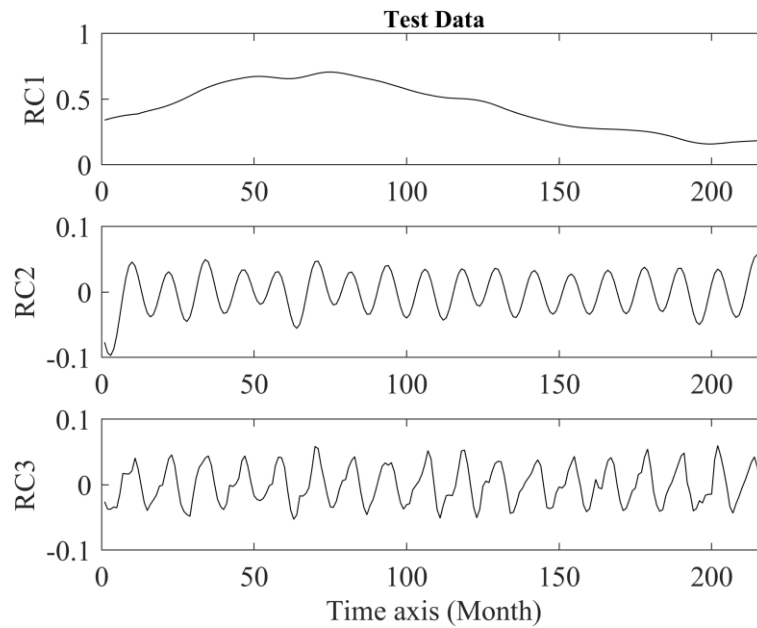


Figure 5b. Testing subband signals decomposed by the SSA method

2.4 Discrete Wavelet Transform method

The Discrete Wavelet Transform (DWT) method runs like a filter bank that decomposes the signals according to the frequency bands. This method, which is based on sub-band coding, has been introduced for the fast calculation of the Continuous Wavelet Transform method, is used to analyze the signal at different scales using different cut-off frequency filters. In order to handle the low frequencies in it, the signal is passed through the low pass filter, and to analyze the high frequencies in the signal, it is passed through the high-pass filter. The resolution of the signal, indicating the amount of detailed information in the signal, is changed by the filtering process, and the scale is replaced by downsampling and upsampling operations. $x[n]$, where n is an integer, represents the signal (Fig. 6). While the low pass filter is indicated by G_0 , the high-pass filter is indicated by H_0 [36].

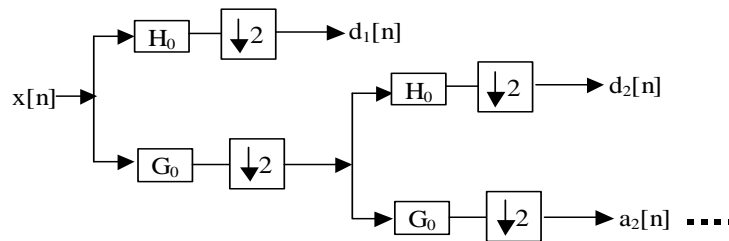


Figure 6. Subband decomposition operation during DWT

For each level, while the high pass filter produces the information of the detail ($d[n]$), the low pass filter produces the information of the approximation ($a[n]$) by the scale function. At each decomposition level, the semi-band filters produce a signal in half the frequency band. The filtering process continues until it reaches the desired level. This process is also called "multi-resolution analysis". The maximum number of levels depends on the length of the data. This operation is the opposite of the decomposition process (Fig. 7). The detail and the approximation coefficients at each level are sampled with 2 and passed through the low- and high-pass filters, then combined. Then, this process continues to the level of the decomposition process to obtain the original signal [36].

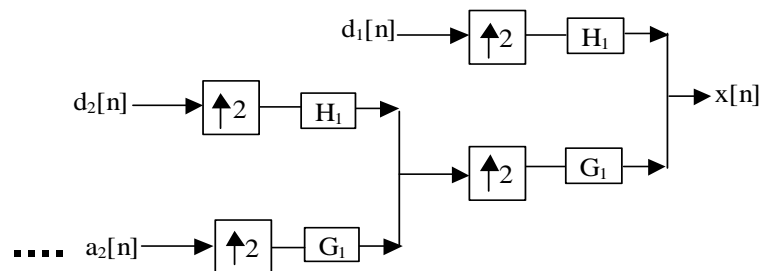


Figure 7. Reconstruction operation during DWT

In this study, the lake water level data have been treated by a two-level decomposition process. Thus, the lake water level signal has been decomposed into the approximation (a2) and detail (d2, d1) subbands (Fig. 8). We have used Daubechies' 4th wavelet function in the decomposition process. The following figure shows the lake water level data used in the training and testing phases, which are decomposed into subbands by using the Discrete Wavelet Transform (DWT) method.

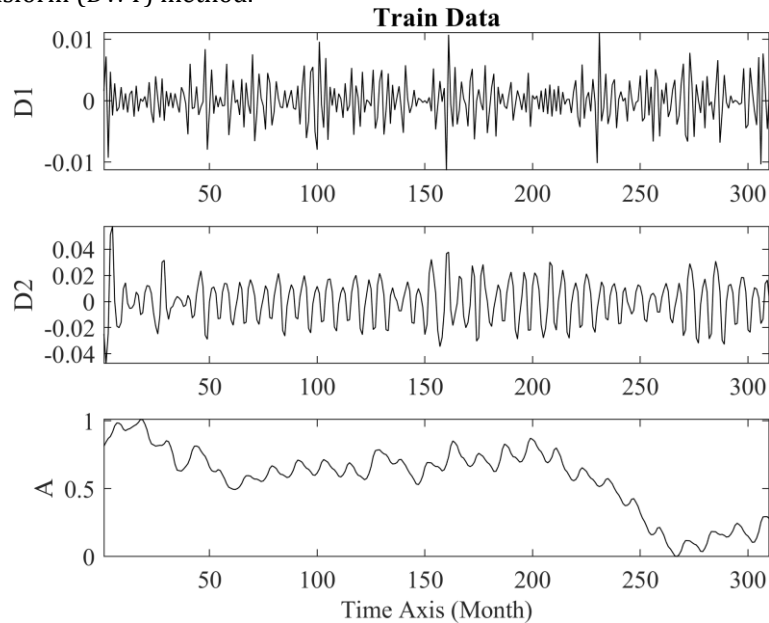


Figure 8.a. Training subband signal decomposed by the DWT method

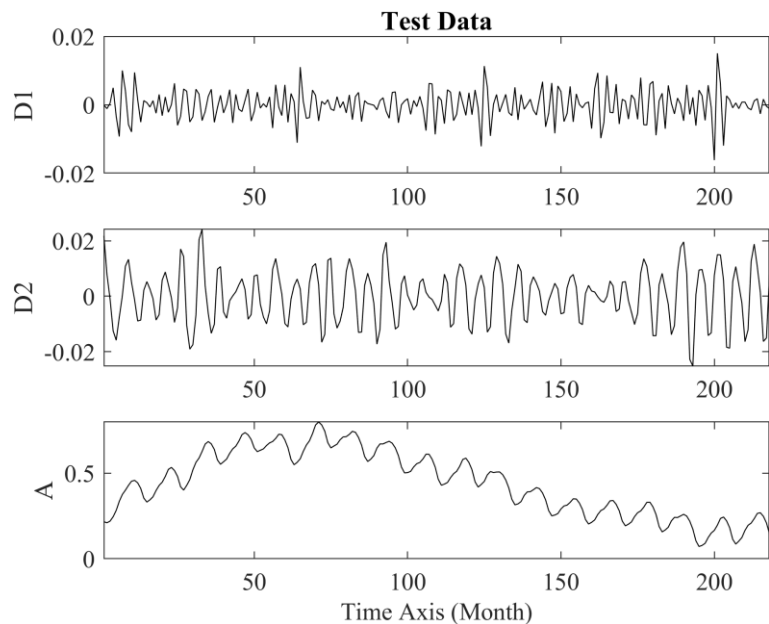


Figure 8.b. Testing subband signal decomposed by the DWT method

2.4 The method of Artificial Neural Networks

Because of its features, such as the capacity to handle nonlinear structures and parallel and serial processing capabilities, the ANN has recently become widely employed in data estimation. The sum and activation functions, as well as the learning strategy of the processor components and the learning rule, are employed in an ANN structure, and the topology determined by the connection of process elements produces the network model. Artificial neural cells (neurons) unite to create their ANN. Neurons are not collected at random. Cells, in general, comprise a three-layer network and are arranged in parallel inside each layer. These are the input, inner (hidden), and output layers [37, 38].

The most widely used version of ANN is the multi-layer perceptron (MLP) model. An MLP model consists of the input layer, one or more hidden layers, and the output layer, and each one has at least one neuron layer. The input layer processor components act as a buffer, distributing input signals to the hidden layer processing units. Each of these parts incorporates the input data into the sum function by multiplying it by the weight coefficients

that represent the effectiveness of the input over the hidden neuron. These sum functions are then transferred via a transfer function to compute the output value of that neuron. These procedures are carried out for each processor in this tier. The processor units of the output layer also serve as hidden layer elements, calculating network output values. Because the information flow in the MLP model is in the forward direction, it is also known as "feed forward ANN". One advantage of this approach is that it may train the network using a variety of learning techniques. The weights of the network are modified according to the training procedure until the error between the network's output and the desired output is reduced. Back Propagation Neural Network (BPNN) is a feed forward network and is the most commonly used ANN model in time series estimation. In our study, the MLP model and back propagation neural network (BPNN) feed forward network structure were used. In the ANN, different learning algorithms are used to train the network. MLP-ANN is based on a supervised learning strategy in which both input and output (that has to be produced corresponding to the input) are applied to the network during training. The task of the network is to produce an output for each input. MLP-ANN learning occurs in two steps. The output of the network is computed in the first stage, the forward calculation stage. The weights are determined in the second stage, the backward calculation stage, based on the difference between the predicted output and the network output. The MLP-ANN learning rule is known as the back-propagated MLP learning rule because it is carried out in this manner via back-propagating. The Levenberg-Marquardt (LM) learning method, which outperforms the ANN in terms of computing speed, is utilized here to estimate lake water level data. The LM algorithm is similar to the Quasi-Newton method based on the least squares calculation and the maximum neighborhood approaching the second-degree training speed without the use of a Hessian matrix [39].

2.5 Parameters Used For Performance Criteria

The statistical criteria commonly used for comparing the estimation accuracies of the hydrological data by various modeling techniques are the mean absolute error (MAE), the mean square error (MSE), the determination coefficient (R^2), and the correlation coefficient (R). In the lake water level estimation study, we have used these parameters to evaluate the performances of the models.

The Mean Square Error (MSE): MSE is the arithmetic average of the squares of the differences of the observed values in the series from the ones estimated by the model used, and is defined by Equation 7 below.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{observed,i} - X_{estimated,i})^2 \quad (7)$$

The Mean Absolute Error (MAE): MAE is the arithmetic average of the absolute differences of the observed values in the series from the ones estimated by the model used, and is defined by Equation 8 below.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{observed,i} - X_{estimated,i}| \quad (8)$$

Determination Coefficient (R^2): R^2 is a measure which quantitatively reflects the accuracy of the estimated values given by the model defined by Equation 9 below. The second term in Equation 9 approaches zero for a powerful model. Therefore, R^2 approaches 1 for a good model.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [X_{observed,i} - X_{estimated,i}]^2}{\sum_{i=1}^N [X_{observed,i} - \text{mean of } X_{observed,i}]^2} \quad (9)$$

Correlation Coefficient (R): It indicates the degree and trend of whether a linear relationship exists between the observed and estimated series. R accepts values ranging from -1 to +1. There is no association between the two data sets if R is near to zero, a significant positive relationship if R is close to +1, and a negative relationship if R is close to -1. Equation 10 below defines R.

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X} \right) \left(\frac{Y_i - \mu_Y}{\sigma_Y} \right) \quad (10)$$

Here, μ_X and σ_X represent the mean and standard deviation of the X data set, respectively, whereas μ_Y and σ_Y represent the mean and standard deviation of the Y data set.

3. Results

3.1 Results for forecasting the lake water levels using the ANN Model

In the first stage of this study, in order to evaluate the effect of pre-processing by the DWT, SSA, and EMD methods on the estimation of the water level data of Lake Eğirdir, the data estimation process has been performed without any pre-processing on these data by using the ANN model. For the estimation of the data, the MLP-ANN structure consists of the input, an hidden layer, and an output layer. The number of hidden layer neurons has been increased from 1 to 9 stepwise and the number of neurons in the hidden layer has been

determined according to the lowest mean square error. In order to determine the best ANN model; MSE and MAE values have been used as the network performance criteria and trained by using the Levenberg Marquardt back propagation algorithm. Successively one-month through six-months ahead forecasted lake levels have been computed using such formed ANN model and the error values that occurred during the ANN training and testing stages are given in Table 1. Figure 9 shows the graphs of one-month ahead and six-months ahead forecasted values of the test phase by the ANN model [31].

Table 1. The performance values of the estimated data obtained from one to six ahead forecasting results using the ANN model for the monthly water levels of Lake Eğirdir

ONE AHEAD FORECASTING WITH ANN MODEL							
TEST				TRAIN			
MSE	MAE	R	R ²	MSE	MAE	R	R ²
0.0009	0.0264	0.9870	0.9742	0.0008	0.0227	0.9860	0.9855
TWO AHEAD FORECASTING WITH ANN MODEL							
0.0033	0.0501	0.9541	0.9103	0.0027	0.0436	0.9542	0.9522
THREE AHEAD FORECASTING WITH ANN MODEL							
0.0064	0.0696	0.9120	0.8318	0.0051	0.0610	0.9120	0.9098
FOUR AHEAD FORECASTING WITH ANN MODEL							
0.0093	0.0846	0.8726	0.7614	0.0073	0.0731	0.8726	0.8617
FIVE AHEAD FORECASTING WITH ANN MODEL							
0.0117	0.0935	0.8443	0.7128	0.0090	0.0806	0.8443	0.8472
SIX AHEAD FORECASTING WITH ANN MODEL							
0.0136	0.0982	0.8317	0.6897	0.0096	0.0821	0.8317	0.8293

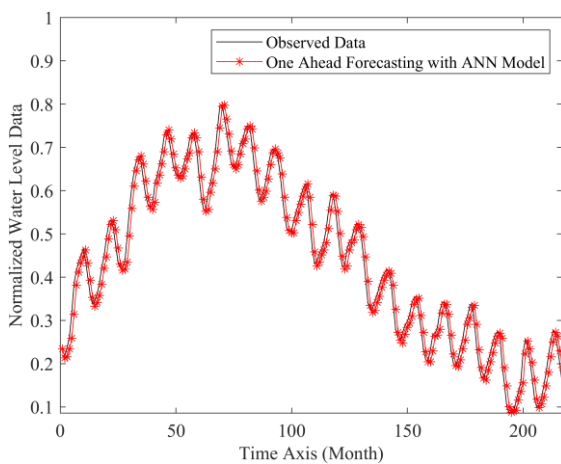


Figure 9a- One month ahead forecasted water level data obtained from the ANN model

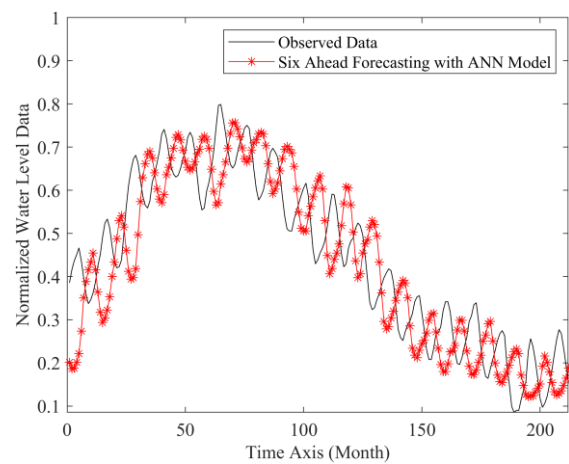


Figure 9b- Six month ahead forecasted water level data obtained from the ANN model

3.2 Results for forecasting the lake water levels using the EMD-ANN model

First, the training and test data have been decomposed into two IMF components by the EMD method. In this way, hydrological training and test data have been defined by the three-component equation of: The ANN model has been used to estimate the data of Lake Eğirdir, which has been divided into three components, two IMF and one residual data.

For the estimation study, the same structure and design procedures have been carried out in the EMD-ANN model as with the ANN. For each subband, ANNs have been trained using the Levenberg Marquardt back propagation algorithm. In order to determine the best ANN model, the MSE and MAE values have been used as performance criteria. Using the EMD-ANN model, one-month through six-months ahead forecasted values have

been obtained, and the error values that occur during the EMD-ANN training and testing phases have turned out to be as given in Table 2. Figure 10 shows the graphs of one-month ahead and six-months ahead forecasted values of the test phase by the EMD-ANN model [31].

Table 2a. The performance values of the subband estimated data obtained for one-step to six-step ahead forecasting results of subbands by using EMD-ANN model for monthly water levels of Lake Eğirdir

	ONE AHEAD FORECASTING							
	TEST				TRAIN			
	MSE	MAE	R	R ²	MSE	MAE	R	R ²
IMF1	0.0006	0.0198	0.8599	0.7378	0.0008	0.0246	0.8698	0.7442
IMF2	0.00001	0.0065	0.9816	0.9831	0.000001	0.0036	0.9913	0.9292
R	0.00001	0.0073	0.9995	0.999	0.000001	0.0043	0.9997	0.9992
	TWO AHEAD FORECASTING							
IMF1	0.0017	0.0339	0.5063	0.2596	0.0023	0.0417	0.4919	0.2398
IMF2	0.0002	0.0122	0.8644	0.8073	0.0001	0.0064	0.9697	0.9442
R	0.0002	0.0116	0.9984	0.9967	0.0001	0.0068	0.9989	0.9976
	THREE AHEAD FORECASTING							
IMF1	0.0022	0.0395	0.0505	0.0193	0.0030	0.0481	0.0172	0.0118
IMF2	0.0004	0.0169	0.8837	0.8761	0.0001	0.0092	0.9360	0.8142
R	0.0004	0.0170	0.9963	0.9945	0.0003	0.0152	0.9973	0.9927
	FOUR AHEAD FORECASTING							
IMF1	0.0018	0.0357	0.4144	0.2433	0.0024	0.0427	0.4380	0.1639
IMF2	0.0007	0.0208	0.6428	0.7841	0.0002	0.0126	0.8855	0.4132
R	0.0007	0.0226	0.9936	0.9899	0.0006	0.0208	0.9950	0.9872
	FIVE AHEAD FORECASTING							
IMF1	0.0010	0.0264	0.7332	0.6246	0.0011	0.0273	0.7954	0.5480
IMF2	0.0009	0.0233	0.7027	0.6658	0.0003	0.0153	0.7940	0.2411
R	0.0011	0.0281	0.9901	0.9837	0.0010	0.0266	0.9918	0.9802
	SIX AHEAD FORECASTING							
IMF1	0.0005	0.0192	0.9042	0.8220	0.0005	0.0184	0.8722	0.7586
IMF2	0.0005	0.0183	0.6907	0.4309	0.0010	0.0237	0.4103	0.2796
R	0.0015	0.0327	0.9878	0.9757	0.0015	0.0334	0.9859	0.9720

Table 2b The magnitudes of the parameters used as performance criteria for estimation of monthly water levels of Lake Eğirdir by the EMD-ANN model for one-step to six-step ahead forecastings

TEST	ONE AHEAD FORECASTING WITH EMD-ANN MODEL							
	TRAIN							
	MSE	MAE	R	R ²	MSE	MAE	R	R ²
	0.0009	0.0252	0.9879	0.9758	0.0007	0.0226	0.9939	0.9876
	TWO AHEAD FORECASTING WITH EMD-ANN MODEL							
	0.0025	0.0430	0.9649	0.9306	0.0021	0.0392	0.9817	0.9640
	THREE AHEAD FORECASTING WITH EMD-ANN MODEL							
	0.0035	0.0503	0.9515	0.9076	0.0032	0.0474	0.9729	0.9468
	FOUR AHEAD FORECASTING WITH EMD-ANN MODEL							
	0.0034	0.0471	0.9563	0.9175	0.0033	0.0468	0.9716	0.9433
	FIVE AHEAD FORECASTING WITH EMD-ANN MODEL							
	0.0027	0.0405	0.9698	0.9405	0.0030	0.0445	0.9743	0.9483
	SIX AHEAD FORECASTING WITH EMD-ANN MODEL							
	0.0027	0.0498	0.9717	0.9429	0.0020	0.0443	0.9742	0.9493

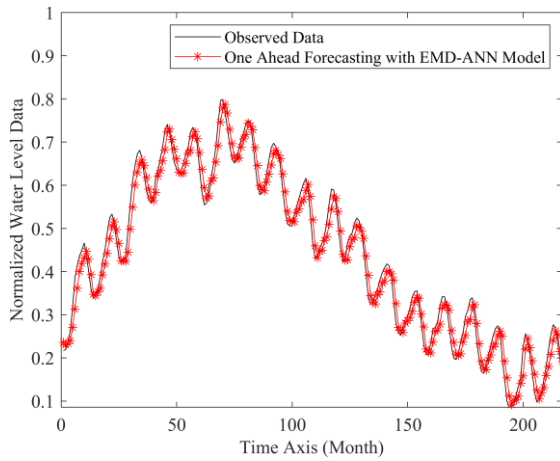


Figure 10.a. One month ahead forecasted water level data obtained from EMD-ANN model

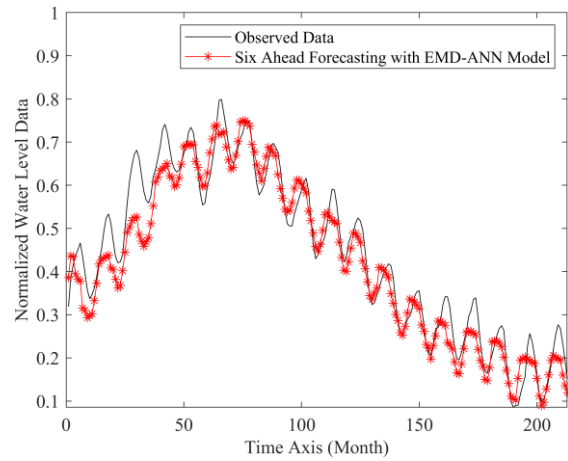


Figure 10.b. Six month ahead forecasted water level data obtained from EMD-ANN model

3.3 Results for forecasting the lake water levels using the SSA-ANN model

The signals, which are the lake water levels in this case, are decomposed into related and non-related components symbolized by RC_i , using the SSA method, and they have been recovered as $RC_1 + RC_2 + RC_3$. In the SSA process, the signals are subjected to the hankelization process with a 12 length of window size and transformed into the trajectory matrix. The component with the highest eigenvalue is denoted by RC_1 , the component with the second highest eigenvalue by RC_2 , and the component with the other eigenvalues by RC_3 . For the estimation study, the same structure and design procedures have been carried out in the SSA-ANN model as in the ANN and EMD-ANN models. Using the SSA-ANN model also, one-month through six-months ahead forecasted values have been obtained; and the resulting error values that occurred with this model are presented in Table 3. Figure 11 shows the graphs of one-month-ahead and three-months-ahead forecasted values of the test phase by the SSA-ANN model [31].

Table 3.a The performance values of the subband estimation data obtained from one to six ahead forecasting results of subbands using the SSA-ANN model for monthly water levels of Lake Eğirdir

TEST	ONE AHEAD FORECASTING				TRAIN			
	MSE	MAE	R	R ²	MSE	MAE	R	R ²
RC1	0.000001	0.0031	0.9999	0.9954	0.000001	0.0024	0.9999	0.9987
RC2	0.0003	0.0070	0.9889	0.8185	0.000001	0.0042	0.9983	0.8243
RC3	0.0008	0.0247	0.8709	0.7416	0.0007	0.0216	0.9232	0.7574
TWO AHEAD FORECASTING								
RC1	0.000001	0.0031	0.9998	0.9963	0.000001	0.0029	0.9998	0.9968
RC2	0.0003	0.0079	0.9801	0.7515	0.0001	0.0072	0.9948	0.7857
RC3	0.0025	0.0428	0.5477	0.3369	0.0022	0.0394	0.7457	0.3577
THREE AHEAD FORECASTING								
RC1	0.0001	0.0055	0.9994	0.9914	0.0001	0.0074	0.9996	0.9929
RC2	0.0001	0.0068	0.9912	0.8942	0.0001	0.0077	0.9929	0.9655
RC3	0.0037	0.0526	0.1315	0.098	0.0036	0.0499	0.5053	0.0897
FOUR AHEAD FORECASTING								
RC1	0.0001	0.0060	0.9991	0.9846	0.000001	0.0057	0.9993	0.9877
RC2	0.0001	0.0079	0.9917	0.8142	0.0001	0.0097	0.9880	0.9537
RC3	0.0034	0.0499	0.1001	0.0606	0.0049	0.0863	0.1806	0.0842
FIVE AHEAD FORECASTING								
RC1	0.0001	0.0075	0.9986	0.9757	0.0001	0.0053	0.9991	0.9814
RC2	0.0002	0.0094	0.9862	0.9478	0.0002	0.0119	0.9815	0.9431
RC3	0.0034	0.0500	0.0829	0.0823	0.0048	0.0553	0.1652	0.1563
SIX AHEAD FORECASTING								
RC1	0.0002	0.0090	0.9979	0.9642	0.0001	0.0084	0.9984	0.9741
RC2	0.0003	0.0110	0.9785	0.9696	0.0003	0.0141	0.9737	0.8081
RC3	0.0029	0.0446	0.4435	0.4081	0.0046	0.0543	0.2383	0.2315

Table 3b The performance values of the estimation data obtained from one to six six ahead forecasting results using the SSA-ANN model for the monthly water levels of Lake Eğirdir

SSA-ANN MODEL ONE AHEAD FORECASTING							
TEST				TRAIN			
MSE	MAE	R	R ²	MSE	MAE	R	R ²
0.0010	0.0257	0.9869	0.9758	0.0008	0.02180	0.9939	0.9776
TWO AHEAD FORECASTING WITH SSA-ANN MODEL							
0.0028	0.0451	0.9611	0.9540	0.0024	0.0357	0.9623	0.9589
THREE AHEAD FORECASTING SSA-ANN MODEL							
0.0037	0.0545	0.9430	0.9214	0.0030	0.0526	0.9659	0.9533
FOUR AHEAD FORECASTING SSA-ANN MODEL							
0.0038	0.0552	0.9456	0.9325	0.0024	0.0511	0.9528	0.9489
FIVE AHEAD FORECASTING SSA-ANN MODEL							
0.0039	0.0568	0.9446	0.9502	0.0036	0.0517	0.9514	0.9605
SIX AHEAD FORECASTING SSA-ANN MODEL							
0.0053	0.0583	0.9529	0.9520	0.0045	0.0467	0.9532	0.9529

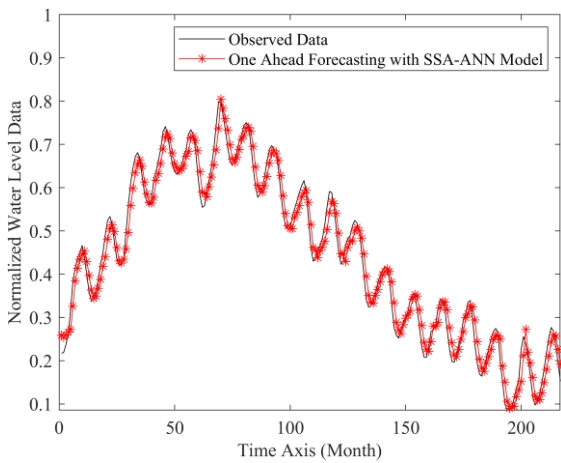


Figure 11.a. One month ahead forecasted water level data computed by the SSA-ANN model

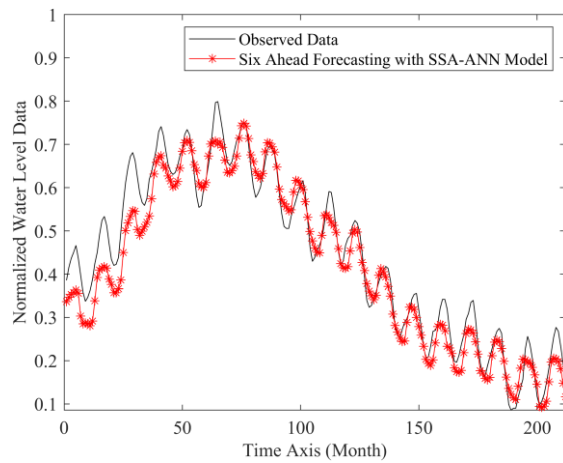


Figure 11.b. Six month ahead forecasted water level data computed by the SSA-ANN model

3.4 Results For Forecasting The Lake Water Levels Using The DWT-ANN Model

For the monthly lake water level data, the DWT method also has been decomposed into related and non-related components. The two levels of the signals that are decomposed by DWT are approximation (A) and detail (D1, D2) signals. In this way, both hydrological training and test data are expressed by the equation: $x(t) = A + D1 + D2$. For the estimation study, the same structure and design procedures have been carried out in the DWT-ANN model as in the ANN, EMD-ANN, SSA-ANN models. Using the DWT-ANN model also, one-month through six-months ahead forecasted values have been computed and the error values that occurred during the training and test phases turned out to be as given Table 4. Figure 12 shows the graphs of one-month ahead and three-months ahead forecasted values of the test phase by the DWT-ANN model.

Table 4.a The performance values of the subband estimation data obtained from one to six ahead forecasting results of the subbands using the DWT-ANN model for the monthly water levels of Lake Eğirdir

ONE AHEAD FORECASTING								
	TEST				TRAIN			
	MSE	MAE	R	R ²	MSE	MAE	R	R ²
D1	0.000001	0.0034	0.4273	0.1826	0.000001	0.0028	0.4302	0.1851
D2	0.000007	0.0068	0.4379	0.1917	0.00002	0.0122	0.4494	0.2019
A	0.00009	0.0253	0.9882	0.9766	0.00007	0.0215	0.9934	0.9868
TWO AHEAD FORECASTING								
D1	0.000002	0.0035	0.3841	0.1475	0.00001	0.0030	0.3161	0.0999
D2	0.000009	0.0078	0.3254	0.1059	0.00002	0.0121	0.4974	0.2474
A	0.0034	0.0486	0.9578	0.9174	0.0024	0.0396	0.9777	0.9559
THREE AHEAD FORECASTING								

D1	0.000002	0.0035	0.4710	0.2219	0.000001	0.0029	0.2150	0.0462
D2	0.000003	0.0051	0.7602	0.5779	0.00001	0.0085	0.7731	0.5976
A	0.0064	0.0681	0.9219	0.8500	0.0044	0.0534	0.9594	0.9204
FOUR AHEAD FORECASTING								
D1	0.000002	0.0038	0.1326	0.0176	0.00001	0.0030	0.1369	0.0187
D2	0.000008	0.0077	0.3314	0.1098	0.00002	0.0120	0.4913	0.2414
A	0.0089	0.0801	0.8914	0.7947	0.0063	0.0638	0.9413	0.8860
FIVE AHEAD FORECASTING								
D1	2.4456x10 ⁻⁵	0.0039	0.1479	0.0219	0.000001	0.0032	0.0093	0.00008
D2	1.0356x10 ⁻⁴	0.0081	0.1755	0.0308	0.00002	0.0126	0.3453	0.1192
A	0.0106	0.0867	0.8714	0.7593	0.0076	0.0702	0.9280	0.8612
SIX AHEAD FORECASTING								
D1	0.00002	0.0042	0.2515	0.0633	0.000001	0.0030	0.2234	0.0499
D2	0.000005	0.0058	0.7448	0.5548	0.000009	0.0077	0.7879	0.6207
A	0.0107	0.0867	0.8688	0.7548	0.0085	0.0748	0.9186	0.8438

Table 4b The performance values of one to six ahead forecasting data obtained by using the DWT-ANN model for monthly water levels of Lake Eğirdir

ONE AHEAD FORECASTING WITH WAVELET-ANN MODEL							
TEST				TRAIN			
MSE	MAE	R	R²	MSE	MAE	R	R²
0.0010	0.0267	0.9874	0.9750	0.00007	0.0224	0.9932	0.9865
TWO AHEAD FORECASTING WITH WAVELET-ANN MODEL							
0.0038	0.0516	0.9529	0.9081	0.0024	0.0400	0.9779	0.9563
THREE AHEAD FORECASTING WITH WAVELET-ANN MODEL							
0.0067	0.0697	0.9189	0.8443	0.0044	0.0540	0.9592	0.9200
FOUR AHEAD FORECASTING WITH WAVELET-ANN MODEL							
0.0090	0.0816	0.8899	0.7920	0.0066	0.0662	0.9381	0.8800
FIVE AHEAD FORECASTING WITH WAVELET-ANN MODEL							
0.0109	0.0887	0.8663	0.7505	0.0083	0.0738	0.9213	0.8488
SIX AHEAD FORECASTING WITH WAVELET-ANN MODEL							
0.0113	0.0897	0.8613	0.7418	0.0094	0.0796	0.9094	0.8270

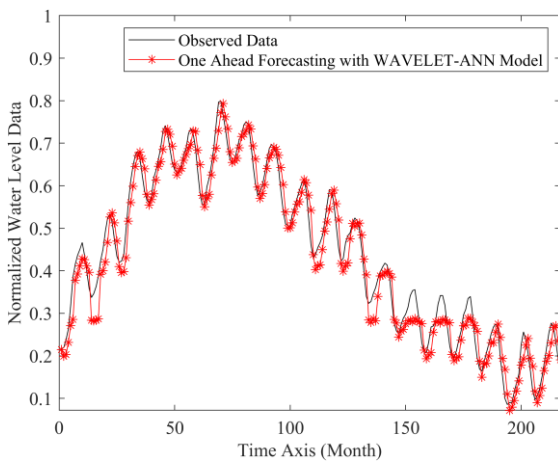


Figure 12.a. One month ahead forecasted water level data obtained by the DWT-ANN model

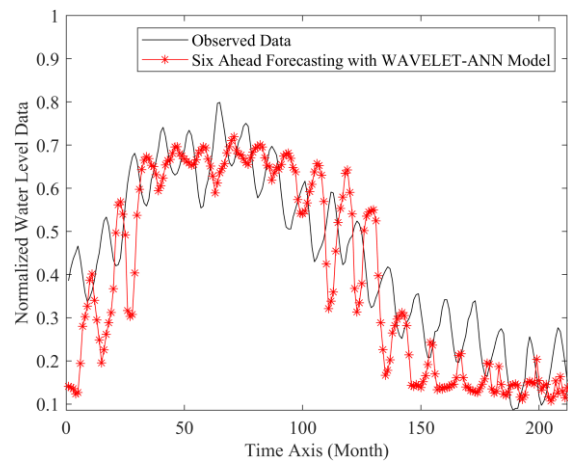


Figure 12.b. Six month ahead forecasted water level data obtained by the DWT-ANN model

4. Discussion and Conclusion

When the literature is examined, there are studies that include linear and nonlinear approaches for estimating the lake water level. In a study carried out in the literature, lake water levels were estimated up to 3-day time intervals by using the autoregressive moving average (ARMA), ANN, adaptive-neuro-fuzzy inference system (ANFIS), and gene expression programming (GEP). According to the results obtained, the superiority of GEP, ANFIS, and ANN models over ARMA models has been demonstrated [40]. In another study, a recurrent neural network (RNN) and ANFIS models were constructed, and the most suitable model was searched. In addition,

autoregressive (AR) and autoregressive moving average (ARMA) models, which are classical stochastic models, were obtained and compared with RNN and ANFIS models. The results show that RNN and ANFIS can be applied successfully and provide higher performance in lake level estimation than AR and ARMA models [41]. In a review article study, it was seen that the main machine learning (ML) models ANN, SVM, ANFIS, hybrid models, evolutionary ML models, ELM, and deep learning models were used in lake water level estimation.

Also, in another review article, the performance of M5-Tree, multivariate adaptive regression spline (MARS) and least square support vector regression (LSSVR) models in lake water level prediction was analyzed [42]. Demir has shown that the MARS model performs better than LSSVR and M5-tree [43]. Although great progress has been made in the application of ML models to predict the water level in lakes, there is still much space for further research [44].

In this study, the lake water level was estimated using the ANN, EMD-ANN, SSA-ANN, and DWT-ANN methods, and the estimation performance of these four methods with the effect of preprocessing the time series data in the forecasting study was analyzed. The difference between this study and the literature studies is that it analyzes the performance of the preprocessing methods in lake water level estimation.

All of the parameters of each of the four models are computed using the available recorded series, and in our study, this is the 310-month portion of the approximately 44-year-long gauged data. Once a model is formed in the optimized way summarized in the relevant sub-sections above, based on the single lake water value of the present month, the water level of either one-month or two-months, ..., or six-months ahead is computed (estimated) by that model. For example, for estimating the 311st water level by any model, the water level measured on the 310th day is given as the input value. Similarly, for any one-month ahead estimated water level, the actual water level measured one month before, for each 213-element test series, is used. Also, the actual water level of the present month is used for estimation of water levels more than one month ahead. Figures 9, 10, 11, and 12 reveal the same information for the models of ANN, EMD-ANN, SSA-ANN, and DWT-ANN, respectively. The black lines in all of these eight figures are exactly the same because they exhibit the actual lake water levels measured over the 213-month test period on normalized scales. The red points represent the estimated values in the 213-element test segment. In any case, the closer the red points are to the solid black line, the better the estimation accuracy. These eight figures are provided here to allow the reader to make a visual assessment of the goodness of estimation accuracy of any model. As it can be observed in these figures, although the one-month ahead forecasts by all four methods look pretty good, the six-months ahead water levels computed by the EMD-ANN and SSA-ANN models are closer to the black line than the other two. The two-months, three-months, four-months, and five-months ahead levels are not given with the purpose of not elongating the paper. They have appearances that are relatively similar to the six-month-ahead figures, given here as Figures 9.b through 12.b.

Figures 13a and 13b show the magnitudes of the performance parameters of R, and R^2 obtained for all four models over the 213-month test segment, respectively. As it is seen in these four figures, one-month ahead prediction abilities of all of the four models seem to be good and close. However, the values begin deviating from each other appreciably with increasing forecast periods up to six months. The calculated performance parameters for the models of ANN, and DWT-ANN deteriorate while those for the models of EMD-ANN and SSA-ANN stay fairly good and much better than the former with increasing forecast periods.

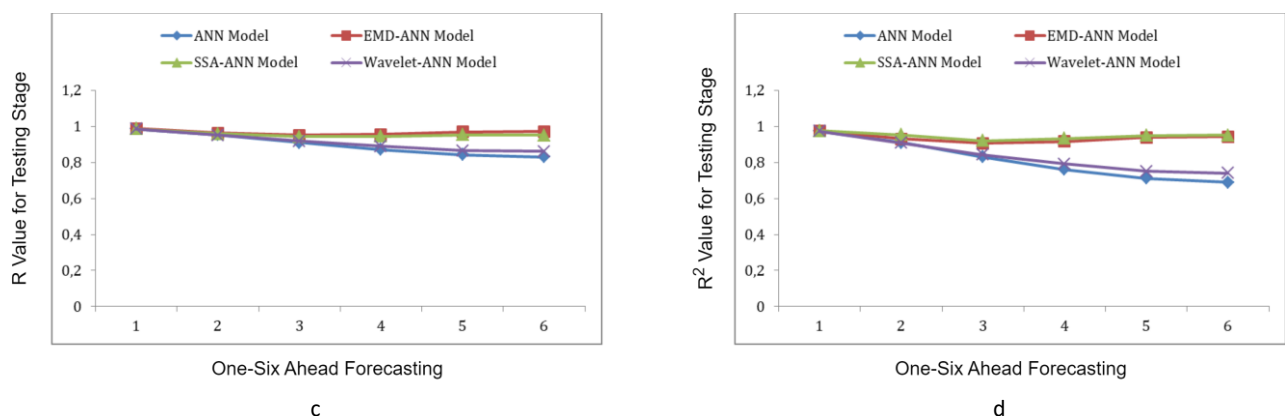


Figure 13. The performance parameters of the EMD-ANN, SSA-ANN, DWT-ANN and ANN models for the estimation of monthly water levels of Lake Eğirdir
a. R values, **b.** R^2 values

In this study, the configurations of these four models have been formed the way summarized here and their model parameters have been determined out of the 310-month sequentially gauged data of water levels of Lake Eğirdir as summarized above. We have used the remaining 213-month segment of sequentially gauged water levels in Lake Eğirdir as testing for the developed models. The measured water levels of Lake Eğirdir over this 213-month period are the actual naturally occurring water levels, and we have computed the estimated water

levels for one-month ahead to six-month-ahead periods using these four models. Therefore, Figures 10 through 12, and especially Figure 13, are tangible validations of these models, and yet they are comparisons of them for betterness in estimation accuracies. Visual observations of graphs of actual water levels and estimated water levels are in the same figures as those in Figures 9 through 12. The second quantification of the R and R^2 performance of these forecasted values is shown in Figure 13. The ANN, DWT-ANN, EMD-ANN, and SSA-ANN models are used to forecast the monthly average water levels of Lake Eğirdir in Turkey one, two, and six months ahead. In the study of the lake water level by the ANN model, one input layer, one hidden layer, and one output layer structure is used. In the estimation study carried out by the EMD-ANN model, the hydrological data are divided into three subbands. Two of these are the IMF components, and the other is the data called the residual component. These subbands are named IMF1, IMF2, and R, and an input-output ANN model is used for the estimation of IMF1, IMF2, and R subband data. In the estimation study performed by the SSA-ANN model, the hydrological data are divided into three subbands called reconstruction components (RCs). These subband data consist of the subband data RC1 having the first highest eigenvalue, the subband data RC2 having the second highest eigenvalue, and the subband data RC3 having the sum of the other residual eigenvalues. In the estimation study performed by the DWT-ANN model, the hydrological data are divided into three subbands. Two of these are the detail subbands, and the third one is the approximation data subband. These subbands are named D1, D2, and A. As for the other models, one input, one output ANN is used for the estimation of D1, D2, and A subband data. In all of the models developed for the lake water level estimation, we have performed estimation studies from one month ahead up to six months ahead. The worst estimation performance is obtained in three-month-ahead forecasting. The performances are compared in three-months ahead forecasting, which is used to determine the best results under the worst conditions. For the three-months ahead forecasting, the magnitudes of the MSE, MAE, R, and R^2 performance parameters have turned out to be; for the ANN model, 0.0064, 0.0696, 0.9120, and 0.8318; for the EMD-ANN model, 0.0035, 0.0503, 0.9515, and 0.9076; for the SSA-ANN model, 0.0037, 0.0545, 0.9430, and 0.9214; and for the DWT-ANN model, they are: 0.0067, 0.0697, 0.9189, and 0.8443, respectively. In the study of the hydrological data on temporal variations of the water surface level of a natural lake, it is seen that the performances of the estimation studies carried out by the EMD-ANN and SSA-ANN models are better than the estimation performances of the ANN and DWT-ANN models. Also, when compared to other models, the EMD-ANN and SSA-ANN models perform quite well, particularly in two-month, three-month, and six-month ahead estimation studies. The overall result of this study is that the preprocessing performed by the SSA and EMD procedures for forecasting the water level of a natural lake one to six months in the future by such a hybrid ANN method appreciably improves the estimation performance. Hence, the conclusion and recommendation for natural lake management administrations is that a hybrid ANN model similar to either the EMD-ANN or the SSA-ANN models developed in this study will enable them to forecast the average lake water surface elevations in the coming couple of months up to six months with a pretty good accuracy. In this study, we have used two-thirds of the gauged lake water data for obtaining the relevant parameters of these models, and we have used the remaining one third for testing the goodness of the forecasts. The goodness of estimations has been checked quantitatively by those four comparison criteria. The prediction ability of the recommended models is indeed good because the errors are very small and the R^2 s are very close to 1.0. The proposed approach should be used for forecasting the future water levels of the other lakes reliably.

References

- [1] Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill. NY
- [2] Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Gharabaghi, B. 2019. A reliable linear method for modeling lake level fluctuations. *Journal of Hydrology*, 570, 236–250.
- [3] Muşmal, H. 2015. Beyşehir Regülâtörü (Taş Köprü), Tarih Okulu Dergisi (TOD) *Journal of History School (JOHS)*. 357-373
- [4] Degens, E. T., Wong, H. K., Kempe, S., & Kurtman, F. (1984). A geological study of Lake Van, eastern Turkey. *Geologische Rundschau*, 73(2), 701–734.
- [5] Batur, E., Kadioğlu, M., Özkaya, M., Saban, M., Akın, İ., Kaya, Y. 2008. Water Level Modelling of Lake Van and Estimation of Extrem Levels. *Van Lake Hydrology and Pollution Conference*, 10-25.
- [6] Kılınçaslan, T. 2000. The rising water level in Lake Van: environmental features of the Van basin which increase the destructive effect of the disaster. *Water Science and Technology*, 42(1–2), 173–177.
- [7] Box, G.E.P., Jenkins, G.M. 1970. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day. San Francisco.
- [8] Carlson, R.F., MacCormick, A.J.A., Watts, D. G. 1970. Application of linear random models to four annual streamflow series. *Water Resources Research*. 6, 1070-1078.

- [9] Grimaldi, S. 2004. Linear parametric models applied to daily hydrological series. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9, 383-391.
- [10] Noakes, D.J., McLeod, A.I., Hipel, K.W. 1985. Forecasting monthly riverflow time series. *International Journal of Forecasting*. 1:179-190.
- [11] Sifuzzaman, M., Islam, M.R., Ali, M.Z., 2009. Application of wavelet transform and its advantages compared to fourier transform. *J. Phys. Sci.* 13, 121-134.
- [12] Cahill, A.T. 2002. Determination of changes in streamflow variance by means of a wavelet-based test. *Water Resources Research*, 38, 1065-1078.
- [13] Padmanabhan, G., Rao. A.R. 1988. Maximum entropy spectral analysis of hydrologic data. *Water Resources Research*. 24, 1519-1533.
- [14] Smith, L. C., Turcotte, D. L., Isacks, B. L. 1998. Stream flow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform. *Hydrological processes*. 12, 233-249.
- [15] Yakowitz, S. J. 1973. A stochastic model for daily river flows in an arid region. *Water Resources Research*. 9, 1271-1285.
- [16] Kentel, E. 2009. Estimation of river flow by artificial neural networks and identification of input vectors susceptible to producing unreliable flow estimates. *Journal of hydrology*. 375, 481-488.
- [17] Hydrology, A. T. C. on A. of A. N. N. in. 2000. Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 115-123.
- [18] Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H. 1989, Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*. 2, 359-266.
- [19] Veintimilla-Reyes, J., Cisneros, F., Vanegas, P. 2016. Artificial Neural Networks applied to flow prediction: A use case for the Tomebamba river. *Procedia Engineering*. 162, 153-161.
- [20] El-Shafie, A., Taha, M. R., & Noureldin, A. 2007. A neuro-fuzzy model for inflow forecasting of the Nile river at Aswan high dam. *Water resources management*. 21, 533-556.
- [21] He, Z., Wen, X., Liu, H., & Du, J. 2014. A comparative study of artificial neural network. adaptive neuro fuzzy inference system and support vector machine for forecasting river flow in the semiarid mountain region. *Journal of Hydrology*. 509, 379-386.
- [22] Noori, R., Karbassi, A. R., Moghaddamnia, A., Han, D., Zokaei-Ashtiani, M. H., Farokhnia, A., & Gousheh, M. G. 2011. Assessment of input variables determination on the SVM model performance using PCA. Gamma test. and forward selection techniques for monthly stream flow prediction. *Journal of Hydrology*. 401, 177-189.
- [23] Partal, T. 2008. River flow forecasting using different artificial neural network algorithms and wavelet transform. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 36, 26-38.
- [24] De Macedo Machado Freire P.K., Santos C.A.G., Da Silva G.B.L. 2019. Analysis of the use of discrete wavelet transforms coupled with ANN for short-term streamflow forecasting. *Applied Soft Computing*. 80:494-505, 2019.
- [25] Huang, N. E., Shen, Z., & Long, S. R., A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum. *Annual review of fluid mechanics*. 31, 417-457.
- [26] Kişi O., Latifoğlu L., Latifoglu F. 2014. Investigation of Empirical Mode Decomposition in Forecasting of Hydrological Time Series. *Water Resources Management*. 28, 4045-4057.
- [27] Rezaie-Balf M., Kim S., Fallah H., Alaghmand S. 2019. Daily river flow forecasting using ensemble empirical mode decomposition based heuristic regression models: Application on the perennial rivers in Iran and South Korea. *Journal of Hydrology*. 572, 470-485.
- [28] Hassani, H., Soofi, A. S., & Zhigljavsky, A. A. 2010. Predicting daily exchange rate with singular spectrum analysis. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. 11, 2023-2034.
- [29] Marques, C. A. F., Ferreira, J. A., Rocha, A., Castanheira, J. M., Melo-Goncalves, P., Vaz, N., Dias, J. M. 2006. Singular spectrum analysis and forecasting of hydrological time series. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C*. 31:1172-1179.
- [30] Latifoğlu, L., Kis,i O., Latifoglu, F. 2015. Importance of hybrid models for forecasting of hydrological variable. *Neural Computing & Applications*. 26, 1669-1680.
- [31] Latifoğlu, L. July 2017. Forecasting of Hydrological Variables Using New Hybrid Methods, Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences Ph.D. Thesis.

- [32] Mehr, D. A., Kahya, E., Bagheri, F., Deliktas, E. 2014. Successive-station monthly streamflow prediction using neuro-wavelet technique. *Earth Sci. Informatics*. 7, 217–229.
- [33] Sahay, R. R., Srivastava, A. 2014. Predicting monsoon floods in rivers embedding wavelet transform. genetic algorithm and neural network. *Water resources management*. 28, 301-317.
- [34] Karthikeyan, L., Kumar, D.N. 2013. Predictability of nonstationary time series using wavelet and EMD based ARMA models. *Journal of Hydrology*. 502,103–119.
- [35] Wang, X., Wu, J., Liu, C., Wang, S., & Niu, W. 2016. A Hybrid Model Based on Singular Spectrum Analysis and Support Vector Machines Regression for Failure Time Series Prediction. *Quality and Reliability Engineering International*. 32, 2717-2738.
- [36] Broughton, S.A., Bryan, K. 2018. *Discrete Fourier Analysis and Wavelets: Applications to Signal and Image Processing*. Wiley.
- [37] Zhang, Z. 2011. Artificial neural network. In *Multivariate time series analysis in climate and environmental research*, 1–35.
- [38] Wang, S.-C. 2003. Artificial neural network. In *Interdisciplinary computing in java programming*. 81–100.
- [39] Marquardt, DW. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*. 11, 431-441.
- [40] Kişi, O., Shiri, J., Nikoofar, B. 2012. Forecasting daily lake levels using artificial intelligence approaches. *Computers & Geosciences*. 41, 169-180.
- [41] Güldal, V., Tongal, H. 2010. Comparison of recurrent neural network, adaptive neuro-fuzzy inference system and stochastic models in Eğirdir Lake level forecasting. *Water resources management*. 24, 105-128.
- [42] Demir, V., Yaseen, Z. M., 2022. Neurocomputing intelligence models for lakes water level forecasting: a comprehensive review. *Neural Computing and Applications*. 1-41.
- [43] Demir, V., 2022. Enhancing monthly lake levels forecasting using heuristic regression techniques with periodicity data component: application of Lake Michigan. *Theoretical and Applied Climatology*. 148(3), 915-929.
- [44] Zhu, S., Lu, H., Ptak, M., Dai, J., Ji, Q. 2020. Lake water-level fluctuation forecasting using machine learning models: a systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*. 27, 44807-44819.

Numerical permeability tensor characterization of fibrous reinforcement through 1D flow analysis using particle swarm optimization

Salman Zafar^{1,2,3}, Hatice S. Sas^{*1,2,3}

¹Integrated Manufacturing Technologies Research and Application Center. Sabanci University. Orhanli- Tuzla. 34956 ISTANBUL, TURKEY

² Faculty of Engineering and Natural Sciences. Sabanci University. Orhanli-Tuzla. 34956. ISTANBUL, TURKEY

³Composite Technologies Center of Excellence. Sabanci University-Kordsa. Istanbul Technology Development Zone. Pendik. 34906 ISTANBUL, TURKEY

(Alınış / Received: 10.08.2022, Kabul / Accepted: 29.11.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Keywords

Fibrous reinforcement,
Permeability tensor,
Flow Simulations,
Particle Swarm
Optimization

Abstract: Flow simulations are performed to analyze the resin flow behavior through fibrous reinforcements to promote void-free composite manufacturing with excellent mechanical properties. These flow simulations require an essential parameter known as permeability tensor which is defined as the resistance to the flow of resin due to fibrous reinforcement. This study proposes a key strategy to determine all in-plane permeability components from a single rectilinear flow experiment. The proposed method is based on introducing intentional disturbance to the mold domain, which transforms the one-dimensional flow into a two-dimensional flow. The process is divided into two steps, the experimental determination of flow arrival times at designated locations within the mold domain and comparing it to the numerical flow arrival times (obtained using LIMS software) via the residual sum of squares (RSS). An optimization algorithm based on particle swarm optimization (PSO) is established to reduce the RSS to get accurate permeability predictions. The validation study of the proposed strategy has been practiced for three cases. The results show that this method can effectively characterize the in-plane permeability components from a single rectilinear injection experiment.

Parçacık sürüsü optimizasyonu ile 1-boyutlu akış analizi yoluyla kompozit kumaşların geçirgenlik tensörünün sayısal karakterizasyonu

Anahtar Kelimeler

Lifli takviye,
Geçirgenlik tensörü,
Akış Simülasyonları,
Parçacık Sürü
Optimizasyonu

Öz: Akış simülasyonları, yüksek mekanik özelliklere sahip boşluksuz kompozit üretimini teşvik etmek için lifli takviyeler yoluyla reçine akış davranışını analiz etmek için gerçekleştirilir. Bu akış simülasyonları, lifli takviye nedeniyle reçine akışına karşı direnç olarak tanımlanan, geçirgenlik tensörü olarak bilinen önemli bir parametre gerektirir. Bu çalışma, tek doğrusal enjeksiyondan tüm düzlem içi geçirgenlik bileşenlerini belirlemek için anahtar bir strateji sunmaktadır. Yöntem, bir-boyutlu akışı iki-boyutlu bir akışa dönüştüren, kalıp alanına kasıtlı bir düzensizlik bölgesinin tanımlanmasına dayanmaktadır. Öncelikle, kalıp alanı içinde belirlenmiş konumlardaki akış varış zamanlarının deneysel olarak belirlenmesi ve bunu, artık kareler toplamı (RSS) yoluyla LIMS yazılımı ile elde edilmiş sayısal akış varış zamanlarıyla karşılaştırılmaktadır. Geçirgenlik tahminlerini hızlı ve yüksek doğrulukta elde etmek için parçacık sürüsü optimizasyonuna (PSO) dayalı bir optimizasyon algoritması kurulmuştur. Önerilen stratejinin validasyon çalışması üç farklı geçirgenlik tensörü durmunu ile yapılmıştır. Sonuçlar, bu yöntemin, tek bir doğrusal enjeksiyon deneyi ile düzlem içi geçirgenlik bileşenlerini etkili bir şekilde karakterize edebildiğini göstermektedir.

*Corresponding Author, email: hatice.sas@sabanciuniv.edu

1. Introduction

Liquid composite molding (LCM) is a composite manufacturing process widely adapted across numerous industries. In this process, a dry fibrous reinforcement in the shape of the final part geometry is placed in a mold, and then a liquid resin system is allowed to flow through the reinforcement under the action of applied pressure difference. The liquid resin is then allowed to cure, after which the composite is demolded. The resin must fill all the empty spaces within the fibrous reinforcement so that the resulting composite is void-free and has excellent mechanical properties. To achieve this, it is essential to analyze and control the flow of resin through the reinforcement. An effective way to analyze the resin flow is to model it numerically. Mathematically, the flow of resin through the fibrous reinforcement can be modeled as flow through porous media by using Darcy's law:

$$\langle \mathbf{u} \rangle = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla p \quad (1)$$

where $\langle \mathbf{u} \rangle$ is the volume-averaged flow velocity, μ is the resin viscosity, ∇p is the applied pressure gradient across the gate and vent locations, and \mathbf{K} is the permeability tensor. Permeability is defined as the resistance to flow of the resin due to the fibrous reinforcement. It is an essential input parameter for resin flow simulations to design and optimize gate and vent locations and other manufacturing parameters for LCM processes [1–3]. Permeability tensor is represented as a second-order symmetric tensor, and for fluid flow in an anisotropic media, it is given as:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

In composite processing design, the accuracy of the permeability tensor plays such a crucial role that there have been many attempts to characterize it. All the characterization methods presented in the literature [4]–[10] can be divided into two main categories based on their injection methods: radial injection and rectilinear injection flow. Radial injection allows the determination of complete in-plane permeability tensor from a single experiment, whereas rectilinear injection requires at least three experiments. This fundamental difference between radial and rectilinear injection methods makes the former method more attractive because of the fewer experimental efforts. However, it has been established that results obtained from radial injection have high variations and are not reproducible [10]–[12]. On the other hand, the reproducibility of permeability results via rectilinear injection has been confirmed in an international benchmark study [13].

There have also been many attempts to determine dual scale or three-dimensional (3D) permeability using numerical methods [14]. In 3D permeability, through-thickness resin flow behavior is also considered along with the planar flow; hence, Eq (2) can represent three additional permeability components, i.e., K_{zz} , K_{xz} , and K_{yz} . Okonkwo et al. [15] used the radial flow method and optimization routine to characterize 3D permeability, while Yun et al. [16] explored a similar approach to characterize the 3D permeability for thick preforms. Gokce et al. [17] used the rectilinear injection method to characterize the transverse permeability with the help of preform with previously known in-plane permeability components.

Despite its ability to provide accurate permeability predictions, not much work has been done to reduce the experimental efforts involved in the rectilinear injection method; therefore, the focus of this study is to utilize this technique for in-plane permeability characterization and to reduce the related complexities. Lundström et al. [4] proposed a multi-cavity rectilinear flow technique to determine in-plane permeability tensor from a single experiment. Di Fratta et al. [5] suggested a strategy to use flow front angle for complete determination of in-plane permeability tensor using two rectilinear flow measurements. Moreover, Lugo et al. [18] developed an analytical method to determine in-plane permeability (in flow direction) as well as the permeability in the through-thickness direction from a single rectilinear experiment. The method depends on the use of preform partially covered with distribution media (a highly permeable layer). The presence of distribution media introduces a flow difference between the top and bottom of the preform, causing two-dimensional (2D) flow conditions in the through-thickness direction. This phenomenon provides the means to estimate the through-thickness permeability from the same single experiment. The aforementioned studies have shown that it is possible to determine textile permeability with fewer experiments than required when using the rectilinear injection method. However, the number of the experiments needed to determine in-plane permeability via the rectilinear method can be further reduced, and the process can be simplified.

This study presents a new and improved methodology to characterize all three components of the in-plane permeability tensor (K_{xx} , K_{xy} , and K_{yy}) from a single rectilinear flow experiment. The main idea of the proposed method is to determine all three components of the in-plane permeability tensor by utilizing the intentionally introduced disturbance to the unidirectional (1D) resin flow in the in-plane space. The resin arrival times at

different sensor locations are recorded during the resin flow. Then, an optimization routine is created using the particle swarm optimization (PSO) method in which the permeability values in a flow simulation of a similar domain are updated continuously until the error between arrival times from simulation and experiment is minimized.

2. Methodology

2.1. In-plane Permeability Tensor Characterization

The objective of this study to use a single rectilinear experiment to characterize in-plane permeability components is based on the introduction of disturbance to the mold domain. The numerical simulation for the flow through porous media is performed with Liquid Injection Molding Simulation (LIMS). LIMS [19] is a finite element/control volume-based method that uses Darcy's law to simulate the mold filling process of resin transfer molding (RTM) and other related processes. LIMS can be used to optimize gates and vent locations in a mold and design injection scheme which allows to strategically control the resin flow into the mold [20,21]. However, LIMS needs permeability tensor values, resin viscosity, fiber volume fraction, and boundary conditions to simulate the resin flow and gives resin arrival time for each node of discretized geometry.

The mold domain used in this study is shown in Figure 1 along with its dimensions and the corresponding mesh. The dimensions of mold in both cases are 0.5 m x 0.2 m, while the dimensions of the rectangular disturbance located at the top-left of the mold domain are 0.1 m x 0.04 m. The dimension and position of the rectangular disturbance will not have any effect on the prediction behavior. A transversely anisotropic preform of 0.5 fiber volume fraction (with $K_{xx} = K_{yy} = 5.65 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ and $K_{xy} = 0$) and rectilinear linear injection is considered along the x-direction for both cases. Moreover, the left side of the mold is assigned as inlet gate with $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ pressure, whereas the right side is considered to be the vent for the flow of the resin having a viscosity of 0.1 Pa.s. Figure 2 and Figure 3 present the fill time behavior and pressure distribution, respectively, for both cases i.e., for a regular mold and a mold with the rectangular disturbance. Figures 2(b) and 3(b) demonstrate the changes in fill-time behavior and pressure distribution experienced by the flowing resin due to the presence of the rectangular disturbance in the mold. As shown in Figure 2(b), the disturbance in the mold affects the fill time behavior and results in two velocity components, i.e., in x- and y-direction. Similarly, the pressure distribution in Figure 3(b) shows two components of pressure gradient, indicating that the initial 1D flow transformed into a 2D flow. This transformation of the flow is extremely crucial in determining all in-plane permeability components from a single rectilinear experiment. Also, the proposed methodology is highly dependent on the resin fill time.

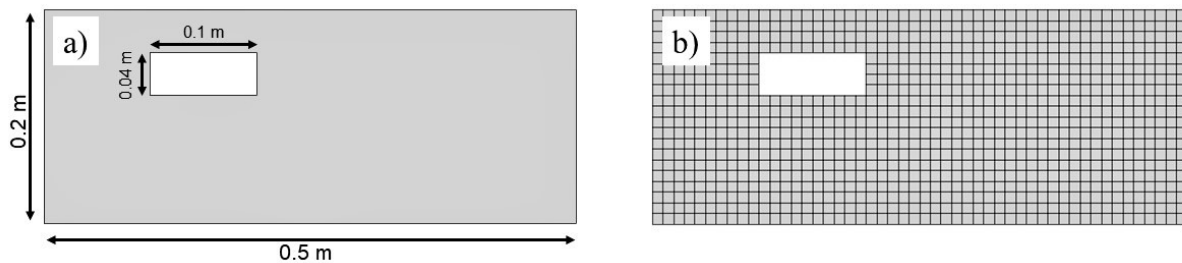


Figure 1. (a) Dimensions and (b) Mesh of the mold domain used in this study.

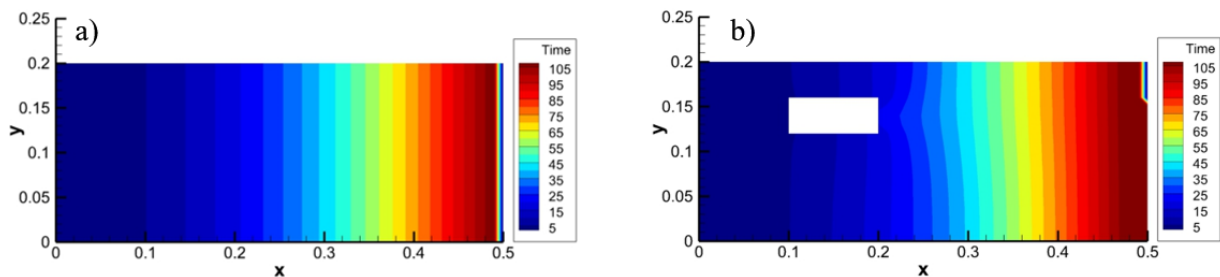


Figure 2. Fill time (seconds) behavior for transversely anisotropic preform in (a) regular mold and (b) mold with rectangular disturbance.

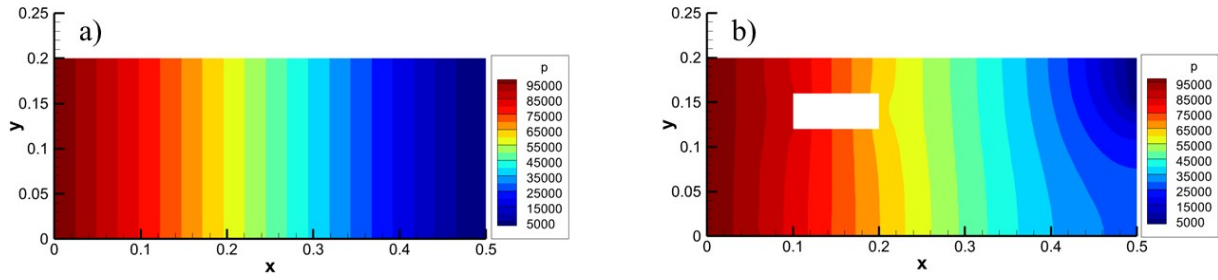


Figure 3. Pressure (Pa) distribution for transversely anisotropic preform in (a) regular mold and (b) mold with rectangular disturbance.

The steps involved in this study to characterize the permeability components are summarized in Figure 4. The first step is to conduct the virtual 1D flow experiment to record the experimental flow arrival time ($T_{i,exp}$) for the assigned in-plane permeability tensor. In the second step, LIMS is used to compute numerical resin arrival time ($T_{i,LIMS}$) for the permeability tensor values of the upper and lower limits of the search domain. The flow arrival time obtained from LIMS is then compared to experimentally recorded resin arrival time and manipulated continuously by updating the permeability tensor guess to reduce the residual sum of squares (RSS). The RSS between the experimental and simulated flow arrival time is used as a parameter to quantify their difference. RSS is calculated as follows:

$$RSS = \sum_{i=1}^N (T_{i,exp} - T_{i,LIMS})^2 \quad (3)$$

In Eq (3), N is the total number of nodes in a discretized geometry and/or corresponding sensors to detect the position of resin in an experimental setup, $T_{i,exp}$ is virtual experimental flow arrival time and $T_{i,LIMS}$ is simulated flow arrival time at i^{th} node/sensor.

The accuracy of the predicted results depends on the minimization of RSS, and for this purpose different optimization algorithms can be used. Okonkwo et al. [15] used the Golden Section Search Minimization Technique (G2MST), and Yun et al. [16] used Simplex Algorithm to characterize 3D fabric permeability. However, in both cases, determination of the initial permeability values was the initial requirement to execute the optimization process. Therefore, in this study, a population-based stochastic technique named Particle Swarm Optimization (PSO) is used to minimize RSS, which does not require initial guesses to start the optimization process.

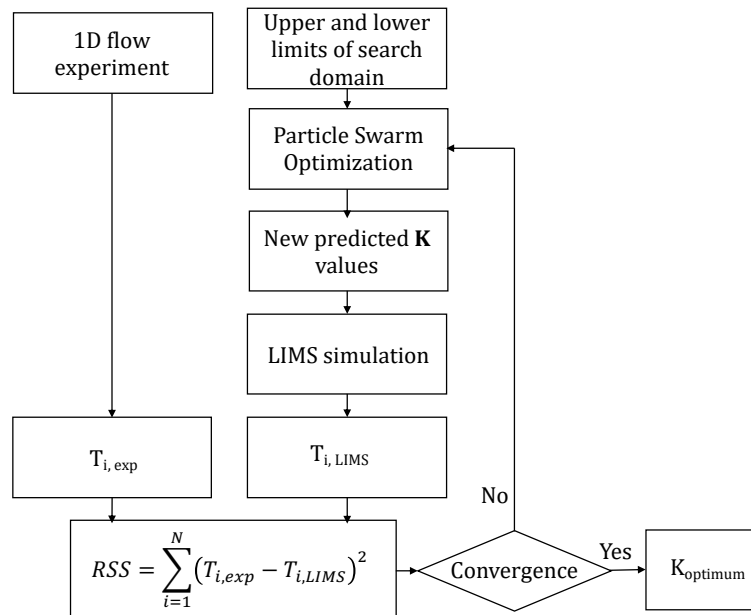


Figure 4. Methodology for the characterization of all in-plane permeability components via single rectilinear injection experiment.

2.2. Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) is a population-based optimization method initially developed by Eberhart et al. [22]. The inspiration behind the development of PSO was derived from the socializing behavior of bird flocking and fish schooling. A key advantage of using the PSO algorithm is that it requires low computational cost. PSO applies social laws to search for the global optimum in a design space. The optimization process of PSO starts by introducing a population of particles randomly distributed at various locations in a search domain, where the location of each particle represents a specific solution. Due to the random distribution of particles, each particle is at a different location in a search domain, and to achieve an optimum, the particles need to update their positions continuously. The change in a particle's position changes its corresponding velocity, resulting in a continuous velocity update. The velocity update that corresponds to the best position of the particle is the key operator behind the optimization process of the PSO algorithm. The best position/location is defined as the nearest position to the possible optimum solution. In PSO, the overall best position is evaluated by considering the best of all particles (global best position) and the best of an individual particle (local best position) that it has reached during the search. This critical approach of PSO helps the entire population of particles to migrate toward the global optimum. Each particle's velocity and position are updated stochastically at each iteration during the optimization process using the following relationships.

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + C_1 r_1^t (P_i^t - X_i^t) + C_2 r_2^t (P_g^t - X_i^t) \quad (4)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (5)$$

In Eq (4) and Eq (5), V_i^t and X_i^t are velocity vector and position vector, respectively. P_i^t refers to the best position of an individual particle, while P_g^t represents the global best position of the whole population. Eq (4) explains the velocity update criteria of the PSO algorithm. It contains three terms, the first of which represents inertia, the second term refers to cognitive behavior, and the third term represents the social behavior of particles. Each term has its respective coefficients ω , C_1 , and C_2 which control the exploration and exploitation behavior of the particles. ω , known as inertia coefficient, defines the ability of the population to change its direction and, as the name suggests, represents the inertia of the population. Higher values of ω encourage exploitation whereas lower values facilitate exploration. Thus, a suitable value of ω can provide a balance between exploration and exploitation. C_1 influences the individualistic behavior of the population; therefore, higher C_1 makes it very difficult to achieve convergence as each particle tries to focus on its best solution. On the other hand, C_2 enforces the influence of particles on each other and improves the collective behavior of the population.

3. Results and Discussion

The accuracy of the presented methodology is evaluated by considering a filling of 0.5 m x 0.2 m x 0.005 m rectangular mold with a constant inlet pressure of 1×10^5 Pa (Figure 1). The fiber volume fraction is 0.5, while the resin viscosity is 0.1 Pa.s. It is very challenging to control the variations in the predicted permeability values during actual experiments. In this study, to validate the presented methodology for permeability characterization, virtual experimentations are performed. In a virtual experiment, a simulation is performed via LIMS by providing permeability values (considered as 'ground value'). This virtual experiment provides flow arrival time ($T_{i,exp}$) at each node of discretized geometry (Figure 1(b)). The position of these nodes corresponds to the position of sensors in an actual experiment. The methodology presented in the previous section is then used to predict the permeability components, which are then compared with ground permeability values. To assess the efficiency of the methodology, three different cases were tried: (i) predicting permeability components in flow direction by using regular mold domain with isotropic preform only, (ii) predicting all three anisotropic permeability components from a single injection by introducing the disturbance to mold domain, and (iii) predicting all three anisotropic permeability components from a single injection by introducing the disturbance to mold domain in the presence of race tracking phenomena as it is the main drawback of rectilinear injection [23], [24]. For each case, two different trials were executed and for each trial the same search domain size was used (upper and lower limits for search domain), while the population of particles was taken to be 200. The results are listed in Table 1. As described earlier as an advantage of using PSO, no initial guess values were needed to proceed with the prediction process. Thus, it can be concluded from the results presented in Table 1 that the proposed methodology is able to predict the permeability values in a very accurate manner. In almost all cases, the error between the ground value and the predicted value is less than 0.01%, with an exception in the second trial of case (ii), in which the maximum error obtained is 3.96%.

To further elaborate the role of PSO in permeability prediction in this study, an analysis on the evolution of particles' population has been performed. Since PSO relies on the convergence of the population to a single global solution, the statistical range of particles in each variable direction is plotted against the iteration to observe the population's behavior. The statistical range represents the spread of particles from each other. If the particle swarm converges to a single solution, then the range in each variable direction goes to zero. Otherwise, in some variable directions, it remains away from zero. The results obtained for case 2(a) of Table 1 are presented in Figure 5. It can be observed that since the beginning of the optimization process, the range is very small, implying that particles are already close to each other. The reason for this can be the upper and lower limits of the search domain used in this study.

The pressure distribution obtained for all three cases are presented in Figure 6. For the first case in Figure 5(a), the pressure gradient is parallel as no anisotropy is assumed. While for the second and third cases in Figures 5(b) and 5(c), the pressure gradient is not parallel, and an inclination is observed (implying the presence of two pressure gradient components) due to the presence of an anisotropic permeability component. In Figure 5(c), one can also observe that at the end of the mold, the flow at the lower edge is distinctly delayed in comparison to the flow at the upper edge due to race-tracking.

Table 1. Comparison of permeability values predicted by proposed methodology for three different cases.

Trial	Lower Limit	Upper Limit	Permeability	Ground Value (m ²)	Predicted Value (m ²)	Relative Error (%)	Number of Iterations	Elapsed Time (sec.)
Case 1. Isotropic preform – regular mold domain								
a.	2.00E-11	2.00E-09	K _{xx}	5.65 x 10 ⁻¹⁰	5.65 x 10 ⁻¹⁰	6.40 x 10 ⁻⁴	37	3924.407
b.	2.00E-11	2.00E-09	K _{xx}	2.00 x 10 ⁻¹⁰	2.00 x 10 ⁻¹⁰	1.63 x 10 ⁻³	34	3750.131
Case 2. Anisotropic preform – mold domain with disturbance								
a.	2.00E-11	2.00E-09	K _{xx}	5.65 x 10 ⁻¹⁰	5.65 x 10 ⁻¹⁰	0	96	12440.06
	2.50E-11	2.50E-09	K _{yy}	6.35 x 10 ⁻¹⁰	6.35 x 10 ⁻¹⁰	0		
	1.00E-12	1.00E-10	K _{xy}	1.97 x 10 ⁻¹¹	1.97 x 10 ⁻¹¹	0		
b.	2.00E-11	2.00E-09	K _{xx}	2.00 x 10 ⁻¹⁰	2.00 x 10 ⁻¹⁰	0	212	29833.51
	2.50E-11	2.50E-09	K _{yy}	2.50 x 10 ⁻¹⁰	2.50 x 10 ⁻¹⁰	0		
	1.00E-12	1.00E-10	K _{xy}	2.23 x 10 ⁻¹¹	2.23 x 10 ⁻¹¹	0		
Case 3. Anisotropic preform with the presence of race-tracking – mold domain with disturbance								
a.	2.00E-11	2.00E-09	K _{xx}	5.65 x 10 ⁻¹⁰	5.65 x 10 ⁻¹⁰	1.77 x 10 ⁻³	173	33931.864
	2.50E-11	2.50E-09	K _{yy}	6.35 x 10 ⁻¹⁰	6.35 x 10 ⁻¹⁰	2.36 x 10 ⁻²		
	1.00E-12	1.00E-10	K _{xy}	1.97 x 10 ⁻¹¹	1.97 x 10 ⁻¹¹	7.61 x 10 ⁻²		
	1.00E-09	1.00E-07	K _{rt}	1.00 x 10 ⁻⁸	1.00 x 10 ⁻⁸	3.00 x 10 ⁻²		
b.	2.00E-11	2.00E-09	K _{xx}	2.00 x 10 ⁻¹⁰	1.99 x 10 ⁻¹⁰	3.82 x 10 ⁻¹	800	95381.674
	2.50E-11	2.50E-09	K _{yy}	2.50 x 10 ⁻¹⁰	2.60 x 10 ⁻¹⁰	3.96 x 10 ⁰		
	1.00E-12	1.00E-10	K _{xy}	2.23 x 10 ⁻¹¹	2.22 x 10 ⁻¹¹	4.20 x 10 ⁻¹		
	1.00E-09	1.00E-07	K _{rt}	1.00 x 10 ⁻⁸	1.02 x 10 ⁻⁸	2.06 x 10 ⁰		

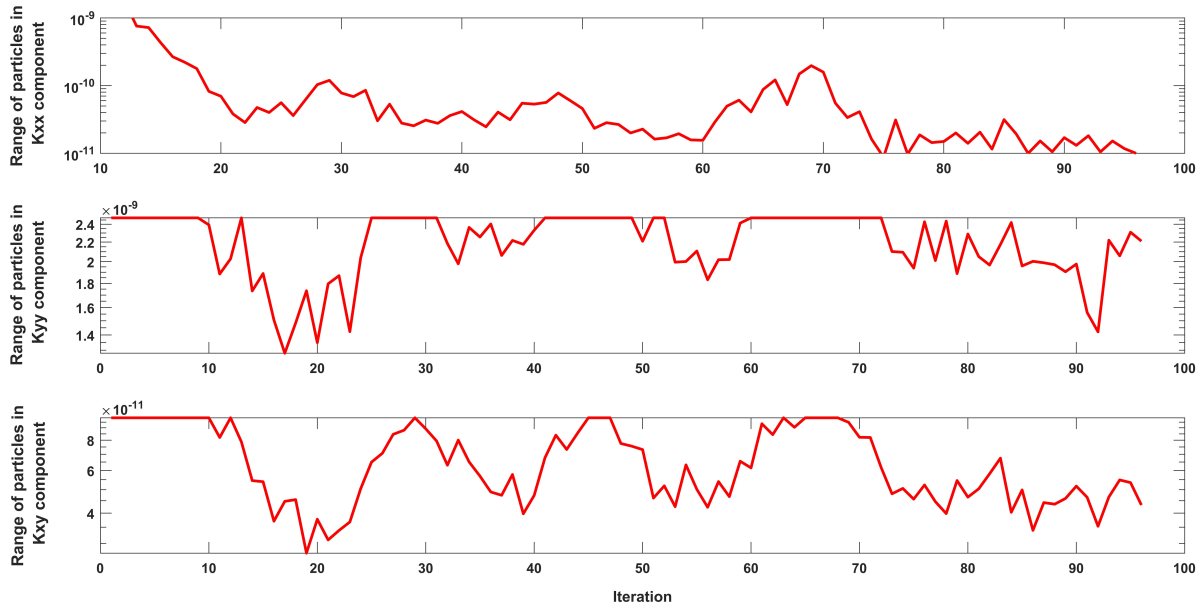


Figure 5. Evolution of the population of particles in each variable direction for Case 2 (a) of Table 1.

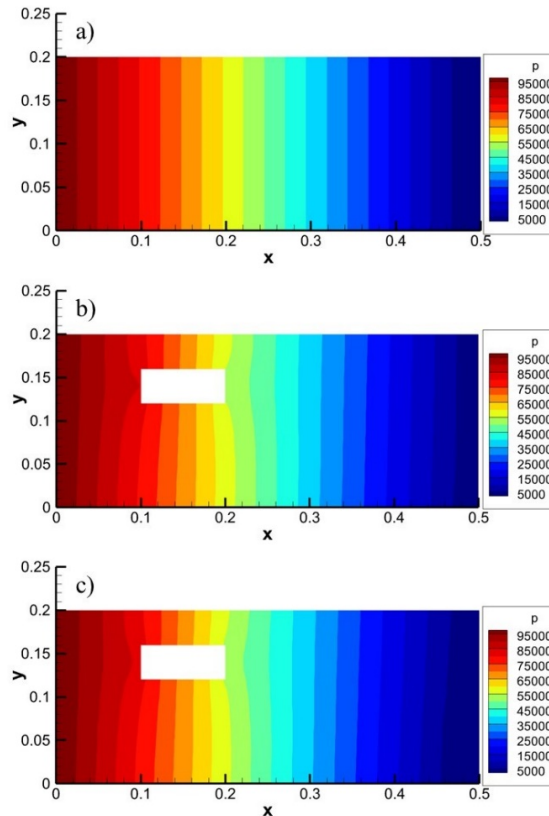


Figure 6. Pressure distribution for (a) isotropic preform – regular mold, (b) anisotropic preform – mold with disturbance, and (c) anisotropic preform with presence of race-tracking – mold with disturbance.

The discretized geometry used for the virtual experiment for case (iii) has 1044 nodes, and as previously mentioned, these nodes correspond to the position of sensors used in the actual experiment to record experimental flow arrival time. To use these many sensors in an experiment is not efficient and requires a substantial amount of effort, which is contrary to the objective of the present study. Therefore, additional analyses have been made to observe the effect of the number of nodes/sensors on the prediction behavior of the proposed methodology. The aim of the study is to find the minimum number of nodes/sensors sufficient to predict permeability values with minimum error in less time. Hence, time to get predicted values along with an average of errors associated with each permeability component is plotted against different numbers of nodes/sensors for two different sets of permeabilities (Figure 7). The observed general trend for both cases is quite similar, i.e., there

is a trade-off between total elapsed time and average error. After observing the elapsed time and average error for each case, it can be concluded that ten nodes/sensors give the best combination of elapsed time and average error, and it can be considered an optimum number of sensors required to predict permeability components in a time-efficient manner.

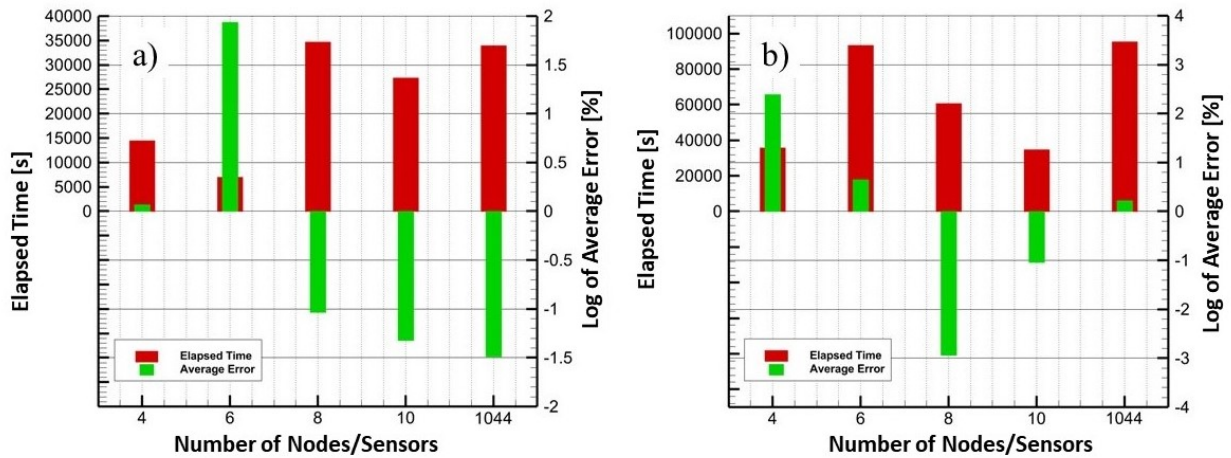


Figure 7. Effect of number of nodes/sensors on the prediction behavior of proposed methodology.

4. Conclusion

A methodology based on disturbing a unidirectional resin flow has been proposed to predict all three components of in-plane permeability tensor from a single rectilinear flow experiment. The method depends on recording the resin flow arrival times during the experiment and minimizing the error between experimental resin flow arrival time and numerical resin flow arrival time obtained via RTM simulation of a similar mold domain in LIMS. The residual sum of squares (RSS) is used to define the error between the experimental and numerical resin arrival time, and the particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to minimize this error. Three different cases were performed, each containing two different sets of permeabilities. The proposed methodology has successfully predicted the permeability with high accuracy for all three cases. An analysis to determine the least number of nodes/sensors sufficient for permeability prediction has been performed to reduce the excessive efforts required in the prediction process. It is found that ten nodes/sensors will be enough to determine the accurate permeability values from a single rectilinear experiment, specifically for the geometry that used in this study.

Acknowledgment

The authors would like to thank Dr. Pavel Simacek and Prof. Suresh G. Advani from the University of Delaware for their advisement on LIMS implementation. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

References

- [1] M. Seyednourani, M. Yildiz, and H. S. Sas, "A two-stage optimization methodology for gate and vent locations and distribution media layout for liquid composite molding process," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 149, no. June, p. 106522, 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106522.
- [2] S. Jiang, C. Zhang, and B. Wang, "Optimum arrangement of gate and vent locations for RTM process design using a mesh distance-based approach," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 4, pp. 471–481, Apr. 2002, doi: 10.1016/S1359-835X(01)00146-4.
- [3] H. S. Sas and M. Erdal, "Modeling of particle–resin suspension impregnation in compression resin transfer molding of particle-filled, continuous fiber reinforced composites," *Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 3, pp. 397–414, Mar. 2014, doi: 10.1007/s00231-013-1275-z.
- [4] T. S. Lundström, B. R. Gebart, and E. Sandlund, "In-plane permeability measurements on fiber reinforcements by the multi-cavity parallel flow technique," *Polym. Compos.*, vol. 20, no. 1, pp. 146–154, Feb. 1999, doi: 10.1002/PC.10342.
- [5] C. Di Fratta, G. Koutsoukis, F. Klunker, F. Trochu, and P. Ermanni, "Characterization of anisotropic permeability from flow front angle measurements," *Polym. Compos.*, vol. 37, no. 7, pp. 2037–2052, Jul. 2016, doi: 10.1002/PC.23382.
- [6] K. K. Han, C. W. Lee, and B. P. Rice, "Measurements of the permeability of fiber preforms and

- applications," *Composites Science and Technology*, vol. 60, no. 12–13, pp. 2435–2441, 2000, doi: 10.1016/S0266-3538(00)00037-3.
- [7] P. Ferland, D. Guittard, and F. Trochu, "Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding," *Polym. Compos.*, vol. 17, no. 1, pp. 149–158, Feb. 1996, doi: 10.1002/PC.10600.
- [8] J. R. Weitzenböck, R. A. Sheno, and P. A. Wilson, "A unified approach to determine principal permeability of fibrous porous media," *Polym. Compos.*, vol. 23, no. 6, pp. 1132–1150, Dec. 2002, doi: 10.1002/PC.10507.
- [9] E. Fauster *et al.*, "Image processing and data evaluation algorithms for reproducible optical in-plane permeability characterization by radial flow experiments," <https://doi.org/10.1177/0021998318780209>, vol. 53, no. 1, pp. 45–63, Jun. 2018, doi: 10.1177/0021998318780209.
- [10] B. R. Gebart and P. Lidström, "Measurement of in-plane permeability of anisotropic fiber reinforcements," *Polym. Compos.*, vol. 17, no. 1, pp. 43–51, 1996, doi: 10.1002/PC.10589.
- [11] T. S. Lundström, R. Stenberg, R. Bergström, H. Partanen, and P. A. Birkeland, "In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 31, no. 1, pp. 29–43, Jan. 2000, doi: 10.1016/S1359-835X(99)00058-5.
- [12] R. S. Parnas and A. J. Salem, "A comparison of the unidirectional and radial in-plane flow of fluids through woven composite reinforcements," *Polym. Compos.*, vol. 14, no. 5, pp. 383–394, Oct. 1993, doi: 10.1002/PC.750140504.
- [13] N. Vernet *et al.*, "Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 61, pp. 172–184, 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.02.010.
- [14] W. R. Hwang and S. G. Advani, "Numerical simulations of Stokes–Brinkman equations for permeability prediction of dual scale fibrous porous media," *Phys. Fluids*, vol. 22, no. 11, p. 113101, Nov. 2010, doi: 10.1063/1.3484273.
- [15] K. Okonkwo, P. Simacek, S. G. Advani, and R. S. Parnas, "Characterization of 3D fiber preform permeability tensor in radial flow using an inverse algorithm based on sensors and simulation," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 10, pp. 1283–1292, 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.05.010.
- [16] M. Yun, H. Sas, P. Simacek, and S. G. Advani, "Characterization of 3D fabric permeability with skew terms," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 97, pp. 51–59, 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.12.030.
- [17] A. Gokce, M. Chohra, S. G. Advani, and S. M. Walsh, "Permeability estimation algorithm to simultaneously characterize the distribution media and the fabric preform in vacuum assisted resin transfer molding process," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 14, pp. 2129–2139, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.compscitech.2005.05.012.
- [18] J. Lugo, P. Simacek, and S. G. Advani, "Analytic method to estimate multiple equivalent permeability components from a single rectilinear experiment in liquid composite molding processes," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 67, pp. 157–170, 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.08.031.
- [19] P. Šimáček and S. G. Advani, "Desirable features in mold filling simulations for liquid composite molding processes," *Polym. Compos.*, vol. 25, no. 4, pp. 355–367, 2004, doi: 10.1002/pc.20029.
- [20] S. Bickerton, H. C. Stadtfeld, K. V Steiner, and S. G. Advani, "Design and application of actively controlled injection schemes for resin-transfer molding," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 11, pp. 1625–1637, Aug. 2001, doi: 10.1016/S0266-3538(01)00064-1.
- [21] E. . Sozer, S. Bickerton, and S. . Advani, "On-line strategic control of liquid composite mould filling process," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 31, no. 12, pp. 1383–1394, Dec. 2000, doi: 10.1016/S1359-835X(00)00060-9.
- [22] R. Eberhart and James Kennedy, "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory," *Int. Symp. Micro Mach. Hum. Sci.*, pp. 39–43, 1999, [Online]. Available: [https://bytebucket.org/12er/pso/raw/b448ff0db375c1ac0c55855e9f19aced08b44ca6/doc/literature/Variants/topology/A new Optimizer using Particle Swarm Theory.pdf](https://bytebucket.org/12er/pso/raw/b448ff0db375c1ac0c55855e9f19aced08b44ca6/doc/literature/Variants/topology/A%20new%20Optimizer%20using%20Particle%20Swarm%20Theory.pdf).
- [23] W.-B. Young and C.-L. Lai, "Analysis of the edge effect in resin transfer molding," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 28, no. 9–10, pp. 817–822, Jan. 1997, doi: 10.1016/S1359-835X(97)00034-1.
- [24] S. Bickerton, S. G. Advani, R. V. Mohan, and D. R. Shires, "Experimental analysis and numerical modeling of flow channel effects in resin transfer molding," *Polym. Compos.*, vol. 21, no. 1, pp. 134–153, Feb. 2000, doi: 10.1002/pc.10172.