



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
DERGİSİ

ÇUKUROVA UNIVERSITY
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

Cilt/Vol: 38

Sayı/Issue: 4

Aralık/December 2023

ISSN 2757-9255



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ
Cukurova University, Journal of the Faculty of
Engineering



Sahibi (Owner)

Ulus ÇEVİK
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

Editör (Editor)

Serin MEZARCIÖZ

EDİTÖR KURULU (Editorial Board)

Ramazan ÇOBAN (Çukurova Üniversitesi)

Mutlu AVCI (Çukurova Üniversitesi)

Mustafa GÖK (Çukurova Üniversitesi)

Ahmet DAĞ (Çukurova Üniversitesi)

Hüseyin AKILLI (Çukurova Üniversitesi)

Ulus ÇEVİK (Çukurova Üniversitesi)

Ali KOKANGÜL (Çukurova Üniversitesi)

Mesut BAŞIBÜYÜK (Çukurova Üniversitesi)

Hacı Murat ARSLAN (Çukurova Üniversitesi)

Oğuz DEMİRYÜREK (Erciyes Üniversitesi)

Hüsamettin BULUT (Harran Üniversitesi)

Metin GÜRÜ (Gazi Üniversitesi)

Mehmet Emin AYDIN (University of the
West of England, İngiltere)

Azra BİLGİN (University of Colorado Boulder,
ABD)

Ulvi Can ÜNLÜGENÇ (Çukurova Üniversitesi)

Özen KILIÇ (Çukurova Üniversitesi)

Serin MEZARCIÖZ (Çukurova Üniversitesi)

Belgin BAYAT (Çukurova Üniversitesi)

Ali KESKİN (Çukurova Üniversitesi)

R. Tuğrul OĞULATA (Çukurova Üniversitesi)

Onur ERMAN (Çukurova Üniversitesi)

Hüseyin VAPUR (Çukurova Üniversitesi)

Hüseyin R. YERLİ (Çukurova Üniversitesi)

Ergun ERÇELEBİ (Gaziantep Üniversitesi)

Nihan ÇETİN DEMİREL (Yıldız Teknik Üniversitesi)

Serter ATABAY (American University of Sharjah,
United Arab Emirates)

Muammer KOÇ (Hamad Bin Khalifa University,
Qatar)

Tamio ENDO (Mie University-Japonya)

Hakemli Bir Dergidir. Yılda Dört Sayı Basılır. / Refereed Journal. Published Quarterly.

Dergimiz **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi'nde taranmaktadır.
Indexed by **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi

Derginin eski adı: Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi
(ISSN: 1019-1011)

YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT

Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA
Tel : (322) 338 63 57 Fax : (322) 338 61 26 E-posta: mmfdergi@cu.edu.tr - cu.mmfdergi@gmail.com

AMAÇ ve KAPSAM

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Mühendislik alanındaki gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişimlerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda Türkçe bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe/İngilizcedir. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan makaleler kabul edilmektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. **“Araştırma ve uygulama içeren makaleleri”** yayımlanmaktadır.

AIM and SCOPE

Journal of the Engineering Faculty of Cukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal is published to follow the developments in the field of engineering, to contribute to the national and international development of professional organizations and individuals, and to create a Turkish resource in these areas. The language of the journal is Turkish/English. All original and up to date scientific research and applications articles that have not been published elsewhere are accepted. Theoretical/experimental and practical studies related to all engineering fields are in the scope of the Journal. Translation and compilation articles are not accepted. The journal publishes **“articles of research and practice”**.

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Adana İlinde Bir Tekstil İşletmesindeki Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı Uygulamalarının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Analizi 875**
Analysis of European Union Green Deal Implementations in a Textile Enterprise in Adana Province Using Multi-Criteria Decision-Making Methods
Duygu Durdu KOÇ, Ash AVDULVAHİTOĞLU ve Adnan ABDULVAHİTOĞLU
- Yenilikçi Soya Lifi İçeren Mamul Denim ve Spor Giyim Kumaşların Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) 887**
Life Cycle Analysis (LCA) of Finished Denim and Sportswear Fabrics Containing Innovative Soy Fiber
Emel Ceyhun SABİR, Serdal SIRLIBAŞ, İpek DÖNMEZ UZUN ve Deniz CİVAN YİĞİT
- The Evaluation of Uster Hairiness Results with an Image Analysis Approach..... 899**
Bir Görüntü Analiz Yaklaşımı ile Uster Tüyülük Sonuçlarının Değerlendirilmesi
Abdurrahman TELLİ
- Grafen Nanoplaka Katkılı Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozit Boruların İç Yüzey Erozif Aşınma Direncinde Aşındırıcı Partikül Hızının Rolünün İncelenmesi..... 907**
Investigation of the Role of Abrasive Particle Velocity on the inner Pipe Surface Erosive Wear Resistance of Composite Pipes Reinforced with Basalt Fibre and Graphene Nanoplatelets
Seyit Mehmet DEMET
- Farklı Kriter Ağırlıklandırma Teknikleri ve Cocoso Yöntemi ile Katılım Bankalarının Performans Değerlendirmesi 917**
Performance Evaluation of Participation Banks with Different Criteria Weighting Techniques and Cocoso Method
Su DAĞLI ve Birsen İrem KUVVETLİ
- The Impact of Tempering Temperature on Retained Austenite and Mechanical Properties of 1.2842 Tool Steel..... 933**
Temperleme Sıcaklığının Kalıntı Östenit ve 1.2842 Takım Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkisi
Ender GÜNERLİ, Melih BAYRAMOĞLU ve Necdet GEREN
- Bulut Bilişim Sanal Sunucu Ürün Seçiminde Çok Kriterli Bir Karar Destek Modeli..... 939**
A Multi-Criteria Decision Support Model for Cloud Computing Virtual Server Product Selection
Onur KOŞAR ve Mehmet ATAK

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Winkler Tipi Elastik Zemine Oturan Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Kirişlerin Statik Analizi.....	955
<i>Static Analysis of Functionally Graded Material Beams Resting on Winkler Type Elastic Foundation</i>	
Timuçin Alp ASLAN, Ahmad Reshad NOORI, Burkay SİVRİ ve Beytullah TEMEL	
Dolum Hattı Makineleri için AHP ve TOPSIS Yöntemine Dayalı Tedarikçi Seçimi	967
<i>Supplier Selection Based on AHP and TOPSIS Method for Filling Line Machines</i>	
Olcay KALAN	
Fuzzy Logic Modeling of Energy and Exergy Efficiencies in Drying Units Powered by Renewable Energy Sources	981
<i>Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Beslenen Kurutma Ünitelerinde Enerji ve Ekserji Verimlerinin Bulanık Mantık Modellemesi</i>	
Ahmet ELBİR, Feyza AKARSLAN KODALOĞLU, Mehmet Erhan ŞAHİN	
Aluminum Forming by Vaporizing Foil Actuator Welding	993
<i>Buharlaştırılmış Folyo Aktüatör Kaynağı ile Alüminyum Şekillendirme</i>	
Ganime Tuğba ÖNDER ve Mustafa Kemal KÜLEKÇİ	
Investigation of Seismic Behaviour of a Construction of a Conveyor Line in a Coal Power Plant.....	1005
<i>Bir Kömür Santrali Konveyör Hattının Sismik Davranışının İncelenmesi</i>	
Erinç ULUDAMAR, Sinan EGÜZ, Kerimcan ÇELEBİ ve Sedat KARAAHMETLİ	
Helisel Kazıklarda Helis Çapının Basınç Yüküne Etkisinin Laboratuvar Deneyleri ile Araştırılması	1013
<i>Investigation of the Effect of Helix Diameter on Compression Load in Helical Piles by Laboratory Tests</i>	
Yakup TÜREDİ, Buse EMİRLER, Murat ÖRNEK, Abdulazim YILDIZ	
Friction and Wear Behavior of High-Silicon Lamellar Graphite Cast Iron Truck Brake Discs	1023
<i>Yüksek Silisli Lamel Grafit Dökme Demir Kamyon Fren Disklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışı</i>	
Ali GÜNEN, Melik ÇETİN, Tarkan SUBAŞ	

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

A Design of Crime Category Detection Framework using Stacking Ensemble Model.....	1035
<i>Suç Kategorisi Tespiti için Yığınlama Topluluk Öğrenimi Modeli Kullanan Çatı Tasarımı</i>	
Recep Sinan ARSLAN ve Burak DÜLGEROĞLU	
Analysis of One-Way Fluid-Structure Interactions for a Straight Pipe under Different Thermal and Pressure Conditions.....	1049
<i>Farklı Isı ve Basınç Koşulları Altında Düz Bir Boru İçin Tek Yönlü Akışkan-Yapı Etkileşimleri Analizi</i>	
Gökhan CANBOLAT	
Güç Sistemlerinde Alanlar-Arası Salınımlar için bir Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) Tabanlı Geniş-Alan Sönümlenme Sistemi Tasarımı.....	1061
<i>Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) Based Wide-area Damping System Design for Inter-area Oscillations in Power Systems</i>	
Mahir Bülent BAŞEL ve Ahmet Naci METE	
Production of Hydrogel with Alginate and Pericardial Fluid for use in Tissue Engineering Applications	1077
<i>Doku Mühendisliği Uygulamalarında Kullanılmak üzere Aljinat ve Perikardiyal Sıvı ile Hidrojel Üretimi</i>	
Dilek SÖNMEZER AÇIKGÖZ ve Fatma LATİFOĞLU	
Wideband Channel Estimation with Imperfect Hardware for Reconfigurable Intelligent Surfaces.....	1083
<i>İdeal Olmayan Donanıma Sahip Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzeyler için Geniş Bant Kanal Kestirimi</i>	
Eren BALEVİ	
Seyhan Nehrinin Su Kalitesi ve İz Element Konsantrasyonlarının Değerlendirilmesi	1093
<i>Evaluation of Water Quality and Trace Element Concentrations of the Seyhan River</i>	
Veli KESKİN ve Sedat TÜRKMEN	
Tencel Kumaşa Uygulanan Farklı Boyama Yöntemlerinin Seçilmiş Kumaş Performans Özelliklerine Etkisinin Değerlendirilmesi.....	1107
<i>Different Dyeing Methods Applied to Tencel Fabric Evaluation of the Effect on Selected Fabric Performance Characteristics</i>	
Mehmet AKBULUT, Füsün DOBA KADEM ve R.Tuğrul OĞULATA	

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Investigation of the Effect of Different Parameters of Phase Change Materials on Heat Exchanger Performance 1117**
Faz Değiştiren Malzemelerin Isı Değiştiricisi Performansına Etkisinin, Farklı Parametreler İçin İncelenmesi
Turan GÜNEŞ, Mahir ŞAHİN ve Mustafa KILIÇ
- Enhancing Early Strength Development of Alkali-Activated Slag through Preheating of Materials 1129**
Malzemelerin Isıtılarak Kullanılması ile Alkali-Aktive Cürufların Erken-dönem Dayanım Gelişimlerinin İyileştirilmesi
Cemal KARAASLAN
- Cilt Kanseri Tanısında Tıbbi Görüntüleri Kıldan Temizlemek İçin Kullanılan İki Yeni Filtre 1139**
Two Novel Filters for Cleaning Medical Images from Hair in Skin Cancer Diagnosis
Berçeste YILMAZ ve Amira TANDİROVİC GÜRSEL
- The Effects of Several Washings on Some of the Comfort Features of Denim Fabrics Made of Cotton and Coolmax Weft Yarns with and without Elastane 1151**
Çeşitli Yıkamaların Pamuklu ve Elastanlı ve Elastansız Coolmax Atkı İpliklerinden Üretilen Denim Kumaşların Bazı Konfor Özelliklerine Etkisi
Md Emdad SARKER ve Serin MEZARCIÖZ

Adana İlinde Bir Tekstil İşletmesindeki Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı Uygulamalarının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Analizi

Duygu Durdu KOÇ¹ ORCID 0000-0002-4400-5714

Aslı ABDULVAHİTOĞLU*² ORCID 0000-0002-3603-6748

Adnan ABDULVAHİTOĞLU³ ORCID 0000-0002-2659-6709

¹Ulusoy Tekstil San. ve Tic. A.Ş., Adana

²Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Adana

³Jandarma ve Sahil Güvenlik Akademisi, Kolluk Uygulamaları Bölümü, Ankara

Geliş tarihi: 21.08.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: KOÇ, D.D., ABDULVAHİTOĞLU, A., ABDULVAHİTOĞLU, A., (2023). Adana İlinde Bir Tekstil İşletmesindeki Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı Uygulamalarının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 875-885.

Öz

Küresel düzeyde, ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşma çabalarında enerji önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle enerji üretim sektörüne yapılan yatırımların, sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesine katkısı, ülkelerin uluslararası konumları açısından belirleyici bir ölçüt olarak kabul edilmektedir. Bu çerçevede, ülkelerin yerel ve yenilenebilir enerji kaynaklarını en üst düzeyde kullanma amacıyla gerçekleştirecekleri yatırımlar, ekonomik büyüme, kesintisiz enerji temini, çevre duyarlılığı ve verimlilik kriterlerini etkileme zorunluluğunu içermektedir. Mevcut üretim tesislerinde ise artan enerji maliyetleri, katılan emisyon standartları ve sürdürülebilir üretim ilkesinin yaygınlaşması firmaları bazı tedbirler almaya zorlamaktadır. Bu bağlamda birçok sektörde olduğu gibi tekstil sektörü de, temiz üretim ve enerji verimliliği uygulamalarına yönelmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, kaynağında bütüncül bir strateji ile enerji tüketimi azaltılarak, hem enerji kaynaklarının korunması hem de yeşil hedeflerin gerçekleştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Mevcut literatürde, tekstil sektöründe enerji verimliliği ve temiz üretim konularında sınırlı sayıda ölçekli çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, Adana Organize Sanayi Bölgesinde Faaliyet gösteren entegre bir tekstil tesisi örneği üzerinde uygulanan en uygun enerji verimliliği projeleri ile enerji kaynaklarından doğalgaz tüketiminin azaltılmasını hedeflemektedir. Bu şekilde, incelenen tekstil tesisinin sürdürülebilir tekstil üretimi ve temiz üretim hedeflerine katkı sağlaması beklenmektedir. Gerçek boyutlarda gerçekleştirilen bu enerji verimliliği çalışmasında, çok kriterli karar verme süreçlerini kullanarak yürütülen projelerin ağırlıkları veya önem dereceleri belirlenerek, önem derecesi yüksek hedeflere öncelik verilmesi önerilmiştir. Böylece optimum verimliliğin sağlanmasına yönelik bir yol haritası sunularak, sektörün sürdürülebilir vizyonunu güçlendirmeye potansiyel sağlanması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, Tekstil sektörü, ÇKKV, Standart sapma, MAUT

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Aslı ABDULVAHİTOĞLU, aabdulvahitoglu@atu.edu.tr

Analysis of European Union Green Deal Implementations in a Textile Enterprise in Adana Province Using Multi-Criteria Decision-Making Methods

Abstract

At the global level, energy plays a crucial role in countries' pursuit of their sustainable development goals. Specifically, the significance of investments in the energy production sector, contributing to the formulation of sustainable energy policies, is acknowledged as a decisive criterion for countries' international standing. Within this context, countries' investments in harnessing local and renewable energy resources to the fullest extent not only entail the responsibility to impact economic growth but also ensure uninterrupted energy supply, foster environmental awareness, and meet efficiency criteria. Amidst prevailing production facilities, escalating energy expenses, tightening emission standards, and the widespread adoption of sustainable production principles compel companies to undertake proactive measures. Like numerous other sectors, the textile industry is increasingly gravitating toward cleaner production and energy-efficient practices. This strategic approach aims to safeguard energy resources while concurrently advancing green objectives, achieved by curbing energy consumption at its source. The existing literature offers a limited number of studies on energy efficiency and clean production in the textile sector. This study seeks to diminish natural gas consumption through optimal energy efficiency projects implemented within an integrated textile facility in the Adana Organized Industrial Zone. Consequently, the examined textile facility is anticipated to make tangible contributions to the aspirations of sustainable textile production and cleaner industrial practices. Within the scope of this energy efficiency study, conducted in practical dimensions, the recommendation is to prioritize targets of utmost importance. This prioritization is achieved by determining weights or levels of significance for the undertaken projects via multi-criteria decision-making processes. The overarching objective is to furnish the sector with the potential to reinforce its sustainable vision, thereby presenting a comprehensive roadmap to attain optimal efficiency.

Keywords: Energy efficiency, Textile sector, MCDM, Standard deviation, MAUT

1. GİRİŞ

Hızla gelişen ve küreselleşen dünya nüfusun hızlı artışı evde ve endüstriyel faaliyetlerde tüketilen enerji miktarının sürekli olarak yükseldiği gerçeğini ortaya çıkarmaktadır. Bu durum enerjiyi dünya çapındaki kalkınmanın temel itici gücü yapmaktadır. Dolayısıyla ekonomik büyüme ve enerji tüketimi arasındaki ilişki her geçen gün daha fazla artarak ve karmaşıklaşarak devam etmektedir [1]. Tüm dünyada sanayi sektöründeki temel ihtiyaçlar arasında üst sıralardaki yerini koruyan enerji talebi, istihdam yaratmaya ve sürdürmeye yardımcı olması nedeniyle, son yıllarda yüksek ekonomik büyüme gösteren ve gelişmekte olan ülkelerde zaruretin ötesine geçmektedir [2]. Bu husus, farklı sektörlerde enerji kullanımındaki hızlı artışın yol açtığı ozon tabakasında inceltme, küresel ısınma, iklim değişikliği vb. bir dizi sorunun ortaya çıkmasına da neden olmaktadır [3].

Yüksek enerji tüketiminin ekonomik refahın da bir göstergesi haline geldiği günümüz dünyasında verimlilik, ekonomik koşulları şekillendiren ana faktörler arasında yer almaktadır. Enerji ve hammadde kaynaklarındaki tükenme göz önüne alındığında, verimliliğin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar, ekonomik büyümeyi sağlamanın en iyi yollarından biri olarak görülmektedir. Bu nedenle, enerji verimliliğinin artırılarak, enerji tüketiminin azaltılması, enerji arzı ve talebinin karşımıza çıkarttığı sorunlarla başa çıkmada ve sera gazı emisyonlarını azaltmada iyi bir strateji olarak ortaya çıkmaktadır. Böylece firmaların rekabet gücü ve vatandaşların refah seviyesi ile birlikte gayri safi yurtiçi hasılanın (GSYİH) artırılmasına da yardımcı olunmaktadır [4].

Sanayileşmiş ülkelerde imalat sanayi toplam enerji tüketiminin %54'ünü oluşturmaktadır. Bu oran içerisinde tekstil sektörünün önemli bir payı vardır

[5]. Özellikle Çin ve Türkiye gibi küresel tekstil tedarikçisi ülkelerdeki tekstil sektörü, toplam enerji tüketiminin sırasıyla %4'ünden [6] ve %10'undan [7] sorumludur.

Türk Tekstil sektörünün en büyük pazarı AB'dir. 2025 yılında AB Yeşil Mutabakatına (ABYM) uyum sağlamak amacıyla tekstil ve hazır giyim sektöründe enerji tasarrufunu teşvik eden, çevre dostu teknolojilere yönelik kullanımın artırılması ve iklim değişikliğine uyum sağlayacak projelerin desteklenmesi bu noktada büyük önem arz etmektedir. Tekstil üretim süreçlerinde detaylı temiz üretim ve enerji verimliliği uygulamaları ile enerji tüketimi ve hava emisyonları kaynağında azaltılabilmektedir. Bu nedenle diğer enerji yoğun endüstriyel sektörlerde olduğu gibi tekstil sektöründe de enerji verimliliği ve temiz üretim uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji, tekstil üretim süreçlerinde en önemli süreç girdilerinden [8] ve maliyet bileşenlerinden [6,9] biridir. Enerji genel olarak elektrik ve ısı enerjisi olarak iki temel formda kullanılmaktadır. Elektrik motorlarını, aydınlatmayı, kompresörleri, pompaları, dokuma ve eğirme makinelerini vb. cihazları çalıştırmak için hemen hemen tüm tekstil üretim süreçlerinde enerji kullanılmaktadır [6]. Tekstil üretim süreçlerinde ısı enerjisi ihtiyacı doğrudan doğalgaz veya fosil yakıtlardan üretilen buhar ile karşılanmaktadır [10].

Denizli ilinde bulunan bir pamuklu/polyester kumaş terbiye-boyama tekstil fabrikasında Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol ve Endüstriyel Emisyon Direktifi'ne göre temiz üretim değerlendirme çalışmaları yapılmıştır. İyi yönetim uygulamaları, su ve enerji tüketimi optimizasyonu-minimizasyonu teknikleri, kimyasal tüketimi optimizasyonu ve ikamesi gibi belirlenen 22 Mevcut En İyi Tekniğin uygulanmasıyla teknik ve çevresel performanslar, potansiyel faydalar ve tasarruflar belirlenmiştir. Bu değerlendirmeler, önerilen 22 Mevcut En İyi Tekniğin uygulanmasından sonra, bu tekniklerin gelecekte uygulanması durumunda şu azalmaların elde edilebileceğini ortaya koymuştur: %43-51 su tüketimi, %11-26 enerji tüketimi, %16-39 kimyasal tüketimi, %42-52 atık su akış hızı, %26-48 kimyasal oksijen talep yükü, %12-32 atık baca gazı emisyonları ve %8-18 katı atık oluşumu. Önerilen

Mevcut En İyi Tekniklerin geri ödeme süreleri 1-26 ay olarak tahmin edilmiştir [7].

Tekstil sektöründe gereksiz enerjinin nasıl önleneceğine yönelik araştırmalar yapılmış ve bu kapsamda temel sorunlar belirlenerek çözüm önerileri sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan enerji kaynaklarının elektrik ve termal enerji başlıkları altında incelenmesinin amacı daha detaylı bir rapor hazırlamak ve sektörde kullanılabilecek bir kaynak oluşturmaktır. Çalışmanın sonucunda sektörde kullanılan çoğu makine ve çalışma yöntemi basit özelleştirmeler ile değiştirilerek veya tasarlanan eski veya çalışma yöntemlerinin bulunmaması nedeniyle makinelerde yapılabilecek yenileriyle değiştirilerek %60'a varan enerji tasarrufu sağlanabildiği gözlemlenmiştir [11].

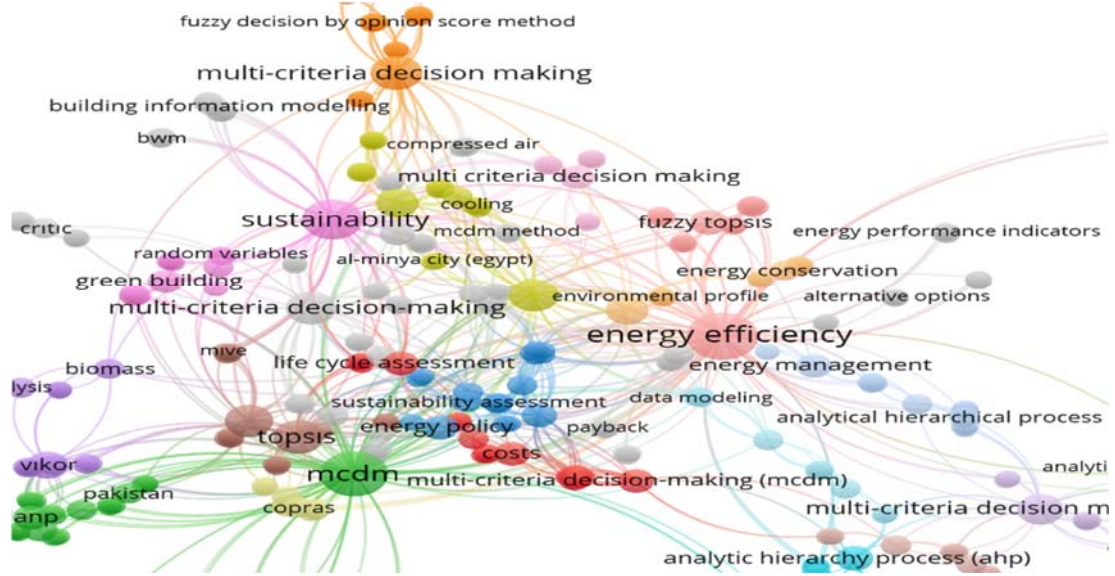
Entegre bir yünlü tekstil tesisinde enerji verimliliği çalışmaları yapılmıştır. Sonuç olarak, proses optimizasyonu, proses bazlı enerji izleme ve kontrol sisteminin kurulması, atık ısının geri kazanımı, buhar kazanlarının optimizasyonu, modifikasyon radyo frekanslı (RF) kurutucuların kurulumu, havalandırma-nemlendirme sistemindeki fan motorlarının modifikasyonu, kompresörlerin doğru konumlandırılması, kompresör izleme sistemi kurulumu ve hava emisyonu arıtma sistemi tekniklerin uygulanmasıyla elektrik, termal enerji ve hava emisyonlarının sırasıyla %8-27, %12-28 ve %23-45 oranında azaltılabileceği bulunmuştur. Mali analize dayalı olarak, öncelikli enerji verimliliği tekniklerinin geri ödeme sürelerinin genellikle 36 aydan kısa olduğu tespit edilmiştir [12].

Bugünün küreselleşen ekonomisi ile rekabet koşulları daha zorlu bir hale gelmiştir. Endüstriyel şirketler için enerji maliyetleri, rekabet gücü üzerinde giderek daha fazla etkili olmaya başlamış ve enerjinin etkili bir şekilde kullanılması büyük bir önem taşımaktadır.

Enerjinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için en önemli adımlar, ölçüm yapma, analiz etme ve tasarruf noktalarını belirlemedir. Bu nedenle enerji analizleri, endüstriyel işletmeler için atılacak ilk adım olmalıdır. Bu analizler sayesinde işletmelerin enerji sistemleri değerlendirilmekte, enerji

verimliliği projeleri önerileri sunulmakta ve kayıp-kaçak durumlarına çözümler getirilmektedir. Yazar tarafından Web of science core collection ile yapılan literatür analizi sonucunda enerji verimliliği

ile ilgili özellikle farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmaların yoğunlaştığı noktalar Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Enerji verimliliği çalışmalarının yoğunlaştığı noktalar

Ülkemiz, enerji kaynaklarını etkili ve çevre dostu bir biçimde kullanarak, enerjinin üretiminden son tüketimine kadar her aşamada verimliliği artırmayı amaçlamaktadır. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı içerisinde bu amaç öne çıkmış ve her endüstri alt sektöründeki enerji yoğunluğunun en az %10 düşürülmesine yönelik eylem planları belirlenmiştir. 2 Mayıs 2007'de yürürlüğe giren Enerji Verimliliği Kanunu [13], ülkemizde enerji verimliliği alanında ilk adımı atmıştır ve bu süreci takiben 27 Ekim 2011'de Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Arttırılmasına Dair yönetmelik hayata geçirilmiştir. En son olarak, 25 Ocak 2020'de güncellenen bu yönetmelik kapsamında:

- i. Yıllık toplam enerji tüketimi 1.000 TEP (Ton Eşdeğer Petrol) ve üzeri olan endüstriyel işletmelerde dört yılda bir
- ii. Toplam inşaat alanı 20.000 metrekareden fazla olan hizmet sektörü binalarında ise yedi yılda bir enerji etüdü yaptırılması gerekmektedir [14].

Bu bağlamda Adana ilinde faaliyet gösteren Ulusoy Tekstil firması tarafından hazırlanan Zorunlu Enerji Etüt Raporunda doğalgaz tüketiminin azaltılmasına yönelik beş proje oluşturulmuş ve uygulama sonucunda önemli miktarda tasarruf sağlanabileceği belirtilmiştir. Ancak her projeye etki eden kriterler aynı olmasına rağmen elde edilen sonuçlar farklıdır. Burada hangi projeden hangi oranda fayda sağlandığının tespiti ve yüksek oranda fayda sağlanan projeye ağırlık verilmesi hem zamandan hem de emekten tasarruf sağlayacaktır. Böylece daha etkili sonuç alınacaktır. Bu maksatla birden fazla kriter ve beş proje bulunduğu için hangi projenin daha etkili sonuç verdiğini ve önem derecesini bulmak için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden faydalanılacaktır.

ÇÇKV Yöntemleri hayatın hemen hemen her anında kullanılmakta olup [15,16], literatürde elektrikli araç batarya seçiminde [17], motor soğutma sistemlerinde kullanılan farklı nanoakışkanları ağırlıklandırma [18], biyodizel üretimine en uygun yağlı tohum bitkisinin

seçiminde [19], enerji santrali kuruluş yeri seçiminde [20], enerji sektörü finansal performans değerlendirmesinde [21], raylı sistemler bakım verimliliklerinin önceliklendirilmesinde [22], enerji üretim yatırım seçeneklerinin değerlendirilmesinde [23] ÇKKV yöntemleri kullanılarak çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Ancak ÇÇKV yöntemlerinden Standart Sapma ve MAUT yöntemlerinin tümleşik olarak kullanıldığı ve bir verimlilik çalışmasına konu olan projelerin karşılaştırılarak sıralandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Ulusoy Tekstilde enerji verimliliği çalışmaları kapsamında, detaylı ve yerinde incelemeler yapılarak hazırlanmış olan ana üretim ve diğer hazırlık süreçleri bazında enerji tüketimleri zorunlu enerji etüt raporunda analiz edilmiştir. Tesisin üretim süreçlerine göre spesifik elektrik, termal enerji ve hava emisyonları hesaplanmıştır. Söz konusu raporda tesiste enerji kaynaklarından doğalgaz tüketimini azaltmak için 5 enerji verimliliği tekniğinden oluşan bir proje listesi hazırlanmıştır. ÇKKV yöntemleri ile bu proje sonuçları karşılaştırılmış, standart sapma yöntemi ile kriter ağırlıkları bulunmuş ve projeler MAUT yöntemi kendi aralarında etkinliklerine göre sıralanmıştır. Böylece en verimli olarak belirlenmiş projelerin yerine getirilme öncelikleri ortaya konulmuştur. Bu çalışma, gerçek verileri kullanarak tekstil endüstrisinde enerji verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik bir çalışma olması nedeniyle bu alanda çalışan diğer araştırmacılara ve paydaşlara katkı sağlayabilir.

2. MATERYAL VE METOT

Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı (ABYM)'nin öncelikli hedefi, ilerici ve çözüm odaklı politikaların oluşturulmasıdır. Bu amaç doğrultusunda değişik sera gazı salınımı azaltılması hedefleri belirlenmiştir. ABYM'nin 1990 yılına göre, 2030 yılı için belirlediği sera gazı azaltım hedefi %50, 2050 hedefi ise karbon nötr bir duruma ulaşmaktır [24]. Türkiye, küresel ölçekte sera gazı emisyonunda 15. sırayı işgal etmektedir (Çizelge 1) ve en yüksek sera gazı salınımı ısınma ve enerji kaynaklı emisyonlardan kaynaklanmaktadır [25].

Çizelge 1. 2020 yılı fosil kaynaklı CO₂ salınımı [25].

Sıra	Ülke	CO ₂ emisyon GT
1	Çin	10,04
2	ABD	4,32
3	Hindistan	2,34
4	Rusya Federasyonu	1,56
5	Japonya	1,00
6	Almanya	0,60
7	Endonezya	0,58
8	İran İslam Cumhuriyeti	0,58
9	Güney Kore	0,55
10	Kanada	0,52
11	Suudi Arabistan	0,50
12	Brezilya	0,39
13	Güney Afrika	0,39
14	Avustralya	0,38
15	Türkiye	0,37
16	Meksika	0,36
17	Birleşik Krallık	0,31
18	Vietnam	0,29
19	İtalya	0,28
20	Polonya	0,28
21	Fransa	0,27

Türkiye dahil tüm dünya karbondioksit azaltım hedeflerine ulaşmak için özellikle enerji kaynaklı emisyonlara odaklanmayı ihmal etmemelidir. Bununla birlikte, hızla devam eden sanayileşme, küresel ısınma, artan enerji kullanımı, savaş, çatışmalar vb küresel krizler göz önünde bulundurulduğunda, ABYM'nin sera gazı azaltım hedeflerine ulaşılmasının giderek zorlaştığını göstermektedir [26].

Aynı zamanda, hızla tükenen fosil enerji kaynaklarının azalması, enerji alanında sürdürülebilirliğin vurgulanmasını ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Bu bağlamda, enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması ve sürdürülebilirlik ilkesine uygun olarak, öncelikli olarak yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına odaklanılması gerekmektedir.

Enerjide sürdürülebilirliğinin sağlanması için [27];

- Karbon emisyonlarını minimize etmeye,
- Çevreye verilen zararı elimine etmeye,

- iii. Enerji geçiş güvenliğini temin etmeye,
- iv. Enerji üretim maliyetlerini minimize etmeye,
- v. Yeşil teknoloji kullanımını geliştirmeye ihtiyacı duyulmaktadır.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) bu çalışmaları desteklemek için ABYM'na uyum çerçevesinde desteklediği araştırma başlıklarından biri olan "Temiz ve Döngüsel Enerji" ana başlığı altında, altı ana başlık açıklamıştır. Bunlardan birisi de "Tekstil ve Deri Sektörlerinde Sürdürülebilir Üretim ve Karbon Salımı ile Sera Gazı Emisyonlarının Azaltılmasına Yönelik Yenilikçi Uygulamalar"dır [28].

Bu bağlamda çalışmalarını yönlendiren 1986 yılında Çukurova'da kurulmuş Ulusoy Tekstil A.Ş. Adana Hacı Sabancı Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunmaktadır. 180.000 m² açık, 90.000 m² kapalı alanda üretim yapmaktadır (Şekil 2). Ulusoy Tekstil, bünyesinde modern iplik üretim tesisleri ve boyahane ünitelerini bulunduran entegre tekstil kuruluşudur. Aylık 1000 tonun üzerinde iplik üretimi yapılmaktadır.



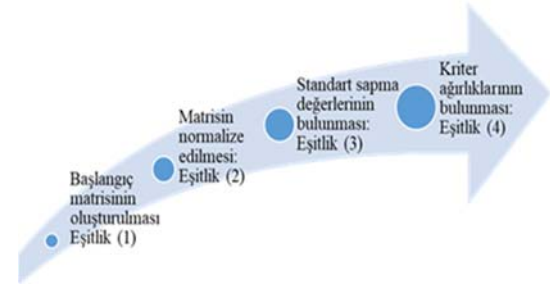
Şekil 2. Ulusoy tekstil tesisi

Fantazi İplik Boyama sektöründe faaliyet gösteren Ulusoy Tekstil firması için oluşturulan "Ulusoy Tekstil Tesisi Zorunlu Enerji Değerlendirme Raporu" temel alınarak bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu raporda yapılan çalışma boyahane ünitelerini bulunduran tesisinde gerçekleştirilmiştir.

2.1. Standart Sapma Yöntemi

Kriterlere ait nicel verilerin bulunduğu veya subjektif değerlerin sayısal olarak ifade edilebildiği

problemlerde, önem derecelerinin belirlenmesi maksadıyla basit ve kolay bir şekilde kullanılabilmesi ve değişik özellikteki kriterleri birlikte değerlendirebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Uzman değerlendirmesine ihtiyaç duyulmaması da bir diğer tercih sebebidir. Uygulama dört adımdan oluşmaktadır. Uygulamanın adımları aşağıda Şekil 3'de ve devamında ise kullanılan eşitlikler gösterilmiştir. [19,29-31]



Şekil 3. Standart sapma yönteminin adımları

İlk aşamada x_{ij} değerlerinden oluşturulan X başlangıç (karar) matrisi (1) numaralı eşitlikle gösterilmiştir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \ddots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Eşitlik (2) vektör normalizasyonu ile X başlangıç matrisi normalize edilir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2)$$

Eşitlik (3) ile her bir değişkenin standart sapması bulunur.

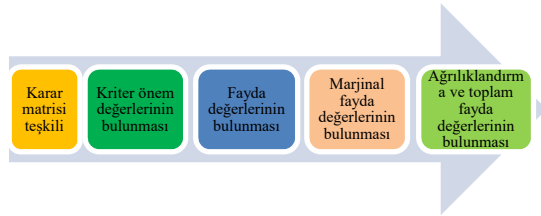
$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_{ij})^2}{m}} \quad (3)$$

Eşitlik (4) ile her bir değişkenin standart sapma değeri tüm değişkenlerin standart sapma değerlerinin toplamına bölünerek görelî ağırlıklar bulunur.

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{i=1}^n \sigma_j} \quad (4)$$

2.2. MAUT (Multi Attribute Utility Theory: Çok Ölçütlü Fayda Teorisi) Tekniği

MAUT yöntemi, sezgisel bağlantı kurma ve karar verme problemlerini çözmek için kullanılan ÇKKV yöntemlerinden biridir. MAUT yöntemi uygulayıcılara, çelişen amaçlar arasından seçim yapabilme imkânı sağlayarak sezgisel ve araştırma odaklı bir yaklaşım sunar [32]. Karar vericiye, nitel veya nicel ayrımı yapmaksızın tüm faktörleri değerlendirme imkânı verir [33]. MAUT yöntemi beş aşamadan oluşmakta olup, aşamaları Şekil 4.'de, hesaplamalarda kullanılan eşitlikler ise devamında belirtilmiştir [31,34,35,36].



Şekil 4. MAUT yönteminin adımları

Diğer ÇKKV tekniklerinin uygulanmasında olduğu gibi $m \times n$ ebatlarında Eşitlik (5)'te gösterilen X karar matrisi oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \ddots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

X matrisi değerleri standart sapma yöntemi ile belirlenen kriter ağırlık değerleri w_j ile çarpılarak ağırlıklandırılır.

Çizelge 2. Doğalgaz tasarruf çizelgesi

Proje	Tasarruf Türü			CO2 azalma miktarı Ton/Yıl	Yatırım maliyeti/ TL.	Geri ödeme süresi/Yıl
	Miktar	TEP/yıl	TL/yıl			
Yoğuşmalı ekonomizer projesi	42745	35,3	125243	8,55	490000	3,91
Kompresör atık ısı projesi	27090	22,3	79374	5,42	198250	2,5
Borularda termal kayıplar	13720	11,3	40200	2,74	13000	0,32
Vanalarda termal kayıplar	16749	13,7	49075	3,35	13500	0,28
Yüzeylerde termal kayıplar	65003	53,3	190459	13	338072	1,78

Çizelge 2.'de belirtilen veriler ile X başlangıç matrisi oluşturulmuştur. (2) numaralı eşitlik

Her bir kriter normalize işlemi için değerlendirilir ve en iyi değer 1, en kötü değer 0 olarak kabul edilir. Müteakiben kriterlerin yönü maximizasyon veya fayda ise (6), minimizasyon veya maliyet ise (7) numaralı eşitlik kullanılarak matris normalize edilmiş olur.

$$x_j(a_i) = \frac{x_i(a_i) - \min(x)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \text{ fayda yönlü} \quad (6)$$

$$x_j(a_i) = 1 + \frac{x_j - x_i(a_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \text{ maliyet yönlü} \quad (7)$$

$$r_{ij} = \frac{e^{(x_{ij})^2} - 1}{1,71} \quad (8)$$

$$X(a_i) = \sum_{j=1}^q x_j(a_i) \cdot w_j \quad (9)$$

(9) nolu eşitlikte;

$x(a_i)$, seçeneklerin fayda değerlerini,
 $x_j(a_i)$, her bir alternatif için her bir kriterin normalize edilmiş fayda değerini,
 w_j , standart sapma yöntemi ile elde edilmiş olan ağırlık değerlerini ifade etmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ulusoy tekstil firmasında yapılan çalışmalar sonucu doğalgaz tüketiminde tasarruf yapmak için 5 proje oluşturulmuş ve projelerin uygulanması ile elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de gösterildiği gibidir.

kullanılarak elde edilen normalize edilmiş matris değerleri aşağıda Çizelge 3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Normalize edilmiş matris

Proje	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆
P ₁	0,566	0,571	0,566	0,600	0,000	0,000
P ₂	0,261	0,262	0,261	0,242	0,612	0,388
P ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,989
P ₄	0,059	0,057	0,059	0,000	0,999	1,000
P ₅	1,000	1,000	1,000	1,000	0,319	0,587

Normalize edilen matris standart sapma yönteminde belirtilen Eşitlik (3) ve (4)'ün kullanılması ile elde edilen kriterlerin standart sapma değerleri ve ağırlıkları Çizelge 4 ve 5'te belirtilmiştir.

Çizelge 4. Kriterlerin standart sapması

Kriter	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆
Standart sapma	0,338	0,359	0,223	0,318	0,184	0,347

Çizelge 5. Kriterlerin ağırlıkları

Kriter	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆
Ağırlık	0,191	0,203	0,126	0,180	0,104	0,196

Standart sapma yöntemi ile kriterlerin ağırlık değerleri elde edildikten sonra MAUT yöntemi ile uygulanan 5 proje sonucu elde edilen sonuçlar değerlendirilerek projeler sıralanmıştır. Öncelikle Çizelge 6'da gösterilen MAUT başlangıç matrisi elde edilmiştir. Kırmızı renkli değerler kriterlerin en iyi, yeşil olanlar ise en kötü değerini ifade etmektedir.

Çizelge 6. MAUT başlangıç matrisi

Proje	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆
P ₁	27090	22,3	79374	5,42	198250	2,5
P ₂	13720	11,3	40200	3	13000	0,32
P ₃	16749	13,7	49075	3	13500	0,28
P ₄	65003	53,3	190459	13	338072	1,78
P ₅	42745	35,3	125243	9	490000	3,91

(6) ve (7) numaralı eşitlikler kullanılarak Çizelge 7'da gösterilen MAUT normalize matris elde edilmiştir.

Çizelge 7. MAUT normalize matris

Proje	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆
P ₁	0,502	0,504	0,502	0,502	0,781	0,784
P ₂	0,318	0,319	0,318	0,318	0,316	0,501
P ₃	0,161	0,161	0,161	0,161	0,021	0,064
P ₄	0,197	0,196	0,197	0,197	0,022	0,056
P ₅	0,763	0,762	0,763	0,763	0,539	0,357

Çizelge 8. MAUT marjinal fayda matrisi

Proje	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆
P ₁	0,221	0,226	0,221	0,253	0,000	0,000
P ₂	0,041	0,042	0,041	0,035	0,265	0,095
P ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,970
P ₄	0,002	0,002	0,002	0,000	1,002	1,000
P ₅	1,000	1,000	1,000	1,000	0,062	0,240

Çizelge 8'de belirtilen değerler daha önce standart sapma yöntemi kullanılarak elde edilen ve Çizelge 5'te belirtilen ağırlıklar ile çarpılarak Çizelge 9'de gösterilen ağırlıklandırılmış marjinal fayda değerlerinin bulunduğu matris elde edilir. Müteakiben her projenin kriterlerine ait ağırlıklı marjinal fayda değerleri toplanarak toplam marjinal fayda değerleri elde edilir. Bu değerlerin sıralanması ile projelerin sıralaması elde edilmiştir. Projelerin sıralaması Çizelge 10'da gösterilmiştir.

Çizelge 9. MAUT Ağırlıklandırılmış marjinal fayda matrisi

Proje	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆
P ₁	0,042	0,046	0,028	0,046	0,000	0,000
P ₂	0,008	0,008	0,005	0,006	0,028	0,019
P ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,104	0,190
P ₄	0,000	0,000	0,000	0,000	0,104	0,196
P ₅	0,191	0,203	0,126	0,180	0,006	0,047

Çizelge 10. MAUT yöntemi ile projelerin sıralaması

S. Nu.	Projeler	Toplam fayda değeri	Önem sırası
1	Yoğuşmalı ekonomizer projesi	0,161374	4
2	Kompresör atık ısı projesi	0,074085	5
3	Borularda termal kayıplar	0,294487	3
4	Vanalarda termal kayıplar	0,301543	2
5	Yüzeylerde termal kayıplar	0,75337	1

Yürütülen projelerin toplam fayda değerlerine bakıldığında Çizelge 10'dan 5'nci sırada bulunan Yüzeylerde Termal Kayıpları azaltma projesinin diğerlerinden çok daha fazla fayda sağladığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Türkiye’de enerji kaynaklarının etkili ve çevre dostu bir şekilde kullanılarak enerji üretiminden tüketimine kadar her aşamada verimliliğin artırılması hedeflenen Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı, Enerji Verimliliği Kanunu, ABYM vb. düzenlemeler ile önemli çalışmalar başlatılmıştır. Bu kapsamda oluşturulan hükümet politikaları ile bazı düzenlemeler getirilirken, işletmeler ve girişimciler için teşvikler de oluşturulmuştur. Bu bağlamda Adana ilinde faaliyet gösteren Ulusoy Tekstil firması yaptığı çalışmaları açıkladığı Zorunlu Enerji Etüt Raporunda doğalgaz tüketiminin azaltılmasına yönelik uyguladığı beş proje ile önemli miktarda tasarruf sağlanabileceği belirtilmiştir. Her bir projeden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda çalışma kapsamında verimliliği sağlamak için yatırım da yapılmıştır. Dolayısıyla girdiler ve çıktılarının birlikte değerlendirilmesi ile doğalgaz tüketimine en çok katkı sağlayan proje ile diğer projelerin katkı değerlerinin ortaya konması hangi projeye ağırlık verilmesi madadurumunda daha fazla fayda sağlanacağını tespitinde yöneticilere ve karar vericilere yardımcı olunması gerekmektedir. Birden fazla sonuç olması ve bunlara etki eden kriterlerin değişiklik göstermesi, ÇKKV yöntemlerinin kullanılmasını ön plana çıkarmıştır.

Ulusoy Tekstil uyguladığı projeler sonucunda tamamen objektif veriler elde edilmiş olması. Bu verilerin uzman değerlendirmelerine ihtiyaç duyulmadan karşılaştırılmasını sağlayan MAUT yönteminde kullanılması ile her bir projenin toplam fayda değeri bulunması, en yüksek fayda değerine sahip projeye ağırlık verilmesi ve diğer projelerinde önem sırasına göre gerçekleştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma hayatın hemen hemen her alanında kullanılan yaklaşık 170 değişik ÇÇKV yöntemlerinden diğerleriyle de yapılabilir ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir. Ayrıca sonuca etki eden değerlerin çeşitliliği artırılabilir, elde edilen sübjektif değerler uygun ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilerek yöneticilere karar desteği sağlanabilir. Böylece karar vericilerin optimum faydayı sağlayacak kararlarla emek, zaman ve maliyette tasarruf etmeleri sağlanabilir.

5. TEŞEKKÜR

Ulusoy Tekstil A.Ş. yönetimine “ULUSOY TEKSTİL TESİSİ ZORUNLU ENERJİ ETÜT RAPORU”nu paylaştıkları için teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Karim, M.Z.A., Chan, S.G., Ismail, N.H., Sharif, A., 2022. Does Energy Productivity Lead to Economic Efficiency and Lower CO₂ Emission in Malaysia? Evidence from Bootstrapped ARDL Approach. *J Sustain Sci Manag*, 17(3), 32-50.
2. Ciacco, E.F., Rocha, J.R., Coutinho, A.R., 2017. The Energy Consumption in the Ceramic Tile Industry in Brazil. *Appl. Therm. Eng.*, 113, 1283-1289.
3. Taban, M., Pourjafar, M., Bemanian, M., Heidari, S., 2012. Climate Impact on Architectural Ornament Analyzing the Shadow of Khavoons in Dezful Historical Context with the Use of Image Processing. *Naqshejahan*, 2(2), 79-90.
4. Khosravi, A., 2017. Investigating the Convergence of Provincial Energy Efficiency in Iran: A Spatial Econometric Approach. *Econ. Res.*, 17(2), 177-197.
5. Industrial Sector Energy Consumption. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/industrial.pdf>. Erişim tarihi: 14.08.2023.
6. Khude, P., 2017. A Review on Energy Management in Textile Industry. *Innov. Ener. Res.*, 6, 169.
7. Ozturk, E., Koseoglu, H., Karaboyacı, M., Yigit, N.O., Yetis, U., Kitis, M., 2016. Sustainable Textile Production: Cleaner Production Assessment/Eco-Efficiency Analysis Study in a Textile Mill. *J. Clean. Prod.*, 138, 248-263.
8. Wang, L., Li, Y., Wanwen, H., 2017. The Energy Footprint of China’s Textile Industry: Perspectives from Decoupling and Decomposition Analysis. *Energies* 10, 1461-1472.
9. Grave, K., Hazrat, M., Boeve, S., Von Blücher, F., Bourgault, C., 2015. Electricity Costs of

- Energy Intensive Industries: An International Comparison. Ger. Minist. Econ. Aff. Energy 76. Germany. <https://isi.fraunhofer.de>
10. Hasanbeigi A., Price L., 2015. A Technical Review of Emerging Technologies for Energy and Water Efficiency and Pollution Reduction in the Textile Industry J. Clean. Prod., 95, 30-44.
 11. Yalçın, T., Arab, G., Şener, A., Gördebil, K., Akçal, E., 2020. Energy Efficiency in Textile Industry for Small and Medium-Sized Businesses. Taikomiej Tyrimai Studijose Ir Praktikoje - Applied Research in Studies and Practice, 16(1), 21-37.
 12. Ozturk, E., Cinperi, N.C., Kitis, M., 2020. Improving Energy Efficiency Using the Most Appropriate Techniques in an Integrated Woolen Textile Facility. J. Clean. Prod., 254, 120145.
 13. Enerji Verimliliği Kanunu, <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5627.pdf>, Erişim tarihi: 16.08.2023.
 14. Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=15437&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>, Erişim tarihi: 16.08.2023
 15. Abdulvahitoğlu, A., 2021. AHP-TOPSIS Tabanlı Matematiksel Modelleme ile Jandarma Karakolu Kuruluş Yeri Seçimi ve CAS/CBS ile Analizi. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği ABD., 287, Adana.
 16. Abdulvahitoğlu, A., 2023. Prioritization of Risk Factors Causing Juvenile Delinquency with Swara Method: A Case Study From Türkiye. Türk İdare Dergisi, 95(496), 39-61.
 17. Abdulvahitoglu, A., Kılıç M., 2022. A New Approach for Selecting the Most Suitable Oilseed for Biodiesel Production; The Integrated AHP-TOPSIS Method. Ain Shams Eng. J., 13(3), 101604 .
 18. Abdulvahitoglu, A. 2019. Using Analytic Types of Nanofluids for Hierarchy Process for Evaluating Different Engine Cooling Systems. Thermal Science 23 (5 Part B), 3199-3208.
 19. Abdulvahitoğlu, A., Abdulvahitoğlu, A., Kılıç, M. 2022. Elektrikli Araç Bataryalarının Bütünleşik Swara-Topsis Metodu ile Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(4), 1061-1076.
 20. Yücenur, G.N., İpekçi, A., 2021. SWARA/WASPAS Methods for a Marine Current Energy Plant Location Selection Problem. Renewable Energy, 163, 1287-1298.
 21. Terzioğlu, M.K. , Kurt, E.S., Yaşar, A., Köken, M., 2022. BİST100-Enerji Sektörü Finansal Performansı: SWARA-VIKOR ve SWARA-WASPAS. Alanya Akademik Bakış, 6(2), 2439-2455.
 22. Özarpa, C. , Kınacı, B.F., Avcı, İ., 2022. Raylı Ulaşım Sistemlerinde Bakım Yöntemlerinin Verimlilik Açısından Önceliklendirilmesi. Verimlilik Dergisi , (4), 643-658.
 23. Özcan, A.N., Bulut, M., Özcan, E., Eren, T., 2022. Enerji Üretim Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin İstatistiksel ve Analitik Olarak Karşılaştırması: Türkiye Örneği. Journal of Polytechnic, 25(2), 519-531.
 24. European Commission, 2019. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal. Brussels: European Commission. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF Erişim tarihi:18.08.2023.
 25. Union of Concerned Scientists, 2020, <https://www.ucsusa.org/resources/each-country-s-share-co2-emissions>. Erişim Tarihi: 18.08.2023.
 26. Vidadili, N., Suleymanov, E., Bulut, C., Mahmudlu, C., 2017. Transition to Renewable Energy and Sustainable Energy Development in Azerbaijan. Renew. Sust. Energ. Rev., 80, 1153-1161.
 27. Karakuş, D.N., An, N., Turp, M.F. ve Kurnaz, M.L., 2022. AB Yeşil Mutabakatı ve Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Kapsamında Temel Uygulama Yaklaşımlarına Küresel Bakış. DEÜ SBE Dergisi, 24(1), 47-67
 28. TÜBİTAK, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, <https://www.tubitak.gov.tr/sites/default/files/21566/yesilmutabakat.pdf>. Erişim tarihi: 17.08.2023.

29. Diakoulaki, D., Avrotas, G., Papayannakis, L., 1995. Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems: the CRITIC Method. *Computers & Operations Research*, 22(7), 763-770.
30. Jahan, A., Mustapha, F., Sapuan, S.M., Yusof I., Bahraminasab, M., 2012. A Framework for Weighting of Criteria in Ranking Stage of Material Selection Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(1-4), 411-420.
31. Demir, G., Özyalçın, A.T., Bircan, H., 2021. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ve ÇKKV Yazılımı ile Problem Çözümü. Nobel Yayıncılık, 382.
32. Kim, K.S., Song, O., 2009. A MAUT Approach for Selecting a Dismantling Scenario for the Thermal Column in KRR-1. *Annals of Nuclear Energy*, 36(2), 145-150.
33. Ishizaka, A., Nemery, P., 2012. *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*. John Wiley&Sons Ltd. Published, Chichester/UK, 320.
34. Zietsman, J., Rilett, L.R., Kim, S.J., 2006. Transportation Corridor Decisionmaking with Multi-Attribute Utility Theory. *International Journal of Management and Decision Making*, 7(2-3), 254-266.
35. Erol, I., Sencer, S., Sari, R., 2011. A New Fuzzy Multi-Criteria Framework for Measuring Sustainability Performance of a Supply Chain. *Ecological Economics*, 70(6), 1088-1100.
36. Öztel, A., 2016. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi Seçiminde Yeni Bir Yaklaşım. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi İstatistik ABD, 172, Ankara.

Yenilikçi Soya Lifi İçeren Mamul Denim ve Spor Giyim Kumaşların Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)

Emel Ceyhun SABİR*¹ ORCID 0000-0002-2385-1524

Serdal SIRLIBAŞ² ORCID 0000-0002-0926-6791

İpek DÖNMEZ UZUN² ORCID 0009-0000-6879-6189

Deniz CİVAN YİĞİT² ORCID 0000-0001-6184-7668

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana

²BOSSA T.A.Ş., Adana

Geliş tarihi: 11.09.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: SABİR, E.C., SIRLIBAŞ, S., DÖNMEZ UZUN, İ., CİVAN YİĞİT, D., (2023). Yenilikçi Soya Lifi İçeren Mamul Denim ve Spor Giyim Kumaşların Yaşam Döngüsü Analizi (LCA). Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 887-898.

Öz

Bu çalışmada yenilikçi doğal lif olan soya protein lifinin denim ve spor giyim ürün olarak üretilen mamul kumaşların yaşam döngü analizi (LCA) incelenmiştir. Çalışmada, denim ve spor giyim ürün grubundan seçilmiş dokuma kumaşlarda atkıda kullanılmak üzere, pamuk, soya lifi ve pamuk/soya karışım ipliklerinden oluşan 8 farklı harman kullanılmıştır. Soya lifi oranı, harmanda %10, %30 ve %50 şeklinde seçilmiş olup diğer karışım materyali pamuktur. Atkı iplikleri Ne10 ve Ne16 şeklinde iki farklı iplik numarasında üretilmiştir. Çözümlü ipliği ise tüm kumaşlarda aynı olup, %100 pamuk materyalidir. Bu iplikler kullanılarak 4 adet denim ve 4 adet spor giyim olmak üzere toplam 8 adet kumaş dokunmuştur. Denim ve spor giyim üretim hattında, işletme koşullarında, mamul kumaşlar elde edilmiştir. Numune kumaşlara, seçilmiş mamul kumaş anti-bakteriyel aktivite, renk haslığı ve bazı kumaş performans testleri uygulanmıştır. Soya lifi içeriğinin dokuma kumaşların haslık ve performansını olumsuz etkilemediği görülmüştür. Çalışmadaki tüm kumaş numuneleri, denim ve spor giyim hattında ayrı ayrı olmak üzere, Yaşam Döngü Analizi (LCA) çalışması ile analiz edilmiştir. Soya lifinin yaşam döngü analizi çalışmasında en iyi sonuç; denim kumaş için atkıda %90 pamuk-%10 soya lifi ve spor giyim kumaş üretiminde %50 pamuk-%50 soya lifi ipliği kullanılmış kumaşlarda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soya lifi, Denim kumaş, Spor giyim kumaş, Yaşam döngüsü analizi (LCA)

Life Cycle Analysis (LCA) of Finished Denim and Sportswear Fabrics Containing Innovative Soy Fiber

Abstract

In this study, the life cycle analysis (LCA) of finished fabrics produced as denim and sportswear products of soy protein fiber, an innovative natural fiber, was examined. In the study, 8 different blends consisting of cotton, soybean fiber and cotton/soybean blend yarns were used to be used in the weft of woven fabrics

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Emel Ceyhun SABİR, emelc@cu.edu.tr

selected from the denim and sportswear product group. The ratio of soybean fiber is selected as 10%, 30% and 50% in the blend, and the other blending material is cotton. Weft yarns are produced in two different yarn counts, Ne10 and Ne16. The warp thread is the same in all fabrics and is 100% cotton material. Fabrics produced using these yarns; It is woven as 8 different fabrics, four of which are denim and four are sportswear. Finished fabrics were obtained in the denim and sportswear production line, under operating conditions. Anti-bacterial activity, color fastness and some fabric performance tests were applied to the sample fabrics. It has been observed that soy fiber content does not adversely affect the fastness and performance of woven fabrics. All fabric samples in the study were analyzed by Life Cycle Analysis (LCA) study, separately for denim and sportswear lines. The best result in the life cycle analysis study of soybean fiber; It was obtained in fabrics using 90% cotton-10% soy fiber in weft for denim fabric and 50% cotton-50% soy fiber yarn in sportswear fabric production.

Keywords: Soy fiber, Denim fabric, Sportswear fabric, Life cycle analysis (LCA)

1. GİRİŞ

Günümüzde denim kumaşlar günlük hayatta başlı başına bir giyim tarzı olmuştur. Bu gelişme ve denime olan yoğun talep tekstil sektörünü de sürekli bir arayış içerisine itmiştir. Son zamanlarda Ar-Ge birimlerinin çalışmaları denim kumaş üzerinde daha da yoğunlaşmıştır. Farklı lifler ve/veya lif karışımları, farklı kimyasallar, farklı yıkama reçeteleri ve farklı mekanik işlemlerle denim ürünlerde bir çok yeni renk ve efekt açılımları keşfedilmiştir. Aynı zamanda denim üretiminde ve performans parametrelerinde değişkenlerin etkisini belirli kılabilmek için bilimsel yaklaşımlar da ağırlık kazanmaya başlamıştır [1]. Türkiye denim üretimi konusunda Avrupa ülkeleri başta olmak üzere dünyada oldukça iyi bir tedarikçi konumundadır ve dünya markalarının birçoğunun denim üretimi Türkiye’de gerçekleşmektedir. İlk üretildiğinden bu yana denim, tekstil sektörünün vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Tekstil sektörünün en kötü dönemlerinde bile sektörün amaçlarına ulaşması için bir lokomotif görevi üstlenmiştir.

Denim, gerek günlük ve gerekse şık giyim kategorisinde olmak üzere dünya modasının en cazibeli ürün grubudur. Denim kumaşlar ağırlıklı olarak pamuk ipliği içermekte olduğundan insanlar tarafından konfor düzeyi yüksek, doğa dostu bir giyim malzemesidir. Denim kumaşın bu denli büyük talep içermesi bu kumaş türünde yenilikçi çalışmaların da önünü açmaktadır. Farklı liflerin kullanımı da bu yenilikçi çalışmalardan biridir. Özellikle de sürdürülebilir ve birçok özelliği içeren

(anti-bakteriyel, doğada çözünebilir, vb) farklı liflerin kullanımı ürünün katma değerini ciddi oranda artırırken ürünün tercih edilmesini de sağlamaktadır. Son yıllarda denim kumaş üretiminde ve terbiyesinde çevresel faktörleri dikkate alan çalışmalar ağırlık kazanmaya başlamıştır. Zervent Ünal ve Küçük, çalışmalarında çevreci bir uygulama olan ozonlama proses şartlarının denim kumaşın mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir [2]. Kadem ve Saraç [3] ısıtma düzenleme, Sabır ve Doba Kadem [4] kaplamalı denim kumaşta konfor ve haslık özellikleri, Tölek ve Doba Kadem [5] denim kumaşta farklı boyama prosesi ile performans ölçümü, Sabır ve Dönmez [6], kostik azaltmasının denim kumaş performansına etkileri ve Gülşen Bakıcı ve Doba Kadem [7] denim kumaşta dikilebilirlik üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. Denim ve spor giyim ürünlerinde müşterilerin farklı beklentilerini karşılamak için yeni lifler üretimde kullanılmaktadır. Yenilikçi olarak görülen pek çok lifler karışım halinde iplik olarak özellikle atkı ipliği olarak kullanılabilir. Soya protein lifi de denim ve spor giyim ürünlerinde kullanıldığına dair bir çalışmaya rastlanmamıştır bu nedenle bu ürün gruplarında soya lifi, yenilikçi bir lif olarak tanımlanabilmektedir.

Soya lifi günümüzde farklı tekstil ürünlerinde kullanımı ile tüm yönleriyle yavaş yavaş tanınmaya başlanan bir lif türüdür. Soya fasulyesinden elde edilen bir protein lifidir. Ülkemiz soya bitkisinde oldukça iyi bir üretici durumdadır ancak bu lifin üretimi henüz ülkemizde mevcut değildir. Günümüzde denim üretimi ve spor giyim

üretiminde talep ve dolayısıyla üretim hacmi giderek artmaktadır. Bu nedenle bu ürünlerin yaşam döngü analizleri ile çevresel etkilerinin incelenmesi de gerekmektedir. Bu çalışmada soya lifi kullanılmış spor giyim ve denim kumaş üretiminin yaşam döngüsü analizi yapılmıştır.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi, bir ürünün üretimi ya da bir hizmetin sağlanması sırasında kullanılan hammaddelerin temininden başlayarak, ilgili tüm üretim, sevkiyat, tüketici tarafından kullanım ve oluşan atıkların bertarafını da kapsayan yaşam döngüsünün her bir aşamasındaki çevresel etkilerini belirlemek, raporlamak ve denetlemek için kullanılan bir yöntemdir. Çevresel etkilere yönelik olarak yapılan araştırmalar 2050 yılına kadar karbon ayak izinde "0" hedefi nedeniyle büyük önem arz etmektedir.

Guinee çalışmasında, 1992'de Hollanda Leiden Üniversitesi Çevre Bilimi Merkezi (CML), uzun bir süre için standardı belirleyen Çevresel Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) metodolojisi hakkında bir kılavuz yayınlamıştır. O zamandan beri LCA metodolojisi çok ilerlemiş ve Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) LCA hakkında bir dizi standart yayınlamıştır. Bu gelişmeler, LCA alanındaki diğer önemli enstitülerle işbirliği içinde CML tarafından yazılan yeni bir LCA El Kitabı'na dâhil edilmiştir. LCA ile ilgili bu El Kitabının genel amacı, LCA için ISO Standartlarına dayanan bilimsel bir arka plan belgesi ile doğrulanmış ve adım adım bir LCA çalışması yürütmek için operasyonel yönergeleri olan bir kitap oluşturulmuştur. Farklı ISO elemanları ve gereklilikleri, her adım için "mevcut en iyi uygulama" için işlevsel hale getirilmiştir. CML, ürünlerin çevresel etkilerini, yani LCA'yı belirlemek için standart bir metodolojinin geliştirilmesinde güçlü bir rol oynamaktadır. Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği (SETAC), Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) gibi uluslararası forumlar da yapılmaktadır [8]. LCA, araştırma ve geliştirme süreci, tekstil ve giysilerin etiketlenmesi için önemli bir araçtır. Tekstil ve Konfeksiyonun Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi El Kitabı (LCA), sistematik olarak LCA sürecini kapsamlı örnekler ve vaka çalışmaları ile kapsamaktadır. Kitabın

birinci bölümünde karbon ve ekolojik ayak izlerinden bertaraf, yeniden kullanım ve geri dönüşüme kadar LCA'daki temel göstergeler ve süreçler ele alınmaktadır. İkinci bölümde ise, tekstil ve konfeksiyon endüstrisindeki çok çeşitli LCA uygulamaları tartışılmaktadır. Farklı sahalarda da yaşam döngü analizi üzerine pek çok çalışma bulunmaktadır.

Dönmez ve Sabır, denim terbiye işletmelerinde verimlilik ve yaşam döngüsü değerlendirmesi üzerine deneysel çalışma ile yaşam döngüsü analizinin tekstil işletmelerinde uygulanabileceğini göstermişlerdir [9]. Angela ve Sotirios çalışmasında, pamuk, ipek, yün, keten, kenevir vb. gibi doğal lifleri kullanmışlardır ve pamuk yetiştiriciliği ve liflerinin çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla tekstil üretimi incelenmiş olup ve Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) kullanılmışlardır [10]. Bevilacqua ve arkadaşları, çalışmalarında pamuk ipliğinin üretim aşaması 2,81 CO₂ kg-eşdeğerine eşit bir etki sağladığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar pamuk ipliği üretiminin en kritik etkileri boyama (1.24 CO₂ kg-eşd.) ve iplik eğirmede (0.64 CO₂ kg-eşd.) olduğunu ve reaktif boyama ve pigment boyamanın, elektrik ve termal enerjiye bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Termal enerji tüketimi ile ilgili olarak boyama tesislerindeki bazı iyileştirmeler soğutma suyunun geri kazanılması, buhar yoğunlaşmasının kazanlara dönüşü veya farklı proses ile suların yeniden kullanılması şeklindedir. Bu iyileştirmelerle, tesisin CO₂ emisyonunda %41.7 oranında azalma sağlayacağını göstermişlerdir [11]. Peters ve arkadaşları çalışmalarında, Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), tekstil ürünlerinin hammadde çıkarılmasından lifi işlemeye, tekstil üretimine, dağıtımına ve kullanımına, bertaraf veya geri dönüşüme kadar çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanmışlardır [12].

Roos ve arkadaşları, çalışmalarında LCA'nın, tekstil endüstrisi için uygulanabilirliği ve kimyasalların çevresel etkilerini incelemişlerdir. Suyun tüketilmesi ve enerji tüketimi konularında, kimyasalların kullanımı ve emisyonları tekstil ürünleri için önemli çevresel faktörler olduğunu, kimyasalların muhasebeleştirilmesinin LCA metodolojisi ve uygulamasında zayıf bir noktada

olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, LCA'nın tekstil ürünlerinin kimyasal performans değerlendirmelerine değer katıp katmadığı ve LCA'ya toksisite konularının dâhil edilmesinin tekstil ürünleri için çevresel performans sıralamalarını etkileyip etkilemediğini de araştırmışlar ve LCA'nın tekstil endüstrisindeki çevresel karar vericiler için yararlı olduğu ve kimyasal etkiler dâhil edildiğinde daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır [13]. Roos ve Peters diğer bir çalışmada, Tekstil endüstrisinde kimyasalların kullanımı ve emisyonu ile bu kimyasalların bazılarının kendine özgü toksik özellikleri önemli olduğunu belirtmişler ve toksik etkilerin kantitatif değerlendirmesi, “toksik ayak izi” olarak adlandırılan bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yaklaşımında bulunmuşlardır. Toksik ayak izi hesaplamasının, tekstil endüstrisini kimyasallarını daha sürdürülebilir kullanıma yönlendirmek için yararlı bir yöntem olup olmadığını incelemişlerdir [14].

Qian ve arkadaşları çalışmasında, denim kumaşın kimyasal ayak izinin hesaplanması ve değerlendirilmesini yapmışlardır. Araştırmacılar, kimyasal hammaddelerin ilk girdileri ve kimyasal kirleticilerin nihai emisyonları dahil olmak üzere, büyük toksik etkiye sahip kimyasal kategorilerini tanımlamak için, kimyasal ayak izi (ChF) karşılaştırması ve değerlendirmesi yapmıştır. Bu çalışmada, tekstil ve hazır giyim ürünlerinin ChF metodolojisi, vaka çalışması olarak denim üretimi ile USEtox modeli kullanılarak gösterilmiştir. Çalışmada yaş işlem sürecinde, yaşam döngüsü boyunca insan ve ekolojik toksisitelere büyük etkisi olan birçok kimyasal kirletici belirlenmiştir [15]. Yi ve arkadaşları, tekstil ve konfeksiyon ürünlerinin kimyasal ayak izi (USEtox) modeline dayalı insan ve ekolojik toksisitelerin değerlendirilmesi konulu çalışmasında, Yaşam döngüsü değerlendirme çerçevesinde, kimyasal ayak izinin (ChF) karşılaştırılması ve değerlendirilmesini kullanmışlardır. Bu çalışmada, ChF tekstil ve hazır giyim ürünleri metodolojisi denim pantolonlu vaka çalışması olarak üretim USEtox modeli kullanılarak gösterilmiştir [16].

Velden ve arkadaşları çalışmalarında, pamuk, polyester (PET), naylon, akrilik ve elastan

kullanılarak üretilen tekstil ürünleri, tekstilin çevresel yükünü araştırmışlardır. Yaşam döngüsü envanteri (LCI) verileri, Hollanda hükümeti literatüründen, yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) veri tabanlarından, emisyon kayıt veri tabanından ve hem üretim ekipmanı hem de tekstil şirketlerinin imalat şirketleriyle iletişiminden toplamışlar ve Eko-maliyetler 2012 (önleme tabanlı bir gösterge), CO2 eşdeğeri (karbon ayak izi), Kümülatif Enerji Talebi (CED) ve ReCiPe (hasara dayalı bir gösterge) şeklinde dört göstergede ortaya koymuşlardır [17].

Wang ve arkadaşları, ürün üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının hesaplanması ve değerlendirilmesinde önemli bir yöntem olan karbon ayak izini detaylı olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, tekstil ürünlerinin muhasebesi ve değerlendirilmesi tartışılmaktadır. Muhasebe sınırı, her türlü yatırımın karbon emisyonu katsayıları, kamu yatırımlarının bölünme prensibi ve muhasebe sonuçlarının değerlendirilmesi için kalite kriterleri vb. açısından Çin'deki büyük ölçekli tekstil üretiminin özellikleri ışığında gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel üretim aşamalarında ise, karbon ayak izi araştırma ve tanıtımının geliştirilebileceği, böylece tekstil karbon ayak izinin daha fazla araştırılması için bu çalışmanın referans olacağı belirtilmiştir [18]. Dönmez Uzun ve arkadaşları, denim kumaş materyali olarak iplikten geri dönüştürülen soya lifi ve pamuktan üretilmiş denim kumaşların yaşam döngü analizini incelemişler ve geri dönüştürülmüş soyanın çevreci bir ürün olduğunu göstermişlerdir [19].

Bu çalışma ile pamuk ile birlikte karşılaştırmalı olarak, bitkisel protein esaslı olan ve doğaya zarar vermeyen soya lifinin denim kumaş üretiminde çevreye zarar verip vermeyeceği ortaya konulmak istenmiştir. Çalışmada, soya lifi değişen oranlarda harmanda kullanılarak pamuk karışımı iplikler üretilmiştir. İplikler, BOSSA T.A.Ş./Adana/Türkiye denim işletmelerinde konvansiyonel işletme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma konusu denim kumaş için de, BOSSA T.A.Ş./Adana/Türkiye işletme altyapısı kullanılarak üretilen kumaşlar terbiye prosesleriyle mamul hale getirilerek beşikten kapıya yaşam döngüsü analizi (LCA) yapılmıştır. Çalışma, iplik ve kumaş

üretimi ile kumaş terbiyesi şeklinde gerçekleşen üretimde, elde edilen deneysel ürünlerin yaşam döngü değerlendirmesini kapsamaktadır. Soya lifi içerikli denim kumaş yaşam döngüsü değerlendirmesi tamamlanmış ve aynı koşullarda üretilen pamuk lifi içerikli denim kumaş yaşam döngüsü değerlendirmesi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Seçilmiş iki farklı atkı iplik numarası ile dokunmuş denim kumaşların üretiminde tüketilen enerji, kimyasal ve suyun Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) ile doğadaki karbon ayak izi ölçümleri yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada, pamuk ve soya/pamuk içerikli olmak üzere sekiz farklı atkı ipliği kullanılarak spor giyim ve denim kumaşlar üretilmiştir. Çözgü ipliği sabit olup %100 pamuk ipliğidir. Tasarlanan ipliklerin üretim bilgileri aşağıdaki gibidir.

Atkı ve çözgü iplik bilgisi:

- Atkı ipliklerindeki harman oranı farklı olduğu için ilk olarak harman hallaçta elyaf karışımı yapılmıştır.

- Streç atkı iplikleri için ring iplik makinesinde 78 dtex elastan beslenerek $\alpha = 4,5$ büküm katsayısı, 3,5 elastan çekimi ile iplikler üretilmiştir.
- Rijit atkı iplikleri ise, $\alpha = 4,5$ büküm katsayısında ve çözgü iplikleri ise, $\alpha = 4,3$ büküm katsayısında ring iplik makinesinde üretilmiştir.
- Ne 10 numara atkı iplikleri için tur sayısı 14,2 (T'') iken, Ne 16 numara atkı iplikleri için tur sayısı 18 (T'')'dir.
- Çözgü ipliğinin tur sayısı 13,46 (T'')'dir.

Tasarlanan spor giyim ve denim kumaşların üretim bilgileri Çizelge 1'deki gibidir. 50'şer m olarak dokunan kumaşların tarak no ve tarak enleri aynı olup 60/4, 180 cm dir. İnce numaralı atkı ipliğinin kullanıldığı kumaşlarda görüntünün/yapının sıkı olması için atkı sıklığı artırılmıştır. Spor giyim kumaşına 'S' kodu, denim kumaşına ise 'D' kodu verilmiştir. Her iki tür kumaştan çözgüsü aynı, atkısı (harmanı) farklı dörder numune üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen kumaşlardan mamul denim pantolon dikimi de gerçekleştirilmiştir. Pantolon ve soya lifinin denim kumaşın arka yüzündeki görünümü Şekil 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Denim ve spor giyim amaçlı üretilen 8 farklı kumaşın genel özellikleri

Sıra	Kumaş kodu	Çözgü ipliği	Atkı ipliği	Streç/ rigid	Çözgü ipliği rengi
1	S1	Ne 9,8/1 Pamuk	Ne 10/1 (%100 Pamuk)	Rigid	Ekru
2	S2	Ne 9,8/1 Pamuk	R-10/1 (%90 Pamuk-%10 Soya) + 78 dtex Ea	Streç	Ekru
3	S3	Ne 9,8/1 Pamuk	R-16/1 (%70 Pamuk-%30 Soya)+78 dtex Ea	Streç	Ekru
4	S4	Ne 9,8/1 Pamuk	R-16/1 (%50 Pamuk-%50 Soya)	Rigid	Ekru
5	D1	Ne 9,8/1 Pamuk	R-16/1 (%100 Pamuk) +78 dtex Ea	Streç	Deep
6	D2	Ne 9,8/1 Pamuk	R-16/1 (%90 Pamuk-%10 Soya)	Rigid	Deep
7	D3	Ne 9,8/1 Pamuk	R-10/1 (%70 Pamuk-%30 Soya)14,2	Rigid	Deep
8	D4	Ne 9,8/1 Pamuk	R-10/1 (%50 Pamuk-%50 Soya)+ 78 dtex Ea	Streç	Deep



Şekil 1. (a) Çalışma sonucunda mamul denim kumaştan üretilmiş pantolon giyim ürünü, (b) Atkıda soya lifinin kumaş ters yüzündeki görünüm

2.2. Metot

Çalışmada yaşam döngüsü değerlendirmesi, SETAC(Çevre Toksikoloji ve Kimya Örgütü (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)) tarafından başlatılan yaklaşım ile yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan analizler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

LCA Çalışmalarında Hesaplanan Çevresel Etkiler:

Kaynak Tüketimi (Abiotic Depletion): Kaynak Tüketimi, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında doğal kaynakların (petrol, demir cevheri vb.) tüketimini ifade eden etki kategorilerinden biridir. Küresel, bölgesel ve yerel etki boyutuna sahiptir ve kullanılan mineral miktarını ve kullanılan fosil yakıt miktarını ifade eder. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

çalışmalarında kaynak tüketimi kg Sb (Antimon) cinsinden ifade edilmektedir.

Asidifikasyon (Acidification): Asidifikasyon, asitleştirici maddelerin toprak, yeraltı suyu, yüzey suyu, organizmalar, ekosistemler ve malzemeler üzerinde yarattığı toksik etkiyi ifade eden etki kategorisidir. Asidik gazların atmosferdeki su ile reaksiyona girmeleri sonucunda ‘asit yağmuru’ denilen olay gerçekleşmektedir. Asit yağmurlarının oluşumu da ekosistem içerisindeki çeşitliliğin azalmasına sebep olmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında asidifikasyon kg SO₂ eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir.

Ötrofikasyon/Nütrifikasyon (Eutrophication): Ötrofikasyon, havaya, suya ve toprağa besi maddelerinin (nutrients) aşırı salınımı nedeniyle oluşan makro besi maddelerinin artışının sebep olduğu etkileri ifade eden etki kategorisidir. Nitrat

ve fosfat gibi besi maddelerinin var olması ekosistem içerisindeki yaşamın devamlılığı için büyük önem taşıyor olsa da yüksek konsantrasyonlarda bulunmaları sonucu sulak alanlarda alg patlamalarına neden olmaktadır ve bu da su içerisindeki oksijen miktarının azalmasına sebep olur. Bu durum ekosistemin zarar görmesine neden olur. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında nütrifikasyon kg PO₄ eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir.

Küresel Isınma (Global Warming): Küresel Isınma, iklim değişikliği sebebiyle atmosferin ısınmasını ifade eden bir kavramdır. Küresel ısınmaya en fazla neden olan insan faaliyetlerinden biri de petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil kaynakların yakılmasıdır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında küresel ısınma kg CO₂ eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir.

Ozon Tabakası İncelmesi (Ozone Layer Depletion): Ozon Tabakası İncelmesi, insan kaynaklı emisyonlar (CFC, HCFC, klor, brom vb.) tarafından stratosferdeki ozon miktarının azalmasını ve ozon deliği olarak adlandırılan ozon tabakasının incelenmesini ifade eden bir kavramdır. Ozon tabakasının delinmesi insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerinde kanserojen etki yapmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında ozon tabakası incelmesi kg CFC-11 eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir.

İnsan Sağlığı Toksisitesi (Human Toxicity): İnsan sağlığı toksisitesi, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında çeşitli kimyasalların çevreye salınımı sonucu insan sağlığı üzerinde yarattığı toksik etkiyi ifade etmektedir. Ağır metaller gibi insan sağlığına toksik etkide bulunan kimyasalları belirten çevresel etki olarak bilinir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında toksisite kg 1,4-DB (diklorobenzen) eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir.

Tatlısu Ekotoksisitesi (Freshwater Aquatic Ecotoxicity): Tatlısu Ekotoksisitesi, toksik maddelerin havaya, suya veya toprağa karışımı sonucu Tatlısu ekosistemine olan etkileri ifade eder. Toksik maddelerin etkisini yansıtan Ekotoksisite Potansiyeli (Ecotoxicity Potential) USES-LCA ile

hesaplanmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında tatlısu ekotoksisitesi kg 1,4-DB eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir.

Deniz Ekotoksisitesi (Marine Ecotoxicity): Deniz Ekotoksisitesi, toksik maddelerin deniz ekosisteminde yarattığı etkileri ifade etmektedir. Toksik maddelerin etkisini yansıtan Ekotoksisite Potansiyeli (Ecotoxicity Potential) USES-LCA ile hesaplanmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında deniz ekotoksisitesi kg 1,4-DB eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir.

Karasal Ekotoksisite (Terrestrial ecotoxicity): Karasal Ekotoksisite, çevreye salınan toksik maddelerin karasal ekosistem üzerinde yarattığı etkileri ifade etmektedir. Toksik maddelerin etkisini yansıtan Ekotoksisite Potansiyeli (Ecotoxicity Potential) USES-LCA ile hesaplanmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında Karasal ekotoksisite kg 1,4-DB eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir.

Fotokimyasal Oksidasyon (Photochemical Oxidation): Fotokimyasal Oksidasyon olarak ifade edilen foto oksidan oluşumu, tarımsal ürünlere, insan sağlığına ve ekosisteme zarar veren reaktif maddelerin oluşumunu açıklayan etki kategorilerinden biridir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarında fotokimyasal oksidasyon kg C₂H₄ eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışma kapsamında soya elyafı kullanılarak pamuk-soya karışımı atkı iplikleri üretilmiştir. Daha sonra bu atkı iplikleri kullanılarak denim ve spor giyim kumaşları dokunmuştur. Dokunan kumaşlar terbiye işlemlerinden geçirilmiştir. Kumaşlar mamul olduğunda LCA çalışmasına başlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, LCA yapılmadan önce üretilen atkı ipliklerinin kalite standartlarına uygunluğu standart test yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Önce elyaf ve iplik daha sonra da kumaş testleri tamamlanmıştır. Bu şekilde kalite kontrol aşamalarında geçirilerek ürün haline

gelebileceği tespit edilmiş ve LCA çalışmasına başlanmıştır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), belirli bir ürün, proses veya aktivitenin çevresel performanslarını “beşikten mezara kadar” değerlendiren bir sistem yaklaşımıdır. LCA, bir ürünün üretimi ya da bir hizmetin sağlanması sırasında kullanılan hammaddelerin temininden başlayarak, ilgili tüm üretim, sevkiyat, tüketici tarafından kullanım ve oluşan atıkların bertarafını kapsayan yaşam döngüsünün her bir aşamasındaki çevresel etkilerini belirlemek, raporlamak ve denetlemek için kullanılan bir yöntemdir. Üretim esnasında işletmelerin tükettikleri doğal kaynaklar, harcadıkları enerji, havaya, suya ve toprağa saldıkları her türkü katı sıvı ve gaz emisyonlarının en aza indirilmesiyle gerçekleşen ‘Ürün Sürdürülebilirliği ve Temiz Üretim’ çalışmalarının başlangıç noktası, beşikten mezara /cradle to grave) anlayışıyla yapılan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi analizleridir. Kaynak ve enerji verimliliği çalışmalarının temelini oluşturan LCA Avrupa’da birçok yasanın oluşumunda etkin bilimsel bir araçtır. Yaşam döngüsü değerlendirilmesi (LCA) için SimaPro yazılımı kullanılmıştır ve veri girişi yapılarak değerlendirme yapılmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirilmesinde hesaplanan çevresel etkilere göre bulgular denim ve spor giyim için verilmiştir.

3.1. Denim Kumaş Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Denim kumaşlarının yaşam döngü değerlendirilmesi için Çizelge 2’de D1, D2, D3, D4 denim kumaşlarının yaşam döngüsü değerlendirme detayları verilmiştir. Denim kumaşında referans kumaş olarak atkı ipliği harmanında %100 pamuk olan D1 kumaşı baz alınmıştır. D1 kumaşı ile D2 kumaşı, D1 kumaşı ile D3 kumaşı ve D1 kumaşı ile D4 kumaşı kıyaslanmıştır. Kıyaslamada formül (1.1) kullanılmıştır, Çizelge 3’de D1 kumaşı ile D2 kumaşı, D1 kumaşı ile D3 kumaşı ve D1 kumaşı ile D4 kumaşı yaşam döngüsü değerlendirme sonuçları kıyaslanmıştır. D1-D2, D1-D3, D1-D4 kumaşlarında yaşam döngüsü değerlendirme sonuçları parametreler olarak kıyaslanmıştır. İyileşme değeri olarak en yüksek değerde gelen D2 kumaşı olduğu görülmektedir. D2 kumaşı atkı ipliği, %90 pamuk-%10 soya protein elyafı içeren kumaştır. D2 kumaşının iyileşme değerlerinin iyi gelmesinin nedeni kullanılan atkı ipliğinin ince olması ve harmanda %90 pamuk-%10 soya protein elyafı kullanılmasıdır. D2 kumaşının atkı ipliği Ne16/1 ‘dir. Atkı ipliği kalınlaştıkça yaşam döngüsü değerlendirme parametrelerinin iyileşmeye olumlu katkı sağlamadığı görülmektedir.

Çizelge 2. D1, D2, D3 ve D4 kodlu denim kumaşlarının yaşam döngüsü değerlendirilmesi

CML-IA Baseline European (EU 25) parametreleri	Birim	D1 kumaşı	D2 kumaşı	D3 kumaşı	D4 kumaşı
Kaynak tükenmesi (Fosil Yakıtlar)	MJ	22,78596548	16,77747703	18,24662977	24,72083873
Küresel ısınma (Gwp100a)	kg CO2 eq	1,817439953	1,376760331	1,524481988	2,030931311
Ozon tabakasının incilmesi (Odp)	kg CFC-11 eq	1,14212E-07	8,09358E-08	9,08402E-08	1,25987E-07
İnsan yaşamı üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	0,679740896	0,534569312	0,596280407	0,770535551
Tatlısu yaşamı üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	5,634738522	4,215383198	4,383319421	5,534040982
Deniz yaşamı üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	2206,38016	1735,059997	1906,547288	2475,942935
Karasal yaşam üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	0,374888566	0,278618031	0,288472493	0,361981935
Fotokimyasal oksidasyon	kg C2H4 eq	0,00041669	0,000340972	0,000434421	0,000564456
Asitleştirme	kg SO2 eq	0,011348026	0,008900015	0,01005077	0,01298979
Ötrofikasyon	kg PO4--- eq	0,00609577	0,004778924	0,005234652	0,0067403
Toplam Su Kullanımı	m3	0,597113229	0,449294395	0,498606923	0,647825211

Çizelge 3. D1 kodlu kumaşının D2, D3 ve D4 kodlu kumaşlarla ile yaşam döngüsü değerlendirme kıyaslaması

CML-IA Baseline European (EU 25) parametreleri	Birim	D1-D2 kumaş kıyaslaması	D1-D3 kumaş kıyaslaması	D1-D4 kumaş kıyaslaması
Kaynak tükenmesi (Fosil Yakıtlar)	Mj	26,4	19,9	-8,5
Küresel ısınma (Gwp100a)	Kg Co2 Eq	24,2	16,1	-11,7
Ozon tabakasının incelməsi (Odp)	Kg Cfc-11 Eq	29,1	20,5	-10,3
İnsan yaşamı üzerindeki toksik etki	Kg 1,4-Db Eq	21,4	12,3	-13,4
Tatlısu yaşamı üzerindeki toksik etki	Kg 1,4-Db Eq	25,2	22,2	1,8
Deniz yaşamı üzerindeki toksik etki	Kg 1,4-Db Eq	21,4	13,6	-12,2
Karasal yaşam üzerindeki toksik etki	Kg 1,4-Db Eq	25,7	23,1	3,4
Fotokimyasal oksidasyon	Kg C2h4 Eq	18,2	-4,3	-35,5
Asitleştirme	Kg So2 Eq	21,6	11,4	-14,5
Ötrofikasyon	Kg Po4--- Eq	21,6	14,1	-10,6
Toplam Su Kullanımı	M3	24,8	16,5	-8,5

3.2. Spor Giyim Kumaş Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Spor giyim kumaşlarının yaşam döngüsü değerlendirme detayları ise S1, S2, S3 ve S4 kumaşları için Çizelge 4’de verilmiştir. Spor giyim kumaşında referans kumaş olarak atkı ipliği harmanında %100 pamuk olan S1 kumaşı baz alınmıştır. Spor giyim kumaşlarının yaşam döngü değerlendirmesi için S1 kumaşı ile S2 kumaşı, S1 kumaşı ile S3 kumaşı ve S1 kumaşı ile S4 kumaşı kıyaslanmıştır.

Kıyaslamada Eşitlik (1) formül kullanılmış olup burada

a' : Referans kumaşı,

a : Deneme kumaşı göstermektedir.

İyileştirme (%) Hesabı:

$$\text{İyileştirme (\%)} = \frac{a' - a}{a'} \times 100 \quad (1)$$

Çizelge 5’de S1 kumaşı ile S2 kumaşı, S1 kumaşı ile S3 kumaşı ve S1 kumaşı ile S4 kumaşı yaşam döngüsü değerlendirme sonuçları kıyaslanmıştır. Kıyaslama için %iyileştirme hesabı kullanılmıştır.

Çizelge 4. S1, S2, S3 ve S4 spor giyim kumaşlarının yaşam döngüsü değerlendirme

CML-IA Baseline European (EU 25) Parametreleri	Birim	S1 Kumaşı	S2 Kumaşı	S3 Kumaşı	S4 Kumaşı
Kaynak tükenmesi	kg Sb eq	8,5536E-06	9,24583E-06	8,48219E-06	6,77252E-06
Kaynak tükenmesi (fosil yakıtlar)	MJ	28,57621332	32,6759095	33,61138412	28,11135519
Küresel ısınma (GWP100a)	kg CO2 eq	2,466945705	2,807079615	2,871358966	2,423112092
Ozon tabakasının incelməsi (ODP)	kg CFC-11 eq	2,19063E-07	2,39799E-07	2,26264E-07	1,85494E-07
İnsan yaşamı üzerindeki Toksik etki	kg 1,4-DB eq	1,094325404	1,225804744	1,222508842	1,028519269
Tatlısu yaşamı üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	14,93236922	15,95955902	14,43383557	11,4006717
Deniz yaşamı üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	2874,519394	3283,349529	3407,584413	2897,766682
Karasal yaşam üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	1,079276807	1,148819639	1,028681401	0,80802404
Fotokimyasal oksidasyon	kg C2H4 eq	0,000600561	0,000708693	0,00075587	0,000677761
Asitleştirme	kg SO2 eq	0,018697876	0,021006412	0,020972001	0,01765687
Ötrofikasyon	kg PO4--- eq	0,01032128	0,011467721	0,011305791	0,00942061
Toplam Su Kullanımı	m3	1,203827954	1,307731537	1,200517295	0,969682992

Çizelge 5. S1 kodlu kumaş ile S2, S3 ve S4 kodlu kumaşların yaşam döngüsü değerlendirme kıyaslaması

CML-IA Baseline European (EU 25) Parametreleri	Birim	S1-S2 kıyaslaması	S1-S3 kıyaslaması	S1-S4 kıyaslaması
Kaynak tükenmesi	kg Sb eq	-8,1	0,8	20,8
Kaynak tükenmesi (fosil yakıtlar)	MJ	-14,3	-17,6	1,6
Küresel ısınma (GWP100a)	kg CO2 eq	-13,8	-16,4	1,8
Ozon tabakasının incilmesi (ODP)	kg CFC-11 eq	-9,5	-3,3	15,3
İnsan yaşamı üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	-12,0	-11,7	6,0
Tatlısu yaşamı üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	-6,9	3,3	23,7
Deniz yaşamı üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	-14,2	-18,5	-0,8
Karasal yaşam üzerindeki toksik etki	kg 1,4-DB eq	-6,4	4,7	25,1
Fotokimyasal oksidasyon	kg C2H4 eq	-18,0	-25,9	-12,9
Asitleştirme	kg SO2 eq	-12,3	-12,2	5,6
Ötifikasyon	kg PO4--- eq	-11,1	-9,5	8,7
Toplam Su Kullanımı	m3	-8,6	0,3	19,5

S1-S2, S1-S3, S1-S4 kumaşlarında yaşam döngüsü değerlendirme sonuçları parametreler olarak kıyaslanmıştır. İyileşme değeri olarak en yüksek değerde gelen S4 kumaşında olduğu görülmektedir. S4 kumaşı atkı ipliği, %50 pamuk-%50 soya protein elyafıdır. S4 kumaşının iyileşme değerlerinin iyi gelmesinin nedeni kullanılan atkı ipliğinin ince olması ve harmanda %50 pamuk-%50 soya protein elyafı kullanılmasıdır. S4 kumaşının atkı ipliği Ne16/1'dir. Atkı ipliği kalınlaştıkça yaşam döngüsü değerlendirme parametrelerinin değerlerinin iyileşmeye olumlu katkı sağlamadığı görülmektedir.

4. SONUÇ

Pamuk ve pamuk/soya karışımı ipliklerden spor ve denim giyim amacıyla sekiz farklı kumaş üretilmiştir. LCA çalışmaları öncesinde, kumaşlara yönelik haslık ve performans testleri yapılmıştır ve kumaşların ticari olarak kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur. LCA çalışması uygulanmış ve sonuçları alınmıştır. Denim kumaş için %90 pamuk-%10 soya harmanlı atkı ipliği kullanılarak üretilen kumaşın yaşam döngü analizinde;

- Ozon tabakası incelmesinde : % 29,1
- Kaynak tükenmesi (fosil yakıtlar) : % 26,4
- Karasal yaşam üzerinde toksik etkisi: % 25,7
- Tatlı su yaşamı üzerindeki toksik etkisi : % 25,2

iyileşme sağlandığı görülmüştür. Spor giyim kumaş için %50-50 pamuk-soya atkı ipliği kullanılarak üretilen kumaşın yaşam döngü analizinde ise;

- Ozon tabakası incilmesi : % 15,3
- Kaynak tükenmesi : % 20,8
- Karasal yaşam üzerinde toksik etkisi : % 25,1
- Tatlı su yaşamı üzerindeki toksik etkisi : % 23,7

iyileşme sağlandığı görülmüştür. Soya lifi kullanılarak yapılan üretimde;

- Denim kumaş için atkıda %90pamuk-%10 soya lifi harmanlı iplik kullanımının ve
- Spor giyim kumaş üretiminde ise atkıda %50 pamuk-%50 soya lifi harmanlı iplik kullanımının

LCA çalışmalarında en iyi sonucu verdiği görülmektedir.

Araştırma sonuçlarından görüldüğü üzere, denim ve spor giyim amaçlı olarak üretilen kumaşlarda soya protein lifinin kullanılması yaşam döngü analizinde olumsuz etki yapmadığı ve soya lifinin kullanılması yaşam döngü analizinde iyileşmelere neden olduğu ortaya konulmuştur.

Bu çalışma ile soya lifinin yenilikçi, insan ve doğa dostu bir lif olarak denim ve spor giyimde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından “Üniversite Sanayi İşbirliği (SAN)” Projesi kapsamında desteklenmiş olup (Proje ID: FSI-2020-12668), desteği için Çukurova Üniversitesi Rektörlüğü’ne teşekkür ederiz. Çalışmanın yürütülmesinde üretim ve testlerin yapılması için destek veren proje paydaşı BOSSA T.A.Ş./Adana işletmelerine ve Ar-Ge merkezi ekibine teşekkürlerimizi sunarız.

6. KAYNAKLAR

1. Unal, B., 2012. The Prediction of Seam Strength of Denim Fabrics with Mathematical Equations. *Journal of The Textile Institute*, 103(7), 744-751.
2. Zervent Ünal, B., Küçük, A.D., 2021. Ozonlama Proses Şartlarının Elastansız Denim Kumaşların Yumuşaklık/Sertli ve Mukavemet Özelliklerine Etkisinin İrdelenmesi. *DEÜ FMD*, 23(69), 745-754.
3. Doba Kadem, F., Saraç, E.G., 2017. An Experimental Application on Denim Garment to Give Thermal Regulation Property. *Journal of the Textile Institute*, 108(3), 353-360.
4. Sabır, E.C., Doba Kadem, F., 2016. The Comfort and Performance Properties of Raised and Laminated Denim Fabrics. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 24(5), 88-94.
5. Tölek, S., Doba Kadem, F., 2016. An Investigation on Colour Analysis and Fastness Properties of the Denim Fabric Dyed with a Different Method. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 26(2), 198-204.
6. Sabır, E.C., Dönmez, İ., 2018. Efficiency in Denim Finishing Mills-Reducing the Use of Coustics in Mercerization. *ISAS 2018-Winter, 2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*, November 30 - December 2, 2018, Samsun, Turkey.
7. Gülşen Bakıcı, G., Doba Kadem, F., 2018. An Experimental Study on Sewability Properties of 100% Cotton Denim Fabrics. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 28(2), 170-176.
8. Dönmez, İ., Sabır, E.C., 2019. Denim Terbiye İşletmelerinde Verimlilik ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Üzerine Deneysel Çalışma, *UÇTEK2019-Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi*, 26-27 Eylül 2019, Adana.
9. Guinee, J.B., 2002. Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to The ISO Standards. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(5), 311-313.
10. La Rosa, A.D., Grammatikos, S.A., 2019. Comparative Life Cycle Assessment of Cotton and Other Natural Fibers for Textile Applications. *Fibers*, 7, 101. www.mdpi.com/journal/fibers.
11. Bevilacqua, M., Ciarapica, F.E., Mazzuto, G., Paciarotti, C., 2014. Environmental Analysis of a Cotton Yarn Supply Chain. *Journal of Cleaner Production*, 82, 154-165.
12. Peters, G., Svanström, M., Roos, S., Sandin, G., Zamani B., 2015. Carbon Footprints in the Textile Industry. Book Chapter, 3-30. (Editor: Muthu, S.S.), *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*, Woodhead Publishing Series in Textiles; 172, Elsevier: Amsterdam, Netherlands,
13. Roos, S., Posner, S., Jonsson, C., Peters, G.M., 2015. Is Unbleached Cotton Better Than Bleached? Exploring The Limits of Life-Cycle Assessment in the Textile Sector. *Clothing & Textiles Research Journal*, 33(4), 250-261.
14. Roos, S., Peters, G.M., 2015. Three Methods for Strategic Product Toxicity Assessment-The Case of the Cotton T-Shirt. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(7), 903-912.
15. Qian, J.H., Li, Y., Wang, L.L., 2018. Calculation and Assessment of Chemical Footprint of Denim Fabric. *Dyeing & Finishing*, 44(13), 52-55.
16. Li, Y., Luo, Y., He, Q., 2020. Chemical Footprint of Textile and Apparel Products: An Assessment of Human and Ecological Toxicities Based on Usetox Model. *Journal of The Textile Institute*, 111(7), 960-971.
17. Van der Velden, N.M., Patel, M.K., Vogtländer, J.G., 2014. LCA Benchmarking Study on Textiles Made of Cotton, Polyester, Nylon, Acryl, or Elastane. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 19, 331-356.

18. Wang, L.L., Ding, X.M., Wu, X.Y., 2013. Research Progress of Textile Carbon Footprint. *Textile Research Journal*, 34(6), 113-119.
19. Dönmez Uzun, İ., Sabır, E.C., Sırlıbaş, S., Yeşiltaş, E., 2021. Performance and Life Cycle Analysis of Denim Fabrics Produced Using Soybean Protein Fiber and Cotton Fiber, 5th Icnf2021-Materials of the Future (5th International Conference on Natural Fibers), 17-19th May 2021, Madeira Island/Portugal.

The Evaluation of Uster Hairiness Results with an Image Analysis Approach

Abdurrahman TELLİ*¹ ORCID 0000-0002-6720-9410

¹Cukurova University, Engineering Faculty, Department of Textile Engineering, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 10.08.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/How to cite: TELLİ, A., (2023). The Evaluation of Uster Hairiness Results with an Image Analysis Approach. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 899-905.

Abstract

In this study, the images of the yarns were taken using a stereomicroscope. MATLAB software was used in image processing studies. The recommended image acquisition and processing steps in previous studies were followed, and the obtained results from textural parameters of images were compared with the results of Uster H and sh. The highest correlation in Uster H hairiness was obtained in the entropy textural parameter of the Sobel technique. The highest correlation in Uster sh hairiness was obtained in the mean of matrix elements (mean2) from the textural parameters in the Sobel technique. In general, higher correlation results were found in Uster sh than in Uster H. It has been observed that the Uster H results have deficiencies in determining the hairiness of dyed yarns. The different from the literature, this study presents that among the hairiness parameters, Uster sh shows the values closest to the real.

Keywords: Yarn hairiness, Uster tester, Image processing, Edge detection algorithm, Textural parameters of image

Bir Görüntü Analiz Yaklaşımı ile Uster Tüylülük Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Öz

Bu çalışmada ipliklerin görüntüleri stereomikroskop kullanılarak alınmıştır. Görüntü işleme çalışmalarında MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda önerilen görüntü elde etme ve işleme adımları izlenmiş ve görüntülerin dokusal parametrelerinden elde edilen sonuçlar, Uster H ve sh sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Uster H tüylülüğündeki en yüksek korelasyon, Sobel tekniğinin entropi dokusal parametresinde elde edilmiştir. Uster sh tüylülüğünde en yüksek korelasyon, Sobel tekniğinde dokusal parametrelerden matris elemanlarının ortalamasında (mean2) elde edilmiştir. Genel olarak Uster sh'de Uster H'ye göre daha yüksek korelasyon sonuçları bulunmuştur. Uster H sonuçlarının boyalı ipliklerin tüylülüğünü belirlemede eksiklikleri olduğu görülmüştür. Literatürden farklı olarak, bu çalışma, tüylülük parametrelerinden Uster sh'in gerçeğe en yakın değerleri gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: İplik tüylülüğü, Uster Tester, Görüntü işleme, Kenar belirleme algoritması, Görüntü doku parametreleri

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Abdurrahman TELLİ, atelli@cu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Yarn hairiness is an important part of total yarn quality control. Excessive hairiness can cause production problems in weaving and knitting. In addition, variation in hairiness can adversely affect the quality of the final product. There are studies in the literature for the development of existing techniques used for the determination of yarn hairiness. For instance, it is stated that changes in test speed affect yarn hairiness results. To remedy this, placing a blowing pipe outside the hairiness test area is among the sensible suggestions [1]. There are many studies in the literature with similar recommendations. In recent years, digital image acquisition and processing techniques are also recommended as an alternative to existing techniques in order to determine yarn hairiness more accurately.

To determine yarn hairiness, Ozkaya et. al., proposed an image processing technique using both the number of hairs and hair lengths. In this way, hair density distribution profile was obtained. They pointed out that their results were compatible with Uster Tester's H index. Researchers also stated that it can give better results than Uster Tester in color and material change [2]. Zhang and Xin, compared the new digital image processing techniques proposed in the literature with traditional detection methods to evaluate the yarn appearance. It was emphasized in their study that new techniques can give more appropriate results depending on the developments in this field in terms of objectivity, speed and accuracy [3]. Sun et. al., captured the yarn images by MOTIC video system to determine the hairiness and to detect the edges of the yarn body. Differently from other studies, images were separated into many small segments for the evaluating long hairs by different measurement lines and different segmentation steps [4]. Wang et. al., proposed an image processing method using the yarn blackboard. From the image of the yarn blackboard, the yarn diameter was determined by algorithms, and the yarn body and hairs were divided into sections. Based on these data, the hairiness index was calculated and compared with the Uster H results. [5]. Jing et. al., unlike other

studies, examined the results of yarn segmentation with five different algorithms. They used the Uster Zweigle HL400 hairiness tester for comparison [6]. Guo et. al., suggested an online yarn image acquisition on the sizing machine. Researchers processed the received images and compared them with the Uster Zweigle Tester [7]. Telli, presented a different image processing approach to determine yarn hairiness. Researchers examined seven different edge detection algorithms and seven textural parameters and compared the results obtained with Zweigle G567 results. A strong correlation was obtained between image processing results and Zweigle hairiness. In the study, 100% cotton yarns produced in three different spinning systems were used [8]. When the study was repeated with yarns in different raw materials, numbers and colors, the correlation values show a decrease [9]. On the other hand, in the different version device (Uster Zweigle HL400) using hairiness length classification system, no correlation was found between Zweigle hairiness [10]. It also has been emphasized in previous studies that even different version devices using the hairiness length classification system can give different results [11].

Today, the most preferred method commercially is the Uster hairiness (H) value. "H" corresponds to the total length of the protruding fibers of the yarn body for 1 cm yarn. The hairiness value is the average of all 1 cm hairiness values in a tested yarn sample. The standard deviation of the values obtained for 1 cm throughout the entire yarn test length gives the hairiness variation (sh) value. In this study, the image acquisition and processing steps recommended in previous studies were followed, and the obtained results were compared with the results of Uster H and sh.

2. MATERIAL AND METHODS

Thirteen ring yarns with different structures and contents were used in the study. The quality properties of these yarns were measured in the Uster Tester 4 device with a test speed of 400m/min for 1 minute. The obtained unevenness, imperfections and hairiness results were presented in Table 1.

Table 1. Unevenness, imperfections and hairiness results of yarns

Yarn type	Yarn properties	CVm	Thin places -50%	Thick places +50%	Neps +200%	H	sh
01	Ecrü Ne 36/1 CO/CV	13,9	0	93	180	4,47	1,1
02	Ecrü Ne 40/1 CO/CV	15,2	8	226	426	5,4	1,34
03	Ecrü Ne 28/2 CO/CV/EL	10,1	0	8	9	7,27	1,72
04	Ecrü Ne 36/2 CO/CV/EL	13,5	0	93	33	7,41	1,78
05	Ecrü Ne 40/2 CO/CV/EL	10,8	0	11	25	5,14	1,28
06	Ecrü Ne 50/2 CO/CV	15,8	21	346	190	5,58	1,47
07	Black Ne 28/1 CO/CV	13,7	0	85	123	4,22	1,29
08	Black Ne 40/1 CO/CV	22,6	376	1668	2506	4,15	1,61
09	Black Ne 28/2 CO/CV/EL	10,1	0	8	13	3,89	1,15
10	Black Ne 36/2 CO/CV/EL	13,2	1	84	49	5,45	1,54
11	Black Ne 40/2 CO/CV/EL	11,1	0	16	33	3,44	1,05
12	Black Ne 50/2 CO/CV/EL	11,8	0	35	79	3,52	1,04
13	Black Ne 60/2 CO/CV	15,2	6	266	161	3,39	1,06

The images of the yarns were taken using a Novel NSZ 808 stereomicroscope. Image acquisition was performed at a magnification of 10x from twenty different regions of the yarn randomly. MATLAB R2018a software was used in image processing studies. The following steps were followed in image processing, respectively [8,10].

1. The image, which has a three-dimensional matrix in RGB format, has been converted into two-dimensional matrices.
2. The matrices have been converted to a "double" format consisting of values between 0-1.
3. 2D median filtering was preferred to reduce noise in the image.
4. With the histogram equalization technique, the image input density values were matched to the new values and the contrast of the image was increased.
5. The yarn body and hairs separated from each other with Sobel and Prewitt edge detection algorithms, which were prominent in previous studies.
6. Textural parameters of images were calculated. In the study, three different parameters recommended in previous studies were investigated: the mean of the matrix elements (mean2), the standard deviation of the matrix elements (std2) and the entropy (entropy).

The relationship between textural parameters and H and sh from Uster hairiness parameters was investigated statistically with Pearson correlation analysis. The degree of correlation between the variables was shown by the correlation coefficient (r).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The obtained textural parameter results as a result of image processing studies were presented in Table 2.

Table 2. Textural parameters mean results of different edge detection algorithms

Yarn type	SOBEL			PREWITT		
	mean2	std2	entropy	mean2	std2	entropy
01	0,0102	0,1003	0,0820	0,0101	0,0997	0,0818
02	0,0120	0,1085	0,0934	0,0118	0,1079	0,0925
03	0,0150	0,1213	0,1122	0,0149	0,1208	0,1114
04	0,0144	0,1189	0,1085	0,0143	0,1185	0,1079
05	0,0118	0,1081	0,0924	0,0117	0,1073	0,0917
06	0,0121	0,1092	0,0944	0,0120	0,1088	0,0939
07	0,0113	0,1055	0,0893	0,0113	0,1053	0,0891
08	0,0135	0,1147	0,1025	0,0134	0,1146	0,1023
09	0,0110	0,1042	0,0874	0,0110	0,1040	0,0871
10	0,0138	0,1164	0,1049	0,0138	0,1161	0,1046
11	0,0101	0,1001	0,0817	0,0101	0,0999	0,0814
12	0,0088	0,0930	0,0724	0,0087	0,0928	0,0721
13	0,0107	0,1027	0,0854	0,0107	0,1026	0,0852

All matrix elements consist of 0 in a completely black image and all matrix elements consist of 1 in a completely white image. It is expected that the values of the Uster hairiness will increase as the values of the textural parameters in Table 2 approach 1, and decrease as they approach 0. In Table 2, the highest and lowest values for textural parameters in different edge detection algorithms were marked. According to Table 2, the highest values were seen in yarn numbered 03 in both algorithms and in all three textural parameters. The lowest values were obtained in yarn numbered 12 in both algorithms and in all three textural parameters. In order to understand the change in textural parameters more easily, the situations before and

after image processing of the third image taken from yarn number 03 and the twelfth image taken from yarn number 12 were presented in Figure 1.

Higher values in the images of yarn 03 having higher yarn hairiness were observed in all three textural parameters compared to yarn 12. In both different edge detection methods, the textural parameter values of yarn 03 were higher than yarn 12. When the textural parameters of the same yarns were compared in terms of edge detection algorithm, Sobel had higher values than Prewitt in all parameters. However, there were insignificant differences between them.

Yarn Type	SOBEL			PREWITT		
	mean2	std2	entropy	mean2	std2	entropy
03	0,0149	0,1210	0,1116	0,0146	0,1201	0,1102
12	0,0066	0,0809	0,0573	0,0066	0,0807	0,0570

Figure 1. The situations before and after image processing of images taken from yarn numbered 03 and 12

When the H and sh values in Table 1 were examined, the second highest H and sh values were determined in the yarn 03. The lowest sh value was observed in yarn 12 similar to the results in textural parameters. Yarn 12 was the third lowest value in terms of H value. When the values in Table 2 were

evaluated in terms of edge detection algorithms, it was seen that there were little differences between them. The values obtained from Sobel were slightly higher than Prewitt in all parameters. In order to make more comprehensive evaluations, the correlation results between Uster hairiness data in

Table 1 and the textural parameter data in Table 2 were shown in Table 3-4. In addition to the general evaluation, correlation analyses are also available according to color and number of ply in Table 3-4.

Table 3. The correlation coefficient (r) results between textural parameters and Uster H

Pearson correlation coefficient (r)	SOBEL			PREWITT		
	mean2	std2	entropy	mean2	std2	entropy
All 13 yarns (1-13)	0,827	0,824	0,825	0,818	0,814	0,818
Ecreu yarns (1-6)	0,983	0,980	0,983	0,984	0,982	0,985
Black colored yarns (7-13)	0,806	0,799	0,803	0,808	0,797	0,803
All CO/CV single yarns (1,2, 6, 7,8,13)	0,280	0,305	0,290	0,250	0,266	0,260
CO/CV Ecreu single yarns (1,2,6)	0,995	0,997	0,997	0,999	0,998	0,999
CO/CV Black plied yarns (1,2,6, 7,8,13)	0,607	0,623	0,615	0,620	0,621	0,618
All CO/CV/ELS yarns (3,4,5,9,10,11,12)	0,938	0,927	0,931	0,932	0,925	0,929
CO/CV/ELS Ecreu plied yarns (3,4,5)	0,973	0,974	0,974	0,975	0,977	0,976
CO/CV/ELS Black plied yarns (9,10,11,12)	0,947	0,928	0,935	0,942	0,928	0,936

According to the results in Table 3, a strong correlation was found between all textural parameters and Uster H hairiness in both techniques. The highest correlation for all 13 yarns was observed in the entropy from textural parameters in the Sobel technique ($r=0.825$). Similarly, in a previous study on Zweigle S3 hairiness, the highest correlation was found in the entropy of images processed using the Sobel technique [8]. When only ecru yarns (1-6) were evaluated instead of all yarns, higher correlation values were obtained. The correlation value decreased in black dyed (7-13) yarns. However, there was strong correlation in both cases. When all single-ply yarns (1,2,6) were evaluated, high

correlation values were obtained similarly. However, correlation values in dyed single-ply yarns decreased and became insignificant. This situation has also been expressed in previous image processing studies. It has been stated that Uster H hairiness may be a problem in dyed yarns and various estimates have been asserted for the reason of this situation [2]. In ply yarns, a strong correlation was found between both techniques and all three textural parameters, regardless of color. Considering all the ply yarns, the highest correlation value was found in the standard deviation of the matrix elements (std2), which is one of the textural parameters, in the Prewitt technique ($r=0.977$).

Table 4. The correlation coefficient (r) results between textural parameters and Uster sh

Pearson correlation coefficient (r)	SOBEL			PREWITT		
	mean2	std2	entropy	mean2	std2	entropy
All 13 yarns (1-13)	0,958	0,950	0,954	0,956	0,951	0,954
Ecreu yarns (1-6)	0,967	0,967	0,969	0,970	0,971	0,970
Black colored yarns (7-13)	0,941	0,924	0,930	0,936	0,925	0,931
All CO/CV single yarns (1,2, 6, 7,8,13)	0,957	0,962	0,961	0,957	0,956	0,960
CO/CV Ecreu single yarns (1,2,6)	0,953	0,960	0,962	0,969	0,966	0,969
CO/CV Black plied yarns (1,2,6, 7,8,13)	0,975	0,979	0,977	0,978	0,979	0,978
All CO/CV/ELS yarns (3,4,5,9,10,11,12)	0,968	0,957	0,962	0,965	0,958	0,962
CO/CV/ELS Ecreu plied yarns (3,4,5)	0,959	0,961	0,960	0,961	0,964	0,962
CO/CV/ELS Black plied yarns (9,10,11,12)	0,961	0,944	0,951	0,957	0,945	0,951

When Uster sh the hairiness values in Table 4 was examined, different results were encountered according to Uster H. A strong correlation was found between all textural parameters and Uster sh hairiness in both Sobel and Prewitt techniques. The fact that it is dyed or plied did not change the results. For all 13 yarns, the highest correlation was obtained with the mean of matrix elements (mean2), one of the textural parameters, in the Sobel technique ($r=0.958$). When only ecru yarns (1-6) were evaluated instead of all yarns, higher correlation values were obtained. The correlation value decreased in black dyed (7-13) yarns. Furthermore, strong correlation was found in both situations. When only single-ply yarns (1,2,6) were evaluated, high correlation values were obtained similarly. The different from Uster H hairiness results in Table 3, strong correlation values were also obtained in dyed single-ply yarns. In addition, the highest correlation values among all values were obtained here. In the standard deviation of the matrix elements for the both edge detection algorithms, the highest correlation coefficient ($r=0.979$) among all values was obtained. When all ply yarns were considered, results similar to Uster H hairiness were observed. Considering all the ply yarns, the highest correlation value ($r=0.968$) was obtained in the Sobel technique, with the mean of the matrix elements (mean2), one of the textural parameters.

4. CONCLUSION

In this study, it was possible to separate the hairs from the yarn body as a result of processing the yarn images taken under the microscope with different techniques. The relationship between the textural parameter values of the obtained images and the hairiness of Uster H and sh was investigated. For all thirteen yarns, the highest correlation in Uster H hairiness was obtained in the entropy textural parameter of the Sobel technique ($r=0.825$). The highest correlation in Uster sh hairiness for all thirteen yarns was obtained in the mean of matrix

elements (mean2) from the textural parameters in the Sobel technique ($r=0.958$). In general, Uster sh has higher correlation results than Uster H. It has been observed that the Uster H results have deficiencies in determining the hairiness of dyed yarns. Although it was ignored in previous academic studies and in the textile market, strong correlation and better results were obtained regardless of color and number of ply in Uster sh hairiness.

The used technique of processing the images taken from the microscope in the study is a more accurate method in determining the actual yarn hairiness. But it is a static method. It needs further development to be fast and efficient. The deficiencies of hairiness detection methods and devices used in the market are known and have been emphasized in previous studies. When evaluated together with the literature, this study presents that among the hairiness parameters, Uster sh shows the values closest to the real.

5. REFERENCES

1. Xia, Z., Liu, X., Wang, K., Deng, B., Xu, W., 2019. A Novel Analysis of Spun Yarn Hairiness Inside Limited Two-Dimensional Space. *Textile Research Journal*, 89(21-22), 4710-4716.
2. Ozkaya, Y.A., Acar, M., Jackson, M.R., 2007. Hair Density Distribution Profile to Evaluate Yarn Hairiness and its Application to Fabric Simulations. *Journal of the Textile Institute*, 98(6), 483-490.
3. Zhang, G., Xin, B. 2016. An Overview of the Application of Image Processing Technology for Yarn Hairiness Evaluation. *Research Journal of Textile and Apparel*. 20(1), 24-36.
4. Sun, Y., Li, Z., Pan, R., Zhou, J., Gao, W., 2017. Measurement of Long Yarn Hair Based on Hairiness Segmentation and Hairiness Tracking. *The Journal of the Textile Institute*, 108(7), 1271-1279.
5. Wang, L., Lu, Y., Pan, R., Gao, W., 2021. Evaluation of Yarn Appearance on a Blackboard Based on Image Processing. *Textile Research Journal*, 91(19-20), 2263-2271.
6. Jing, J., Huang, M., Li, P., Ning, X., 2018. Automatic Measurement of Yarn Hairiness

- Based on the Improved MRMRF Segmentation Algorithm. The Journal of the Textile Institute, 109(6), 740-749.
7. Guo, M., Gao, W., Wang, J., 2023. Online Measurement of Sizing Yarn Hairiness Based on Computer Vision. Fibers and Polymers, 24(4), 1539-1552.
 8. Telli, A., 2021a. The Comparison of the Edge Detection Methods in the Determination of Yarn Hairiness Through Image Processing. Textile and Apparel, 31(2), 91-98.
 9. Telli, A., 2021b. İplik Tüylülüğünün Belirlenmesi için Bir Görüntü Analizi Yaklaşımı ve Zweigle Tüylülüğü ile Karşılaştırılması. 9th International Fiber and Polymer Research Symposium, 19-20 November 2021, 207-210.
 10. Telli, A., 2022a. Uster Zweigle HL400 Cihazında Ölçümü Yapılan İpliklerin Tüylülük Sonuçlarının Mikroskop Altında Alınan Görüntülerin İşlenmesi ile Değerlendirilmesi. UÇTEK 2022 Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi, 29-30 Eylül 2022, 217-224.
 11. Telli, A., 2022b. The Comparison of the Yarn Hairiness Test Devices Using the Hairiness Length Classification System. Tekstil ve Mühendis, 29(128), 219-228.

Grafen Nanoplaka Katkılı Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozit Boruların İç Yüzey Eroziyon Direncinde Aşındırıcı Partikül Hızının Rolünün İncelenmesi

Seyit Mehmet DEMET*¹ ORCID 0000-0002-9795-0939

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya

Geliş tarihi: 05.10.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: DEMET, S.M., (2023). Grafen Nanoplaka Katkılı Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozit Boruların İç Yüzey Eroziyon Direncinde Aşındırıcı Partikül Hızının Rolünün İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 907-915.

Öz

Bu çalışmada $[\pm 55]_4$ sarım konfigürasyonunda filament sarım tekniği ile imal edilen iki farklı kompozit borunun boru içi malzeme akışının olduğu alt yapı ve malzeme aktarım uygulamalarında eroziyon aşınmaya maruz kalabilecek boru iç yüzeyinin erozyon davranışı dikkate alınarak araştırılmıştır. Bazalt elyaf takviyeli kompozit boru (BETKB) ile ağırlıkça %0,25 grafen nanoplakalar ile güçlendirilmiş bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların (GNP/BETKB) katı partikül erozyon davranışları yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Dört farklı çarpma hızında (23 m/s, 28 m/s, 34 m/s, 53 m/s) ve üç farklı çarpma açısında (30°, 45°, 60°) alümina aşındırıcı partiküller boru iç yüzeyine çarptırılarak elde edilen erozyon oranı değerlendirildiğinde grafen nanoplaka takviyesinin bazalt elyaf takviyeli boruda erozyon aşınmasına karşı direnci artırdığı görülmüştür. Erozyon oranının oransal değişiminin de incelendiği grafiklerde de sunulduğu üzere 28 m/s çarpma hızında %50'ye yakın bir erozyon oranı azalımı grafen nanoplaka takviyesi sayesinde elde edilmiştir. Her iki borunun aşınma modelinin yarı sünek aşınma modeline uygun bir davranış sergilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Filament sarım tekniği, Erozyon aşınması, Grafen nanoplaka takviyeli kompozit boru

Investigation of the Role of Abrasive Particle Velocity on the inner Pipe Surface Erosive Wear Resistance of Composite Pipes Reinforced with Basalt Fibre and Graphene Nanoplatelets

Abstract

In this study, two different composite pipes manufactured with filament winding technique in $[\pm 55]_4$ winding configurations were investigated by considering the erosive behaviour of the inner surface of the pipe which may be subjected to erosive wear in substructure and material transfer applications where may be worn because of material flow. The solid particle erosion behaviour of basalt fibre reinforced composite pipe (BETKB) and basalt fibre reinforced composite pipes reinforced with 0.25 wt % graphene

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Seyit Mehmet DEMET, smdemet@ktun.edu.tr

nanoplatelets (GNP/BETKB) were compared by considering the results obtained from the experiments. When evaluating the erosion rate resulting from impacting alumina abrasive particles on the inner surface of a pipe at various impact velocities (namely 23 m/s, 28 m/s, 34 m/s, and 53 m/s) and impingement angles (30°, 45°, 60°), it was observed that graphene nanoplatelets reinforcement increased the resistance to erosive wear in basalt fibre-reinforced pipes. As indicated by the graphs, which also analyse the proportional change in erosion rate, the graphene nanoplatelets reinforcement achieved an erosion rate reduction of almost 50% at the impact velocity of 28 m/s. It was observed that the wear model of both pipes showed a behaviour suitable for the semi-ductile wear model.

Keywords: Filament winding technique, Erosive wear, Graphene nanoplatelets reinforced composite pipe

1. GİRİŞ

Kompozit yapıya sahip diğer elemanlar gibi kompozit borularda, birden fazla malzemenin kullanıldığı ve farklı malzemelerin birleşerek yeni bir malzeme elde edilmesi ile üretilen bir boru tipidir. Kompozit borular, kullanılan her bir malzemenin avantajlı özelliklerinden yararlanacak şekilde tasarlanabilmekte bu sayede geliştirilmiş performans özelliklerine sahip bir boru eldesi mümkün olabilmektedir [1-4].

Kompozit borular, geleneksel metal veya plastik borulara göre çeşitli avantajlar sunar. Örneğin korozyona karşı dirençli bir boru elde edebilmek için polimer iç astarın kullanıldığı kompozit boru uygulamaları, metal boruları aşındırabilecek sıvıların taşınmasında özellikle yararlı olan korozyona karşı daha üstün direnç sağlamaktadır [5,6]. Bununla birlikte polimerler ile yüksek mukavemet değerlerine sahip dayanıklı fiberler takviye edilerek imal edilen borular sayesinde yüksek bir mukavemet-ağırlık oranı elde edilebilmektedir [7-9]. Bu durum, nakliye, kurulum ve taşıma faaliyetlerini kolaylaştırmaktadır. Metalik boru tiplerine kıyasla kompozit borular esnek bir yapıya sahip olabilmektedirler. Boruların kolay şekil verilebilmesi montaj alanlarında kolaylık sağlayabilecek bir kazanım sağlamaktadır. Kompozit borunun iç yüzeyinde bulunan polimer astarlar sayesinde pürüzsüzlüğü daha iyi yüzeyler elde edilebilmekte bu durum ise boru içerisindeki akışta enerji tasarrufu sağlayacak bir artı olacaktır. Tüm bu etkileri göz önüne alarak çeşitli çalışma ortamlarında daha uzun ömürlü ve verimli bir boru performansı elde edilebilmektedir.

Kompozit borular; petrol sanayi, kimyasal işleme tesisleri, su dağıtım şebekeleri ve altyapı projeleri gibi çeşitli endüstrilerde uygulama alanı bulmaktadır [10-14]. Avantajlı özellikleri sayesinde aşındırıcı ortamlarda, yüksek basınçlı uygulamalarda, hatta geleneksel malzemelerin uygulanmasının çeşitli dezavantajlarının olduğu durumlar da dahil olmak üzere çok çeşitli koşullar için uygun kullanım alanları bulmaktadır. İlerleyen teknoloji ve malzeme çeşitliliği ile birlikte kompozit boruların performans ve uygulama yelpazesinin de genişleyeceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada erozif ortamda bulunabilecek grafen nanoplaka ile güçlendirilmiş bazalt elyaf takviyeli kompozit borunun katı partikül erozyon aşınması araştırılmıştır. Bazalt elyafın yüksek kimyasal ve ısı denge, yüksek ısı ve elektrik yalıtımı gibi özellikleri bilinmektedir. Bununla birlikte bazalt elyaflar -230°C ile $+700^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında kullanılabilme avantajına sahiptir. Bazalt elyafın yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon direnci sağlaması tribolojik olarak pozitif bir katkı sunmaktadır [15,16]. Kompozit boru erozyon aşınmasının incelendiği bu çalışmada deney numuneleri farklı hızlarda ve farklı çarpma açılarında katı partikül erozyon testlerine tabi tutularak grafen nanoplaka takviyesinin erozyon aşınmasına etkisi incelenmiştir. Boru içi katı partikül akışı deneysel ortamda simüle edilerek farklı parametreler altında boru iç yüzeyinde oluşan aşınma durumları değerlendirilmiştir. Grafen ile güçlendirme yapılmamış olan bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların katı partikül erozyon aşınması

davranışı [17] ile grafen nanoplaka ile güçlendirilen boruların erozyon davranışı karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

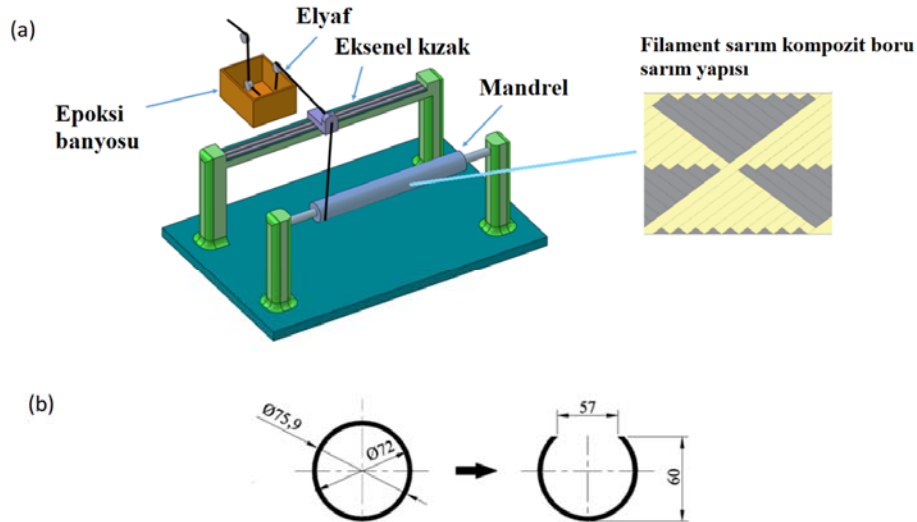
2.1. Deneysel Malzemesi

Kompozit borularda kullanılan bazalt lifler 13 μm ve 1000 m elyaf uzunluğu 400 gram olan monofilament özelliğe sahip olup, matris olarak Bisphenol-A epoksi reçine ve anhidrit bazlı kürleme ajanı kompozit borunun imalatında kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan bazalt elyaf takviyeli kompozit malzeme; 800 m^2/g yüzey alanı, 3-7 nm katman kalınlığı, ortalama 1,5 μm katman genişliği ve %99,9 saflığa sahip grafen nanoplakalar ile takviye edilmiştir. Kompozit borunun imalat sürecinde ağırlıkça % 0,25 oranında grafen nanoplakalar epoksi reçine ile homojen bir dağılım elde edilene kadar 60°C sıcaklıkta karıştırılmış ve sonrasında anhidrit bazlı (EpikureTM 866) sertleştirici eklenecek filament sarıma hazır hale getirilmiştir. Boru üretiminde kullanılan malzemeler, bazalt elyaf ve epoksi reçine sırasıyla Kamenny Vek ve Hexion firmalarından temin edilmiştir. Mekanik özelliklere ilişkin ayrıntılar Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Kompozit boru bileşenlerinin mekanik özellikleri

	Elastisite modülü (GPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Yoğunluğu (g/cm^3)
Bazalt elyaf	90-95	2900-3200	2,48
Epoksi reçine	3,2	70-75	1,25

Kompozit borular filament sarım yöntemi kullanılarak 11 mm bant genişliğinde ve $[\pm 55]_4$ sarım konfigürasyonunda imal edilmiştir. Filament sarım işlemi tamamlanan kompozit borular yatay döner fırında önce 120°C'de 3 saat kurlenmiş ve nihai olarak 140°C'de 3 saat kurlenmiştir (post-cure). İmal edilen kompozit borular 75,9 mm dış çapa ve 1,95 mm et kalınlığında geometrik ölçüleri sahiptir. Şekil 1'de boyutları ile birlikte verilen kompozit boru deney numuneleri Şekil 2'de gösterilen deney setinde katı partikül erozyon testine tabi tutulmuştur. Deney numunesi – nozul arasındaki mesafe sabit tutularak kompozit borular, boru eksenine boyunca ve iç yüzeyde partikül akışını sağlayacak şekilde deney setinde konumlanmıştır (Şekil 3). Deneylerde, katı partiküllerin belirlenmiş çarpma açıları boru boyunca iç yüzeye çarpıtılıp erozif ortam simüle edilmesi için belirtilen ölçülere sahip boru parçalarına kesilmiş ve ardından bu parçalar üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1, bu tasarımın detaylarını göstermektedir.



Şekil 1. a) Filament sarım kompozit boru üretim şeması b) deney numunesi ölçüleri (ölçüler mm'dir)

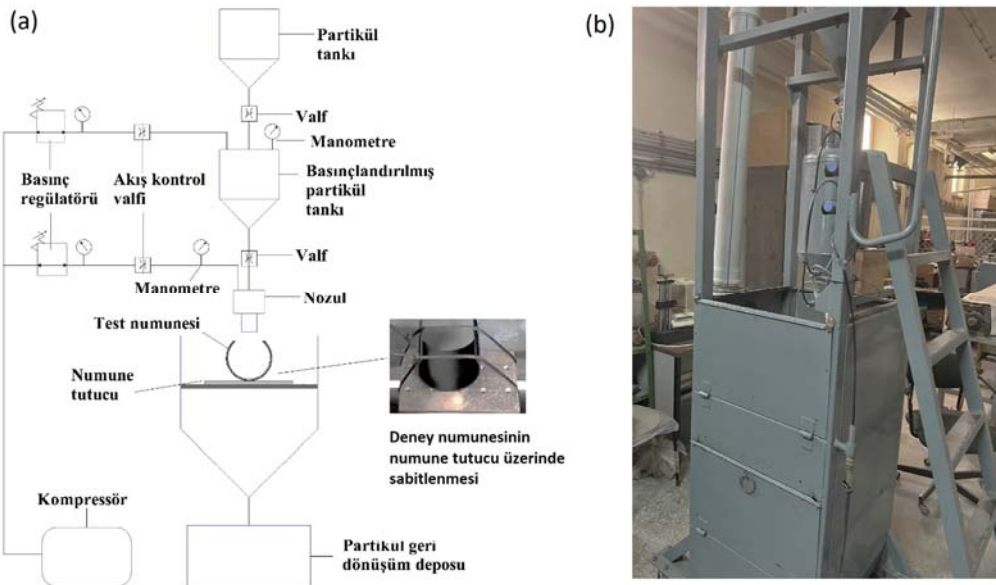
2.1. Deney Tesisatı

Üretilen kompozit boruların katı partikül erozyon testleri Şekil 2’de verilen ASTM G76-95 standardına uygun deney setinde yapılmıştır. Şekil 2’de elemanları ile birlikte verilen deney setinde aşındırıcı olarak kullanılan alümina partikülleri önceden belirlenmiş miktarda partikül tankına eklenmekte ardından basınçlandırılmış partikül tankına aktarılıp belirlenmiş basınç değerlerinde basınçlandırılmaktadır. Çift disk metodu ile belirlenen basınç – hız ilişkisi sayesinde belirli basınç altında bulunan alümina partiküller istenilen çarpma hızında ve çarpma açısında deney numunesi üzerine çarptırılmaktadır. Bu yöntemle deney numunesi olarak belirlenmiş olan kompozit borunun iç yüzeyi üzerine çarpan partiküllerin erozyon aşındırıcı etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 2. Erozyon deneyi parametreleri

Aşındırıcı	Alümina (Al ₂ O ₃)
Aşındırıcı boyutu	600 µm
Partikül miktarı	2 kg
Partikül debisi	95 g/s
Partikül çarpma açıları	30°/45°/60°
Partikül çarpma hızları	23/28/34/53 m/s
Nozul-Deney numunesi arası mesafe	10 mm
Nozul çapı	6 mm

Şekil 3’de şematik olarak gösterildiği gibi yaklaşık 600 µm ortalama boyutundaki alümina aşındırıcı partiküller 23, 28, 34 ve 53 m/s çarpma hızlarında ve 30°, 45° ve 60° çarpma açılarında boru içerisine etki ettirilmiştir. Deneylerde kullanılan partikül hızlarının belirlenmesinde çift disk metodu kullanılmış ve basınçlandırılmış partikül tankının basınç değerinin 1, 1.5, 2 ve 3 bar olarak ayarlandığında karşılık gelen partikül hızı (m/s) değerleri Çizelge 2’de sunulmuştur.

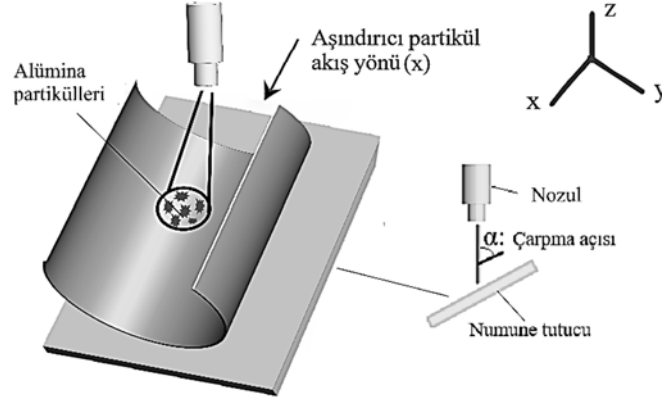


Şekil 2. ASTM G76-95 ile uyumlu katı partikül erozyon deney seti a) şematik resim, b) deney seti fotoğrafı

Boru içi partikül akışının simüle edildiği bu çalışmada deney öncesinde ve sonrasında deney numuneleri 10⁻⁴ gr hassasiyetteki terazide tartılarak deney esnasında oluşan ağırlık kaybı (ΔW, mg) belirlenmiştir. Deneyler üçer kere tekrar edilmiştir. Tekrarlı testler sonucunda ortalama ER değerleri standart sapma çubukları ile birlikte grafiklerle

sunulmuştur. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde erozyon oranı (ER) dikkate alınmış ve ağırlık kaybının aşındırıcı partikül miktarına (Q_p,kg) oranı ile belirlenmiştir (Eşitlik 1).

$$ER = \frac{\Delta W}{Q_p} \quad (\text{mg/kg}) \quad (1)$$

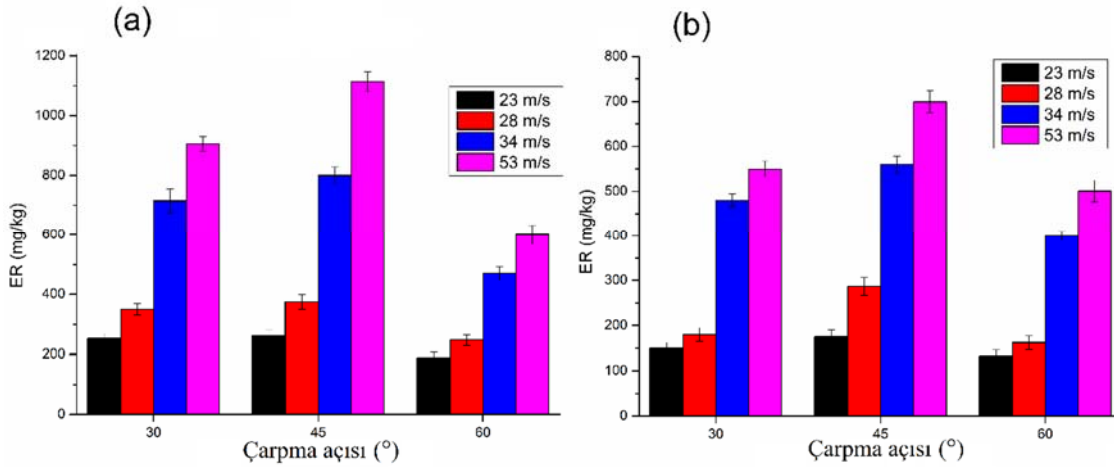


Şekil 3. Numunelerin test pozisyonunun belirlenme şekli

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Grafen nanoplaka ile kuvvetlendirilmiş ve saf bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların eroziv dayanımı katı partikül erozyon testleri ile araştırılmış olup Şekil 4’de verilen grafikte çarpma

açısı ve hız değişkenleri dikkate alınarak sonuçlar sunulmuştur. Yapılan deneysel çalışmada üç farklı çarpma açısında ve dört farklı çarpma hızında alümina partiküller boru içerisinde oluşabilecek katı partikül akışını simüle etmiş ve deney sonuçları erozyon oranı (ER) ile grafiğe yansıtılmıştır.



Şekil 4. Partikül çarpma hızı değişiminin kompozit borunun erozyon oranına etkisi a) Bazalt elyaf takviyeli kompozit boru [17], b) grafen nanoplaka ile güçlendirilmiş bazalt elyaf takviyeli kompozit boru

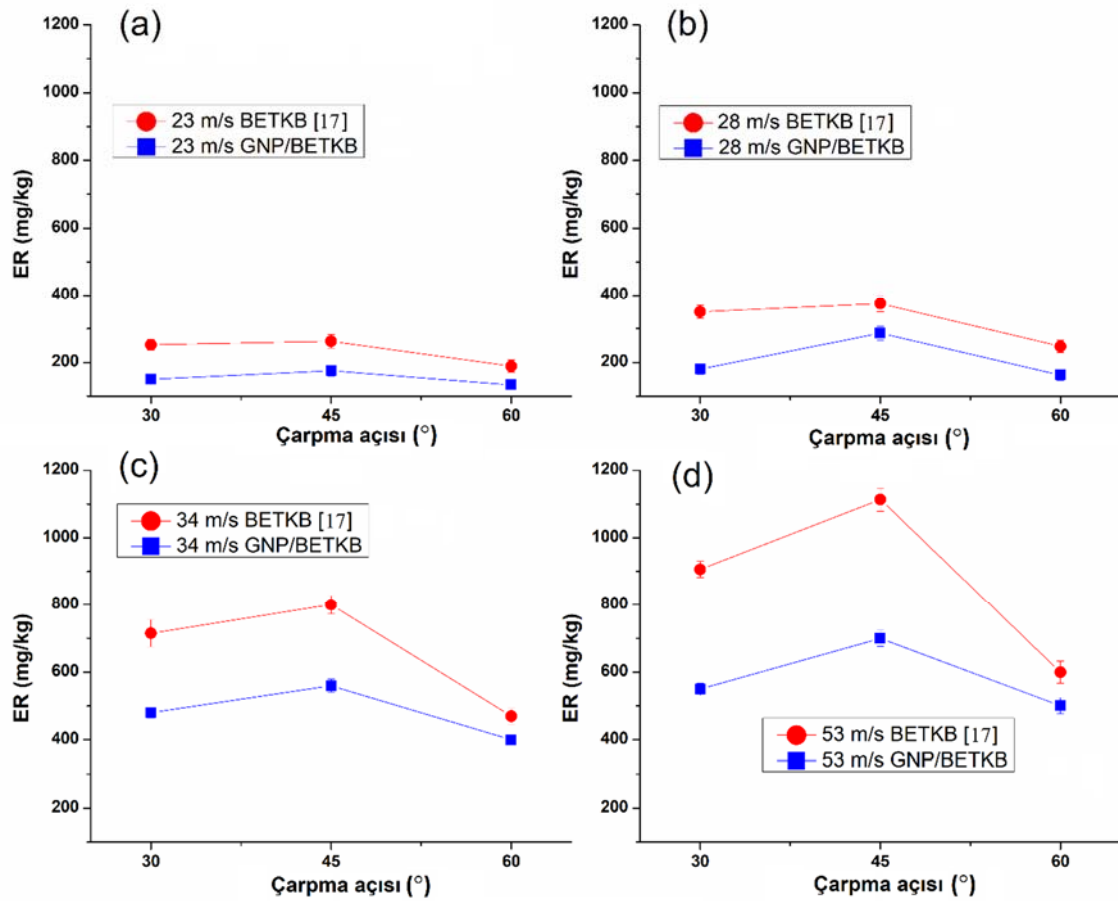
Şekil 4’de verilen grafik sonuçlarına bakıldığında tüm çarpma açılarında alümina partiküllerinin deney numunesi yüzeyine çarpma hızı arttıkça erozyon oranının arttığı görülmüştür. Bununla birlikte en yüksek aşınma oranlarına 45° çarpma açısında ulaşıldığı görülmektedir. Çarpma hızı ve çarpma açısı erozyon aşınmasına etki eden önemli test parametrelerindedir [18]. Boru iç yüzeyine

çarpma partiküllerinin çarpma hızı arttıkça çarpma enerjileride artacaktır ve yüzeyden partikül koparma oranı düşük hıza göre daha yüksek oranda olacaktır. Dolayısıyla partikül çarpma hızı arttıkça erozyon aşınması artacaktır [19-21].

Şekil 5’de bazalt elyaf takviyeli kompozit borunun erozyon aşınmasına ait erozyon oranı değerlerinin

dört farklı hız parametresi içinde grafen nanoplaka takviyeli kompozit borudan daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Grafen nanoplaka ile kuvvetlendirilen deney numunelerine ait sonuçlara bakıldığında ise grafen katkısının erozyon aşınmayı azalttığı ve erozyona karşı daha dirençli bir yapı elde edildiği görülmektedir. Bu sonucun eldesinde grafen nanoplakaların partikül ile yüzey arasında yağlayıcı bir rol üstlenerek partikülün yüzeyden kaymasını kolaylaştırması sonucunda alümina partiküllerinin daha az malzeme kopmasına sebep

olması bir etkidir. Grafen nanoplakaların kompozit yapılarda katı yağlayıcı bir rol üstlendiği, kompozit yapının sertlik ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerini geliştirdiği literatür çalışmalarında da ifade edilmektedir [22-24]. Mekanik olarak daha mukavemetli bir kompozit yüzeyden malzemenin koparılmasının daha zor olmasının yanında birde ara yüzeyde yağlayıcı bir rol alıyor olması GNP takviyeli kompozit borunun aşınma direncini iki kata yakın artırmış ve erozyon direncini yükseltmiştir



Şekil 5. Partikül çarpma açısı değişiminin kompozit borunun erozyon oranına etkisi; a) 23 m/s partikül çarpma hızında ER değişimi, b) 28 m/s partikül çarpma hızında ER değişimi, c) 34 m/s partikül çarpma hızında ER değişimi, d) 53 m/s partikül çarpma hızında ER değişimi

Bunun yanında her iki kompozit boru içinde erozyon oranı ile aşındırıcı partikülün yüzeye çarpma açısına bağlı olarak sunulan Şekil 5'deki

grafikler incelendiğinde hızdan bağımsız olarak yarı sünek bir erozyon davranışı görülmektedir. Erozyon testlerinde malzemelerde aşındırıcı

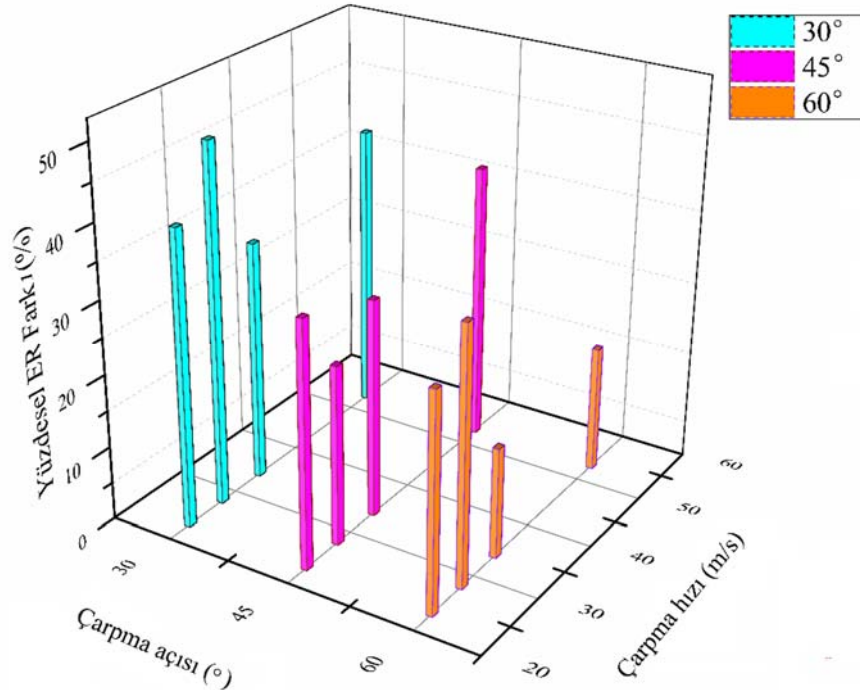
partikülün deney numunesi üzerine çarpma açısının 15°-30°, 45°-60° ve 90° aralıklarında değişimine bağlı olarak aşınma oranının en yüksek seviyelere ulaşması sonucunda sırasıyla sünek, yarı sünek ve gevrek davranış sergilediği ifade edilmektedir [25,26]. Yarı sünek erozyon davranışı görülen malzemelerde 45°-60° çarpma açısı aralığında en yüksek aşınma oranına ulaşılmaktadır. BETKB ve GNP/BETKB borularda erozyon aşınması davranışı çarpma açısının etkisi altında değerlendirildiğinde yarı sünek bir aşınma davranışı sergilediği Şekil 5’de görülmektedir. Sünek ve yarı sünek erozif davranış sergileyen malzemelerde 90° çarpma açısında daha düşük bir erozyon oranı elde edilir [25,26]. Bu sebeple yapılan çalışmada yarı sünek davranış tespit edildiği için 90° çarpma açısında erozif davranış incelenmemiştir.

Kompozit uygulamalarda yaygın kullanılan cam elyaf takviyesine göre daha mukavemetli bir yapıya ulaşan bazalt elyaf takviyeli kompozit [27,28] borularda grafen takviyesinin aşınmaya karşı direnci daha üstün bir seviyeye ulaştırdığı görülmektedir. GNP/BETKB borularda ise BETKB

borulara göre daha mukavemetli bir yapıya ulaştığı ve yorulmaya dayanımının da arttığı da belirtilmektedir [29,30].

Şekil 6’da verilen grafikte bazalt elyaf takviyeli kompozit borunun grafen nanoplaka ile güçlendirilmesi sonucunda erozyon oranlarının değişimi eşitlik 2 ile yüzdesel olarak sunulmuştur. Grafikten de görüldüğü gibi çarpma açısı ve çarpma hızı değişkenliğinde sabit bir erozyon oranı azalışı gerçekleşmemektedir. Çarpma açısındaki değişimin çarpma hızı üzerinden değerlendirildiği grafikte 30° çarpma açısında grafen nanoplaka ile güçlendirilen numunelerin en yüksek erozyon aşınma direnci geliştirme oranına sahip olduğu görülmüştür. Dört farklı çarpma hızında yapılan erozyon testleri sonucunda 30° çarpma açısında en yüksek erozyon oranı farkları elde edilmiştir. Alümina partiküllerinin 28 m/s hızında yüzeye çarptığı testlerde bu açıda %50’ye yakın bir erozyon oranı azalımı görülmüştür.

$$\text{Yüzdesel fark} = \frac{ER_{BETKB} - ER_{GNP/BETKB}}{ER_{BETKB}} * 100 \quad (2)$$



Şekil 6. BETKB ve GNP/BETKB borulara ait erozyon oranı yüzdesel değişimi

4. SONUÇLAR

Bazalt elyaf takviyeli kompozit boruda grafen nanoplaka ile güçlendirilme sonrasında erozyon direncinin partikül çarpma hızı ve çarpma açısına bağlı olarak değişiminin incelendiği bu çalışmada boru içi partikül akışı alümina partiküller kullanılarak simüle edilmiş ve her iki boruda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Grafen nanoplaka ile güçlendirilen ve güçlendirme yapılmayan bazalt elyaf takviyeli kompozit boru eksenine paralel olarak çarpan partiküllerin çarpma hızındaki artış sonucunda erozyon aşınmasının arttığı ve borunun erozyon direncinin azaldığı görülmüştür.
- Her iki kompozit boruda da 45° çarpma açısında en yüksek aşınma değerlerine ulaşılmış olup yarı sünek erozyon aşınma modeli davranışı sergiledikleri görülmüştür.
- Grafen nanoplaka ile güçlendirilen boru iç yüzeyindeki erozyon oranlarının ciddi bir oranda düştüğü ve borunun erozyon direncinin arttığı ve dolayısıyla erozyona bağlı kullanım ömrünün de uzayacağı açık bir şekilde görülmüştür.

Grafen nanoplaka ile güçlendirilen borudaki erozyon oranlarının güçlendirilmemiş boruya göre en yüksek erozyon direnci kazandığı testlerde 30° çarpma açısının etkili olduğu görülmüştür (Şekil 6).

5. KAYNAKLAR

1. Beycioğlu, A., Mıs, H., Güner E.D., Güner H., Gökçe N., 2020. A Study on Industrial-Scale Waste Utilization in Construction Material Production: The Use of Fly Ash in GRP Composite Pipe. *Materiales de Construcción*, 70(340), e234.
2. Adam, S., Ghosh, S., 2016. Application of Flexible Composite Pipe as a Cost Effective Alternative to Carbon Steel-Design Experience. In *Offshore Technology Conference Asia, OTC*.
3. Laney, P., 2002. Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas. *INEEL Field Work Proposal*, 4340-70.
4. Silverman, S.A., 1997. Spoolable Composite Pipe for Offshore Applications. *Materials Performance*, 36(1).
5. Prabhakar, M.M., Rajini, N., Ayrılmış, N., Mayandi, K., Siengchin, S., Senthilkumar, K., Karthikeyan, S., Ismail, S.O., 2019. An Overview of Burst, Buckling, Durability and Corrosion Analysis of Lightweight FRP Composite Pipes and Their Applicability. *Composite Structures*, 230, 111419.
6. Alabtah, F.G., Mahdi, E., Khraisheh, M., 2021. External Corrosion Behavior of Steel/GFRP Composite Pipes in Harsh Conditions. *Materials*, 14(21), 6501.
7. Picard, D., Hudson, W., Bouquier L., Dupupet G., Zivanovic, I., 2007. Composite Carbon Thermoplastic Tubes for Deepwater Applications. In *Offshore Technology Conference, OTC*.
8. Czél, G., Czigány, T., 2008. A Study of Water Absorption and Mechanical Properties of Glass Fiber/Polyester Composite Pipes-Effects of Specimen Geometry and Preparation. *Journal of Composite Materials*, 42(26), 2815-2827.
9. Chen, M., Weng, Y., Semple, K., Zhang, S., Jiang, X., Ma, J., Fei, B., Dai, C., 2021. Sustainability and Innovation of Bamboo Winding Composite Pipe Products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110976.
10. Zubail, A., Traidia, A., Masulli, M., Vatopoulos, K., Viellette, T., Taie, I., 2021. Carbon and Energy Footprint of Nonmetallic Composite Pipes in Onshore Oil and Gas Flowlines. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127150.
11. Okolie, O., Latto, J., Faisal N., Jamieson, H., Mukherji, A., Njuguna, J., 2023. Manufacturing Defects in Thermoplastic Composite Pipes and Their Effect on The in-Situ Performance of Thermoplastic Composite Pipes in Oil and Gas Applications. *Applied Composite Materials*, 30(1), 231-306.
12. GangaRao, H., 2017. Infrastructure Applications of Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Applied Plastics Engineering Handbook*, 675-695.
13. Imrek, H., Demet, S., 2014. Experimental Investigation of Wear Behaviors of Bronze and Carbon-Reinforced Polytetrafluoroethylene Alloy Pivot Pin Bearings. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 228(10), 1187-1194.
14. Najafigharehtapeh, A., Kaçar, R., 2016. Elektrofüzyon Kaynaklı Polietilen 80 Kalite Doğalgaz Borularının Tokluğu. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(ÖS1), 109-116.
 15. Chen, C., Liu, X., Zhou, Q.Q., Ma, Y.L., 2022. Effect of Basalt Fiber on the Thermal Conductivity and Wear Resistance of Sintered WC-Based Diamond Composites. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 105, 105829.
 16. Balaji, K., Shirvanimoghaddam, K., Rajan, G.S., Ellis, A.V., Naebe M., 2020. Surface Treatment of Basalt Fiber for Use in Automotive Composites. Materials Today Chemistry, 17, 100334.
 17. Demet, S.M., Sepetçioğlu H., Bağcı M., 2022. Filament Sarım Bazalt/Epoksi Kompozit Boruların İç Yüzey Erozif Aşınma Davranışına Partikül Hızı ve Çarpma Açısının Etkisi. Gazi University Journal of Sicene Part C: Design and Technology, 10(4), 1046-1058.
 18. Oka, Y.I., Okamura, K., Yoshida, T., 2005. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact: Part 1: Effects of Impact Parameters on a Predictive Equation. Wear, 259(1-6), 95-101.
 19. Peng, W., Cao, X., 2016. Numerical Simulation of Solid Particle Erosion in Pipe Bends for Liquid-Solid Flow. Powder Technology, 294, 266-279.
 20. Dong, M., Li, Q., Liu, H., Liu, C., Wujcik., E.K., Shao, Q., Ding, T., Mai, X., Shen, C., Guo, Z., 2018. Thermoplastic Polyurethane-Carbon Black Nanocomposite Coating: Fabrication and Solid Particle Erosion Resistance. Polymer, 158, 381-390.
 21. Demet, S.M., Sepetçioğlu, H., Bağcı, M., 2023. Solid Particle Erosion Behavior on the Outer Surface of Basalt/Epoxy Composite Pipes Produced by the Filament Winding Technique. Polymers, 15(2), 319.
 22. Alajmi, A.F., Ramulu, M., 2021. Solid Particle Erosion of Graphene-Based Coatings. Wear, 476, 203686.
 23. Sepetçioğlu, H., Demet, S.M., Bağcı, M., 2023. A Comprehensive Experimental Study of Enhanced Solid Particle Erosive Resistance on the Inner/Outer Surface of Graphene Nanoplatelets Modified Basalt/Epoxy Composite Pipe. Polymer Composites, 44, 6944-6956.
 24. Rana, A.R.K., Islam, M.A., Farhat, Z., 2020. Effect of Graphene Nanoplatelets (Gnps) Addition on Erosion-Corrosion Resistance of Electroless Ni-P Coatings. Journal of Bio-and Tribo-Corrosion, 6, 1-14.
 25. Harsha, A., Thakre, A.A., 2007. Investigation on Solid Particle Erosion Behaviour of Polyetherimide and Its Composites. Wear, 262(7-8), 807-818.
 26. Shahapurkar, K., Soudagar, M.E.M., Shahapurkar, P., Mathapati, M., Khan, T.M.Y., Mujtaba, M.A., Ali, M.D.I., Thanaiah, K., Siddiqui, I.H., Massod, A.A., 2022. Effect of Crump Rubber on the Solid Particle Erosion Response of Epoxy Composites. Journal of Applied Polymer Science, 139(2), 51470.
 27. Singha, K., 2012. A Short Review on Basalt Fiber. International Journal of Textile Science, 1(4), 19-28.
 28. Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K.Y., Park, S.J., Hui, D., 2015. A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites. Composites Part B: Engineering, 73, 166-180.
 29. Sepetçioğlu, H., Tarakçioğlu, N., 2021. Fatigue Behavior of Graphene Nanoplatelets Reinforced and Unreinforced Basalt/Epoxy Composite Pressure Vessels Subjected to Low-Velocity Impact Under Internal Pressure. Journal of Composite Materials, 55(29), 4361-4373.
 30. Rafiee, M., Hosseini Rad, S., Nitzsche, F., Laliberte, J., Labrosse, M., 2020. Significant Fatigue Life Enhancement in Multiscale Doubly-Modified Fiber/Epoxy Nanocomposites with Graphene Nanoplatelets and Reduced-Graphene Oxide. Polymers, 12(9), 2135.

Farklı Kriter Ağırlıklandırma Teknikleri ve Cocoso Yöntemi ile Katılım Bankalarının Performans Değerlendirmesi

Su DAĞLI¹ ORCID 0000-0002-2915-0593

Birsen İrem KUVVETLİ*² ORCID 0000-0002-7730-098X

¹Adapazarı Vakıf Katılım Bankası, Sakarya

²Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü,
Osmaniye

Geliş tarihi: 20.10.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: DAĞLI, S., KUVVETLİ, B.İ., (2023). Farklı Kriter Ağırlıklandırma Teknikleri ve Cocoso Yöntemi ile Katılım Bankalarının Performans Değerlendirmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 917-931.

Öz

Ülke ekonomisi açısından büyük önem taşıyan bankaların kaynaklarını etkin ve verimli kullanması, sektörde yaşanan rekabet dolayısı ile önemlidir. Bundan dolayı, bankaların performans değerlendirilmeleri gerçekleştirilmeli ve değerlendirme sonucunda da gerekli tedbirler alınmalıdır. Bu çalışmada, çok kriterli karar verme tekniklerinden Entropi, CILOS, IDOCRIW ağırlıklandırma yöntemleri ile CoCoSo yöntemi kullanılarak katılım bankalarının 2018-2022 yılları arasındaki finansal göstergelerine dayalı finansal performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Entropi yöntemi sonuçlarına göre; 2020 yılı için en yüksek ağırlığa sahip kriter Şube Sayısı iken, diğer yıllar için bu kriter Dönem Net Kârı olmuştur. CILOS yöntemi sonuçlarına göre 2018 ve 2021 yıllarında en yüksek ağırlığa sahip kriter Toplam Özkaynaklar ve diğer yıllarda Toplam Krediler olmuştur. IDOCRIW yöntemi uygulandığında ise, 2022 yılı için en yüksek ağırlığa sahip kriter Toplam Krediler iken, diğer yıllar için bu kriter Dönem Net Kârı olmuştur. Entropi, CILOS ve IDOCRIW yöntemleri sonuçları alınarak katılım bankalarının CoCoSo Yöntemi ile performans sıralamaları yapılmıştır. Kuveyt Türk Katılım Bankası, Entropi yöntemi ile elde edilen 2019 yılı sıralamaları haricindeki sonuçların tümünde, bütün yıllarda performans birincisi olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çok kriterli karar verme, Entropi, CILOS, IDOCRIW, CoCoSo, Banka performansı

Performance Evaluation of Participation Banks with Different Criteria Weighting Techniques and Cocoso Method

Abstract

It is important for banks, which are of great importance for the country's economy, to use their resources effectively and efficiently due to the competition in the sector. Therefore, performance evaluations of banks should be carried out and necessary measures should be taken as a result of the evaluation. In this study, the financial performance of participation banks was evaluated based on their financial indicators between 2018 and 2022, using the Entropy, CILOS, IDOCRIW weighting methods and the CoCoSo method, which

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Birsen İrem KUVVETLİ, birsenselamoglu@osmaniye.edu.tr

are multi-criteria decision-making techniques. According to the results of the Entropy method, while the most weighted criterion for 2020 was the Number of Branches, for other years this criterion was Net Profit for the Period. According to the results of the CILOS method, the criterion with the highest weight in 2018 and 2021 was Total Equity and Total Loans in other years. When the IDOCRIW method was applied, the criterion with the highest weight for 2022 was Total Loans, while for other years this criterion was Net Profit for the Period. By taking the Entropy, CILOS and IDOCRIW methods' results, the performance rankings of the participation banks were made using the CoCoSo Method. Kuveyt Türk Participation Bank ranked first in performance in all years, except for the 2019 rankings obtained by the Entropy method.

Keywords: Multi-criteria decision-making, Entropy, CILOS, IDOCRIW, CoCoSo, Bank performance

1. GİRİŞ

Ülke ekonomisi açısından büyük önem taşıyan bankaların kaynaklarını etkin ve verimli kullanması, sektörde yaşanan rekabet dolayısı ile önemlidir. Bundan dolayı, bankaların performans değerlendirilmelerinin gerçekleştirilmesi gerekir ve değerlendirme sonucunda da gerekli tedbirler alınmalıdır. Literatürde yer alan farklı çalışmalarda çeşitli Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılarak banka performansı değerlendirmeleri yapılmıştır. Bu çalışmada, farklı kriter ağırlık yöntemleri kullanılarak kriter ağırlıkları hesaplanmış ve sonuçlar CoCoSo Yöntemi'nde kullanılarak Türkiye'de faaliyet gösteren katılım bankalarının performans sıralamalarına dair bir çıktı elde edilmiştir. Kullanılan ağırlıklandırma yöntemleri ise sırasıyla Entropi, CILOS ve IDOCRIW'dir.

Bu çalışmada, değerlendirmeye alınan katılım bankaları Finans Katılım, Ziraat Katılım, Albaraka Türk Katılım, Vakıf Katılım, Kuveyt Türk Katılım Bankalarıdır. İlgili bankaların 2018-2022 yılları arasındaki finansal göstergelere dayalı finansal performansını analiz etmek amaçlanmıştır. Katılım bankaları faizsiz finansman prensipleri ile çalıştığı için diğer bankalardan ayrı değerlendirilebilmektedirler. Bu sebeple bu bankaların kendi içlerinde performans değerlendirilmesi yapılması amaçlanmıştır. Çalışma, farklı ağırlıklandırma yöntemi sonuçları kullanılarak CoCoSo yöntemi ile katılım bankalarının performans sıralaması yapılmış ve farklı ağırlıklandırma yöntemlerine göre performans sıralamasının değişim durumu incelenmiştir. Literatürde katılım bankalarına

yönelik bu yöntemlerle yapılan bir çalışmaya rastlanmamış olması sebebi ile literatüre katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

ÇKKV yöntemleri literatürde pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatür taraması bölümünde, bankacılık sektörü ile ilgili çalışmalarda kullanılan ÇKKV yöntemleri ele alınmıştır.

2007 yılına ait bir çalışmada, Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak en yüksek aktif büyüklüğü olan beş bankanın finansal ve finansal olmayan verileri ile performansları analiz edilmiştir [1].

Demireli [2] TOPSIS yöntemiyle kamu bankalarının performans analizini yapmıştır. Çalışmanın verileri 2001-2007 yılları arasında kapsamaktadır. Taşabat vd. PROMETHEE, TOPSIS, MAPPAC, ORESTE, WSA yöntemlerini kullanılarak 2013 yılına ait mali veriler ile 21 mevduat bankasının performans analizini yapmıştır [3].

Çetin ve Çetin [4], banka performanslarını VIKOR yöntemi ile analiz etmiştir. Çalışmalarında 13 bankaya ait 2008 yılı verileri kullanılmıştır. Dinçer ve Görener [5], 2002-2008 yılları arasındaki veriler ile Analitik Hiyerarşi Süreci ve VIKOR tekniğini kullanarak kamu, özel ve yabancı sermayeli bankaların dinamik performanslarını analiz etmişlerdir. Bir diğer çalışmalarında, 2008 yılı verileri ile TOPSIS ve VIKOR sonuçlarına göre kıyaslama yapılmıştır [6]. Tezergil [7], Sakınç ve

Açıkalin [8] da VIKOR yöntemi ile banka performans sıralamalarına yönelik çalışmalar yapmışlardır.

Bağcı ve Rençber [9] halka açık özel sermayeli bankalar ve kamu sermayeli bankaların kârlılık performans analizini PROMETHEE yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Aynı yöntemi kullanan Çalışkan ve Eren [10] çalışmalarında 2014 yılı sonunda aktif büyüklük bakımından ilk 20 bankanın performans analiz ve değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Sakarya ve Aytekin [11], Ünal ve Yüksel [12] çalışmalarında PROMETHEE yöntemini kullanmışlardır.

Yalçın ve Karaatlı, TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerini kullanarak mevduat bankası seçimine yönelik çalışma gerçekleştirmişlerdir [13]. Çağıl [14], çalışmasında sermaye kaynaklarına göre sınıflandırılan mevduat bankalarının 2006-2010 yıllarına ait verileri ile performans analizlerini ELECTRE yöntemi ile gerçekleştirmiştir.

Bulanık AHP ve bulanık MOORA yöntemleri de bankaların finansal performanslarına göre yapılan değerlendirmelerde kullanılan yöntemler olarak literatürde yer almaktadır [15,16]. Erdoğan [17], 2016-2017 yıllarına ait 3 aylık dönem bilançoları kullanarak beş katılım bankasının performans analizini Multi-MOORA yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Atukalp [18] ise Borsa İstanbul Pay Endeksi'nde bulunan 9 mevduat bankasının performans analizini 2010-2016 yılları arasındaki verileri kullanarak MOORA yöntemi ile yapmıştır.

Behdioğlu ve Özcan [19] 29 ticari bankanın sermaye yapılarını ve ölçek büyüklüklerini değerlendirmek için 1999-2005 yılları arasındaki verileri kullanmıştır, çalışmasında Veri Zarflama Analizi yöntemi kullanılmıştır. Cingi ve Tarım, mevduat pazar payı %1'in üzerinde olan 21 bankanın etkinliğini analiz etmek için ölçeğe göre sabit getiri (CCR) ve değişken getiri (BCC) yaklaşımları kullanarak 1989-1996 yılları arasındaki verileri üzerinden gerekli analizleri gerçekleştirmiştir [20]. Elmas ve arkadaşları, CCR modeli ile borsada işlem gören 12 bankanın analizini gerçekleştirmişlerdir, çalışmada 2005-2010 yılları verileri kullanmıştır [21].

Ecer, 11 özel bankanın finansal performansını Gri İlişkisel Analiz yöntemini kullanarak gerçekleştirmiştir. Değerlendirme 2008-2011 yılları arasındaki yılsonu veri ortalamaları kullanılarak ve CAMELS kriterlerine dayalı olarak yapılmıştır [22]. Güneysu ve arkadaşları, GİA yöntemini kullanarak 31 ticari bankanın performans değerlendirmesini yapmışlardır ve çalışmada kriter ağırlıklarını belirlemek için Analitik Hiyerarşi Süreci yöntemini kullanmışlardır [23]. Gündoğdu [24], Alpay ve Sakınç [25], Altan ve Candoğan [26], Girginer ve Uçkun [27] çalışmalarında Gri İlişkisel Analiz yöntemini kullanmışlardır.

Albayrak ve Erkut, çalışmalarında AHS yöntemi ile 2002 yılı verilerini kullanarak aktif büyüklük sıralamasında ilk beşte yer alan bankaların performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir [28]. Akçakanat ve arkadaşları ise aktif büyüklükleri esas alarak bankaların performanslarını Entropi ve WASPAS yöntemi ile değerlendirmişlerdir. Çalışmada 2016 yılına ait aylık verilerden yararlanılmıştır [29]. Gözkonan ve Küçükbay, (katılım bankaları ile geleneksel bankalarının performans değerlendirilmesini TOPSIS ve GİA yöntemlerini kullanarak karşılaştırmalı analiz şeklinde gerçekleştirmiştir [30]. Parmaksız ve Özdemir, çalışmalarında kamu, özel ve yabancı sermayeli 19 bankanın 2019 yılına ait mali oranlarını kullanarak COPRAS, TOPSIS, MOORA ve ELECTRE teknikleri ile performans analizini gerçekleştirmiş ve sonuçları karşılaştırmıştır [31]. Yılmaz ve Yakut ise BİST'te işlem gören 22 bankanın finansal performans analizini Entropi temelli VIKOR ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak gerçekleştirmiştir [32]. Yetiz ve Kılıç [33] VIKOR yöntemi ile, Gülsün ve Erdoğan [34] Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ve Bulanık TOPSIS yöntemleri ile, Akgül [35] Entropi, SAW, MAUT ve ARAS yöntemleri ile, Akbulut [36] Gri Entropi, PSI, ARAS yöntemleri ile bankaların performans değerlendirmesi üzerine çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Ayçin ve Orçun, şube sayısı 500 ve üzerinde olan, Türkiye'de faaliyet gösteren mevduat bankalarının performans analizini Entropi ve MAIRCA yöntemleri ile yapmışlardır [37]. Ulutaş, Entropi tabanlı EDAS yöntemini kullanarak lojistik

firmalarının performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir [38]. Işık, Entropi ve TOPSİS yöntemlerini kullanarak finansal performans ile pay senedi getirileri arasındaki ilişkiyi analiz etmiştir [39]. Akbalık ve arkadaşları, mevduat ve katılım bankalarının finansal performanslarını Entropi ve COPRAS yöntemlerini kullanarak karşılaştırmışlardır [40].

Çiftaslan ve Rençber [41], IDOCRIW ve CoCoSo yöntemlerini kullanarak sekiz bankanın performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Altıntaş [42] çalışmasında CoCoSo yöntemini kullanmıştır. Görçün ve Küçükönder, kentlerin ulaşım performanslarını değerlendirmek için BWM kriter ağırlıklandırma yöntemi ve CoCoSo yöntemi ile sıralama işlemini gerçekleştirmişlerdir [43]. Yenilmez ve Ertuğrul [44] ile Turanlı ve

arkadaşları [45], CoCoSo yöntemini kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Bankaların performanslarının değerlendirilmesi adına yapılan literatürde bulunan bazı çalışmalar ve kullanılan yöntemler Çizelge 1’de gösterilmiştir. Bu çalışmada birden fazla kriter ağırlıklandırma yöntemi ve tek bir sıralama yöntemi kullanılarak katılım bankalarının performans sıralamaları gerçekleştirilmiştir. Farklı kriter ağırlık yöntemi sonuçlarına göre katılım bankalarının performans sıralamalarında değişiklik olup olmadığına yönelik sonuçların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde, bu çalışmada kullanılan yöntemler ve kriterler ile katılım bankalarına yönelik yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple, bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çizelge 1. Alanyazın özeti

Yazar (Yıl)	Banka Türü	Yöntem	Zaman Aralığı
Chang [46]	Kamu, Özel ve Yabancı Sermayeli Bankalar	GIA	2000-2002
Kumar ve Sayani [47]	Katılım bankaları	CAMELS	2008-2014
Ural ve arkadaşları [48]	Kamu Sermayeli Bankalar	ENTROPİ WASPAS	2012-2016
Yamaltidnova [49]	Kamu, Özel ve Yabancı Sermayeli Bankalar	TOPSIS	2010-2014
Guru ve Mahalik [50]	Kamu Sermayeli Bankalar	AHP VIKOR	2015-2016
Wu ve arkadaşları [51]	Kamu, Özel ve Yabancı Sermayeli Bankalar	ÇVA VIKOR	2007-2014
Akçakanat ve arkadaşları [52]	Kamu, Özel ve Yabancı Sermayeli Bankalar	CRITIC MDL Temelli EDAS	2012-2017
Akgül [53]	Kamu Sermayeli Banka	ENTROPİ EDAS	2007-2017
Akbulut [54]	İş Bankası	EDAS CRITIC	2009-2018
Sama ve arkadaşları [55]	Özel Sermayeli Bankalar	ARAS MOORA	2000
Önal ve arkadaşları [56]	Özel ve Kamu Katılım Bankaları	Oran Analizi	2015-2020
Çiftaslan ve Rençber [41]	Kamu, Özel ve Yabancı Sermayeli Bankalar	IDOCRIW COCOSO	2010-2020
Çilek [57]	Mevduat Bankaları	CILOS MARCOS COPELAND	2017-2020

3. YÖNTEM

3.1. Alternatifler ve Kriterler

Türk bankacılık sektöründe yer alan katılım bankalarının performans sıralamalarını yapmak üzere Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri'nin kullanıldığı bu çalışmada, 2018-2022 yılları arasında ilgili verilerine tam olarak ulaşılabilen beş katılım bankası çalışmaya dâhil edilmiştir. Katılım bankalarının performans analizi için kriter belirleme sürecinde literatüre başvurulmuş ve literatürde yer alan yedi kriter çalışmada kullanılmıştır. Her alternatif için ilgili kriterlere ait verilere ulaşılmıştır. Belirlenen yedi kritere ait bilgiler bankaların ilgili web sitelerinde yayınlanan yıllık faaliyet raporları üzerinden elde edilmiştir [58]. Yayınlanan yıllık faaliyet raporları tüm kullanıcıların erişimine açıktır.

Çalışmada kullanılan kriterler şu şekilde sıralanmıştır: Toplam Aktifler, Krediler, Mevduat, Özkaynaklar, Dönem Net Kârı, Şube ve Personel Sayısı [36,40,41]. Alternatifleri ve kriterleri gösteren tablolar Çizelge 2 ve Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 2. Alternatifler

Alternatifler	Açıklama	Sembol
Ziraat Katılım	-----	B1
Vakıf Katılım	-----	B2
Finans Katılım	-----	B3
Albaraka Türk Katılım	-----	B4
Kuveyt Türk	-----	B5
Türkiye Emlak Katılım	Veri Eksikliği Nedeni ile Hariç Tutulmuştur.	

İlgili verilerine ulaşamadığı için Türkiye Emlak Katılım Bankası çalışmaya dahil edilmemiştir.

Çizelge 3. Kriterler

Kriterler	Hedef	Sembol
Toplam aktifler	Maksimum	Kriter1
Toplam krediler	Maksimum	Kriter2
Toplam mevduat	Maksimum	Kriter3
Toplam özkaynaklar	Maksimum	Kriter4
Dönem net kârı	Maksimum	Kriter5
Şube sayısı	Minimum	Kriter6
Personel sayısı	Minimum	Kriter7

Çizelge 3'te verilen kriterlerden Toplam Aktifler, Toplam Krediler, Toplam Mevduat, Toplam Özkaynaklar ve Dönem Net Karı fayda yönlü kriterler olarak belirlenirken, Şube Sayısı ve Personel Sayısı maliyet yönlü kriterler olarak belirlenmiştir.

3.2. Çalışmada Kullanılan Yöntemler

3.2.1. ENTROPİ Kriter Ağırlıklandırma Yöntemi

Kriterlere ilişkin ağırlıkların hesaplanmasında objektif ve sübjektif ağırlıklandırma yöntemleri kullanılır. Objektif yöntemlerden biri olan Entropi yönteminin ağırlıklandırma sürecinde kişisel yargı ve düşünceleri dahil etmiyor oluşu, yöntemin güçlü yönü olarak belirtilmiştir [39].

Entropi Kriter Ağırlıklandırma Yöntemi hesaplama adımları aşağıda sıralanmıştır [29]:

1. Karar Matrisi: İlk aşamada karar matrisi oluşturulur. Karar matrisinde probleme ait bütün alternatifler ve kriterler yer almalıdır (Eşitlik 1).

$$D = X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2. Standartlaştırma: Standartlaştırma işlemi Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 kullanılarak gerçekleştirilir ve standart karar matrisi oluşturulur.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}}, \min_j(x_{ij}) \neq 0 \quad (3)$$

3. Karar Matrisinin Normalizasyonu: Bu aşamada karar matrisinin normalizasyon işlemi Eşitlik 4'te gösterilen formül kullanılarak hesaplanır.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4)$$

i alternatifleri, j kriterleri, p_{ij} normalize edilmiş değerleri ifade eder.

4. Kriterlere Ait Entropi Değerlerinin Hesaplanması: Eşitlik 5 kullanılarak kriterlere ait Entropi değerleri hesaplanır.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m [p_{ij} \ln p_{ij}] \quad (5)$$

$$k = \frac{1}{\ln(m)}$$

Eşitlik 5'te E_j Entropi katsayısını, p_{ij} normalize edilmiş değerleri, k ise $1/\ln(m)$ şeklinde ifade edilen bir sabiti temsil eder.

5. d_j Belirsizliğinin Hesaplanması: d_j belirsizliği Eşitlik 6 ile hesaplanır.

$$d_j = 1 - E_j \quad (6)$$

6. Entropi Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması: Her bir kriterin Entropi kriter ağırlıkları Eşitlik 7 kullanılarak hesaplanır.

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{i=1}^m (1-E_j)}, \sum_{i=1}^m w_j = 1 \quad (7)$$

3.2.2. CILOS Kriter Ağırlıklandırma Yöntemi

Criterion Impact Loss (CILOS) Yöntemi de objektif ağırlıklandırma yöntemlerindedir [44]. En iyi olarak seçilen kritere karşı diğer kriterlerin maruz kaldığı karşılaştırmalı etki kaybının tespit edilmesinde kullanılan bir yöntemdir [57].

CILOS Kriter Ağırlıklandırma Yönteminin uygulama adımları aşağıdaki gibidir [57]:

1. Karar Matrisinin Hesaplanması:

$$A = A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Karar matrisi Eşitlik 8'de verilmiştir.

2. Maliyet Kriterlerinin Dönüşümü: : CILOS yönteminde maliyet yönlü kıstaslar fayda yönlü kıstaslara dönüştürülür. Dönüştürme işlemi Eşitlik 9 kullanılarak gerçekleştirilir.

$$a_{ij} = \frac{\min a_{ij}}{a_{ij}} \quad (9)$$

3. Normalizasyon: Dönüşüm matrisinin normalizasyon işlemi Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (10)$$

4. Kare Matris A'nın Hesaplanması: Normalizasyon işlemi sonuçları $X = \|x_{ij}\|$ ile gösterilmektedir. $R = \|r_k\|$ hesaplanması için her bir sütundaki en yüksek değere sahip $\max x_{ij}$ kıstasının da yer aldığı satır t_k 'lar birleştirilerek oluşturulur. R dizeyine ait köşegen değerleri bütün kıstaslar içerisindeki en yüksek değere sahiptir.

5. Göreceli Kayıp Matrisi P'nin Hesaplanması: $P = \|p_{kj}\|$ matrisi Eşitlik 11 kullanılarak oluşturulur.

$$p_{kj} = \frac{x_{ij} - r_{kj}}{x_{ij}} \quad (11)$$

p_{kj} , k. ölçütü en iyi ölçüt olarak seçildiğinde j. ölçütün etki kaybını göstermektedir.

6. Ağırlık Sistem Matrisi F'nin Hesaplanması: Ölçüt önem dereceleri q 'lar Eşitlik 12 kullanılarak hesaplanır. F'nin hesaplanması için Eşitlik 13 kullanılır.

$$Fq^T = 0 \quad (12)$$

$$F = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^n p_{k1} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & -\sum_{i=1}^n p_{kn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

7. Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması: Eşitlik 12 ve Eşitlik 13 kullanılarak doğrusal denklem modeli oluşturulur. q değeri Eşitlik 14'te bulunan çözümlerden oluşur.

$$\sum_{i=1}^m q_i = 1 \quad (14)$$

3.2.3. IDOCRIW Kriter Ağırlıklandırma Yöntemi

Zavadskas ve Podzenko tarafından 2016 yılında geliştirilen IDOCRIW ağırlıklandırma yöntemi, Entropi ve CILOS yöntemlerinin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. İki farklı yöntemin güçlü yönlerinin birleştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Güvenilirlik ve doğruluk açısından önemli bir yöntem olarak literatüre katılmıştır [59].

IDOCRIW kriter ağırlık yöntemi uygulama adımları aşağıdaki gibidir [59]:

1. Karar Matrisinin Oluşturulması: Karar matrisi Eşitlik 15’te görülmektedir.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

2. Entropi Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması: Eşitlik 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 kullanılarak Entropi kriter ağırlıkları hesaplanır.

3. CILOS Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması: Eşitlik 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 kullanılarak CILOS kriter ağırlıkları hesaplanır.

4. IDOCRIW ağırlıklarının (ω_j) Hesaplanması: Eşitlik 16 kullanılarak IDOCRIW ağırlıkları hesaplanır.

$$\omega_j = \frac{w_j \cdot q_j}{\sum_{i=1}^n w_j \cdot q_j} \quad (16)$$

3.2.4. CoCoSo Sıralama Yöntemi

CoCoSo yöntemi 2018 yılında Yazdani ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve literatüre eklenmiştir [60]. CoCoSo yönteminin uygulama adımları şu şekildedir [41]:

1. Karar Matrisi: Eşitlik 17 kullanılarak CoCoSo yönteminin ilk adımı olan karar matrisi oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$i=1,2, \dots, m$ tane alternatifi, $j=1,2,\dots,n$ tane kriteri ifade etmektedir.

2. Normalizasyon Matrisinin Oluşturulması: Bu aşamada fayda ve maliyet kriterlerinin normalizasyon işlemleri Eşitlik 18 ve Eşitlik 19’daki formüller ile hesaplanır.

Fayda kriteri için normalizasyon işlemi:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (18)$$

Maliyet kriteri için normalizasyon işlemi:

$$r_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (19)$$

3. S_i ve P_i Değerlerinin Hesaplanması: Alternatiflerin ağırlıklı karşılaştırılabilirlik dizisinin toplamı ve güç ağırlığının toplamı S_i ve P_i olarak ifade edilmektedir. S_i değeri Gri İlişkisel Yaklaşımı, P_i değeri ise WASPAS çarpımsal değerine göre elde edilir. S_i değeri Eşitlik 20, P_i değeri ise Eşitlik 21 ile hesaplanmaktadır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j r_{ij}) \quad (20)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (21)$$

4. Alternatiflerin Göreli Ağırlıklarının Hesaplanması: Bu aşamada 3 farklı ağırlık hesaplama işlemi yapılmaktadır. İlk olarak ağırlıklı toplam metodu ile çarpım metodunun aritmetik ortalaması Eşitlik 22 ile hesaplanır. Daha sonra ikinci adımda Eşitlik 23 kullanılarak ağırlıklı toplam ve çarpım skorları hesaplanır. Son adımda ağırlıklı çarpım ve toplam metodunun, seçilen λ ayar değeri ile dengelenmiş skorları hesaplanarak bulunur (Eşitlik 24). Bu çalışmada λ değeri 0,5 olarak kabul edilmiştir.

$$k_{ia} = \frac{S_i + P_i}{\sum_{i=1}^n (S_i + P_i)} \quad (22)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{\min_i S_i} + \frac{P_i}{\min_i P_i} \quad (23)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda(S_i) + (1-\lambda)P_i}{(\lambda \max_i S_i + (1-\lambda) \max_i P_i)} \quad (24)$$

5. Alternatiflerin Sıralanması: Eşitlik 22, 23, 24 ile hesaplanan değerlerin aritmetik ve geometrik ortalamaları toplanarak k_i değeri elde edilir. İfade Eşitlik 25’te verilmiştir. En yüksek k_i değeri ilk sırada yer alacak şekilde performans sıralamaları yapılır.

$$k_i = (k_{ia} k_{ib} k_{ic})^{1/3} + \frac{1}{3}(k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}) \quad (25)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Entropi Sonuçlarına Göre Katılım Bankalarının Performans Sıralaması

Katılım bankalarının 2018-2022 yılları arasındaki finansal göstergelerine ait kriterlerin ağırlıkları Entropi Yöntemi ile hesaplanmış, performans sıralamaları ise CoCoSo yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma Microsoft Excel kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Entropi Kriter Ağırlık Yöntemine göre ilk olarak katılım bankalarının 2018-2022 yıllarına ait karar matrisi Eşitlik 1 kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada yalnızca 2022’ye ait tablolar verilecektir. 2022 yılına ait karar matrisi Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4. Karar matrisi [61]

2022 yılı							
	Kriter1	Kriter2	Kriter3	Kriter4	Kriter5	Kriter6	Kriter7
B1	213.343.000	144.858.000	173.139.000	11.378.000	384.000	156	1.904
B2	188.086.080	119.581.642	138.619.916	18.913.593	4.735.800	165	2.384
B3	152.762.122	82.014.948	102.847.258	11.075.195	2.904.105	308	3.735
B4	146.340.106	72.625.023	112.675.797	8.118.970	1.365.496	225	2.695
B5	384.630.780	197.603.000	301.517.000	28.714.842	14.043.447	443	4.031

Uygulamanın ikinci adımında Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 kullanılarak karar matrisinde yer alan değerlerin standartlaştırma işlemi gerçekleştirilerek standart karar matrisi oluşturulmuştur. Uygulamanın üçüncü adımında Eşitlik 4 kullanılarak karar matrisinde yer alan değerler normalize edilmiştir. Kriterlerin normalize edildikten sonraki aşamada Eşitlik 5 uygulanır. Eşitlik 5’teki k değeri, beş adet katılım bankası için değerlendirildiğinden $k = 1/\ln(m)$ formülünden yararlanılarak $k = 1/\ln(5)$ olarak hesaplanmıştır.

Eşitlik 5 ile Entropi değerleri elde edildikten sonraki aşamada Eşitlik 6 ile d_{ij} belirsizliği elde edilmiştir. D_j belirsizliği her bir E_j , değerinden 1 çıkarılarak bulunur. Son aşamada ise Eşitlik 7’den yararlanarak kriter ağırlıkları hesaplanır. Kriter ağırlıkları her bir kriterin D_j değerinin tüm kriterlerin D_j değerlerinin toplamına bölünmesi ile elde edilir.

Entropi yöntemi sonucu elde edilen E_j, D_j ve W_j değerleri Çizelge 5’te gösterilmiştir.

Çizelge 5. E_j, D_j ve W_j değerleri [61]

Yıl	Değerler	Kriter1	Kriter2	Kriter3	Kriter4	Kriter5	Kriter6	Kriter7
2022	E_j	0,9552	0,9589	0,9471	0,9342	0,6970	0,9590	0,9762
	D_j	0,0448	0,0411	0,0529	0,0658	0,3030	0,0410	0,0238
	W_j	0,0782	0,0718	0,0924	0,1149	0,5293	0,0717	0,0416

Entropi Kriter Ağırlık Yöntemi sonuçları değerlendirildiğinde 2018 ve 2019 yıllarında en yüksek ağırlığa sahip kriter Dönem Net Kârı (Kriter5), en düşük ağırlığa sahip kriter ise Toplam Krediler (Kriter2) olarak bulunmuştur. 2020 yılında Şube Sayısı (Kriter6), 2021 ve 2022 yılında Dönem Net Kârı (Kriter5) en yüksek ağırlığa sahip kriterler olarak bulunmuştur. 2020 yılı Covid-19 sürecinin Türkiye’de yoğun bir şekilde yaşandığı ve kısıtlamaların arttığı bir dönem olmuştur. Bu durum 2020 yılında en yüksek ağırlığa sahip kriterin Şube Sayısı (Kriter6) olarak ortaya çıkmasına sebebiyet vermiş olabilir. 2021 ve 2022 yılında en yüksek

ağırlığa sahip kriterin Dönem Net Kârı (Kriter5) olmasında Covid-19 sürecinin olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik olarak gerçekleştirilen devlet teşvikleri, kısıtlamaların kaldırılması sonucunda ekonominin canlanması vb. nedenler sıralanabilir. 2020, 2021 yıllarında en düşük ağırlığa sahip kriter Toplam Özkaynaklar (Kriter4) olurken, 2022 yılında en düşük ağırlığa sahip kriter Personel Sayısı (Kriter7) olmuştur.

Entropi ağırlıklandırma yöntemi tamamlandıktan sonra, sıralama için CoCoSo yöntemi kullanılmış ve sonuçları Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. Entropi sonuçlarına göre CoCoSo yöntemi performans sıralamaları [61]

2022 Yılı							
	<i>S_i</i>	<i>P_i</i>	<i>k_{ia}</i>	<i>k_{ib}</i>	<i>k_{ic}</i>	<i>k_i</i>	Performans sıralaması
B1	0,2277	5,5845	0,2225	3,7304	0,8296	2,4773	3
B2	0,3879	6,1196	0,2491	5,2106	0,9288	3,1939	2
B3	0,1612	4,6615	0,1846	2,8793	0,6883	1,9660	4
B4	0,1232	2,9669	0,1183	2,0000	0,4410	1,3239	5
B5	0,8867	5,0000	0,2254	8,8818	0,8402	4,5050	1

4.2. CİLOS Sonuçlarına Göre Katılım Bankalarının Performans Sıralaması

Bu adımda kriter ağırlık değerleri CİLOS yöntemi ile hesaplanmıştır. Çizelge 4’te verilen karar matris değerleri ile Eşitlik 9 kullanılarak maliyet kriterlerinin dönüşümü hesaplanmıştır. Bu

dönüşüm maliyet bazlı kriterler olan Şube Sayısı ve Personel Sayısı kriterleri için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, Eşitlik 10 kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Normalizasyon sonrası işlem basamakları takip edilerek, CİLOS kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. 2022 yılına ait ağırlık değerleri Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. CİLOS kriter ağırlıkları [61]

Yıl	Kriter1	Kriter2	Kriter3	Kriter4	Kriter5	Kriter6	Kriter7
2022	0,1669	0,3680	0,1807	0,0879	0,0038	0,0728	0,1199

CİLOS Kriter Ağırlık Yöntemi sonuçları değerlendirildiğinde 2018 yılında en yüksek ağırlığa sahip kriterin Toplam Özkaynaklar (Kriter4), en düşük ağırlığa sahip kriterin ise Personel Sayısı (Kriter7) olduğu bulunmuştur. 2019, 2020 ve 2022 yıllarında Toplam Krediler (Kriter2) en yüksek ağırlığa sahip iken, 2021 yılında en yüksek ağırlığa sahip kriter Toplam Özkaynaklar (Kriter4) olmuştur. Pandemi sürecine dair kısıtlamaların kontrollü bir şekilde kaldırılması ve ekonominin canlanması 2021 yılında en yüksek ağırlığa sahip kriterin Toplam Özkaynaklar (Kriter4) olmasında etkili olmuş denilebilir. 2020 ve 2022 yıllarında en yüksek ağırlığa sahip kriterin

Toplam Krediler (Kriter2) olmasında 2022 yılında; bankaların kredi faiz oranlarını düşürmesi, 2020 yılında; Covid-19 sürecinde Pandemi Devlet Destek Kredisi’nin verilmesi vb. faktörlerinin sebebiyet verdiği söylenebilir. 2019 yılında en düşük ağırlığa sahip kriter Personel Sayısı (Kriter7) olurken, 2020 yılında en düşük ağırlığa sahip kriter Şube Sayısı (Kriter6), 2021 yılında Toplam Krediler (Kriter2), 2022 yılında ise Dönem Net Kârı (Kriter5) olmuştur.

CİLOS ağırlıklandırma yöntemi sonuçlandırıldıktan sonra, sıralama için CoCoSo yöntemi kullanılmış ve sonuçları Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8. CILOS sonuçlarına göre CoCoSo yöntemi performans sıralamaları [61]

2022 Yılı							
	S_t	P_t	k_{ta}	k_{tb}	k_{tc}	k_t	Performans sıralaması
B1	0,5302	5,3057	0,2212	7,0169	0,8465	3,7902	2
B2	0,4107	6,0868	0,2463	6,0009	0,9425	3,5134	3
B3	0,0964	4,5056	0,1745	2,2884	0,6675	1,6870	4
B4	0,1399	3,4969	0,1379	2,4507	0,5275	1,6015	5
B5	0,8072	5,0000	0,2201	9,8031	0,8424	4,8423	1

4.3. IDOCRIW Sonuçlarına Göre Katılım Bankalarının Performans Sıralaması

Çalışmada üçüncü ağırlık hesaplama yöntemi olarak IDOCROW yöntemi seçilmiştir. Bu

yöntemde ağırlıklar Entropi ve CILOS yöntemleri ile elde edilen ağırlık değerleri dikkate alınarak hesaplanmaktadır. IDOCRIW yöntemi kullanılarak hesaplanan ağırlık değerleri Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 9. IDOCRIW Yöntemi ile hesaplanan kriter ağırlıkları [61]

Yıl	Kriter1	Kriter2	Kriter3	Kriter4	Kriter5	Kriter6	Kriter7
2022	0,1663	0,3368	0,2127	0,1287	0,0254	0,0665	0,0636

IDOCRIW Kriter Ağırlık Yöntemi (ω_j) sonuçları değerlendirildiğinde 2018-2021 yıllarında en yüksek ağırlığa sahip kriterin Dönem Net Kârı (Kriter5) olduğu bulunmuştur. 2022 yılında ise en yüksek ağırlığa sahip kriter Toplam Krediler (Kriter2) olmuştur. 2022 yılında en yüksek ağırlığa sahip kriterin Toplam Krediler (Kriter2) olmasında kredi faiz oranlarının düşmesi etkili olmuştur denilebilir. 2018-2021 yıllarında en yüksek ağırlığa sahip kriterin Dönem Net Kârı (Kriter5) olmasında pandemi süreci de dahil olmak üzere teşvik, plan ve ödemelerin doğru bir şekilde yönetilmiş olması

etkili olabilir. 2018 yılında en düşük ağırlığa sahip kriter Toplam Mevduat (Kriter2) olurken, 2019 yılında en düşük ağırlığa sahip kriter Personel Sayısı (Kriter7), 2020 yılında Toplam Özkaynaklar (Kriter4), 2021 yılında Toplam Krediler (Kriter2), 2022 yılında ise Dönem Net Kârı (Kriter5) olmuştur.

IDOCRIW ağırlıklandırma yöntemi sonuçlandırıldıktan sonra, sıralama için CoCoSo yöntemi kullanılmış ve sonuçları Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. IDOCRIW sonuçlarına göre CoCoSo yöntemi performans sıralamaları [61]

2022 Yılı							
	S_t	P_t	k_{ta}	k_{tb}	k_{tc}	k_t	Performans sıralaması
B1	0,4672	5,2317	0,2181	6,5507	0,8253	3,5877	2
B2	0,3832	6,0354	0,2456	5,8839	0,9295	3,4563	3
B3	0,0931	4,5367	0,1771	2,3282	0,6705	1,7101	4
B4	0,1028	3,4155	0,1346	2,1047	0,5095	1,4409	5
B5	0,8699	5,0000	0,2246	10,8097	0,8501	5,2346	1

4.4. Duyarlılık Analizi

CoCoSo analizi sonuçları farklı lambda (λ) değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde 2018-2022 yılları arasında banka performans sıralamaları farklı λ değerleri için büyük çoğunlukla değişiklik

göstermediği için λ değeri 0,5 olarak alınmıştır.

Entropi yöntemi için 2018 yılı sıralamasında λ 0,1-0,4 değerleri arasında Ziraat Katılım 3., Albaraka Türk Katılım 2. sırada yer alırken, λ 0,5-0,9 değerleri arasında Albaraka Türk katılım 3., Ziraat Katılım 2. sırada yer almıştır. Diğer bankaların sıralamasında değişim olmamıştır. Aynı yöntem

için diğer yıllarda da λ değeri değişse de sıralamada değişim gözlenmemiştir.

CILOS yöntemi için 2021 yılı sıralamasında $\lambda=0,9$ değeri için Ziraat Katılım 4., Albaraka Türk Katılım 5. diğer tüm λ değerleri için Albaraka Türk katılım 4., Ziraat Katılım 5. sırada yer almıştır. Diğer bankaların sıralamasında değişim olmamıştır. Aynı yöntem için diğer yıllarda da λ değeri değişse de sıralamada değişim gözlenmemiştir.

IDOCRIW yönteminde 2018 yılı için $\lambda=0,9$ değerinde Ziraat Katılım 3. sırada, diğer tüm değerlerde 4. sırada yer almıştır. Yine Finans katılım $\lambda=0,9$ değerinde 4. sırada yer alırken diğer λ değerlerinde 3. sırada yer almıştır. Ayrıca, 2020 yılı için $\lambda = 0,9$ değerinde Ziraat Katılım 2. sırada yer alırken, Finans Katılım 3. sırada yer almıştır, diğer tüm λ değerleri için Ziraat Katılım 3. sırada yer alırken, Finans Katılım 2. sırada yer almıştır. Ayrıca, λ 0,1-0,4 değerleri arasında Vakıf Katılım 5., Albaraka Türk Katılım 4. sırada yer alırken, λ 'nın diğer değerlerinde iki bankanın sıralaması yer değiştirmiştir.

5. SONUÇLAR

Türkiye'de faaliyet gösteren katılım bankalarının 2018-2022 yıllarına ait, belirlenen 7 kriter kapsamında performanslarının incelendiği bu çalışmada kriterlerin ağırlıklandırılmasında Entropi, CILOS ve IDOCRIW Yöntemleri kullanılmış ve performans sıralaması CoCoSo Yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Türkiye'de faaliyet gösteren Ziraat Katılım (B1), Vakıf Katılım (B2), Finans Katılım (B3), Albaraka Türk Katılım (B4) ve Kuveyt Türk Katılım (B5) bankalarına ait 2018, 2019, 2020, 2021 ve 2022 yılları için seçili kriterlere ait veriler bankalara ait web sitesinde yayınlanan faaliyet raporları üzerinden elde edilmiştir. Çalışma sonucunda farklı ağırlıklandırma yöntemleri ile CoCoSo yöntemi kullanılarak bankaların performans sıralaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Ek-1'de verilmiştir.

Kuveyt Türk Katılım Bankası (B5) ENTROPI Kriter Ağırlıklıdırma Yöntemi ile elde edilen 2019 yılı sonuçları haricinde, Entropi ve diğer kriter

ağırlıklandırma yöntemleri sonuçlarında tüm yıllarda performans birincisi olmuştur.

Ziraat Katılım Bankası (B1) ENTROPI Kriter Ağırlık Yönteminde ile elde edilen sonuçlarda 2019 yılında performans birincisi olmuştur. Tüm kriter ağırlıklandırma yöntemleri için 2021 yılında Ziraat Katılım Bankası (B1) son sırada yer almıştır.

2015 yılında kurulan Vakıf Katılım Bankası (B2) bütün kriter ağırlıklandırma yöntemlerinde 2018 ve 2019 yıllarında performans sıralamasında sonuncu sırada yer almıştır. 2021 yılında ise bankanın performans sıralamasının yükseldiği gözlemlenmiştir.

2018-2020 yılları arasında performans sıralaması kriter ağırlıklandırma yöntemlerine göre değişiklik gösteren Finans Katılım Bankası'nın (B3) performans sıralaması 2021 ve 2022 yıllarında tüm kriter ağırlıklandırma yöntemlerinde aynı çıkmış olup, 2021 yılında performans sıralamasında 3. sırada yer almış, 2022 yılında 4. sıraya gerilemiştir.

Albaraka Türk Katılım Bankası (B4) 2018 ve 2020 yıllarında tüm kriter ağırlıklandırma yöntemlerinde farklı sıralamalarda yer almıştır. 2019 ve 2021 yıllarında tüm kriter ağırlıklandırma yöntemlerinde 4. sırada yer almış, 2022 yılında 5. sıraya gerilemiştir.

2021 yılı bütün kriter ağırlıklandırma yöntemleri sonuçlarında Kuveyt Türk Katılım (B5) ve Vakıf Katılım Bankalarının (B2) performans puanlarında artışlar olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmadaki yaklaşım gelecek çalışmalarda farklı ÇKKV yöntemleri ile, bulanık kümeler gibi ÇKKV genişletmeleri ile ve farklı kriterlerle genişletilebilir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Su Dağlı'nın 2023 yılında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İşletme Bölümünde tamamladığı yüksek lisans tez çalışmasından türetilmiştir. Yazarlar, tez değerlendirme jürisine teşekkür eder.

7. KAYNAKLAR

1. Seçme, N., Bayrakdaroğlu, Y.A., Kahraman, C., 2009. Fuzzy Performance Evaluation in Turkish Banking Sector Using Analytic Hierarchy Process And Topsis. *Expert Systems with Applications*, 36, 11699-11709.
2. Demireli, E., 2010. Topsis Çok Kriterli Karar Verme Sistemi: Türkiye'deki Kamu Bankaları Üzerine Bir Uygulama. *Girişimcilik ve Kalkınma Dergisi*, 5(1), 101-112.
3. Taşabat, S. Erpolat, Cin, N., Şen, E.S., 2015. Farklı Ağırlıklandırma Tekniklerinin Denendiği Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Türkiye'deki Mevduat Bankalarının Mali Performanslarının Değerlendirilmesi. *Social Sciences Research Journal*, 4(2), 96-110.
4. Çetin, K., İpekçi Çetin, E., 2010. Multi-Criteria Analysis of Banks' Performances. *International Journal of Economics and Finance Studies*, 2(2), 73-78.
5. Dinçer, H., Görener, A., 2011. Analitik Hiyerarşi Süreci ve Vikor Tekniği ile Dinamik Performans Analizi: Bankacılık Sektöründe Bir Uygulama. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(19), 109-127.
6. Dinçer, H., Görener, A., 2011. Performans Değerlendirmesinde Ahp-Vikor ve Ahp-Topsis Yaklaşımları: Hizmet Sektöründe Bir Uygulama. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Sigma Dergisi*, 29, 244-260.
7. Tezgil, S., 2016. Vikor Yöntemi ile Türk Bankacılık Sektörünün Performans Analizi. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 38(1), 357-373.
8. Sakınç, İ., Açıkalm, S., 2015. Ranking of Turkish Banks According to Capital Adequacy and Profitability Ratios with the Vikor Method. *The International Journal of Business & Management*, 3(4), 329-335.
9. Bağcı, H., Rençber, Ö.F., 2014. Kamu Bankaları ve Halka Açık Özel Bankaların Promethee Yöntemi ile Kârlılıklarının Analizi. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(1), 39-47.
10. Çalışkan, E., Eren, T., 2016. Bankaların Performanslarının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemiyle Değerlendirilmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 85-107.
11. Sakarya, Ş., Aytekin, S., 2013. İMKB'de İşlem Gören Mevduat Bankalarının Performansları ile Hisse Senedi Getirileri Arasındaki İlişkinin Ölçülmesi: Promethee Çok Kriterli Karar Verme Yöntemiyle Bir Uygulama. *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, 5(2), 99-109.
12. Ünal, S., Yüksel, R., 2017. Finansal Performans ve Hisse Senedi Getirisi İlişkisi: Bist Sürdürülebilirlik Endeksindeki Bankalar Üzerine Bir İnceleme. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 17, 264-270.
13. Yalçınar, D., Karaatlı, M., 2018. Mevduat Bankası Seçimi Sürecinde Topsis ve Electre Yöntemlerinin Kullanılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(2), 401-423.
14. Çağıl, G., 2011. 2008 Küresel Kriz Sürecinde Türk Bankacılık Sektörünün Finansal Performansının Electre Yöntemi ile Analizi. *Maliye ve Finans Yazıları*, 1(93), 59-86.
15. Altunöz, U., 2017. Bankaların Finansal Performanslarının Bulanık Moora ve Bulanık Ahp Yöntemleri ile Analizi: Türk Bankaları Deneyimi. *Route Educational and Social Science Journal*, 4(4), 116-132.
16. Şişman, B., Doğan, M., 2016. Türk Bankalarının Finansal Performanslarının Bulanık Ahp ve Bulanık Moora Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 23(2), 354-371.
17. Erdoğdu, A., 2018. Katılım Bankalarının Performans Analizlerine Multimoora Yöntemi ile Bir Bakış. *Ekonomi, Yönetim ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 3(2), 99-111.
18. Atukalp, M.E., 2018. Bankaların Finansal Performansının Multi-Moora Yöntemi ile Analizi, 2018 I. Uluslararası Bankacılık Kongresi Bildiriler Kitabı, Ankara, 67-78, 891.
19. Behdioğlu, S., Özcan, G., 2009. Veri Zarflama Analizi ve Bankacılık Sektöründe Bir Uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 14(3), 301-326.
20. Cingi, S., Tarım, A., 2000. Türk Banka Sisteminde Performans Ölçümü Dea-Malmquist Tfp Endeksi Uygulaması. *Türkiye Bankalar Birliği Yayınları*, 35.

21. Elmas, B., Yakut, E., Arı, E.S., 2014. İMKB’de İşlem Gören Bankaların Etkinliklerinin Veri Zarflama Analizi ile Ölçümü. Verimlilik Dergisi, 4, 67-81.
22. Ecer, F., 2013. Türkiye’deki Özel Bankaların Finansal Performanslarının Karşılaştırılması: 2008-2011 Dönemi. AİBÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 13(2), 171-189.
23. Güneysu, Y., Er, B., Ar, İ.M., 2015. Türkiye’deki Ticari Bankaların Performanslarının AHS ve GİA Yöntemleri ile İncelenmesi. KTU Sbe Sos. Bil. Dergisi, 9, 71-93.
24. Gündoğdu, A., 2018. Türkiye’de Katılım Bankalarının Finansal Performansının Gri İlişki Analizi ile Ölçülmesi. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, 17. ÜİK Özel Sayısı, 201-214.
25. Alpay, M.G., Sakıncı, İ., 2017. Türk Bankacılık Sektörünün Yeniden Yapılandırma Öncesi ve Sonrası Gri İlişkisel Analiz ile Finansal Performans Analizi. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 10(2), 49-61.
26. Altan, M., Candoğan, M.A., 2014. Bankaların Finansal Performanslarının Değerlemede Geleneksel ve Gri İlişki Analizi: Katılım Bankalarında Karşılaştırmalı Bir Uygulama. Selçuk Üniversitesi, Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi, (27), 374-396.
27. Uçkun, N., Girginer, N., 2011. Türkiye’deki Kamu ve Özel Bankaların Performanslarının Gri İlişki Analizi ile İncelenmesi. Akdeniz İ.İ.B.F. Dergisi, (21), 46-66.
28. Albayrak, Y.E., Erkut, H., 2005. Banka Performans Değerlendirmede Analitik Hiyerarşi Süreç Yaklaşımı, İTÜ Dergisi, Mühendislik, 4(6), 47-58.
29. Akçakanat, Ö., Eren, H., Aksoy, E., Ömürbek, V., 2017. Bankacılık Sektöründe Entropi ve Waspas Yöntemleri ile Performans Değerlendirmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 22(2), 285-300.
30. Küçükbay, F., Gözkonan, Ü.H., 2019. Katılım Bankaları ile Geleneksel Bankaların ÇKKV Yöntemleri ile Performansının Değerlendirilmesi: Topsis ve Gri İlişkisel Analiz Yöntemleri ile Karşılaştırmalı Analiz. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, (25), 71-94.
31. Parmaksız, S., Özdemir, O., 2021. Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerinin Bankacılık Oran Analizinde Kullanılması Üzerine Bir Araştırma. Bankacılık ve Finansal Araştırmalar Dergisi, 8(2), 65-93.
32. Yılmaz Ö., Yakut E., 2021. Entropi Temelli Topsis ve Vikor Yöntemleri ile Bankacılık Sektöründe Finansal Performans Değerlendirmesi. Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 35(4), 1297-1321.
33. Yetiz, F., Kılıç, Y., 2021. Bankaların Finansal Performansının Vikor Yöntemi ile Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği. Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi (Akad), 13(24), 151-164.
34. Gülsün, B., Erdoğan, K.N., 2021. Bankacılık Sektöründe Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ve Bulanık Topsis Yöntemleri ile Finansal Performans Değerlendirmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25(1), 1-15.
35. Akgül, Y., 2019. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Türk Bankacılık Sisteminin 2010-2018 Yılları Arasındaki Performansının Analizi. Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 4(4), 567-582.
36. Akbulut, O.Y., 2020. Gri ENTROPİ Temelli Psi ve Aras ÇKKV Yöntemleriyle Türk Mevduat Bankalarının Performans Analizi. Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 5(2), 171-187.
37. Ayçin, E., Orçun, Ç., 2019. Mevduat Bankalarının Performanslarının ENTROPİ ve Mairca Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 22(52), 175-194.
38. Ulutaş, A., 2019. ENTROPİ Tabanlı Edas Yöntemi ile Lojistik Firmalarının Performans Analizi. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, 2019(23), 53-66.
39. Işık, Ö., 2019. ENTROPİ ve TOPSİS Yöntemleriyle Finansal Performans ile Pay Senedi Getirileri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. Kent Akademisi, 12(37), 200-213.
40. Akbalık, M., Yurttadur, M., Taşcı, M.Z., 2022. ENTROPİ ve COPRAS Yöntemleriyle Finansal

- Performans Analizi: Mevduat ve Katılım Bankaları Karşılaştırması. Bankacılık ve Sigortacılık Araştırmaları Dergisi, (16),13-27.
41. Çiftaslan, M.E., Rençber, Ö.F., 2022. IDOCRIW ve CoCoSo Yöntemleri ile Sistemik Önemli Bankaların Performans Analizi: Türkiye Örneği. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, (21. Uluslararası İşletmecilik Kongresi Özel Sayısı), 54-72.
42. Altıntaş, F.F., 2021. G7 Ülkelerinin Bilgi Performanslarının Analizi: COCOSO Yöntemi ile Bir Uygulama. Journal of Life Economic, 8(3), 337-347.
43. Görçün, Ö.F., Küçükönder, H., 2022. BWM ve CoCoSo Yöntemleri ile Kentlerin Ulaşım Performanslarının Karşılaştırmalı Analizi. İDEALKENT, 13(36), 824-856.
44. Yenilmez, S., Ertuğrul, E., 2022. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Bir Mermer Fabrikası İçin Kesintisiz Güç Kaynağı Seçimi. Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 14(3), 251-266.
45. Turanlı, R., Özden, Ü.H., Gerçek, D., 2023. Cocosu Yöntemi ile En İyi Yaşanabilir Avrupa Ülkeleri Başkentlerinin Sıralanması. Balkan ve Yakın Doğu Sosyal Bilimler Dergisi, 9(1), 84-95.
46. Chang, C.P., 2006. Managing Business Attributes and Performance for Commercial Banks. The Journal of American Academy of Business, 9(1), 104-109.
47. Kumar, V., Sayani, H., 2015. Application of CAMEL model on the GCC Islamic Banks: 2008-2014. Journal of Islamic Banking and Finance, 3(2), 1-14
48. Ural, M., Demireli, E., Güler Özçalık, S., 2018. Kamu Bankalarında Performans Analizi: ENTROPI ve WASPAS Yöntemleri ile Bir Uygulama. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (31), 129-141 .
49. Yamaltdinova, A., 2017. Kırgızistan Bankalarının Finansal Performanslarının TOPSIS Yöntemiyle Değerlendirilmesi. International Review of Economics and Management, 5(2), 68-87.
50. Guru, S., Mahalik, D.K., 2018. Evaluating and Ranking the Performance of Banks Using VIKOR Analysis. The IUP Journal of Bank Management, 17(3), 26-41.
51. Wu, M., Li, C., Fan, J., Wang, X., Wu, Z., 2018. Assessing the Global Productive Efficiency of Chinese Banks Using the Cross-Efficiency Interval and VIKOR. Emerging Markets Review, 34, 77-86.
52. Akçakanat, Ö., Aksoy, E., Teker, T., 2018. Critic ve Mdl Temelli Edas Yöntemi ile Tr-61 Bölgesi Bankalarının Performans Değerlendirmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 1(32), 1-24.
53. Akgül, Y., 2019. Entropi ve Edas Yöntemleri ile Ziraat Bankasının 2007-2017 Yılları Arasındaki Performansının Analiz Edilmesi. B.C. Tanrıtanır ve A. Movlyanov (Ed.), ATLAS 3. Uluslararası Sosyal Bilimler Kongresi Tam Metin Kitabı (II-Cilt) içinde (378-385). ATLAS 3. Uluslararası Sosyal Bilimler Kongresi'nde sunulan bildiri, Sivas, 28-30 Haziran. İstanbul: IKSAD Yayınevi, 435.
54. Akbulut, O.Y., 2019. CRITIC ve EDAS Yöntemleri ile İş Bankası'nın 2009-2018 Yılları Arasındaki Performansının Analizi. Ekonomi Politika ve Finans Araştırmaları Dergisi, 4(2), 249-263.
55. Sama, H.R., Kalvakolanu, S., Chinmay, C., 2021. Integration of ARAS and MOORA MCDM Techniques for Measuring the Performance of Private Sector Banks in India. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 29, 279-295.
56. Önal, S., Eraslan, S., Özdoğan, H., 2021. Türkiye'de Özel ve Kamu Katılım Bankalarının 2015-2020 Dönemindeki Karlılıklarının Oran Analizi Yöntemiyle İncelenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 11(1), 109-124.
57. Çilek, A., 2023. Piyasa Yapıcı Bankaların Performanslarının Sıralanması: CILOS, MARCOS ve COPELAND Çok Kıstaslı Karar Verme Analizi. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 54, 1-24.
58. Bankacılık Denetleme Ve Düzenleme Kurumu (2022, Aralık). Türk Bankacılık Sektörü Temel Göstergeleri. <https://www.bddk.org.tr>, Erişim tarihi: 15.06.2023

59. Demir, G., Sel, A., 2020. Çok Kriterli Karar Verme Problemlerinde Kriter Ağırlıklandırma Yöntemleri. Nobel Yayınevi, Ankara, 188.
60. Yazdani, M., Zarate, P., Zavadskas, E.K., Turskis, Z., 2018. A Combined Compromise Solution (Cocoso) Method For Multi-Criteria Decision-Making Problems. Management Decision, 57(9), 2501-2519.
61. Dağlı, S. 2023. Farklı Ağırlıklandırma Tekniklerine Dayalı CoCoSo Yöntemi ile Türkiye'deki Katılım Bankalarının Performans Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Osmaniye, 104.

Ek 1. ENTROPI, CILOS ve IDOCRIW Kriter Ağırlık Yöntemi Sonuçlarına Göre Katılım Bankalarının CoCoSo Yöntemi ile Performans Sıralamaları [61]

Ziraat Katılım Bankası (B1)					
	2018	2019	2020	2021	2022
ENTROPI	2	1	2	5	3
CILOS	4	3	3	5	2
IDOCRIW	4	2	3	5	2
Vakıf Katılım Bankası (B2)					
	2018	2019	2020	2021	2022
ENTROPI	5	5	4	2	2
CILOS	5	5	5	2	3
IDOCRIW	5	5	4	2	3
Finans Katılım Bankası (B3)					
	2018	2019	2020	2021	2022
ENTROPI	4	3	3	3	4
CILOS	3	2	2	3	4
IDOCRIW	3	3	2	3	4
Albaraka Türk Katılım Bankası (B4)					
	2018	2019	2020	2021	2022
ENTROPI	3	4	5	4	5
CILOS	2	4	4	4	5
IDOCRIW	2	4	5	4	5
Kuveyt Türk Katılım Bankası (B5)					
	2018	2019	2020	2021	2022
ENTROPI	1	2	1	1	1
CILOS	1	1	1	1	1
IDOCRIW	1	1	1	1	1

The Impact of Tempering Temperature on Retained Austenite and Mechanical Properties of 1.2842 Tool Steel

Ender GÜNERLİ¹ ORCID 0000-0002-2373-5603

Melih BAYRAMOĞLU*² ORCID 0000-0002-5152-3798

Necdet GEREN² ORCID 0000-0002-9645-0852

¹ADOCIM TITAN Cement Company SA, Türkiye

²Cukurova University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 18.09.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: GÜNERLİ, E., BAYRAMOĞLU, M., GEREN, N., (2023). The Impact of Tempering Temperature on Retained Austenite and Mechanical Properties of 1.2842 Tool Steel. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 933-938.

Abstract

This work investigates the impact of tempering temperature on the mechanical properties quenched 1.2842 (O2) cold work tool steel depending on the volume fraction of retained austenite (RA). The tempering temperature significantly influences proportion of RA and the mechanical properties. Therefore, the tempering temperature and the volume fractions of RA in through-hardened tool steels must be optimized to minimize dimensional variations and augment performance in service. In this work, the hardened samples were subjected to tempering process at different tempering temperatures and hardness, impact and tensile tests were applied to the samples. Then the results obtained from these tests were analyzed and optimum tempering temperature was defined. The findings reveal that low-temperature tempering leads to a robust stabilization of the RA phase and better mechanical properties for the steel investigated.

Keywords: Cold work tool steel, Tempering temperature, Retained austenite, Mechanical properties

Temperleme Sıcaklığının Kalıntı Östenit ve 1.2842 Takım Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkisi

Öz

Bu çalışmada, temperleme sıcaklığı ve kalıntı östenit miktarının, sertleştirilme işlemine tabi tutulmuş 1.2842 (O2) soğuk iş takım çeliğinin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sertleştirme ısıl işlemi sonrası uygulanan temperleme işlemlerinde sıcaklığı kalıntı östenit miktarını önemli derecede etkilemektedir. Bu nedenden ısıl işlemler sonrası istenilen mekanik özelliklerinin elde edilebilmesi için kalıntı östenit miktarı ve temperleme sıcaklığının optimize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, sertleştirilmiş ve farklı sıcaklıklarda temperleme işlemine tabi tutulmuş numunelerde elde edilen sertlik, tokluk, çekme dayanımı ve yüzde uzama değerlerini belirlemek için sırası ile sertlik, çentik darbe ve çekme testleri yapılmıştır. Bu testlerde elde edilen sonuçlar analiz edilerek optimum temperleme sıcaklığı

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Melih BAYRAMOĞLU, bayramog@cu.edu.tr

belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre 1.2842 soğuk iş takım çeliği için kalıntı östenit miktarının en olumlu etkisi ve en uygun mekanik özelliklerin düşük temperleme sıcaklığında olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğuk iş takım çeliği, Temperleme sıcaklığı, Kalıntı östenit, Mekanik özellikler

1. INTRODUCTION

Steels used for tooling applications are usually supplied in the annealed condition to simplify machining and other operations [1]. However, this condition of steel has a low hardness and wear resistance. Therefore, tool steels are subjected to various heat treatment processes at different conditions according to the steel type and service requirements. These processes increase the tool's service performance, contingent on the proper selection of steel and the correct application of heat treatment processes [2].

The first heat treatment process is quenching. The microstructure of tool steels obtained after the hardening process composed of martensite and austenite that does not transformed to martensite. Untransformed austenite is called Retained Austenite (RA). The mechanical properties of tool steels such as fatigue resistance and impact toughness are highly affected by the amount of RA content. Generally, an optimal amount of RA can bolster ductility and toughness, whereas an excess can impair the dimensional stability, strength, and wear resistance of steel components. Therefore, it is important to select proper heat treatment conditions for achieving optimal service life and mechanical properties [3-6].

Tempering process is applied after the quenching processes to reduce the brittleness and improve toughness of martensitic structure and to increase its ductility and toughness. The tempering conditions influences proportion of RA and the mechanical properties. Therefore, it is one of the critical step during heat treatment of tool steels. Many studies have been performed in order to determine the optimum tempering temperatures depending on the grade of steel [7-9].

This work explores the effect of tempering temperature on the mechanical properties of

quenched 1.2842 (O2) cold work tool steel depending on the amount retained austenite. The volume fraction of retained austenite obtained after the tempering process was determined by using X-ray diffraction method. [10,11]. The analysis assessed different tempering temperatures and evaluating the impacts on the mechanical properties of the 1.2842 tool steel.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

The subject of this investigation was commercially available 1.2842 cold work tool steel, a common member of high carbon steels with modest alloy additions. A breakdown of the steel's chemical make-up is found in Table 1. The cost-effective nature of this steel category, paired with its suitability for forming dies that demand hard surfaces and stability during hardening, makes it a popular choice.

Table 1. Breakdown of chemical composition of 1.2842 steel utilized in the tests (% by weight)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	P
0.90	0.25	2.00	0.40	-	-	0.10	-	0.03

2.2. Heat Treatment Procedure

The study incorporated hardening and tempering processes under the conditions detailed in Table 2, in line with the recommended technical procedures for 1.2842 steel heat treatment.

The test specimens were first stress-relieved at 400°C for 2 hours, austenitized at 820°C for a half-hour, and oil-quenched. Further stress-relieving preceded the tempering stage at 150°C to prevent cracking or warping. Subsequently, the samples were tempered in an electrical muffle furnace at

varying temperatures for 90 minutes and cooled in still air. The tempering temperatures were informed by the kinetics of diffusional phase transformation during heating from the quenched state, as detailed by Continuous Heating Transformations diagrams (CHT) [12].

Table 2. Heat treatment parameters

	Temperature (°C)	Time (h)	Medium
Stress relieving	400	2	Furnace
Hardening	820	0.5	Oil
Tempering	150	1.5	Still air
	200		
	250		
	300		
	400		

2.3. Hardness Testing

Rockwell C hardness was measured on the specimens at room temperature, with the average hardness taken from at least three readings for each tempering temperature. The average values were plotted against tempering temperatures for interpretation.

2.4. Impact Testing

V-notch test was executed at room temperature using a 300 J Charpy tester. Samples, measuring 10x10x55 mm and treated at varied temperatures, were subjected to this test.

2.5. Tensile Testing

Tests were conducted on a 100-ton capacity hydraulic load-controlled tensile testing machine, in accordance with ASTM E8M-04. This facilitated a comprehensive examination of the tensile properties of specimens conditioned under different circumstances.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Hardness

Figure 1 illustrates the average hardness and the proportion of Retained Austenite (RA) across

varying tempering temperatures. As anticipated, the maximum hardness was achieved under as-quenched conditions due to the extensive distortion in the lattice during martensite formation. The hardness of the examined samples decreased at varied rates as the tempering temperature rose to 400°C.

Within a tempering temperature of roughly 150°C, a minor decrease in hardness to 62 HRC occurred, mainly due to reduced RA content. This highlights that the combination of high dislocation density and precipitation of epsilon carbides contributed to a less significant reduction in hardness within this temperature range. An increase in tempering temperature to around 200°C led to a more pronounced reduction in hardness (from 64 to 57 HRC). The volume fraction of RA reached a local maximum at this temperature, linking the soft RA to the decline in hardness numbers.

In the tempering temperature ranges of 200°C to 250°C and 250°C to 300°C, hardness values dropped to 53 and 51 HRC, respectively. This occurred because the volume fraction of retained austenite started to gradually decline in these ranges, as corroborated by Kokosza and Pacyna [13]. Secondary hardening effects were absent in the tempering range of 150°C to 400°C, a result of the minimal carbide-forming elements in the examined steel that would typically elevate hardness at higher tempering temperatures.

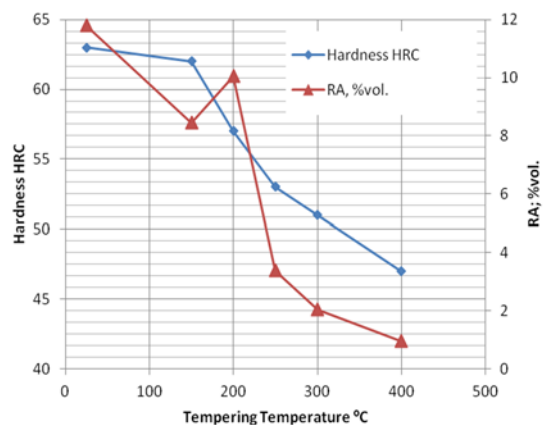


Figure 1. Hardness and RA as a function of tempering temperature

3.2. Impact Toughness

Austenite, besides being robust, exhibits greater impact strength than martensite, leading to a positive correlation between the steel's impact strength and its austenite content.

Figure 2 presents the results of impact tests performed at room temperature and RA volume as functions of tempering temperature. Increasing the temperature from 150°C to 200°C resulted in an enhancement of material impact toughness, peaking at 200°C, coinciding with a local maximum in RA volume (Figure 2). Other researchers reported similar findings, connecting the increment in impact toughness at this temperature directly to RA [13,14].

Impact toughness is decreased and reached local minimum at around 250°C, a result of reduced RA volume fraction and the influence of tempered martensite embrittlement. According to Herring and Euser [15,16], segregation of elements like phosphorus and sulphur to austenite grain boundaries causes this reduction. Further studies by other researchers [17,18] revealed that the higher amount of Mn and Si can accelerate this segregation, contributing to tempered martensite embrittlement in the temperature range of 200-250°C.

Above 250°C, tempering led to higher impact toughness due to advancements in the tempering processes and structural coarsening.

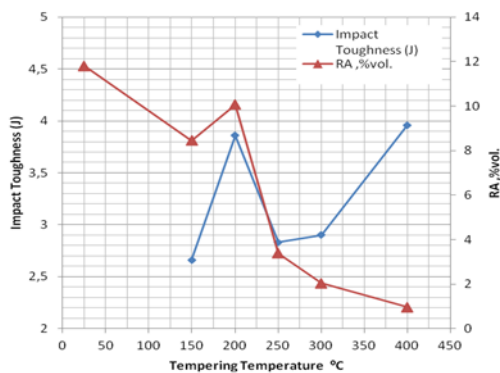


Figure 2. Impact toughness and RA as a function of tempering temperature

3.3. Tensile Properties

Following quenching, specimens were tempered for 90 minutes at temperatures ranging from 150°C to 400°C and subjected to tensile testing. The results, illustrated in Figure 3, demonstrate the steel's sensitivity to tempering temperature. Both yield and ultimate tensile strength declined with increasing tempering temperatures, a known effect of carbon diffusion in cementite, which diminishes the strength of tempered martensite while increasing its ductility.

Figure 3 shows that tempered martensite embrittlement occurred in the range of approximately 200-250°C, tensile properties were relatively unaffected. As Herring [15] noted, this phenomenon doesn't affect room-temperature tensile properties but can significantly reduce impact toughness and fatigue performance.

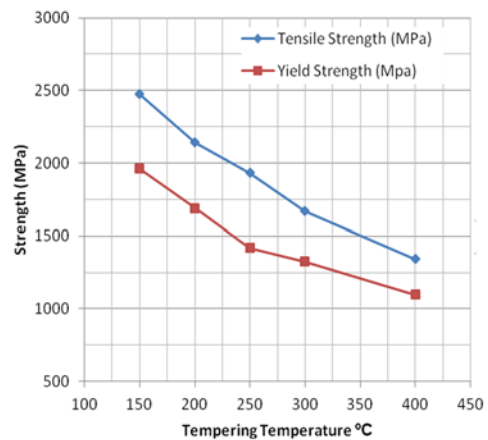


Figure 3. Ultimate tensile strength and 0.2% yield strength against the tempering temperature

Figure 4 displays the percent elongation and hardness as a function of tempering temperatures. With the increment in tempering temperature, the percent elongation increased, peaking at 400°C. There appears to be an opposite relationship between material ductility and hardness as deduced from experimental observations.

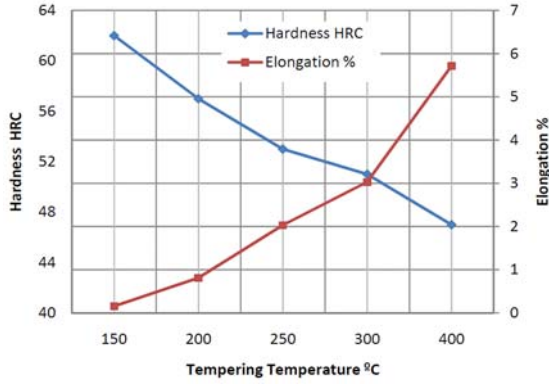


Figure 4. Hardness and percent elongation as a function of tempering temperature.

4. CONCLUSION

This study evaluated the mechanical properties of quenched and tempered 1.2842 tool steel depending on the tempering temperature and amount RA. Figure 5 summarizes the relationship between tempering temperature, retained austenite and mechanical properties of investigated steel.

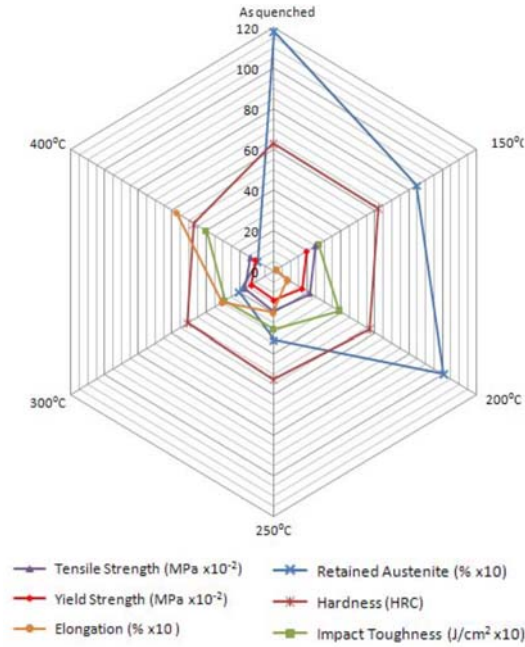


Figure 5. The relationship between tempering temperature, RA and mechanical properties of 1.2842 tool steel

Several key conclusions were drawn:

The hardness decreased gradually with increased tempering temperature, though the reduction was not uniform.

No secondary hardening effect was observed between 150°C and 400°C.

Impact toughness dropped suddenly from 200 to 250°C due to factors including RA transformation and segregation of minor elements.

Yield strength and ultimate tensile strength decreased within the range of 150-200°C, with no significant effect from tempered martensite embrittlement.

Percent elongation increased with tempering temperature, peaking at 400°C.

The results indicate that a tempering temperature range of about 180-220°C is recommended for tempering 1.2842 tool steel, considering the effects on hardness, tensile properties, and impact toughness.

This analysis offers a comprehensive understanding of how tempering temperature affects various properties of 1.2842 tool steel, providing valuable insights for industrial applications and further research.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Scientific Research Projects Coordination Unit (BAP) of Cukurova University in Adana, Turkey for the financial support provided. Project No: MMF2012YL15. This article was produced from the master thesis of the first author.

6. REFERENCES

1. Heat Treatment of Tool Steels, <https://www.thefreelibrary.com/Heat+treatment+of+tool+steels.-a066123648>, Access date: Sep. 07 2023.
2. Uchegbulam, I., Abeer, A.S., Nnorom, O., 2019. Heat Treatment of UNS T72305 Tool

- Steel: Effect on Mechanical and Microstructural Properties. *The International Journal of Engineering and Science* 8(9), 50-56.
3. Tabatabae, B.A., Ashrafizadeh, F., Hasanli, A.M., 2011. Influence of Retained Austenite on the Mechanical Properties of Low Carbon Martensitic Stainless Steel Castings. *The International Journal of Engineering and Science (ISIJ)*, 51(3), 471-475.
 4. Feng, Y., Jing, C., Lin, T., Wu, Z., Li, Z., Zhao, J., 2023. Effect of Retained Austenite on the Microstructure and Mechanical Properties of Cold-rolled Medium-manganese Q&P Steel. *Iron & Steelmaking Processes, Products and Applications*, 50(2), 167-173.
 5. Saastamoinen, A., Kaijalainen, A., Nyo, T.T., Suikkanen, P., Porter, D., Kömi, J., 2019. Direct-Quenched and Tempered Low-C High-Strength Structural Steel: The Role of Chemical Composition on Microstructure and Mechanical Properties. *Materials Science & Engineering: A*, 760, 346-358.
 6. Podgornik, B., Puš, G., Žužek, B., Leskovšek, V., Godec, M., 2017. Heat Treatment Optimization and Properties Correlation for H11-Type Hot-Work Tool Steel. *Met. Mater. Trans. A*, 49(2), 455-462.
 7. Zhang, Y., Zhan, D., Qi, X., Jiang, Z., 2019. Effect of Tempering Temperature on the Microstructure and Properties of Ultra High Strength Stainless Steel. *Journal of Materials Science and Technology*, 35(7), 1240-1249.
 8. Chen, K., Jiang, Z., Liu, F., Yu, J., Li, Y., Gong, W., Chen, C., 2019. Effect of Quenching and Tempering Temperature on Microstructure and Tensile Properties of Microalloyed Ultra-high Strength Suspension Spring Steel. *Materials Science and Engineering: A*, 766, 1-11.
 9. Bae, K., Moon, H.S., Park, Y., Jo, I., Lee, J., 2022. Influence of Tempering Temperature and Time on Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured H13 Tool Steel. *Materials (Basel)*, 15(23), 1-10.
 10. Günerli E., Bayramoglu M., Geren N., 2022. Volume Fraction of Retained Austenite in 1.2842 Tool Steel as a Function of Tempering Temperature. *European Mechanical Science*, 6(4), 263-268.
 11. Gunerli, E., 2012. Effect of Tempering Temperature on the Mechanical Properties of Hardened 1.2842 Tool Steel, MSc diss., Institute of Natural and Applied Sciences, University of Cukurova, Adana, 108.
 12. Bala, P., Pacyna, J., Krawczyk, J., 2009. The Kinetics of Phase Transformations During the Tempering HS6-5-2 Steel. *Archives of Materials Science and Engineering*, 35(2), 69-76.
 13. Kokosza, A., Pacyna, J., 2008. Effect of Retained Austenite on the Fracture Toughness of Tempered Tool Steel. *Archives of Materials Science and Engineering*, 31(2), 87-90.
 14. Zhou, S.B., Hu, F., Zhou, W., Cheng, L., Hu, C.Y., Wu, K.M., 2021. Effect of Retained Austenite on Impact Toughness and Fracture Behavior of Medium Carbon Submicron-Structured Bainitic Steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1021-1034
 15. Herring, D.H., 2006. The Embrittlement Phenomena in Hardened and Tempered Steel. *Industrial Heating*, 10, 16-18.
 16. Euser, V.K., Don, L.W., Kip, O.F., Amy, J.C., Speer, J.G., 2021. The Role of Retained Austenite in Tempered Martensite Embrittlement of 4340 and 300-M Steels Investigated Through Rapid Tempering. *Metals*, 11(9), 1-12.
 17. Spink, G.M., 1977. Reversible Temper Embrittlement of Rotor Steels. *Metallurgical Transactions A*, 8(1), 135-143.
 18. Bandyopadhyay, N., McMahon, C.J., 1983. The Micro-mechanisms of Tempered Martensite Embrittlement in 4340-type Steels. *Metall Trans A*, 14, 1313-1325.

Bulut Bilişim Sanal Sunucu Ürün Seçiminde Çok Kriterli Bir Karar Destek Modeli

Onur KOŞAR*¹ ORCID 0000-0003-4716-374X

Mehmet ATAĞ² ORCID 0000-0002-4373-5192

¹Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş tarihi: 16.08.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: KOŞAR, O., ATAĞ, M., (2023). Bulut Bilişim Sanal Sunucu Ürün Seçiminde Çok Kriterli Bir Karar Destek Modeli. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 939-953.

Öz

Bulut bilişim sunduğu servislerin yönetim kolaylığı ile sıklıkla tercih edilen bir seçenek haline gelmiştir. Bulut Bilişim’de sunulan sanal sunucular müşterilerin ihtiyacına göre belirlenebilmektedir. Sanal sunucu seçenekleri arasından hedeflenen ürünün seçimi, seçenek sayısının fazlalığı ve bir arada değerlendirilmesi gereken kriterlerin çokluğu sebebi ile çok kriterli karar verme problemine dönüşmektedir. Bu çalışmada karar vericilerin sanal sunucu seçiminde kriter ağırlıklarının Entropi yöntemi ile belirlendiği ve seçeneklerin VIKOR yöntemi ile sıralandığı bir model önerilmiştir. Modelin etkinliği kriter ağırlıklarının uzman görüşü alınarak Analitik Hiyerarşi Süreci ile hesaplandığı durum ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen test ortamında Amazon EC2 ürün konfigürasyon sınırları arasında rastgele oluşturulan farklı müşteri talebi senaryoları uygulanmıştır. Önerilen yöntem ve kriterlerin uzman görüşü alınarak AHS ile hesaplandığı ve VIKOR ile sıralandığı yöntemlerin sonuçları karşılaştırılmış ve %81.21 oranında aynı ürünün önerildiği gözlemlenmiştir. Bulut bilişime geç problemi kapsamında modelin yeterli teknik bilgiye sahip olmayan yönetim kademesindeki karar vericiler için alternatif bir seçenek olarak değerlendirilebileceği önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bulut bilişim, Karar teorisi, Çok kriterli karar verme

A Multi-Criteria Decision Support Model for Cloud Computing Virtual Server Product Selection

Abstract

Cloud computing has become a preferred option due to the ease of management of the services it offers. Virtual servers offered in Cloud Computing can be configured according to the needs of the customers. The selection of the targeted product among the virtual servers turns into a multi-criteria decision making problem due to the large number of options and the large number of criteria that need to be evaluated together. In this study, a model is proposed in which the criteria weights are determined by Entropy method and the options are ranked by VIKOR method. The effectiveness of the model is compared with the case where the criteria weights are calculated by Analytic Hierarchy Process with expert opinion. In the

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Onur KOŞAR, onur.kosar@gazi.edu.tr

developed test environment, different customer demand scenarios randomly generated within Amazon EC2 product configuration boundaries were applied. The results of the methods where the proposed method and criteria were calculated with AHS and ranked with VIKOR by taking expert opinion were compared and it was observed that the same product was recommended 81.21% of the time. It is suggested that the model can be considered as an alternative option for decision makers at the management level who do not have sufficient technical knowledge within the scope of the cloud computing migration problem.

Keywords: Cloud computing, Decision theory, Multi criteria decision making

1. GİRİŞ

Bulut Bilişim, bilgisayar ağları üzerinden birbirine bağlı yüksek kapasiteli bilişim servislerinin kullanıcılara düşük maliyetle sunulduğu bir hizmettir [1]. Kişiler ve kuruluşlara talepleri halinde kullandıkları kadar ödeyebilecekleri ve istedikleri yerden erişebilecekleri bilişim kaynakları sunan bulut bilişim, ana yatırım bütçesi olmadan ve altyapı işletim masrafı yapılmadan yüksek kapasiteli bilişim kaynaklarına erişim sağlamaktadır [2]. Müşterilerin farklı ihtiyaçlarına göre özelleşmiş olarak sunulan servis olarak yazılım, servis olarak platform ve servis olarak altyapı ürün modelleri olan bulut bilişimde yazılım uygulamaları, geliştirme platformları ve sanal sunucu altyapıları kiralanarak kullanılabilir [3].

Bulut bilişimin sağladığı ölçeklenebilirlik, kullandığın kadar ödeme, aracısız olarak bilişim kaynaklarına erişim, güvenlik, sürdürülebilirlik özellikleri ve bilişim servislerine yapılması planlanan yatırımların öngörülebilirliği sebebi ile gün geçtikçe daha çok kuruluş kaynaklarını bulut bilişime taşımaya değerlendirmektedir [4,5]. Bilişim yöneticileri, bulut altyapılarına geçiş sonrasında geleneksel iş süreçlerinde güncelleme yapılması zorunluluğuna ve operasyonlarının ağ kesintilerinden etkilenme olasılığına rağmen bulut bilişimin piyasa koşullarına hızlı adapte olmayı düşük maliyet ile sağlaması sebebiyle altyapılarını bulut bilişime aktarma konusunda isteklidirler [6,7]. Bulut bilişimin servis olarak yazılım hizmetinde müşteriler bilgisayar ağları üzerinden ihtiyaç duydukları yazılımları kiralarak kullanabilmektedirler. Servis olarak platform hizmetinde çeşitli uygulama geliştirme araçları ve yazılımları sunulurken bulut hizmet seviyesinin altında yer alan servis olarak altyapı hizmetinde

kullanıcıların ihtiyaç duyduğu bilişim altyapıları sanallaştırılmış olarak sunulmaktadır [8-10]. Servis Olarak Altyapı (SOA) hizmeti; sanal sunucu, sanal veri depolama alanı ve sunucuların bilgisayar ağı kaynaklarını müşterilerin yerel kaynakları gibi kullanmalarına olanak sağlayan bir servis modelidir [11]. Bulut bilişim SOA servisinin temel ürünü olan sanal sunucu ürünleri arasında ihtiyaca uygun olan yapılandırmanın karar verici kriterleri değerlendirilerek önerilebilmesi, çok sayıda servis sağlayıcı olması, her servis sağlayıcının farklı sanal işlemci, bellek, disk, bant genişliği ve fiyat kombinasyonlarına sahip çok sayıda ürün seçeneği sunması sebebi ile çok kriterli karar problemine dönüşmekte ve yöneticiler için karar desteğine ihtiyaç duyulmaktadır [12,13].

Bu çalışmada sanal sunucu seçim problemi hakkında yeterli teknik bilgiye sahip olmayan yönetim seviyesindeki karar vericiler için kriter ağırlıklarının seçenekler arasındaki farklılaşma seviyesini temel alan Entropi [14] yöntemi ile hesaplandığı ve alternatiflerin VIKOR [15] yöntemi ile sıralanarak karar verici taleplerine en uygun ürünlerin bulunmasını amaçlayan bir model önerilmiştir. Modelin etkinliğinin test edilmesi için alan uzmanı en az 3 yıl tecrübeli 28 sistem ve ağ yöneticisi personelin uzman görüşüne başvurulmuştur. Alan uzmanlarının sanal işlemci, bellek, disk alanı ve bant genişliği kriterlerinin birbirine göre baskınlıklarını değerlendirmeleri amacı ile AHS[16] yönetiminde kullanılan ikili karşılaştırma matrisi kullanılmış ve uzman görüşü ile birlikte kriter ağırlıkları hesaplanmıştır.

Matlab [17] geliştirme ortamında oluşturulan test düzeneğinde Amazon EC2 [18] ürün listesinden Amazon komut satırı arayüzü servisi kullanılarak elde edilen 3339 satırlık veri setindeki her bir kriterin alt ve üst sınırları arasında rastgele

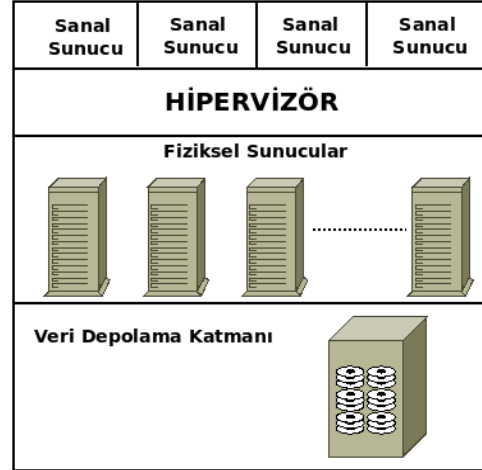
oluşturulan toplamda 161118 farklı ürün sorgusu, kriter ağırlıklarının Entropi ve AHS yöntemleri ile hesaplandığı iki modele gönderilmiş ve her iki model toplamda %81.21 benzer ürün öneriminde bulunmuştur. Elde edilen bulgular Entropi yöntemi ile kriterlerin otomatik ağırlıklandırıldığı ve VIKOR ile sıralandığı modelin sanal sunucu seçimi problemi hakkında yeterli teknik bilgiye sahip olmayan yönetim kademesindeki karar vericiler için güçlü bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

1.1. Sunucu Sanallaştırma ve Servis Olarak Altyapı

Bilişim uygulamalarının kullanıcılara sunulması için yazılımların barındırılacağı bilgisayar sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sunucu bilgisayarlar olarak adlandırılan bu donanımlar günümüzde yüksek işlemci ve bellek kapasitesine ulaşmıştır. Sunucu bilgisayarların tek bir işletim sistemi üzerinde tüm işlemci çekirdekleri ve bellek kapasitesini kullanacak şekilde yapılandırılması kaynakların verimsiz kullanımına yol açmakta, çoğunlukla da sunucunun teknik özelliklerine kıyasla istenilen performansın alınamamasına neden olmaktadır. Kaynakların verimli kullanılabilmesi adına bir sunucu bilgisayarın birden çok birbirinden izole işletim sistemi çalıştırabilmesine ve donanım kaynaklarının bu işletim sistemlerine paylaşılmasına olanak sağlayan sunucu sanallaştırma teknolojisi geliştirilmiştir [19-21]. Bu teknolojiye fiziksel sunucu bilgisayar kaynakları hipervizör [22] adı verilen sanallaştırma yazılımı ile farklı işletim sistemleri arasında paylaşılmakta ve sunucu bilgisayar üzerinde birden çok işletim sistemine sahip farklı sanal sunucu çalıştırılabilmektedir [23,24].

Veri depolama donanımları, sunucu bilgisayarlar, hipervizör ve sanal sunuculardan oluşan sanallaştırma altyapısında veri depolama için fiziksel sunucuların disk alanları ya da veri iletim ağları üzerinden erişim sağlanacak şekilde veri depolama donanımları kullanılabilir (Şekil 1). Sanallaştırma ile kullanıcılara; maliyet verimliliği, iş yükünde azalma, enerji verimliliği, uygulamaların hızlı işleme alınması ve felaket

kurtarma senaryolarının uygulanması konularında kolaylık sağlanmaktadır [27,28].



Şekil 1. Sunucu sanallaştırma katmanları [25,26]

Bulut bilişim SOA servisleri müşterilere kapasite ihtiyacı değişikliklerinde kolaylıkla ölçeklenebilecek ve kullanıldığı süre boyunca faturalandırılacak donanım ve sanal altyapılar sunmaktadır [29,30]. SOA servisinde hazır sanal sunucu çözümleri müşteriler tarafından sıklıkla tercih edilen ürünlerdir.

Çizelge 1. Örnek SOA sanal sunucu ürünleri

Üretici	Ürün	vCPU	Bellek (GB)	Disk (GB)	B.Genişliği (Gbps)
Amazon	C6id.large	2	4	118	12,5
Google	c3-highcpu-22	22	44	256	23
Alibaba	Hfg7.2xlarge	8	32	40	6

Amazon EC2, Google Cloud CE, Alibaba Cloud ECS gibi önde gelen birçok bulut servis sağlayıcı, sanal sunucu ürünleri için farklı bellek, depolama alanı ve bant genişliği özellikleri olan hazır konfigürasyonları müşterilerine sunmaktadır (Çizelge 1). Bulut servis sağlayıcıların fazlalığı, sanal sunucu ürünleri kapasite çeşitliliği, servis verilecek veri merkezi lokasyonlarının farklılığı gibi birçok kriterin seçim aşamasında bir arada değerlendirilmesi gerektiğinden seçim problemi birçok kriterli karar verme problemine dönüşmektedir [31,32]. Bulut servis sağlayıcıların birbirlerine yakın teknik özelliklere sahip olan ürünlerini farklı işletim sistemi, farklı işlemci

mimarisi ve farklı disk tiplerini ürün çeşitliliğinde kullanmaları sebebi ile sanal sunucu seçim problemi daha da karmaşık bir hal almaktadır.

1.2. Bulut Bilişim Ürün Seçiminde Karar Desteği

Bulut bilişim sanal sunucu kiralama hizmeti kullanmak isteyen ya da mevcut sanal sunucularını bulut bilişime taşımak isteyen firmalar çok sayıda servis sağlayıcı ve bu servis sağlayıcıların farklı fiyatlandırma politikaları ile işletilen farklı kapasite ve donanım mimarisi üzerinde çalıştırılan hazır sanal sunucu ürünleri arasından kendilerine uygun ürünü seçmeleri gerekmektedir. Bulut bilişime taşıyacak sanal sunucu adedi ve konfigürasyon çeşitliliğinin fazla olduğu durumlarda seçim probleminde karar desteğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde bulut bilişim servis sağlayıcı ve ürün seçimi ile ilgili karar vericileri desteklemek amacı yapılan çalışmalar öne çıkmaktadır. SOA servis sağlayıcı ve ürün seçiminde bellek, işlemci, yazma okuma hızı gibi sanal sunucu servis seviyesi performans verisinin veya hizmet kalitesi seviyesi kriterlerinin değerlendirildiği, talebe uygun ürün ve servis sağlayıcının belirlendiği çok kriterli karar verme tekniklerinin uygulandığı çalışmalar [33-44] olduğu gibi SOA ürünlerinin teknik özelliklerinin seçim kriteri olarak belirlendiği, kullanıcı talebine en uygun ürünün öneri olarak sunulduğu öneri sistemleri [45-49] de bulunmaktadır. Servis sağlayıcı seçiminde hizmet kalitesi kriterlerinden olan, müşteri memnuniyeti, kesinti süresi, sorun bildirimlerine dönüş hızı, ölçeklenebilirlik, servislerin performans seviyesi, hizmet seviyesi anlaşması ihlal oranları temel karşılaştırma kriterleri olarak önce çıkmaktadır.

Çok kriterli karar verme metotları dışında SOA katmanında sunulan fiziksel sunucu ve sanal sunucu bileşenlerinin servis sağlayıcının kendi ürün listesinde ya da farklı servis sağlayıcılar arasındaki performanslarının karşılaştırıldığı çalışmalarda [50-56], sunucuların işlem hızı, veri iletim hızı ve yazma/okuma hızı gibi performansa etki eden kriterler test edilmekte ve karar vericilerin hizmet performansının karşılaştırmalarına olanak tanınmaktadır.

Bu çalışmada sanal sunucu ürünü seçiminde nesnel kriter ağırlıklandırma metotlarından olan Entropi yöntemi çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan VIKOR yöntemine ile beraber kullanılarak teknik bilgiye sahip olmayan karar vericilerin de bulut bilişime göç problemi karşısında alternatif ürün seçimi önerisi alabilmesi ve bulut bilişime göç senaryolarını test edebilecekleri karar desteğinin sağlanması amaçlanmıştır.

2. YÖNTEM

Bulut Bilişim sanal sunucu ürün seçimi karar desteği sağlanmasında Amazon EC2 ürün konfigürasyonlarını içeren ve çevrimiçi komut satırı arayüzü servisi kullanılarak internet üzerinden anlık olarak elde edilebilen 65 farklı veri merkezi lokasyonunda, 275 farklı ürün tipinde, 1497 farklı fiyat bilgisine sahip toplam 3339 farklı sanal sunucu konfigürasyonunun yer aldığı ürün verisi kullanılmıştır. Elde edilen veri, veri ön işlemeden geçilerek veri içerisinde yer alan ve tüzel müşterilere sunulmayan kamu bulutu çözümleri, disk kapasitesinin ağ tabanlı servisler ile sunulduğu konfigürasyonlar ve fiyat bilgisinin belirtilmediği satırlar veriden ayıklanmıştır. Ürün verisinde yer alan sanal işlemci adedi, bellek miktarı, disk kapasitesi, bant genişliği ve fiyat kriterleri problemin seçim kriteri olarak belirlenmiştir. Veri setinin özet görünümü Çizelge 2’de, veri setindeki kriterlerin alt-üst sınırları ve her bir kriter için kaç farklı adette veri olduğu Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 2. EC2 ürün veri seti özet görünüm

Ürün	vCpu (Adet)	Bellek (GB)	Disk (GB)	Fiyat (\$)
c5ad.large	2	4	75	62.82
c5ad.xlarge	4	8	150	125.6
c6id.xlarge	4	8	237	147.2
c6id.metal	128	256	7600	4712

Çizelge 3. EC2 ürün veri seti sınırları

	vCpu (Adet)	Bellek (GB)	Disk (GB)	BW	Fiyat (\$)
Min.	1	2	4	1	17.89
Maks.	192	4096	336000	400	37999
Tip	15	41	81	16	1497

Önerilen model ile yeterli teknik bilgiye sahip olmayan yöneticiler için seçim kriter ağırlıkları Entropi yöntemi ile hesaplanmakta ve ürünler VIKOR çok kriterli karar verme yöntemi ile sıralanmaktadır. Yöntemin gerçek hayat koşullarındaki performansının belirlenebilmesi adına alanında uzman profesyonellerden seçim kriterlerini, sanal sunucu üzerinde çalıştırılacak herhangi bir iş yükü bilgisine sahip olmadan ağırlıklandırılması talep edilmiştir. AHS yöntemi kullanılarak oluşturulan ikili karşılaştırma matrisini doldurularak istenilen, sunucu yönetim tecrübesine sahip, sistem yöneticisi ve ağ yöneticisi pozisyonlarında en az 3 yıl tecrübe ile çalışmakta olan 28 uzmanın girdilerinin AHS yöntemi ile işlenmesi sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları VIKOR yöntemine girdi olarak kullanılmıştır. Entropi yöntemi ile yapılan kriter ağırlıklandırma ve AHS yönteminde uzman görüşü alınarak elde edilen kriter ağırlıklarının VIKOR yönteminde kullanılması sonrasında elde edilen ürün sıralamalarının benzerliği karşılaştırılmıştır.

2.1. Entropi Yöntemi Kriter Ağırlıklandırma

Rudolf Clausius tarafından termodinamikte düzensizliğin bir ölçüsü olarak tanımlanan entropi [57] Shannon'un enformasyon teorisinde [58] kesikli olasılık dağılımı ile açıklanmış ve belirsizliğin ölçüsü olarak ele alınmıştır.

Entropi kriter ağırlıklandırma teorisinin temelinde bir arada değerlendirilen seçeneklerde aynı kriter özelinde kriter değerleri arasındaki farklılık ne kadar fazla ise o kriterin seçim problemindeki önemi o kadar yüksektir fikri yatmaktadır. Bir başka deyişle bir kriterin sahip olduğu bilgi miktarı ne kadar fazla ise seçim problemindeki önemi o ölçüde fazladır [59,60]. Bununla birlikte entropi metodu, çok kriterli karar verme probleminde kullanılacak veri setindeki kriterler hakkındaki yargıların kısmi olması ya da hiç olmaması durumunda kriter ağırlıklarının belirlenmesinde objektif bir yöntem olarak kullanılabilir [61]. Yöntem herhangi bir subjektif değerlendirmeye ihtiyaç duymaması ve kriter ağırlıklarının hesaplanmasında karar matrisinin

oluşturulmasının yeterli olması sebebi ile farklı çok kriterli karar verme problemlerine uygulanabilmektedir [62].

Entropi yöntemi ile kriter ağırlıklarının hesaplanması dört aşamalı bir süreci kapsamaktadır [63,64].

Aşama 1,2: Karar matrisi düzenlenerek normalize edilir. i değeri alternatifleri, j değeri kriterleri ifade etmek üzere eşitlikte yer alan $[x_{ij}]$ i . alternatifin j . kriteri özelindeki performans değeridir.

$$K = [x_{ij}]_{m \times n} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{p=1}^n x_{pj}}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Aşama 3: Her bir kriterin entropi değeri olan e_j hesaplanır (Eşitlik 3).

$$e_j = -\ln(n)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln(r_{ij}) \quad (3)$$

Aşama 4: Entropi değerleri bulunan kriterlerin kriter ağırlıkları hesaplanır (Eşitlik 4).

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j} \quad (4)$$

2.2. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) Kriter Ağırlıklandırma

Saaty tarafından 1990 yılında önerilen analitik hiyerarşi süreci [65], çok kriterli karar verme problemlerinde kompleks karar kriterlerinin analiz edilmesine, önceliklendirilmesine ve problemin hiyerarşiler sistemine bölünmesine olanak sağlayan çok kriterli bir karar verme yöntemidir [66]. Problemin hiyerarşik yapısının tanımlanmasını temel alması ile karar vericilere kriter ve alt kriterlerin önem derecesi belirlenmesi aşamasında seçim kriterlerine odaklanılmasına olanak sağlar [67]. AHS karar vericilere birbiriyle ilişkili ve çoğunlukla birbiri ile çelişen kriterler arasında

önem derecesi belirlenmesine imkân tanıyarak karar vericinin yargısına uygun alternatiflerin belirlenmesine yardımcı olur [68,69].

Yöntem, problemin parçalara ayrılmasını ve bu parçalar arasındaki hiyerarşinin kurulmasını ilk adım olarak ele alır. Problem hiyerarşisinde en üst seviye, ulaşılmak istenen amaç, ikinci seviye kararı etkileyebilecek kriterler ve en alt seviye ise seçim alternatifleridir [70]. Karar vericilerin probleme özgü kriterleri ikili karşılaştırmaları sonucuna göre kriter ağırlıkları belirlenir. Kriter ağırlık değeri ne kadar yüksekse kriterin önemi o ölçüde yüksektir ve kriter değerlerinin ağırlıkları arasında bir baskınlık sıralaması yapılması mümkündür [71].

Yöntemin aşamaları aşağıda belirtildiği gibi özetlenebilir [72].

- Problemin tanımlanması ve hedef belirlenmesi
- Kriterlerin ve alternatiflerin belirlenmesi
- Hiyerarşik karar diyagramının oluşturulması
- Karşılaştırma matrislerinin oluşturulması
- Kriter ağırlıklarının hesaplanması
- Tutarlılık kontrolünün yapılması
- Kararın verilmesi

Kriter ağırlıklarının belirlenebilmesi için karar vericilerden kriterleri ikili olarak karşılaştırmaları istenir. Kriterlerin önem düzeyi belirlenirken Saaty'nin geliştirdiği ölçek kullanılmaktadır [73]. Önem düzeyi ölçeği Çizelge 4'de ve "K" kriter, "w" kriter ağırlığı olmak üzere örnek ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 4. AHS önem düzeyleri çizelgesi

Puan	Değer
1	Eşit önem düzeyi
3	Kısmen önemli
5	Önemli
7	Çok önemli
9	Aşırı önemli
2, 4, 6, 8	Ara değerler

Çizelge 5. AHS örnek ikili karşılaştırma matrisi

	K 1	K 2	...	K n
K 1	1	w1/w2	...	w1/wn
K 2	w2/w1	1	...	w2/wn
...			...	
K n	wn/w1	wn/w2	...	1

Karar vericiden ya da alan uzmanından elde edilen subjektif değerlendirmelere dayanarak karşılaştırma matrisi oluşturulur (Eşitlik 5).

$$K_{n \times n} = [k_{ij}]; \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

Kriter sayısı "n" olmak üzere "n×n" boyutundaki kare karşılaştırma matrisinde i=j olduğu hücreler 1 değerini alırken, diğer hücreler karar verici tarafından belirlenen önem düzeylerine göre puanlanır. Matristeki simetrik hücrelerde Eşitlik 6'daki dönüşüm uygulanmaktadır.

$$k_{ji} = \frac{1}{k_{ij}} \quad (6)$$

Karşılaştırma matrisinin her bir hücresi kendi sütun toplamına bölünerek, normalize edilir (Eşitlik 7).

$$b_{ij} = \frac{k_{ij}}{\sum k_j} \quad (7)$$

Normalize edilen kriter matrislerinin satır ortalamaları alınarak öncelik (ağırlık) matrisi elde edilir (Eşitlik 8).

$$W_i = \frac{\sum b_{ij}}{n} \quad (8)$$

Karar verici tarafından yapılan ikili karşılaştırmaların tutarlı olup olmadığı tutarlılık oranı (CR) hesaplanarak test edilir. CR değerinin elde edilebilmesi için bir dizi hesaplama yapılır. Karşılaştırma matrisi ve kriter ağırlık matrisi çarpımından λ öz vektörü elde edilir (Eşitlik 9). λ_{\max} ise λ öz vektöründeki en yüksek değerdir. CI tutarlılık indeksi ve CR tutarlılık oranı hesaplanır (Eşitlik 11,12). Rastgele gösterge değerleri (RI) Çizelge 6'da verilmiştir. Elde edilen tutarlılık oranının sıfır ya da sıfıra yakın olması karar vericilerin ikili karşılaştırma işlemlerinde tutarlı davrandıklarının bir göstergesidir. 0,10'a kadar tutarsızlık değeri kabul edilir. Bu değerden yüksek elde edilen tutarsızlık oranlarında karar vericiler karar yargılarını yeniden gözden geçirmelidir [74].

$$\lambda = W \times K \quad (9)$$

$$\lambda_{\max} = \max \lambda_i \quad (10)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (12)$$

Çizelge 6. Rastgele gösterge değerleri (RI)

n	RI	N	RI
1	0,00	6	1,24
2	0,00	7	1,32
3	0,58	8	1,41
4	0,90	9	1,45
5	1,12	10	1,49

AHS yönteminde kriter ve alternatiflerin ağırlıklarının belirlenmesi sürecinde, karar vericilerin özel yargıları etkindir [75]. Bu çalışmada AHS'nin kriter ağırlıklarının belirlenmesi aşamasına kadar olan adımları uygulanmış ve karar vericilerin kriterlerin ikili karşılaştırmalarındaki tutarlılıkları test edilmiştir. Elde edilen ağırlıklar VIKOR modeline girdi olarak kullanılmıştır.

2.3. VIKOR Yöntemi ile Bulut Bilişim Ürün Seçimi

VIKOR, karar problemlerinde ideal sonuca en yakın alternatifi belirlemeyi hedefleyen ve farklı kriterlerin bir arada değerlendirilmesine imkân tanıyan birçok kriterli karar verme yöntemidir [76]. Birbiri ile çelişen kriterlere sahip alternatiflerin sıralanmasında uzlaşık bir çözüm bulmayı hedefler. Uzlaşık çözüm çoğunluğun en yüksek grup fayda değerini ifade ederken karşıt görüşlülerin de en az pişmanlığı sağlanır. Uzlaşık çözüm değeri ideal çözüme en yakın olan çözümdür. Seçim problemindeki her alternatifin her bir kriteri için değerlendirildiği modelde alternatifler ideal alternatife uzaklıklarına göre sıralanır [77].

Yöntemin aşamaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir [78];

Aşama 1: i kriterler ve j alternatifler olmak üzere. Her bir kriter için en iyi f_j^+ ve en kötü f_j^- değerleri hesaplanır (Eşitlik 13,14).

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

j kriteri süreçte fayda olarak ele alınmışsa;

$$f_j^+ = \max_i x_{ij}, \quad f_j^- = \min_i x_{ij} \quad (13)$$

j kriteri süreçte maliyet olarak ele alınmışsa;

$$f_j^+ = \min_i x_{ij}, \quad f_j^- = \max_i x_{ij} \quad (14)$$

olarak hesaplanır.

Aşama 2: Karar matrisi elde edilen f_j^+ ve f_j^- değerleri ile normalize edilerek ve r_{ij} matrisi elde edilir (Eşitlik 15). Normalize edilen karar matrisi w_j kriter ağırlıkları ile çarğılarak ağırlıklandırılmış karar matrisine dönüştürülür (Eşitlik 16).

$$r_{ij} = \frac{f_j^+ - x_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \quad (15)$$

$$v_{ij} = r_{ij} w_j \quad (16)$$

Aşama 3: S_j, R_j, Q_j , değerleri; S_j ortalama grup değerini, S_j en kötü grup değerini, Q_j maksimum grup faydasını ifade etmek üzere hesaplanır (Eşitlik 17,18,19).

$$S_j = \sum_{i=1}^n v_{ij} \quad (17)$$

$$R_j = \max v_{ij} \quad (18)$$

$$Q_j = q \cdot \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1 - q) \cdot \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (19)$$

f_j^+ minimum S_j değerini, S^- maksimum S_j değerini, R^* minimum R_j değerini, ifade etmek üzere q değeri maksimum grup faydasını $1 - q$ değeri ise minimum karşıt görüş pişmanlığını ifade etmektedir. Maksimum grup faydasında $q > 0.5$ olması çoğunluğun olumlu tutumunu, $q = 0.5$ uyuşmayı, $q < 0.5$ ise reddetmeyi ifade etmektedir [79].

Elde edilen S_j, R_j, Q_j , değerleri küçükten büyüğe sıralanarak alternatifler arasındaki sıralama bulunur. Sonucun geçerliliğinin test edilebilmesi için kabul edilebilir avantaj ve kabul edilebilir istikrar koşulları test edilir. Kabul edilebilir avantaj

koşulu sıralamada en iyi ilk iki sırayı paylaşan seçenekler arasında belirgin bir fark olmasını kabul eder. m değerlendirilen alternatif sayısını göstermek üzere, ikinci ve birinci alternatif arasındaki fark (Eşitlik 20) deki eşitsizliği sağlamalıdır.

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{1-m} \quad (20)$$

Kabul edilebilir istikrar koşulunda ise; Q değeri sıralamada en iyi olan alternatifin S ve R değerlerinin en az birisinde de sıralamada en iyi değerde olması aranır.

2.4. Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Amazon EC2 ürün kataloğundan elde edilen ürün listesinde bulunan özelliklerden temel sanal sunucu niteliklerinden sanal cpu(vcpu), bellek, disk, bant genişliği ve fiyat kriterleri seçim kriterleri olarak belirlenmiştir. Sistem yöneticisi ve ağ yöneticisi olan ve en az 3 yıl çalışma tecrübesine sahip uzman personelden herhangi bir iş yükü bilgisine sahip olmadan bir sanal sunucu ürün seçimi yapmaları istenildiği durumda sanal işlemci, bellek, disk, bant genişliği ve fiyat kriterlerinin birbirlerine baskınlıklarını değerlendirmeleri talep edilmiştir. Bu amaçla hazırlanan ve katılımcılara iletilen çevrim içi web formundaki AHS ikili karşılaştırma matrisindeki girdiler kriter ağırlıklarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Toplam 28 uzman katılımcının girdileri ile AHS yöntemi kullanılarak seçim kriterlerinin ağırlıkları hesaplanmıştır. Elde edilen kriter ağırlıkları Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. AHS yöntemi kullanılarak elde edilen kriter ağırlıkları

vCpu	Bellek	Disk	Bant genişliği	Fiyat
0.3560	0.2741	0.1474	0.1113	0.1112

Karar verme sürecinde birden çok ve genellikle birbiri ile çelişen kriterin bir arada değerlendirilmesi gerekliliği karar sürecini zorlaştırmaktadır. Karşılaştırılacak kriter sayısının artması ile birlikte karşılaştırılacak ikili kriter sayısı artmakta ve AHS yönteminde ikili karşılaştırmalar ile baskınlık değerleri hesaplaması sonrasında elde

edilen tutarlılık oranı, yeterli tutarlılık değerini sağlamadığında karar vericinin kriterlerin ikili karşılaştırmalarını tekrar yapması beklenmektedir ve bu süreç kabul edilebilir tutarlılık oranı yakalanana kadar devam etmektedir. Sürecin karar vericilerin hatasına açık olması, karar verme için zaman kısıtının bulunduğu durumlarda kullanılamaması ve karar vericilerin karar kriterleri hakkında yeterli teknik bilgiye sahip olmaması durumunda uygulanamaması sebepleri ile karar verici yargısına gereksinim olmadan kriterlerin ağırlıklarının hesaplanabildiği çeşitli nesnel kriter ağırlıklandırma yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlerden birisi olan Entropi yöntemi ile kriter ağırlıklandırıldığı yöntem, alternatif olarak SOA ürün seçiminin kriter ağırlıklandırma aşamasında kullanılmıştır.

Önerilen yöntemin performansının değerlendirilmesi amacıyla Matlab programında bir test yazılımı geliştirilmiştir. Test ortamında Amazon EC2 veri setindeki kriterlerin alt ve üst sınırları gözetilerek farklı talep sayılarında rastgele müşteri talepleri oluşturulmuş ve uzman görüşü alınarak kriterlerin ağırlıklandırıldığı model ile Entropi yöntemi ile kriterlerin ağırlıklandırıldığı modellerin bu talepler karşısında Amazon EC2 veri setinden önerdikleri ürünlerin benzerlikleri karşılaştırılmıştır. Rastgele oluşturulan müşteri taleplerinde, istenilen kriterleri minimum düzeyde karşılayan ürün sayıları her bir talep için farklıdır. Örneğin; “vcpu >= 14, bellek >=210, disk >=6120, bant genişliği >=50 ve fiyat <=25690” olan talep için Amazon EC2 veri setinde bu talebe uygun alternatif ürün sayısı 138 iken “vcpu >= 37, bellek >=143, disk >=1769, bant genişliği >=5 ve fiyat <=15639” olan talepte sıralama yapılacak alternatif ürün sayısı 941 olmaktadır. Entropi yöntemi ile yapılacak kriter ağırlıklandırmada alternatiflerin bulunduğu veri setinin kendi iç dinamiklerinden faydalanıldığından her bir talep için ortaya çıkan farklı boyuttaki veri setinin her birisi için ayrıca kriter ağırlık hesaplaması yapılmaktadır. Oluşturulan farklı müşteri talepleri sonrasında hesaplanan Entropi kriter ağırlıklarından örnek veri Çizelge 8’de verilmiştir.

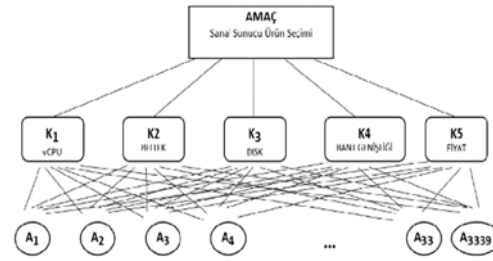
Çizelge 8. Entropi yöntemi kullanılarak elde edilen kriter ağırlıkları örneği

vCpu	Bellek	Disk	Bant genişliği	Fiyat
0.0267	0.1621	0.7113	0.0567	0.0429
0.0623	0.1182	0.6251	0.0917	0.1024
0.0172	0.2036	0.5972	0.1085	0.0732

S_E , R_E , Q_E Entropi yöntemi kullanılarak elde edilen kriter ağırlıklarının VIKOR yöntemine girdi sağlanması sonucunda elde edilen sıralamalar, S_{AHP} , R_{AHP} , Q_{AHP} AHS yöntemi kullanılarak elde edilen ağırlıkların VIKOR yöntemine girdi sonrasında elde edilen sıralama değerleri olmak üzere rastgele oluşturulan müşteri talepleri ve yöntemlerin sıralama çıktıları örnek olarak Çizelge 9’da verilmiştir. Çizelge 9’da bulunan “Boyut” alanı alt kriterlerin alt ve üst sınırları gözetilerek rastgele oluşturulan değerlerin Amazon EC2 ürün tablosundan sorgulanması sonucunda bu talebe uygun olan ürün adedini göstermektedir. Q_E değeri S_E ve R_E değerlerinden (Eşitlik 19) ile elde edilen uzlaşık çözümdür ve bu çözüm yöntemlerin önerdiği en iyi sanal sunucu alternatifini ürün sırası

olarak ele alınmıştır. Q_E değeri ile Q_{AHP} değerleri birbirine eşit olan sonuçlar, her iki yönteminde müşteri talebi karşısında ilk sırada aynı ürünü önerdiğini göstermektedir. Sanal sunucu ürün seçiminde amaç müşteri talebine en yakın ürünü müşteriye önerilmesidir.

Seçim kriterleri K_1 - vCpu, K_2 - Ram, K_3 - Disk, K_4 - Bant Genişliği, K_5 - Fiyat olarak belirlenmiş ve ürün seçimi Amazon EC2 ürün listesinde bulunan 3339 adet farklı alternatif(A) arasından yapılmıştır. Problemin karar hiyerarşisi Şekil 2’de verilmiştir

**Şekil 2.** Karar hiyerarşisi**Çizelge 9.** Yöntemlerin önerdiği ürün sıra karşılaştırması

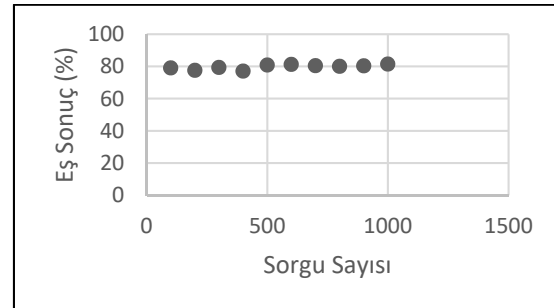
vCpu	Ram	Disk	Bant genişliği	Fiyat	Boyut	S_E	R_E	Q_E	S_{AHS}	R_{AHS}	Q_{AHS}
112	652	1020	34	31265	100	4	1	4	4	4	4
14	210	6120	50	25690	138	1	1	1	4	4	4
31	157	6631	29	37256	168	12	5	12	12	12	12
66	116	2099	49	35800	251	4	4	4	4	4	4
70	253	478	9	27181	413	154	12	154	7	7	7
37	143	1769	5	15639	941	347	347	347	347	38	347

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

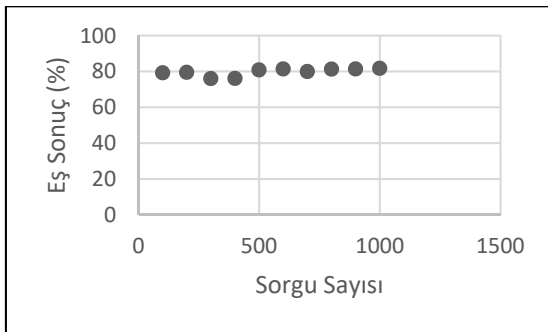
Önerilen yöntemin etkinliğinin ortaya konulabilmesi için Matlab uygulamasında geliştirilen test ortamında farklı talep sayılarında ve farklı tekrarlar da müşteri talepleri oluşturulmuş ve yöntemlerin önerdikleri ürünlerin benzerlikleri karşılaştırılmıştır.

İlk test senaryosunda; ardışık olarak gelen, kesintisiz ve yüzer talep artırılarak çalıştırılan “100, 200, 300 .. 1000 “ adetlik rastgele oluşturulan birbirinden farklı müşteri talepleri karşısında VIKOR + Entropi kriter ağırlıklandırma(Yöntem 1 - önerilen) ve VIKOR + AHS kriter ağırlıklandırma (Yöntem 2) yöntemlerinin önerdikleri ürünlerin

benzerlikleri Şekil 3’de verilmiştir. Senaryo 1’in test sonucunda modeller maksimum %81.4, minimum %79.69, ortalama %77 aynı ürün öneriminde bulunmuştur.

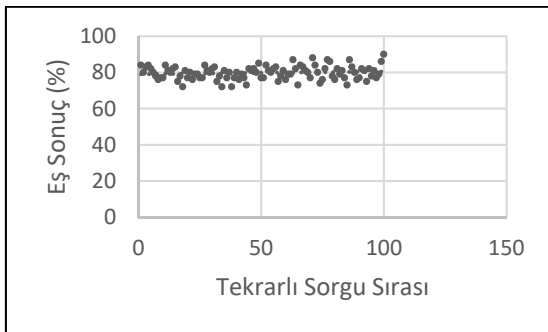
**Şekil 3.** Senaryo 1 sonuç benzerlik oranları (%)

Benzerlik sonuçlarının istikrarının test edilmesi için 100, 200, 300 ..1000 adetlik sorgular barındıran test senaryosunda her bir sorgu grubu tekrarlı şekilde 10 defa çalıştırılmış ve her bir sorgu grubundan elde edilen benzerlik oranlarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Test sonucunda maksimum %81.7, minimum %75.96 ve ortalama %79.71 oranında aynı ürün öneriminde bulunulmuştur. Senaryo 1'in 10'ar tekrarlı yapılması ile elde edilen senaryo2'de elde edilen benzerlik sonuçları Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Senaryo 2 sonuç benzerlik oranları (%)

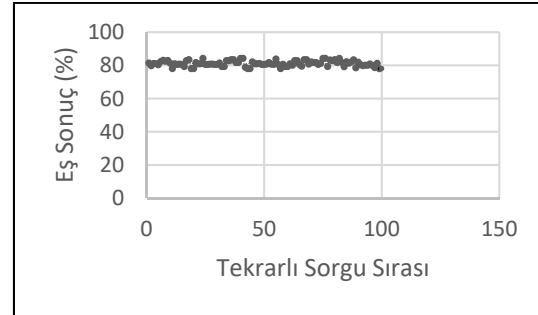
Eşit sayıda ve sürekli olarak tekrar eden müşteri taleplerindeki benzer sonuç önerim oranı 100 adet müşteri talebinin tekrarlı bir şekilde 100 defa gelmesi senaryosu üzerinden test edilmiştir. Test sonucunda maksimum %90, minimum %72, ortalama %79,75 aynı sonuç önerilmiştir. Senaryo 3'ün test edilmesi sonucu elde edilen benzerlik oranları Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Senaryo 3 sonuç benzerlik oranları (%)

Müşterilerden gelen yüksek adetli taleplerin simule edilmesi amacı ile Senaryo 4'de 1000'er adetlik

rastgele talepler tekrarlı bir şekilde 100 defa çalıştırılmıştır. Senaryo 4'ün test edilmesi sonrasında yöntemler minimum %78, maksimum %84.2 ve ortalama %81.09 aynı ürün öneriminde bulunulmuştur. Senaryo 4 test sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Senaryo 4 sonuç benzerlik oranları (%)

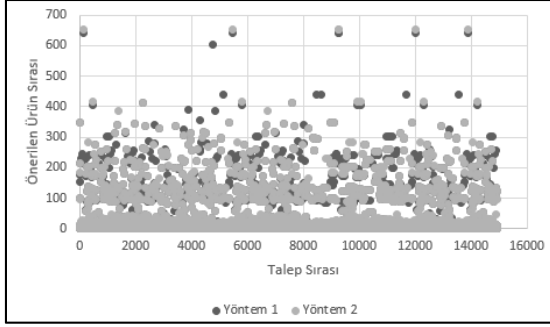
Çizelge 10. Test sonuçları karşılaştırması

Test no:	Min (%)	Maks (%)	Eş sonuç ortalaması (%)
1	79.69	81.4	77
2	75.96	81.7	79.71
3	72	90	79.75
4	78	84.2	81.09

Yapılan dört farklı test sonucu kriter ağırlıklarının AHS kullanılarak uzman görüşü ile ağırlıklandırıldığı ve VIKOR ile alternatiflerin sıralandığı yöntem ile kriter ağırlıklarının Entropi yöntemi ile hesaplandığı ve alternatiflerin VIKOR yöntemi ile sıralandığı yöntemin önerdiği ürünler arasında ortalama %79.38 aynı ürün önerisinde bulunulduğu gözlemlenmiştir. Test sonuçları her bir test için minimum, maksimum ve ortalama eş sonuç önerim oranları olmak üzere Çizelge 10'da verilmiştir.

Testler süresince Amazon EC2 ürün veri tabanından toplamda 161118 adet birbirinden farklı müşteri talebi sorgusu yapılmış ve her iki yöntemin de aynı ürünü önerdiği Q_E ve Q_{AHP} değerlerini birbirine eşit olduğu 130852 sorgu sonucu tespit edilmiştir. Toplam 161118 adet müşteri talebinde Yöntem 1 ve Yöntem 2 %81.21 oranında eş ürün öneriminde bulunulmuştur. Toplam test sürecinde her iki yöntemin oluşturulan aynı müşteri talepleri

karşısında önerdikleri ürün sıraları Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Yöntemlerin önerdiği ürün sıra karşılaştırması

4. SONUÇLAR

Bulut bilişimin SOA hizmetinde kriter sayısı ve hizmet veren bulut servis sağlayıcı çokluğu düşünüldüğünde müşterilere karar desteği sağlanması sanal sunucu ürün seçim sürecini kısaltacak ve kolaylaştırılacaktır. Çok kriterli karar verme sürecinde kriter ağırlıklandırma kriter sayısı fazlaştıkça karşılaştırılacak ikili kriter sayısı arttığından karar verici üzerinde ek yük oluşturmaktadır. Önerilen yöntem yeterli teknik bilgiye sahip olmayan yönetim seviyesindeki karar vericilere kriter ağırlıklarının nesnel olarak hesaplandığı ve karar alma sürecini kolaylaştırıldığı bir çözüm sunmaktadır. Çalışma sürecinde toplam yapılan 161118 farklı müşteri talebinde 130852 adet talepte 3339 ürünün bulunduğu Amazon EC2 sanal sunucu ürün listesinden aynı ürünün önerildiği görülmüştür. Tekrarlı test adedi ve talep sayıları farklı test senaryolarında her iki yöntem sırasıyla; %79.69, %79.71, %79.75, %81.09 ve tüm müşteri taleplerinin tamamında %81.21 aynı ürünü önermiştir. Yapılan test senaryolarındaki müşteri taleplerinin toplamında %81.21 oranında aynı ürün önerilmesi önerilen yöntemin karar vericiler için alternatif bir karar destek seçeneği olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bulut bilişime geç kararı işletmeler için stratejik bir karardır ve teknik bilgiye sahip orta seviye yöneticiler ile birlikte üst seviye yönetim kademesinin de geç sürecine dahil olması

gerekmektedir. Bulut servis sağlayıcı firmalar sanal sunucu ürünlerini müşterilerin iş yükü taleplerini ön görerek sınıflandırmakta ve buna göre ürün grupları oluşturmaktadır. Örneğin Amazon EC2 ürün ailesinde, genel amaçlı, işlem öncelikli, bellek öncelikli, donanım hızlandırıcılı, veri depolama öncelikli ve yüksek başarımlı hesaplama öncelikli olarak hazır yapılandırılmış ürün çeşitleri ile müşterilerine ürün seçiminde karar desteği sağlanmaktadır ancak bulut bilişime taşınacak çok sayıda sanal sunucusu olan ve sanal sunucuları arasında işlem yükü özelinde sınıflandırma yapmamış işletmelerin yöneticilerinin ürün seçiminde alabilecekleri karar desteği sınırlı kalmaktadır. Önerilen yöntem sayesinde sanal sunucu envanteri hakkında teknik bilgisi olmayan yönetim seviyesindeki karar vericilerin bulut bilişime geç senaryolarını test edebilmelerine imkân tanınmaktadır. Farklı servis sağlayıcı ürün verisinin de geliştirilen yöntemle eklenmesi ile birlikte talep edilen kapasite için farklı servis sağlayıcılar kullanılarak alternatif servis sağlayıcı portföyleri oluşturulması, yedeklilik sağlanması ve böylelikle servis sağlayıcı bağımlılığının ortadan kaldırılacağı seçeneklerin karar vericilere sunulması ileri çalışma konuları olarak değerlendirilmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Qian, L., Luo, Z., Du, Y., Guo, L., 2009. Cloud Computing: An Overview. 1th International Conference, CloudCom, Beijing, China, 626-631.
2. Sunyaev, A., 2020. Internet Computing. Springer International Publishing, New York, 407.
3. Rani, B.K., Rani, B.P., Babu, A.V., 2015. Cloud Computing and Inter-Clouds–Types, Topologies and Research Issues. Procedia Computer Science, 50, 24-29.
4. Cardoso, A., Moreira, F., Escudero, D.F., 2018. Information Technology Infrastructure Library and the Migration to Cloud Computing. Universal Access in the Information Society, 17(3), 503-515.
5. Ahmad, N., Naveed, Q.N., Hoda, N., 2018. Strategy and Procedures for Migration to the Cloud Computing. 5th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), Skopje, 1-5.

6. Adel, A., Reza, S., David, J., 2013. Migration to Cloud Computing-The Impact on IT Management and Security. 1th International Workshop on Cloud Computing and Information Security, 9-11 November 2013, Shanghai.
7. Sefraoui, O., Aissaoui, M., Eleuldj, M., 2014. Cloud Computing Migration and IT Resources Rationalization. International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), Marrakesh, 1164-1168.
8. Moghaddam, F.F., Rohani, M.B., Ahmadi, M., Khodadadi, T., Madadipouya, K., 2015. Cloud Computing: Vision, Architecture and Characteristics. 6th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), Shah Alam, 1-6.
9. Xiao-hui, L., Xin-fang, S., 2013. Analysis on Cloud Computing and its Security. 8th International Conference on Computer Science and Education, Colombo, 839-842.
10. Moravcik, M., Segec, P., Kontsek, M., 2018. Overview of Cloud Computing Standards. 16th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), High Tatras, 395-402.
11. Lei, Qing, Yingtao J., Mei Y., 2014. Evaluating Open IaaS Cloud Platforms Based Upon NIST Cloud Computing Reference Model. 17th International Conference on Computational Science and Engineering, Chengdu, 1909-1914.
12. Samreen, F., Elkhatab, Y., Rowe, M., Blair, G. S., 2016. Daleel: Simplifying Cloud Instance Selection Using Machine Learning. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS'2016), 25-19 April 2016, İstanbul.
13. Kritikos, K., Horn, G., 2018. IaaS Service Selection Revisited. 7th IFIP WG 2.14 European Conference (ESOCC 2018), Como, 170-184.
14. Shannon, C.E., 1948. A Mathematical Theory of Communication. The Bell System Technical Journal, 27(3), 379-423.
15. Opricovic, S., Tzeng, G.H., 2004. Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research, 156(2), 445-455.
16. Saaty, T.L., 1991. Some Mathematical Concepts of the Analytic Hierarchy Process. Behaviormetrika, 18(29), 1-9.
17. Matlab Matematiksel Hesaplama Programı, 2023. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, Erişim tarihi: 10.08.2023, Ankara.
18. Amazon EC2 Sanal Sunucu Ürün Listesi, 2023. <https://aws.amazon.com/tr/ec2/>, Erişim tarihi: 10.08.2023, Ankara
19. Ueno, H., Hasegawa, S., Hasegawa, T., 2010. Virtage: Server Virtualization with Hardware Transparency. Euro-Par Parallel Processing Workshops (HPPC'2009), 25-28 August 2009, Delft.
20. Ueno, H., Hasegawa, T., Yoshihama, K., 2011. System Performance Improvement by Server Virtualization. The World Congress on Engineering, London, 2-7.
21. Uddin, Mueen, Asadullah S., Adamu A., Imran A., 2014. Implementation of Server Virtualization to Build Energy Efficient Data Centers. Journal of Power Technologies, 94(2), 1-10.
22. Desai, A., Oza, R., Sharma, P., Patel, B., 2013. Hypervisor: A Survey on Concepts and Taxonomy. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2(3), 222-225.
23. Tanaka, T., Tarui, T., Naono, K., 2009. Investigating Suitability for Server Virtualization Using Business Application Benchmarks. 3rd International Workshop on Virtualization Technologies in Distributed Computing, 15-19 June 2009, Barcelona.
24. Lv, H., Dong, Y., Duan, J., Tian, K., 2012. Virtualization Challenges: a View from Server Consolidation Perspective. 8th ACM SIGPLAN/SIGOPS Conference on Virtual Execution Environments, London, 15-26.
25. Winarno, I., Ishida, Y., 2015. Simulating Resilient Server Using XEN Virtualization. Procedia Computer Science, 60, 1745-1752.
26. Jin, Y., Wen, Y., Chen, Q., 2012. Energy Efficiency and Server Virtualization in Data Centers: An Empirical Investigation. IEEE INFOCOM Workshops, 25-30, Orlando.
27. Rashid, A., Chaturvedi, A., 2019. Virtualization and its Role in Cloud Computing Environment. International Journal of Computer Sciences and Engineering, 7(4), 1131-1136.
28. Anand, A., Chaudhary, A., Arvindhan, M., 2021. The Need for Virtualization: When and Why Virtualization Took Over Physical Servers. 2019

- Advances in Communication and Computational Technology (ICACCT), Singapore, 1351-1359.
29. Prodan, R., Ostermann, S., 2009. A Survey and Taxonomy of Infrastructure As a Service and Web Hosting Cloud Providers. 10th IEEE/ACM International Conference on Grid Computing, Banf, 17-25.
 30. Longo, F., Ghosh, R., Naik, V. K., Trivedi, K. S., 2011. A Scalable Availability Model for Infrastructure-as-a-Service Cloud. 41st IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), Hong Kong, 335-346.
 31. Whaiduzzaman, M., Gani, A., Anuar, N.B., Shiraz, M., Haque, M.N., Haque, I.T., 2014. Cloud Service Selection Using Multi Criteria Decision Analysis. The Scientific World Journal, 1-10.
 32. Sun, L., Dong, H., Hussain, F.K., Hussain, O.K., Chang, E., 2014. Cloud Service Selection: State-of-the-Art and Future Research Directions. Journal of Network and Computer Applications, 45, 134-150.
 33. Han, S.M., Hassan, M.M., Yoon, C.W., Huh, E.N., 2009. Efficient Service Recommendation System for Cloud Computing Market. 2nd International Conference on Interaction Sciences: Information Technology, Culture and Human, Seoul, 839-845.
 34. Ur Rehman, Z., Hussain, O.K., Hussain, F.K., 2013. Multi-criteria IaaS Service Selection Based on QoS History. 27th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), Barcelona, 1129-1135.
 35. Ur Rehman, Z., Hussain, O.K., Hussain, F.K., 2012. IaaS Cloud Selection Using MCDM Methods. 9th IEEE International Conference on e-Business Engineering, Hangzhou, 246-251.
 36. Fattah, S.M.M., Bouguettaya, A., Mistry, S., 2020. Signature-Based Selection of IaaS Cloud Services. IEEE International Conference on Web Services (ICWS), Beijing, 50-57.
 37. Ghule, D., Gopal, A., 2018. Comparison Parameters and Evaluation Technique to Help Selection of Right IaaS Cloud. 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), Gorakhpur, 1-6.
 38. Chauhan, N., Agarwal, R., Garg, K., Choudhury, T. 2020. Redundant IAAS Cloud Selection with Consideration of Multi Criteria Decision Analysis. Procedia Computer Science, 167, 1325-1333.
 39. Saha, M., Panda, S.K., Panigrahi, S., 2021. A Hybrid Multi-Criteria Decision Making Algorithm for Cloud Service Selection. International Journal of Information Technology, 13, 1417-1422.
 40. Do Chung, B., Seo, K. K., 2015. A Cloud Service Selection Model Based on Analytic Network Process. Indian Journal of Science and Technology, 8(18), 1-5.
 41. Lee, Y.H., 2014. A Decision Framework for Cloud Service Selection for SMEs: AHS Analysis. SOP Transactions on Marketing Research, 1(1), 51-57.
 42. Grgurević, I., Kordić, G., 2017. Multi-criteria Decision-Making in Cloud Service Selection and Adoption. 5th Int. Virtual Res. Conf. Tech. Disciplines, Zagreb, 8-12.
 43. Gireesha, O., Kamalesh, A.B., Krithivasan, K., Sriram, V.S., 2022. A Fuzzy-Multi Attribute Decision Making Approach for Efficient Service Selection in Cloud Environments. Expert Systems with Applications, 206, 117526.
 44. Jatoth, C., Gangadharan, G.R., Fiore, U., Buyya, R., 2019. SELCLOUD: a Hybrid Multi-Criteria Decision-Making Model for Selection of Cloud Services. Soft Computing, 23, 4701-4715.
 45. Ahmadi, J., Toroghi Haghghat, A., Rahmani, A. M., Ravanmehr, R., 2022. A Flexible Approach for Virtual Machine Selection in Cloud Data Centers with AHS. Software: Practice and Experience, 52(5), 1216-1241.
 46. Ramamurthy, A., Saurabh, S., Gharote, M., Lodha, S., 2020. Selection of Cloud Service Providers for Hosting Web Applications in a Multi-Cloud Environment. IEEE International Conference on Services Computing (SCC), Beijing, 202-209.
 47. Bibi, U., 2018. Cost Aware Resource Selection in IaaS Clouds. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 9(8).
 48. Abdel-Basset, M., Mohamed, M., Chang, V., 2018. NMCDA: A Framework for Evaluating Cloud Computing Services. Future Generation Computer Systems, 86, 12-29.
 49. Soltani, S., Elgazzar, K., Martin, P., 2016. QuARAM Service Recommender: a Platform for IaaS Service Selection. 9th International Conference on Utility and Cloud Computing, Shanghai, 422-425.
 50. Yamato, Y., 2017. Performance-Aware Server Architecture Recommendation and Automatic

- Performance Verification Technology on IaaS Cloud. *Service Oriented Computing and Applications*, 11, 121-135.
51. Jiang, Q., 2012. Virtual Machine Performance Comparison of Public IaaS Providers in China. *IEEE Asia Pacific Cloud Computing Congress (APCloudCC)*, Shenzhen, 16-19.
52. Yamato, Y., 2018. Server Structure Proposal and Automatic Verification Technology on IaaS Cloud of Plural Type Servers. *International Journal of Informatics and Information Systems*, 1(2), 97-106.
53. Cunha, M., Mendonça, N.C., Sampaio, A., 2017. Cloud Crawler: a Declarative Performance Evaluation Environment for Infrastructure-as-a-Service Clouds. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 29(1), e3825.
54. Michael, N., Ramannavar, N., Shen, Y., Patil, S., Sung, J.L., 2017. Cloudperf: A Performance Test Framework for Distributed and Dynamic Multi-Tenant Environments. *8th ACM/SPEC on International Conference on Performance Engineering*, L'Aquila, 189-200.
55. Sachdeva, N., Kapur, P.K., Singh, G., 2016. Selecting Appropriate Cloud Solution for Managing Big Data Projects Using Hybrid AHS-Entropy Based Assessment. *International Conference on Innovation and Challenges in Cyber Security (ICICCS-INBUSH)*, Greater Noida, 135-140.
56. Kumar, R.R., Kumari, B., Kumar, C., 2021. CCS-OSSR: a Framework Based on Hybrid MCDM for Optimal Service Selection and Ranking of Cloud Computing Services. *Cluster Computing*, 24(2), 867-883.
57. Clausius, R., 1879. *The Mechanical Theory of Heat*. Macmillan, London, 373.
58. Shannon, C., 1948. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Tech. Journal*, 27, 379-423
59. Aomar, R.A., 2010. A Combined AHS-Entropy Method for Deriving Subjective and Objective Criteria Weights. *International Journal of Industrial Engineering*, 17(1), 12-24.
60. Wu, R.M., Zhang, Z., Yan, W., Fan, J., Gou, J., Liu, B., Wang, Y., 2022. A Comparative Analysis of the Principal Component Analysis and Entropy Weight Methods to Establish the Indexing Measurement. *PloS one*, 17(1), e0262261.
61. Mukhametzyanov, I., 2021. Specific Character of Objective Methods for Determining Weights of Criteria in MCDM Problems: Entropy, CRITIC and SD. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 4(2), 76-105.
62. Ayçin, E., Güçlü, P., 2020. BIST Ticaret Endeksinde Yer Alan İşletmelerin Finansal Performanslarının Entropi ve MAIRCA Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 85, 287-312.
63. Odu, G.O., 2019. Weighting Methods for Multi-Criteria Decision Making Technique. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(8), 1449-1457.
64. Huang, J., 2008. Combining Entropy Weight and TOPSIS Method for Information System Selection. *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, Chengdu, 281-1284.
65. Saaty, T.L., 1990. How to Make a Decision: the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
66. Ameen, R.F.M., Mourshed, M., 2019. Urban Sustainability Assessment Framework Development: The Ranking and Weighting of Sustainability Indicators Using Analytic Hierarchy Process. *Sustainable Cities and Society*, 44, 356-366.
67. Ishizaka, A., Labib, A., 2011. Review of the Main Developments in the Analytic Hierarchy Process. *Expert Systems With Applications*, 38(11), 14336-14345.
68. Darko, A., Chan, A.P.C., Ameyaw, E.E., Owusu, E.K., Pärn, E., Edwards, D.J., 2019. Review of Application of Analytic Hierarchy Process (AHS) in Construction. *International Journal of Construction Management*, 19(5), 436-452.
69. Fidan, Ü., Atak, M., 2020. Analitik Hiyerarşi Süreci ve Veri Önleme Yoluyla Türkiye'nin Güç Sistemi Portföyünün Planlanması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1031-1046.
70. Borade, A.B., Kannan, G., Bansod, S.V., 2013. Analytical Hierarchy Process-Based Framework for VMI Adoption. *International Journal of Production Research*, 51(4), 963-978.
71. Palcic, I., Lalic, B., 2009. Analytical Hierarchy Process as a Tool for Selecting and Evaluating Projects. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 8(1).

72. Subramanian, N., Ramanathan, R., 2012. A Review of Applications of Analytic Hierarchy Process in Operations Management. *International Journal of Production Economics*, 138(2), 215-241.
73. Saaty, T.L., 2004. Decision Making-the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHS/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13, 1-35.
74. Saaty, T.L., 2008. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98.
75. Lin, Y.C., Chen, T., 2020. A Multibelief Analytic Hierarchy Process and Nonlinear Programming Approach for Diversifying Product Designs: Smart Backpack Design as an Example. *Journal of Engineering Manufacture*, 234(6-7), 1044-1056.
76. Opricovic, S., Tzeng, G.H., 2007. Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods. *European Journal of Operational Research*, 178(2), 514-529.
77. Ou Yang, Y.P., Shieh, H.M., Leu, J. D., Tzeng, G. H., 2009. A VIKOR-Based Multiple Criteria Decision Method for Improving Information Security Risk. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 8(02), 267-287.
78. Mardani, A., Zavadskas, E.K., Govindan, K., Amat Senin, A., Jusoh, A., 2016. VIKOR Technique: A Systematic Review of the State of the Art Literature on Methodologies and Applications. *Sustainability*, 8(1), 37.
79. Sofiyabadi, J., Kolahi, B., Valmohammadi, C., 2016. Key Performance Indicators Measurement in Service Business: a Fuzzy VIKOR Approach. *Total Quality Management and Business Excellence*, 27(9-10), 1028-1042.

Winkler Tipi Elastik Zemine Oturan Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Kirişlerin Statik Analizi

Timuçin Alp ASLAN*¹ ORCID 0000-0002-7558-3568

Ahmad Reshad NOORI² ORCID 0000-0001-6232-6303

Burkay SİVRİ¹ ORCID 0000-0002-1350-9493

Beytullah TEMEL¹ ORCID 0000-0002-1673-280X

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

²İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 30.10.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: ASLAN, T.A., NOORI, A.R., SİVRİ, B., TEMEL, B., (2023). Winkler Tipi Elastik Zemine Oturan Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Kirişlerin Statik Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 955-965.

Öz

Bu çalışmada, Winkler tipi elastik zemine oturan ve kalınlık boyunca fonksiyonel derecelenmiş (FD) malzemeli kirişlerin eğilme davranışı üzerine bir inceleme yapılmıştır. Farklı mesnet koşullarının, malzeme değişim katsayılarının ve Winkler zemin katsayısının FD kirişlerin statik davranışı üzerine etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Ele alınan problemin davranışını idare eden denklemler Euler-Bernoulli kiriş teorisine (EBKT) dayanan minimum toplam potansiyel enerji ilkesinin yardımıyla ilk defa bu çalışmada elde edilmiştir. Elde edilen bu kanonik denklem takımının sayısal çözümünde Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile Runge-Kutta 5 (RK5) algoritması kullanılmıştır. Önerilen yöntemin doğruluğu ve uygulanabilirliği, literatürde verilen mevcut çalışmaların değerleri ile bu yöntemin sonuçlarının karşılaştırılmasıyla gösterilmiştir. Malzeme değişim katsayısı, Winkler zemin katsayısı ve sınır koşulları ele alınan probleme önemli ölçüde etki etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Statik analiz, Winkler tipi elastik zemin, Fonksiyonel derecelenmiş malzeme, Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi

Static Analysis of Functionally Graded Material Beams Resting on Winkler Type Elastic Foundation

Abstract

In this paper, the bending response of the Functionally Graded Material (FGM) beams resting on the Winkler foundation is examined. The effects of boundary conditions, material gradient indexes, and Winkler spring constants on the static behavior of FGM beams are studied parametrically. The governing equations of the considered problem are obtained with the aid of the minimum total potential energy

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Timuçin Alp ASLAN, taslan@cu.edu.tr

principle based on the Euler-Bernoulli Beam Theory (EBT). Complementary Functions Method (CFM) and the fifth order Runge- Kutta have been used in the numerical solution of these canonical equations. The accuracy and applicability of the proposed method are demonstrated by comparing the method results with those of existing literature. The material gradient index, Winkler constants, and boundary conditions have an important influence on the problem in the hand.

Keywords: Static analysis, Winkler type elastic foundation, Functionally graded materials, Complementary functions method.

1. GİRİŞ

Elastik zemine oturan kiriş probleminin statik ve dinamik analizi inşaat mühendisliği ve makine mühendisliği gibi temel mühendislik alanlarında yaygın olarak araştırılmaktadır. Bu kapsamda yapılan bazı güncel çalışmalar şöyle özetlenebilir;

Aköz ve Kadioğlu, elastik zemine oturan eğri eksenli kirişlerin statik analizini karışık sonlu elemanlar kullanarak araştırmışlardır [1]. Wang ve arkadaşları, Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorilerine dayalı modellenen kirişlerin eğilme, titreşim ve burkulma davranışını araştırmışlardır. Farklı tiplerde elastik zeminlere oturan kirişlerin kesin çözümlerini Green fonksiyonlarını kullanarak elde etmişlerdir [2]. Chen ve arkadaşları elastik zemine oturan kirişlerin serbest titreşiminin analizi için durum uzay yöntemi ve diferansiyel quadrature yöntemlerini birleştiren karma bir yöntem önermişlerdir [3]. Ying ve arkadaşları, Winkler-Pasternak tipi elastik zemine oturan FD kirişlerin eğilme ve serbest titreşimini analitik olarak araştırmışlardır. Durum uzay metodunu kullanarak elde ettikleri sonuçları literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırmışlardır [4]. Civalek ve Demir, Winkler tipi elastik zemine oturmuş kirişlerin statik, serbest titreşim ve burkulma davranışını araştırmışlardır. Ayrık tekil konvolüsyon ve Harmonik Diferansiyel Quadrature yöntemlerini kullanarak elastik zemine oturan iki ucu ankastre mesnetlenmiş kirişin deplasman ve eğilme değerlerini sayısal olarak elde etmişlerdir [5]. Şimşek, düzgün yaylı yüklü basit mesnetli FD kirişlerin statik analizini araştırmıştır. Kalınlık yönünde fonksiyonel derecelendirilmiş kirişleri Timoshenko ve yüksek mertebe kayma deformasyon teorilerine dayalı modellemiştir [6]. Fouad ve arkadaşları, elastik zemin üzerindeki FD sandviç kirişin sonlu elemanlar yöntemini

kullanarak analiz etmişlerdir[7]. Akbaş, Winkler tipi zemin üzerine oturan kalınlık yönünde FD kirişlerin serbest titreşim ve eğilme analizini incelemiştir. Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorisine dayalı modellenen basit mesnetli kirişlerin analizinde Navier çözüm yöntemini kullanmıştır [8]. Akgöz ve Civalek, Winkler zemine oturan FD mikro kirişlerin eğilme analizini araştırmışlardır. Farklı kiriş teorilerine dayalı modellenen ve minimum potansiyel enerji ilkesi yardımıyla elde edilen yönetici diferansiyel denklemler, Navier yöntemiyle çözülmüştür [9]. Yanık ve Yaylı, elastik zemine oturmuş klasik ve rijit olmayan sınır koşullarına sahip kirişlerin eksenel titreşim analizini incelemiştir [10]. Lohar ve arkadaşları, elastik zemine oturan eksenel yönde FD kirişin serbest titreşim davranışını farklı zemin rijitleri için karşılaştırmışlardır [11]. Akgöz ve arkadaşları, elastik zemin üzerindeki kirişlerin statik analizi için ayrık tekil konvolüsyon yöntemini kullanmışlardır [12]. Avcar ve Mohammed, kalınlık yönünde FD kirişlerin serbest titreşimini incelemiştir. Winkler zemine oturan FDM kirişlerin serbest titreşimini Newton-Raphson yöntemi kullanarak elde etmişlerdir [13]. Cunedioğlu, elastik ortama oturan farklı sıcaklık ve eksenel yük altındaki kompozit konsol kirişin burkulma ve serbest titreşimini araştırmıştır. Euler-Bernoulli teorisine dayalı modellenen kirişlerin analizini sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirmiştir [14]. Phuong ve arkadaşları, Timoshenko kiriş teorisine dayalı kalınlık yönünde FD kirişlerin eğilme davranışını araştırmışlardır. Kalınlık yönünde simetrik olmayan malzeme değişimine sahip kirişlerin analitik çözümünü elde edebilmek amacıyla nötr yüzeyi konsepti önermişlerdir [15]. Akbaş, Winkler-Pasternak tipi elastik zemine oturan Lifle güçlendirilmiş kompozit kirişlerin statik analizini Ritz yöntemi ile araştırmıştır [16]. Chami ve arkadaşları, Winkler-Pasternak Elastik

zemin üzerine oturan kompozit kirişlerin eğilme analizini analitik modellenme kullanarak incelemiştir [17]. Chen ve arkadaşları, hareketli yüke maruz kalan çift gözenekli FD kiriş sisteminin dinamik tepkisini incelemiştir [18]. Zghal ve arkadaşları, kalınlık yönünde FD boşluklu kirişlerin statik eğilme davranışını karışık sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmıştır [19]. Literatürde çeşitli mühendislik mekaniği problemleri TFY kullanarak araştırılmıştır [20-26].

Literatür incelendiğinde birçok çalışma olmasına rağmen, elastik zemine oturan FD kirişlerin statik davranışını TFY ile araştıran herhangi bir çalışma bulunamamıştır. Bu çalışmanın temel amacı, tek parametrelili Winkler tipi elastik zemine oturan ve kalınlık boyunca FD kirişlerin eğilme davranışını idare eden diferansiyel denklemleri TFY ile çözmek için RK5 algoritmasından yararlanılmıştır. Bu etkin yöntem, ilk defa elastik zemine oturan ve kalınlığı boyunca FD kirişlerin eğilme davranışına uygulanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Şekil 1’de Winkler tipi elastik zemine oturan kirişe ait FD malzemenin değişim fonksiyonu Eşitlik (1) ile verilmektedir.

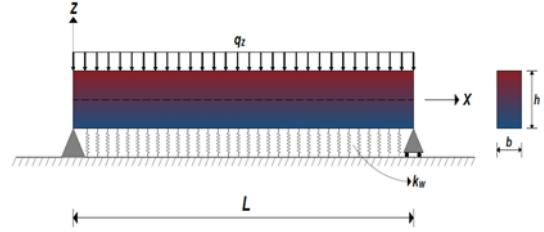
$$E(z) = E_b + (E_t - E_b) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^{nz} \quad (1)$$

Burada, E_t ve E_b sırasıyla kiriş kesitinin üst ve alt yüzeyi için elastisite modüllerini göstermektedir. nz ise malzeme değişim katsayısını temsil etmektedir. Bu çalışmada, ele alınan FD kirişin malzeme özellikleri kalınlık boyunca heterojen olarak kabul edilmiştir.

Winkler tipi elastik zemine oturan FD kirişin eğilme davranışını idare eden kanonik denklemler, ince çubuk teorisine göre elde edilmiştir. Elastik zemine oturan FD kirişin yer değiştirmeler aşağıdaki gibi yazılabilir [4].

$$U_x = u(x) + z \theta(x) \quad (2)$$

$$U_z = w(x) \quad (3)$$



Şekil 1. Winkler tipi elastik zemine oturan FD basit mesnetli kiriş

Burada, $w(x)$ düşey deplasmanı, $u(x)$ aksel yer değiştirmeyi ve $\theta(x)$ ise dönmeyi göstermektedir. FD kiriş için şekil değiştirmeler Eşitlik (4-5)’de olduğu gibi ifade edilmektedir [4].

$$\varepsilon_x = \frac{dU_x}{dx} = \frac{du}{dx} + z \frac{d\theta}{dx} \quad (4)$$

$$\gamma_{xz} = \theta + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Elastik zemine oturan FD kirişlere ait gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkiler Eşitlik (6-7)’de verilmektedir [4].

$$\sigma_x = E(z) \varepsilon_x \quad (6)$$

$$\tau_{xz} = G(z) \gamma_{xz} = \frac{E(z)}{2(1 + \nu)} \gamma_{xz} = 0 \quad (7)$$

Minimum toplam potansiyel enerji ifadesi Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayalı olarak Eşitlik (8)’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \Pi_t = & \frac{1}{2} \int_0^L \int_A (\sigma_x \varepsilon_x + \tau_{xz} \gamma_{xz}) dA dx \\ & - \int_0^L \int_A (q_z w) dA dx \\ & - \int_0^L \int_A (q_x u) dA dx \\ & + \frac{1}{2} \int_0^L \int_A (\bar{k}_w w^2) dA dx \end{aligned} \quad (8)$$

Bu çalışma, ince kiriş teorisine dayalı olduğundan $\gamma_{xz} = 0$ olarak alınacaktır.

Eşitlik (6) ve (7), Eşitlik (8)'de yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} \Pi_t = \frac{1}{2} \int_0^L \left[A_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right. \\ \left. + A_{22} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \right] \\ + A_{33} \left[\theta^2 + 2\theta \frac{\partial w}{\partial x} \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] dx \\ - \int_0^L \int_A (q_y w) dAdx \\ - \int_0^L \int_A (q_x u) dAdx \\ + \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \bar{k}_w w^2 dAdx \end{aligned} \quad (9)$$

şeklinde elde edilir. Burada \bar{k}_w Winkler zemin katsayısıdır. Eşitlik (9)'da görülen A_{11} , A_{12} , A_{22} ve A_{33} kesit rijitlik sabitleridir. Bu sabitler aşağıda sunulan integraller yardımı ile elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \{A_{11}, A_{12}, A_{22}\} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} E(z) \{1, z, z^2\} dz \\ A_{33} = k_s b \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E(z)}{2(1+\nu)} dz \end{aligned} \quad (10)$$

Gerekli büyüklüklerin türevleri ve impulsif bileşenleri elde edilerek, Winkler tipi elastik zemine oturan FD ince çubukların eğilme davranışını idare eden 6 adet adi kanonik diferansiyel denklemler bu çalışmada elde edilmiş ve Eşitlik (11-16)'ta verilmiştir.

$$u' = \frac{du}{dx} = \frac{A_{12}M_y - A_{22}N_x}{A_{12}^2 - A_{11}A_{22}} \quad (11)$$

$$w' = \frac{dw}{dx} = -\theta \quad (12)$$

$$\theta' = \frac{d\theta}{dx} = \frac{A_{12}N_x - A_{11}M_y}{A_{12}^2 - A_{11}A_{22}} \quad (13)$$

$$N' = \frac{dN}{dx} = -q_x \quad (14)$$

$$Q'_z = \frac{dQ_z}{dx} = -q_y + \bar{k}_w w \quad (15)$$

$$M'_y = \frac{dM_y}{dx} = Q_z \quad (16)$$

Bu denklemlerde N, Q_z ve M_y sırasıyla aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momentini göstermektedir. Elde edilen (11-16) eşitlikleri matris formunda yazılabilir.

$$\frac{d\{\Psi(x)\}}{dx} = [A(x)]\{\Psi(x)\} + \{\Phi(x)\} \quad (17)$$

Burada x , bağımsız değişkeni temsil etmektedir. Eşitlik (17)'de verilen iki noktalı sınır değer problemi TFY ile çözülmektedir. İki noktalı sınır değer problemi, TFY yardımıyla başlangıç değer problemine indirgenebilmektedir. Eşitlik (17) için genel çözüm ise,

$$\{\Psi(x)\} = \sum_{m=1}^6 C_m [\mathbf{U}^{(m)}(x)] + \{\mathbf{V}(x)\} \quad (18)$$

olarak elde edilmektedir. Burada $\{\mathbf{V}(x)\}$ diferansiyel denklemin özel çözümünü ve $[\mathbf{U}^{(m)}(x)]$ ise olayı idare eden diferansiyel denklemin homojen çözümünü göstermektedir. $[\mathbf{U}^{(m)}(x)]$ terimini elde etmek için m 'inci bileşenine 1, diğerlerine sıfır değeri verilmektedir. Özel çözümünün elde edilebilmesi için başlangıç şartları sıfır alınmaktadır. İntegrasyon sabitleri (C_m), kirişin sınır şartlarından elde edilir. Problemin sınır şartları, [23]'de detaylı bir şekilde verilmektedir.

3. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu çalışmada, tek parametrelili Winkler tipi elastik zemine oturan, kalınlık boyunca FD malzemeli kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Farklı Winkler zemin katsayılarının, mesnet koşullarının

ve malzeme değişim katsayılarının eğilme davranışı üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Uygulamalarda kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 1’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge ve grafik formunda sunularak değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. Malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	E (Gpa)	ν
Kirişin en üst liflerinde kullanılan malzeme özellikleri	70	0.3
Kirişin en alt liflerinde kullanılan malzeme özellikleri	380	0.3

Winkler zemin katsayısının boyutsuzlaştırılmasında Eşitlik (19) kullanılmıştır [27].

$$k_w = \frac{\bar{k}_w L^4}{E I} \quad (19)$$

Bu denklemde k_w boyutsuz Winkler zemin katsayısını, \bar{k}_w zemin türüne bağlı Winkler zemin katsayısını, E kirişin en üst liflerinde kullanılan malzemenin elastisite modülünü, I ise kesitin atalet momentini göstermektedir. $k_w = 0$ alındığında elastik zemin etkisi ihmal edilmektedir.

Elde edilen çökme değerlerinin boyutsuzlaştırılması ise Eşitlik (20) yardımıyla yapılmıştır.

$$\bar{w} = \frac{w E I}{q L^4} \quad (20)$$

Bu eşitlikte w çökme değerini ve q düzgün yayılı yükün şiddetini göstermekte olup $q = 100$ N/m alınmıştır.

Bu çalışmada k_w için 0, 10 ve 100 değerleri kullanılmıştır. Tüm örneklerde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 1’de sunulmuştur. Ele alınan tüm FD kirişlerde $b = 0.1$ m olarak alınmıştır.

Öncelikle önerilen yöntem mevcut literatür ile karşılaştırılarak doğruluğu gösterilmiştir. Bu amaç ile ankastre-ankastre (A-A) ve serbest-serbest (S-S)

mesnetli kirişler için maksimum çökme değerleri elde edilerek Çizelge 2’de [27] ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2. Boyutsuz düşey deplasmanların ($\bar{w} \times 10^{-2}$) literatür ile karşılaştırılması

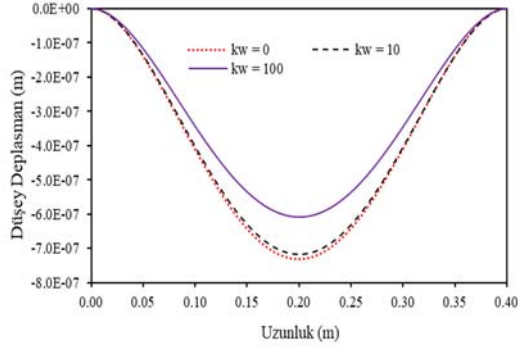
	k_w	Doeva [27]	Bu çalışma
A-A	0	0.2604	0.2604
	10	0.2553	0.2552
	100	0.2165	0.2165
S-S	0	1.3028	1.3020
	10	1.1804	1.1803
	100	0.6400	0.6401

Çizelge 2’den de görüldüğü gibi, karşılaştırılan tüm durumlar için TFY sonuçları mevcut literatür sonuçları ile uyumludur.

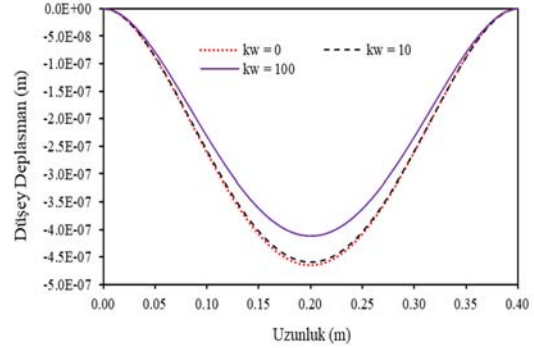
Düşey deplasman değerleri birçok farklı durum için elde edilerek parametrik çalışmalar yapılmıştır. Malzeme değişim katsayısının ve Winkler zemin katsayısının kiriş davranışı üzerindeki etkisinin daha iyi yorumlanabilmesi için hesaplanan sonuçlar hem liste (Çizelge 3) hem de Şekil 2-12’de grafik formunda sunulmuştur.

Çizelge 3. A-A ve S-S sınır koşulları için boyutsuz düşey deplasman ($\bar{w} \times 10^{-2}$) değerleri

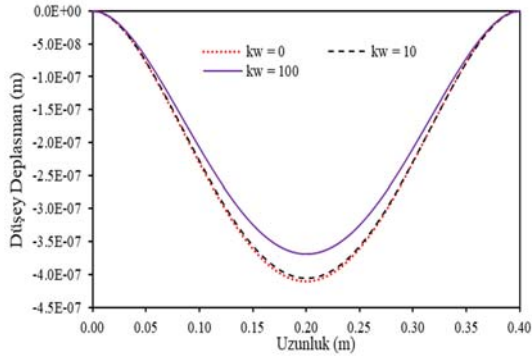
nz	k_w	A-A	S-S
Alüminyum (0)	0	0.2604	1.3020
	10	0.2552	1.1803
	100	0.2165	0.6400
0.5	0	0.1653	0.8711
	10	0.1632	0.8149
	100	0.1465	0.5150
1	0	0.1463	0.7769
	10	0.1447	0.7318
	100	0.1314	0.4806
2	0	0.1311	0.6875
	10	0.1298	0.6520
	100	0.119	0.4448
5	0	0.1148	0.5852
	10	0.1138	0.5593
	100	0.1054	0.3997
Zirkonya (seramik)	0	0.0911	0.4557
	10	0.0905	0.4398
	100	0.0851	0.3348



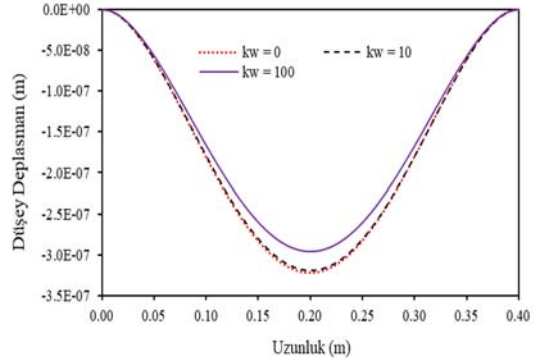
Şekil 2. Değişim katsayısı $nz=0$ ve A-A mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=16$)



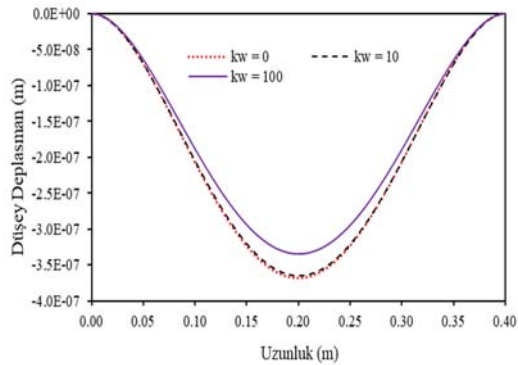
Şekil 5. Değişim katsayısı $nz=0.5$ ve A-A mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=16$)



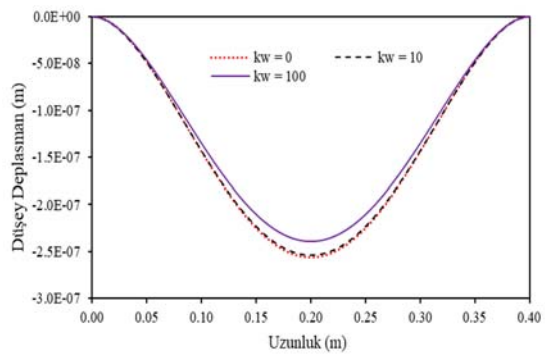
Şekil 3. Değişim katsayısı $nz=1$ ve A-A mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=16$)



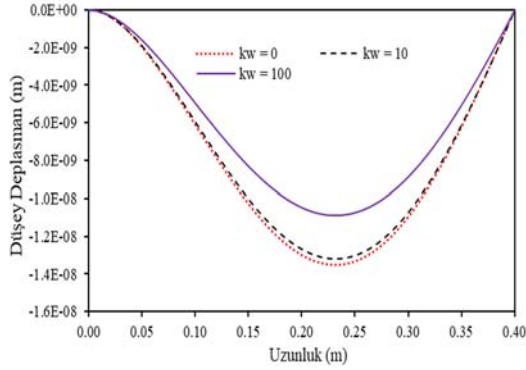
Şekil 6. Değişim katsayısı $nz=5$ ve A-A mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=16$)



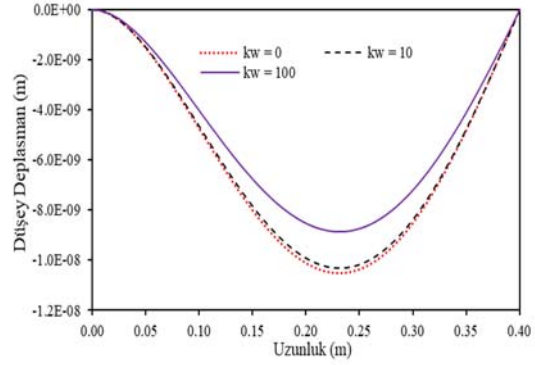
Şekil 4. Değişim katsayısı $nz=2$ ve A-A mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=16$)



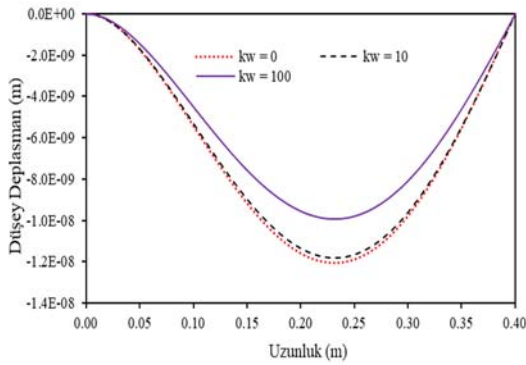
Şekil 7. Değişim katsayısı $nz=10$ ve A-A mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=16$)



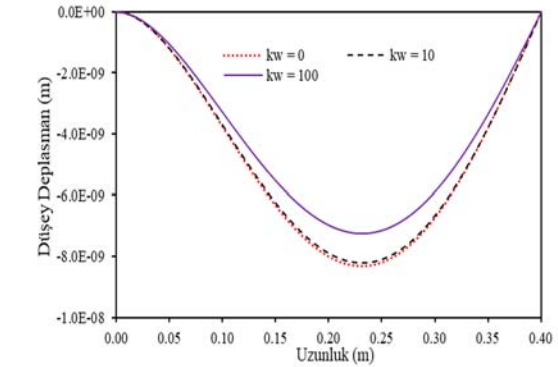
Şekil 8. Değişim katsayısı $nz=1$ ve A-S mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=4$)



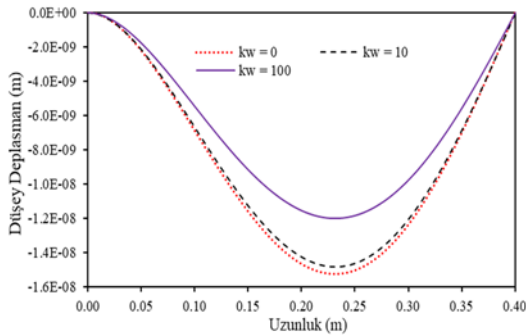
Şekil 11. Değişim katsayısı $nz=5$ ve A-S mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=4$)



Şekil 9. Değişim katsayısı $nz=2$ ve A-S mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=4$)



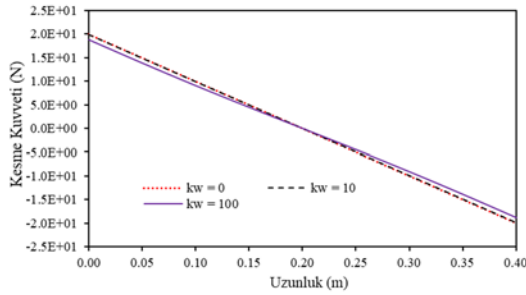
Şekil 12. Değişim katsayısı $nz=10$ ve A-S mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=4$)



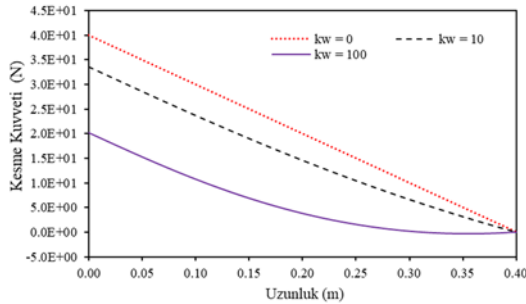
Şekil 10. Değişim katsayısı $nz=0.5$ ve A-S mesnetli kiriş için elde edilen çökme değerleri ($L/h=4$)

Çalışmanın bu aşamasında Winkler zemin katsayısının FD kirişlerinde oluşan kesme kuvveti üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik çalışmalar yapılmış ve sonuçlar Şekil 13-16'da çizilmiştir.

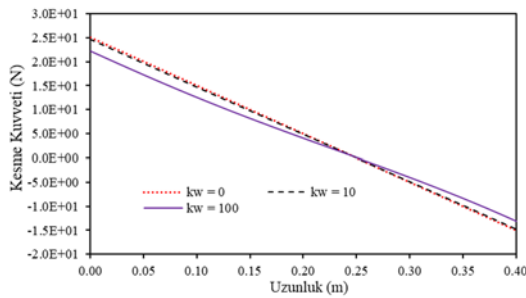
Şekil 13-16 incelendiğinde, Winkler zemin katsayısı k_w azaldıkça kesme kuvveti değerlerinin arttığı görülmektedir. Düşey deplasman değerlerinde olduğu gibi $k_w=0$ ve $k_w=10$ için elde edilen sonuçlar yakındır. Winkler tipi elastik zemine ait katsayısının konsol kirişlerin kesme kuvvetine etkisi diğer mesnet koşullarına göre daha belirgindir.



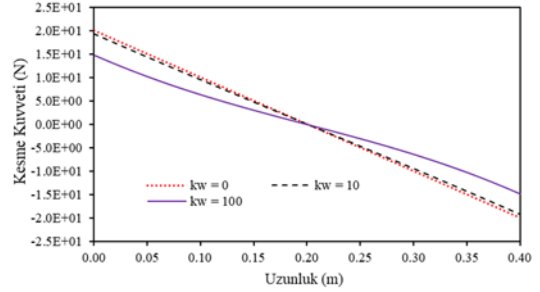
Şekil 13. Değişim katsayısı $nz=5$ ve A-A mesnetli kiriş için elde edilen kesme kuvveti ($L/h=16$)



Şekil 14. Değişim katsayısı $nz=5$ ve konsol kiriş için elde edilen kesme kuvveti ($L/h=16$)

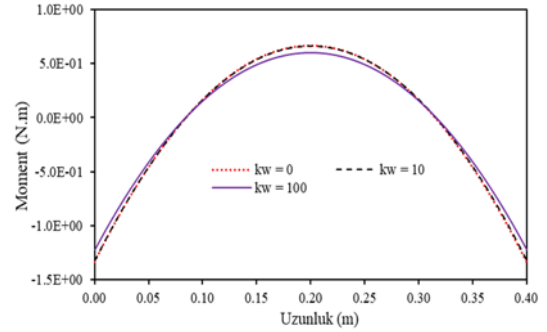


Şekil 15. Değişim katsayısı $nz=5$ ve A-S mesnetli kiriş için elde edilen kesme kuvveti ($L/h=16$)

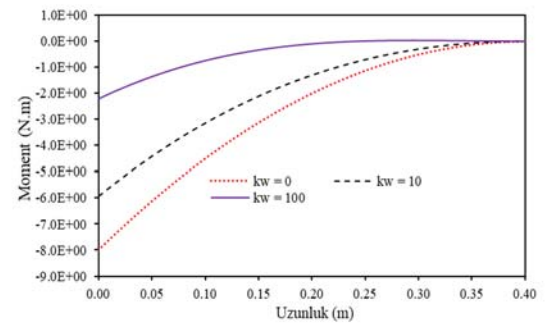


Şekil 16. Değişim katsayısı $nz=5$ ve S-S mesnetli kiriş için elde edilen kesme kuvveti ($L/h=16$)

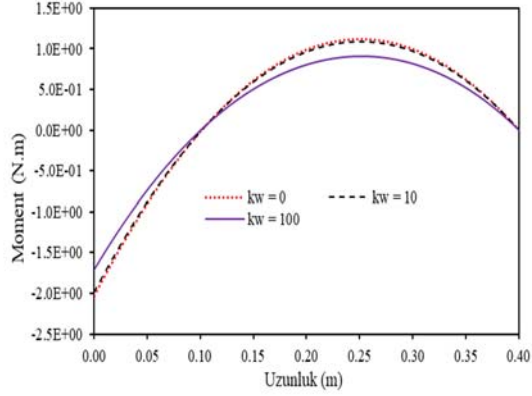
Kesme kuvveti değerleri karşılaştırıldıktan sonra Winkler zemin katsayısının eğilme momenti üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar Şekil 17-20'de verilmiştir.



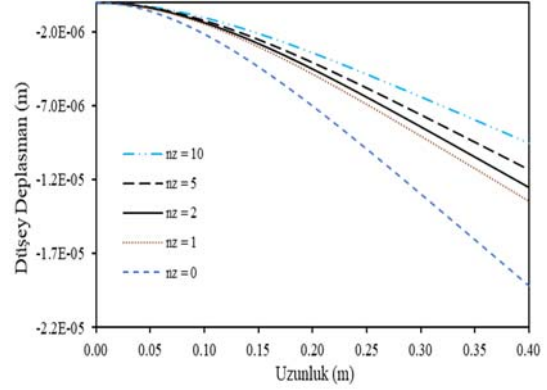
Şekil 17. Değişim katsayısı $nz=2$ ve A-A mesnetli kiriş için elde edilen eğilme momenti ($L/h=16$)



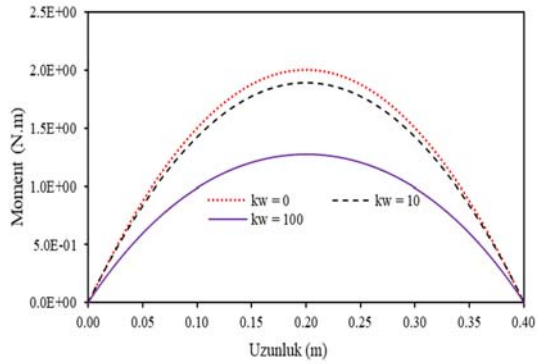
Şekil 18. Değişim katsayısı $nz=2$ ve konsol kiriş için elde edilen eğilme momenti ($L/h=16$)



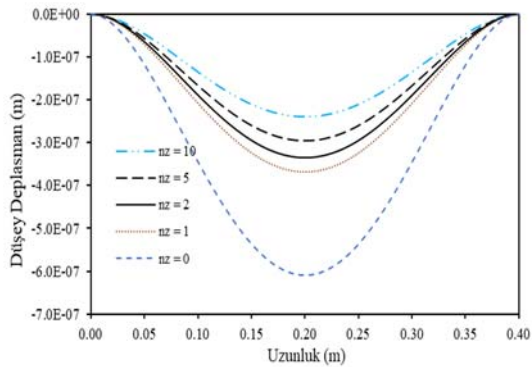
Şekil 19. Değişim katsayısı $n_z=2$ ve A-S mesnetli kiriş için elde edilen eğilme momenti ($L/h=16$)



Şekil 22. $kw=10$ zemin katsayısı için ve A-S sınır koşulu için elde edilen çökme değerleri ($L/h=16$)



Şekil 20. Değişim katsayısı $n_z=2$ ve S-S mesnetli kiriş için elde edilen eğilme momenti ($L/h=16$)



Şekil 21. $kw=100$ ve A-A sınır koşulu için elde edilen çökme değerleri ($L/h=16$)

Şekil 17-20'den de görüldüğü gibi, kw değeri küçüldükçe eğilme momentleri büyümektedir. Mesnet koşulları açısından bakıldığında; Winkler zemin katsayısının en çok etkilediği durum A-S (konsol kiriş durumu) en az etkilediği mesnet koşulu ise A-A durumudur. Momenti sıfır olduğu ve momentin maksimum olduğu noktaların konumlarına Winkler zemin katsayısının etki etmediği görülmüştür.

Son olarak, malzeme değişim katsayısının Winkler tipi elastik zemine oturan FD kirişlerin eğilme davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu amaç ile $kw=100$ alınarak A-A mesnetli ve konsol kirişlerinin farklı malzeme değişim değerleri için çökme değerleri elde edilerek Şekil 21-22'de çizilmiştir. Şekil 21-22'ye bakıldığında, n_z değerlerinin artmasıyla çökme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü kullanılan FD malzeme fonksiyonunda malzeme değişim katsayısının artması eğilme rijitliğini artırmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tek parametrelili Winkler tipi elastik zemine oturan ve kalınlık boyunca FD malzemeli kirişlerin eğilme davranışı araştırılmıştır. Minimum toplam potansiyel enerji ilkesi yardımıyla elde edilen kanonik denklemlerin sayısal çözümünde TFY kullanılmıştır. Çalışmada Winkler zemin

katsayılarının, malzeme değişim katsayılarının ve mesnet koşullarının FD kirişlerin statik davranışına etkileri incelenmiştir.

Tüm mesnet koşulları için k_w değeri arttıkça düşey deplasmanların azaldığı görülmüştür. Malzeme değişim katsayısının artmasıyla Winkler zemin katsayısının düşey deplasmanlar üzerindeki etkisinin azaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca momentin sıfır olduğu ve momentin maksimum olduğu noktalarda kirişin Winkler zemin katsayısından etkilenmediği görülmüştür. Diğer yandan Winkler zemin katsayısının en çok A-S, en az ise iki ucu ankastre mesnetlenmiş (A-A) sınır koşulu için kirişi etkilediği görülmüştür.

Son olarak bu çalışmada önerilen metodun Winkler tipi elastik zemine oturan FD kirişlerin statik analizi için oldukça etkin ve kolayca uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Aköz, A.Y., Kadioğlu, F., 1996. The Mixed Finite Element Solution of Circular Beam on Elastic Foundation. *Computers & Structures*, 60(4), 643-651.
2. Wang, C.M., Lam, K.Y., He, X.Q., 1998. Exact Solutions for Timoshenko Beams on Elastic Foundations Using Green's Functions. *Journal of Structural Mechanics*, 26(1), 101-113.
3. Chen, W.Q., Lü, C.F., Bian, Z.G., 2004. A Mixed Method for Bending and Free Vibration of Beams Resting on A Pasternak Elastic Foundation. *Applied Mathematical Modelling*, 28(10), 877-890.
4. Ying, J., Lü, C.F., Chen, W.Q., 2008. Two-Dimensional Elasticity Solutions for Functionally Graded Beams Resting on Elastic Foundations. *Composite Structures*, 84(3), 209-219.
5. Civalek, Ö., Demir, Ç., 2009. Elastik Zemine Oturan Kirişlerin Ayrık Tekil Konvolüsyon ve Harmonik Diferansiyel Quadrature Yöntemleriyle Analizi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 56-71.
6. Şimşek, M., 2009. Static Analysis of a Functionally Graded Beam Under a Uniformly Distributed Load by Ritz Method. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(3), 1-11.
7. Boukhelf, F., Bouiadjra, M.B., 2017. Static Analysis of P-FGM Beams Resting on the Winkler Elastic Foundations. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 4(1), 18-22.
8. Akbaş, Ş.D., 2015. Free Vibration and Bending of Functionally Graded Beams Resting on Elastic Foundation. *Research on Engineering Structures and Materials*, 1(1), 25-37.
9. Akgöz, B., Civalek, Ö., 2015. Bending Analysis Of FG Microbeams Resting on Winkler Elastic Foundation via Strain Gradient Elasticity. *Composite Structures*, 134, 294-301.
10. Yanık, F., Yaylı, M.Ö., 2015. Rijit Olmayan Sınır Koşullarında Elastik Zemine Oturan Bir Çubuğun Eksenel Titreşim Analizi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 35-44.
11. Lohar, H., Mitra, A., Sahoo, S., 2016. Free Vibration Analysis of Axially Functionally Graded Linearly Taper Beam on Elastic Foundation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 149, 012130.
12. Akgöz, B., Mercan K., Demir, Ç., Civalek, Ö., 2016. Static Analysis of Beams on Elastic Foundation by the Method of Discrete Singular Convolution. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)* 8(3), 67-73.
13. Avcar, M., Mohammed, W.K.M., 2017. Winkler Zemin ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme Özelliklerinin Kirişin Frekans Parametrelerine Etkilerinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 573-580.
14. Cunedioğlu, Y., 2017. Elastik Ortama Oturan Kompozit Kirişlerin Farklı Sıcaklık ve Eksenel Yük Altında Burkulma ve Serbest Titreşimi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 180-190.
15. Phuong, N.T.B., Tu, T.M., Phuong, H.T., Van Long, N., 2019. Bending Analysis of Functionally Graded Beam with Porosities Resting on Elastic Foundation Based on Neutral

- Surface Position. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE*, 13(1), 33-45.
16. Akbaş, Ş.D., 2020. Static Analysis of a Fiber Reinforced Composite Beam Resting on Winkler-Pasternak Foundation. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(3), 88-98.
 17. Chami, K., Messafer, T., Hadji, L., 2020. Analytical Modeling of Bending and Free Vibration of Thick Advanced Composite Beams Resting on Winkler-Pasternak Elastic Foundation. *Earthq. Struct.*, 19(2), 91-101.
 18. Chen, S., Zhang, Q., Liu, H., 2021. Dynamic Response of Double-FG Porous Beam System Subjected to Moving Load. *Engineering with Computers*, 38(3), 20.
 19. Zghal, S., Ataoui, D., Dammak, F., 2022. Static Bending Analysis of Beams Made of Functionally Graded Porous Materials. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 50(3), 1012-1029.
 20. Temel, B., Yildirim, S., Tutuncu, N., 2014. Elastic and Viscoelastic Response of Heterogeneous Annular Structures Under Arbitrary Transient Pressure. *International Journal of Mechanical Sciences*, 89, 78-83.
 21. Yildirim, S., Tutuncu, N., 2018. Radial Vibration Analysis of Heterogeneous and Non-Uniform Disks via Complementary Functions Method. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 53(5), 332-337.
 22. Celebi, K., Yarimpabuc, D., Tutuncu, N., 2018. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams Using Complementary Functions Method. *Archive of Applied Mechanics*, 88, 729-739.
 23. Noori, A.R., Aslan, T.A., Temel, B., 2021. Dynamic Analysis of Functionally Graded Porous Beams Using Complementary Functions Method in the Laplace Domain. *Composite Structures*, 256, 113094.
 24. Yildirim, S., 2020. Free Vibration Analysis of Sandwich Beams with Functionally-Graded-Cores by Complementary Functions Method. *AIAA Journal*, 58(12), 5431-5439.
 25. Sivri, B., Temel, B., 2022. Euler Bernoulli ve Timoshenko Kiriş Teorilerine Dayalı Eksenel Yönde Fonksiyonel Derecelenmiş Kolonların Burkulma Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 319-328.
 26. Noori, A.R., Aslan, T.A., Temel, B., 2020. Static Analysis of FG Beams via Complementary Functions Method. *European Mechanical Science*, 4(1), 1-6.
 27. Doeva, O., Masjedi, P.K., Weaver P.M., 2021. Closed Form Solutions for an Anisotropic Composite Beam on a Two-Parameter Elastic Foundation. *European Journal of Mechanics /A Solids* 88, 104245.

Dolum Hattı Makineleri için AHP ve TOPSIS Yöntemine Dayalı Tedarikçi Seçimi

Olca KALAN*¹ ORCID 0000-0001-5828-7743

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 27.10.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: KALAN, O., (2023). Dolum Hattı Makineleri için AHP ve TOPSIS Yöntemine Dayalı Tedarikçi Seçimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 967-980.

Öz

Son zamanlarda tedarikçi seçimi işletmelerin başarısı için büyük rol oynamaktadır. Maliyetin düşürülmesi, müşteri memnuniyetinin artırılması ve rekabette avantajlı hale gelmesi için doğru tedarikçi seçimi büyük önem arz etmektedir. Tedarikçi seçerken kriterlerin çeşitli olması değerlendirme sürecini etkilemekte ve karar vermeyi zorlaştırmaktadır. Seçim problemlerinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanımı belirtilen olumsuzlukları azaltmak için günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP (Analytical Hierarchy Process) ve TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) entegre bir şekilde kullanılarak deterjan imalatı yapan bir fabrikaya sıvı dolum makinesi alımı için en iyi tedarikçinin seçimi amaçlanmıştır. İlk olarak literatür taraması yapılmış, daha sonra seçim için önemli kriterler ortaya konmuştur. Kriterler belirlendikten sonra AHP yöntemi ile kriterlerin öncelikleri belirlenmiş ve ardından TOPSIS yöntemi ile tedarikçilerin önem sırası belirlenmiştir. Değerlendirme sonucunda B firmasının makine alımı için en iyi alternatif tedarikçi olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok kriterli karar verme, AHP, TOPSIS, Tedarikçi seçimi

Supplier Selection Based on AHP and TOPSIS Method for Filling Line Machines

Abstract

Recently, supplier selection has become important for the success of businesses. Choosing the right supplier is of great importance in order to reduce costs, increase customer satisfaction and gain competitive advantage. The variety of criteria when choosing a supplier affects the evaluation process and makes it difficult to make a decision. The use of multi-criteria decision-making methods in selection problems is frequently used today to reduce the mentioned disadvantages. In this study, it is aimed to choose the best supplier for the purchase of liquid filling machine for a detergent manufacturing factory by using AHP (Analytical Hierarchy Process) and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), which are multi-criteria decision making methods, in an integrated manner. First, a literature review was made, and then important criteria for selection were determined. After the criteria were determined, the priorities of the criteria were determined with the AHP method, and then the priority order

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Olca KALAN, okalan@cu.edu.tr

of the suppliers was determined with the TOPSIS method. As a result of the evaluation, it has been determined that company B is the best alternative supplier for machinery purchase.

Keywords: Multiple criteria decision making, AHP, TOPSIS, Supplier selection

1. GİRİŞ

Tedarikçi seçimi, tedarik edilecek hammadde, mamul veya yarı mamulün hangi tedarikçiden alınması gerektiğine karar verilmesi sürecidir. Bu süreçte doğru satın alma kararının verilmesiyle maliyetin düşürülmesi, müşteri memnuniyetinin artırılması ve rekabette avantajlı duruma gelinmesi hedeflenmektedir. Son dönemlerde tedarik edilecek firmanın seçiminde birçok kriterin yer alması ve firmalara göre bu kriterlerin önem derecesinin farklılaşması karar mekanizmasını karmaşık hale getirmekte ve zorlaştırmaktadır. Bu nedenle seçim problemi çok kriterli karar verme problemi (ÇKKV) olarak ele alınmaktadır.

Çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde birçok yöntem kullanılmaktadır. Alternatif tedarikçilerin değerlendirilmesi ve en uygun tedarikçinin seçilmesinde çok kriterli yöntemlerin kullanılmasıyla işletmede yer alan kaynaklar daha verimli şekilde kullanılmakta ve yöneticiler daha kolay karar verebilmektedir [1]. Bu yöntemler arasında AHP, ANP, Veri Zarflama Analizi, SMART, TOPSIS, ELECTRE, MOORA gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Özellikle AHP ve TOPSIS yöntemleri daha hızlı sonuç elde etmek amacıyla hem öznel hem nesnel ölçütlerin bir arada değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Yapılan bu çalışmada öncelikle literatürde yer alan tedarikçi seçiminde ÇKKV yöntemlerinden AHP ve TOPSIS yöntemlerini beraber kullanan çalışmalar incelenmiştir.

Bagheri ve Tarokh, çalışmalarında 2010 yılında tedarikçi seçiminde hangi kriterlerin önemli olduğunu belirlemiş, bu kriterleri kullanarak örnek uygulama ile tedarikçi seçimi yapmışlardır. AHP ve bulanık TOPSIS kullanarak toplam maliyet fonksiyonu, kalite fonksiyonu ve servis fonksiyonunu ana kriterler olarak belirlemişler ve

tekstil sektöründe önerdikleri uygulamada 4 alternatiften 1. Alternatifi tedarikçi olarak belirlemişlerdir [3].

Supçiller ve Çapraz'ın 2011 yılında yaptıkları çalışmada oluklu mukavva kutu üretimi yapan bir firma için tedarikçi seçiminde AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. İlk olarak AHP yöntemi ile ana kriterlerin önem dereceleri belirlenmiş daha sonra TOPSIS yöntemi kullanılarak işletmenin mevcut tedarikçileri arasından seçim yapılmıştır [2].

Zeydan ve arkadaşlarının 2011 yılında yaptıkları çalışmada Türkiye'nin en büyük araba üreticisi için tedarikçi seçiminde bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. İlk olarak nitel performansın değerlendirilmesinde bulanık AHP yöntemi kullanılmış ardından bulanık TOPSIS yöntemi ile de tedarikçi sıralaması yapılmıştır. Yapılan çalışmada nitel değişkenler veri zarflama analizi ile nicel değişkenlere dönüştürülmüştür [4]. Yine 2012 yılında Tayyar'ın yaptığı çalışmada gıda sektöründeki pet şişe üretimi yapan bir firma için tedarikçi seçiminde bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bulanık AHP yöntemi kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesinde, bulanık TOPSIS yöntemi ise tedarikçilerin sıralanması için kullanılmıştır [5].

2013 yılında Önder ve Dağ'ın yaptığı çalışmada, elektrolitik bakır katot tedarikinde AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlar ve 4 alternatif arasından en iyisini belirlemişlerdir [6].

Arıkan ve Gökbek' in 2014 yılında yaptıkları çalışmada, bir elektronik firmanın tedarikçi seçiminde kriter ağırlıkları AHP yöntemi ile belirlenmiş, alternatiflerin sıralaması ise TOPSIS yöntemi ile yapılmıştır. Yine Gökbek' in aynı yılda yaptığı çalışmada TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinden tedarikçilerin sıralanmasında yararlanılmıştır. Çalışmada 21 kriter belirlenerek 4

alternatif firma arasından bu kriterler dikkate alınarak seçim yapılmıştır [7].

2014 yılında Junior ve arkadaşlarının yaptığı diğer bir çalışmada otomotiv sektöründe tedarikçi seçimi için bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemleri entegre bir şekilde kullanılmıştır. Yapılan çalışmada motosiklet üreten bir üretici firmasında şanzıman kablosu tedariki için beş kriter dikkate alınarak beş adet alternatif firma arasından seçim yapılmıştır [8]. Aynı yılda Koçak'ın yaptığı çalışmada Türkiye'de Kayseri'de organize sanayi bölgesinde yer alan bir mobilya fabrikası için orman endüstrisi ürünleri tedarikinde 6 adet kriter belirlenmiş ve 5 adet tedarikçi firmanın seçim sıralamasında ANP, AHP, ELECTRE, TOPSIS ve SAW yöntemleri kullanılmıştır [9].

Gündüz ve Güler'in 2015 yılında yaptığı çalışmada, bir termal turizm işletmesinde ürün tedarikinde 7 adet kriter belirlenerek AHP yöntemi ile önem dereceleri saptanmış daha sonra 7 adet alternatif tedarikçi arasından seçim yapmak için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır [10]. Yine aynı yılda Şahin ve Supçiller' in yaptıkları çalışmada, AHP, TOPSIS ve K-ortalamlar yöntemi kullanarak 20 adet tedarikçi firması için kümeleme yapan bir karar destek sistemi önermişlerdir [11].

2016 yılında Geyik ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, ders kitabı basımevi seçimi için AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak seçim yapılmıştır. Çalışmada dört adet seçim kriteri belirlenerek altı adet alternatif basımevi için TOPSIS yöntemi kullanarak seçim yapılmıştır [12]. Yine aynı yıl Çelik ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, otomotiv sektöründeki 3 alternatif firma için tedarikçi seçimi uygulaması yapılmış, seçim kriterlerinin ağırlıklandırılması için bulanık AHP yöntemi 3 adet alternatif tedarik firması arasından, seçim için ise TOPSIS yöntemi kullanılmıştır [13].

Günay ve Ünal'ın 2016 yılında yaptığı başka bir çalışmada ise, bir telekomünikasyon şirketinde tedarikçi seçimi için AHP ve TOPSIS yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Öncelikle AHP yöntemi ile 7 kriter için önem sırası belirlenmiş daha sonra bu kriterler dikkate alınarak 4 uluslararası tedarikçi

arasından TOPSIS yöntemi ile seçim yapılmıştır [14]. Yine aynı yılda Güneş ve Çavdar'ın yaptıkları çalışmada kişiye özel lüks giysi üreten bir firma için tedarikçi seçimi yapılmıştır. Yöntem olarak 7 adet kriterin derecelendirilmesinde AHP yöntemi, 7 adet tedarikçinin sıralanmasında TOPSIS yöntemi kullanılmıştır [15].

Yerlikaya ve Arıkan'ın 2017 yılında yaptıkları çalışmada, kimya endüstrisindeki bir firmanın test kiti tedarikçi seçimi için AHP ve CRITIC yöntemi ile kriterlerin önem derecesi belirlenmiş, daha sonra TOPSIS yöntemi ile 4 adet test kiti üreten firma arasından seçim yapılmıştır [16].

2018 yılında Aydın ve Eren'in yaptıkları çalışmada ise özel alaşımli çelik bir parçanın tedarik edilmesinde 10 adet alternatif tedarik firması arasından TOPSIS yöntemi ile seçim yapılmıştır. Öncesinde AHP yöntemi kullanılarak 6 adet kriter önem derecelerine göre sıralanmıştır [17].

Alakaş ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptıkları çalışmada öncelikle AHP yöntemi ile 4 adet ambulans tedarikçisi seçim kriterleri ağırlıklandırılmış, daha sonra 4 adet ambulans tedarikçisi arasından TOPSIS ve VIKOR yöntemlerine göre seçim yapılmıştır [18].

2021 yılında Öztürk ve Tekin'in yaptıkları çalışmada ise, gıda sektöründe tedarikçi seçimi için AHP ve TOPSIS yöntemleri birlikte kullanılmıştır. 4 adet kriterin önem sırası AHP yöntemi ile belirlendikten sonra 5 adet tedarikçi firması arasından TOPSIS yöntemi ile seçim yapılmıştır [19].

Literatür taraması sonucunda deterjan imalatı yapan bir fabrikada kullanılmak üzere sıvı dolmuş makinesi alımı için tedarikçi seçiminde maliyet, kalite, teknoloji, tedarik süresi ve ödeme yöntemi değerlendirme için belirlenmiş ve tanımlanmıştır.

Daha sonra AHP yöntemi bu kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesinde, TOPSIS yöntemi ise 3 adet alternatif tedarikçi firmanın önem sırasını belirlemek için kullanılmış ve fabrika için en uygun tedarikçi seçimi gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Günümüzde artan rekabet ortamında işletmelerin satın alma maliyetlerini azaltmak ve müşteri memnuniyetini arttırmak amacıyla doğru tedarikçiyi belirlemeleri büyük önem kazanmıştır. Tedarikçi seçiminde her işletmenin farklı ihtiyaçlarından kaynaklı olarak seçim problemi daha karmaşık bir hale gelmiş ve karar vericiler tarafından ele alınan kriterlerin sayısının artması bu problemi daha da zorlaştırmıştır. Bu ÇKKV problemlerinin çözümü için birçok yöntem kullanılmaktadır. Özellikle AHP ve TOPSIS yöntemleri karar vericiler için kolay anlaşılabilir ve uygulanabilir olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde tedarikçi seçim problemlerinde de yaygın olarak bu yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada deterjan imalatı yapan bir fabrikaya sıvı dolum makinesi alımı için doğru tedarikçiyi seçmek amacıyla AHP yöntemi ile TOPSIS yöntemi entegre bir şekilde uygulanmıştır. Öncelikle AHP yöntemi ile tedarikçi seçim kriterleri ağırlıklandırılmış daha sonra TOPSIS yöntemi ile bu kriterler göz önünde bulundurularak

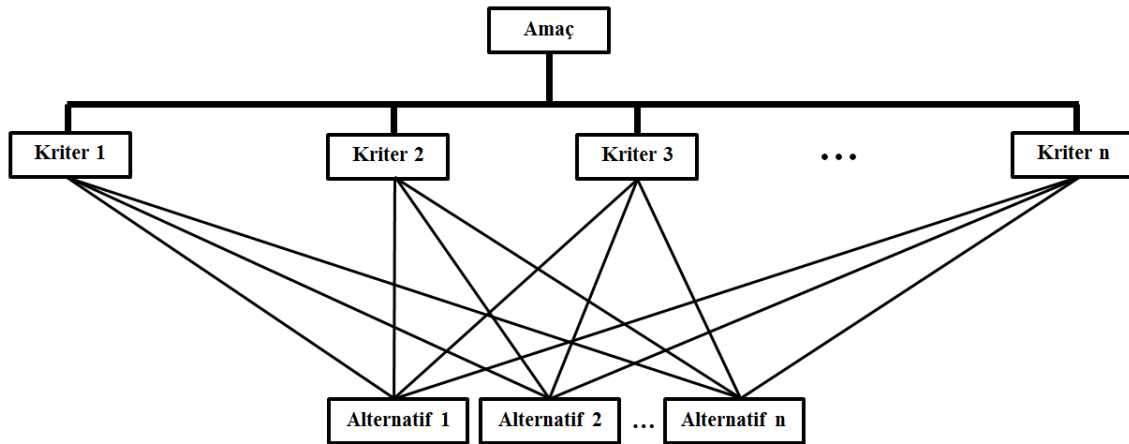
alternatif tedarikçiler arasında seçim gerçekleştirilmiştir.

2.1. Analitik Hiyerarşi Süreci

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), 1977 yılında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiş çok kriterli karar verme tekniğidir [20].

AHP tekniği, karar problemlerinin çözümünde matematiksel ve mantıksal ifadelerden yararlanılması yönünden analitik, kriterleri ve alternatifleri amaca uygun olarak değerlendirmesi açısından hiyerarşik yapıya sahip bir tekniktir.

Hiyerarşik yapı oluşturulurken amaca uygun karar verme için alternatifler ile bu alternatiflerin değerlendirilmesi için dikkate alınacak kriterler ortaya konmaktadır. En üstte amaç belirtilirken orta kısımda kriterler en alt seviyede ise alternatifler yer almaktadır [21]. Bu kriterlerin hem karar verme problemini en iyi yansıtacak hem de dikkate alınması gereken tüm öğeleri içerecek şekilde belirlenmesi en önemli hususlardan biridir. Şekil 1'de AHP tekniğinin hiyerarşik yapısı gösterilmektedir.

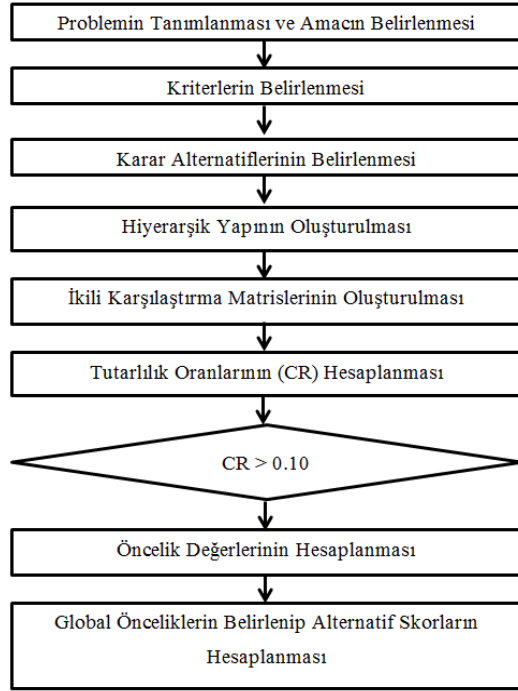


Şekil 1. AHP hiyerarşik yapısı

AHP tekniğinde hiyerarşik yapı belirlendikten sonra tüm kriterler analitik olarak değerlendirilmektedir. Alternatiflerin değerlendirilmesi için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmaktadır. Bu matrislerde yer alan veriler

karar verme problemi için görüş bildirecek uzman kişiler yardımıyla elde edilmektedir [22]. Daha sonra değerlendirilecek olan nicel ve nitel kriterler sayısal olarak ölçütlendirilip değerlendirilmekte ve amaca uygun en iyi alternatif seçimi yapılmaktadır.

Özetle AHP tekniği Şekil 2'deki aşamalardan oluşmaktadır [22]:



Şekil 2. AHP aşamaları

Problem Tanımlanması ve Amacın Belirlenmesi; ilk olarak karar verme problemine ait amacın ne olduğu ifade edilmektedir.

Kriterlerin Belirlenmesi; daha sonra bu amaca yönelik tüm değerlendirme kriterleri belirlenmektedir.

Karar Alternatiflerinin Belirlenmesi; probleme ait tüm kriterler belirlendikten sonra bu kriterler ile değerlendirilecek olan alternatifler ortaya konmaktadır. Böylece probleme ait hiyerarşik yapı oluşturulmaktadır.

İkili Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması; probleme ait tüm kriterlerin birbirlerine göre önem dereceleri ve bunun için sayısal olarak bir ölçeklendirme gereklidir. İkili karşılaştırmaların yapılmasında Çizelge 1'deki Saaty tarafından 1977 yılında oluşturulan puan skalası kullanılmaktadır [20].

Çizelge 1. İkili karşılaştırmada kullanılan puan skalası

Kriter önem derecesi	Tanım
1	Eşit derecede önemli
3	Orta derecede önemli
5	Kuvvetli derece önemli
7	Çok kuvvetli derece önemli
9	Mutlak derecede önemli
2-4-6-8	Ortalama (ara) değerler

İkili Karşılaştırma matrisleri A matrisi olarak isimlendirilmekte ve uzman görüşleri yardımıyla puan skalasındaki önem derecelerine göre oluşturulmaktadır. Bu matrislerde her bir matris elemanı a_{ij} olarak isimlendirilmekte ve bu değerler i. karar alternatifi veya kriterinin j. karar alternatifi veya kriterine göre belirlenen önem değeridir. Bu matrisler Eşitlik 1'de gösterilmiştir.

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A matrisi köşegen elemanları 1 olan ve karşılıklı kıyaslamalar doğrultusunda $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ olan bir kare matristir. Örneğin eğer A alternatifi veya kriterinin B alternatif veya kriterine göre önem derecesi 7 ise, B alternatif veya kriterinin A alternatif veya kriterine göre 1/7 düzeyinde önem derecesine sahip olduğu belirlenmektedir.

Önem dereceleri tespit edildikten sonra oluşturulan matriste kriterlerin bütün içerisindeki önem ağırlıkları hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada her bir sütun değeri Eşitlik 2'den faydalanarak hesaplanmaktadır:

$$c_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

Burada, kriterlerin birbirlerine göre önem değerlerini gösteren bir matris oluşturulur. Oluşturulan bu matris C matrisi olarak ifade

edilmektedir. Bu matrisin elemanı olan her bir c_{ij} değeri hesaplanırken, A matrisindeki her bir sütunda toplam değerler bulunur ve A matrisinin her bir elemanı bu değere bölünerek c_{ij} değerleri elde edilir. Elde edilen bu matris A matrisinin normalize edilmiş halidir.

Normalize edilerek elde edilen C matrisinde her bir satırın ortalaması alınarak her bir kritere ait öncelik vektörü W değerleri hesaplanır. Bu hesaplama Eşitlik 3'te gösterilmiştir.

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ij}}{n} \quad (3)$$

Tutarlılık Oranının Hesaplanması; Öncelik vektörü belirlendikten sonra karar vericilerin kişisel değerlendirmelerinden kaynaklı tutarlılığın test edilmesi gerekmektedir. Bunun için tutarlılık oranlarının hesaplanması gerekmektedir [23]. İkili karşılaştırma matrisleri % 100 tutarlı ise kriter sayısı n değeri A matrisinin en büyük özdeğeri olur ve $n = \lambda_{max}$ olarak yazılmaktadır [22]. $A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w$ eşitliğinden A matrisinin en büyük özdeğeri Eşitlik 4' teki gibi hesaplanmaktadır:

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j}{w_i} \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

A matrisinde tutarsızlık fazla ise λ_{max} , n'den o derece uzaktır. Tutarlılığın ölçümünde "**Tutarlılık Endeksi**" (CI) ve "**Tutarlılık Oranı**" (CR) değerleri hesaplanmaktadır [22]. "**Tutarlılık Endeksi**" Eşitlik 5'te, "**Tutarlılık Oranı**" ise Eşitlik 6'da yer alan formüllerle hesaplanmaktadır.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da yer alan RI, rastsal endeks değerini temsil etmektedir. Saaty tarafından sabit sayıların yer aldığı ve n değerine göre değişen endeks değerleri Çizelge 2. 'de gösterilmiştir [24].

Çizelge 2. Rastgele endeks değerleri

N değeri	1	2	3	4	5	6
RI değeri	0	0	0,58	0,89	1,12	1,24
N değeri	7	8	9	10	11	12
RI değeri	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

Eğer CR değeri 0,10 değerinden düşük ise ikili karşılaştırma matrisi tutarlıdır denir. Yapılan hesaplamalar sonucunda tutarsızlık söz konusu ise yapılan ikili karşılaştırmalar tekrar değerlendirilmelidir.

En yüksek öncelikli alternatifin seçilmesi; bütün ikili kıyaslamalar değerlendirildikten sonra en yüksek öncelik değerine sahip olan seçenek karar verici için en uygun alternatiftir.

2.2. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi, 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilmiş çok kriterli karar verme tekniğidir [25].

TOPSIS yöntemi, anlaşılmasının kolay oluşu ve karmaşık matematiksel hesaplamalar içermemesinden dolayı sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir [22].

Bu yöntemde iki temel kavram yer almaktadır: pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm. Pozitif ideal çözüm, fayda veya kazancı maksimize eden veya maliyeti minimize eden çözümdür. Negatif ideal çözüm ise, tam tersine fayda veya kazancı minimize eden veya maliyeti maksimize eden çözümdür. En uygun alternatifin, pozitif ideal çözüme yakın, negatif ideal çözümden uzak olması istenir. Bu yakınlık veya uzaklık, ideal çözüm noktalarına olan uzaklıkların hesaplanmasıyla belirlenmektedir. Bu uzaklıkların karşılaştırılması ile alternatifler arasında sıralamalar belirlenerek en uygun alternatif seçilmektedir.

TOPSIS yöntemi 6 adımdan oluşan bir süreç içermektedir [22]:

1. Karar matrisinin elde edilmesi,
2. Normalize (Standart Karar) matrisinin elde edilmesi,

3. Ağırlıklandırılmış Normalize (Ağırlıklandırılmış Standart Karar) matrisinin elde edilmesi,
4. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerinin elde edilmesi,
5. Pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm noktalarına olan uzaklıkların belirlenmesi,
6. İdeal çözüme nispi (Göreceli) yakınlığın hesaplanması.

Bu adımlar şu şekilde özetlenmektedir:

Adım 1: Karar matrisinin elde edilmesi; karar vericiler tarafından oluşturulan başlangıç matrisidir. Bu matris A matrisi olarak isimlendirilmekte ve satırlar üstünlükleri sıralanmak istenen alternatifleri belirtirken, sütunlar karar verilmesi için dikkate alınan değerlendirme kriterlerini içermektedir. Eşitlik 7' de m adet karar alternatifi ve n adet değerlendirme kriterinden oluşan bir karar matrisinin genel gösterimi yer almaktadır.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Adım 2: Normalize (Standart Karar) matrisinin elde edilmesi; Standart karar matrisi Eşitlik 7' de belirtilen A karar matrisinin normalize edilmesi ile elde edilmektedir. Normalizasyon işlemi farklı şekillerde gerçekleştirilirken sıklıkla vektör normalizasyonundan yararlanılmaktadır [22]. Vektör normalizasyonunda A matrisinde yer alan her bir değerın kareleri alınarak bu değerler sütunlar için ayrı ayrı toplanmakta ve her bir a_{ij} değeri yer aldığı sütunun toplamının kareköküne bölünmektedir. Bu normalizasyon işlemi Eşitlik 8' de gösterilmektedir.

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (i=1, \dots, m \text{ ve } j=1, \dots, n) \quad (8)$$

x_{ij} değerlerinden oluşan normalize edilmiş matris (X_{ij}) Eşitlik 9'da gösterilmektedir.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Adım 3: Ağırlıklandırılmış Normalize (Standart Karar) matrisinin elde edilmesi; elde edilen normalize matriste değerlendirme kriterlerine ait ağırlık değerleri uzman görüşü veya AHP, ANP, CRITIC, DEMATEL, SWARA vb. yöntemler kullanılarak belirlenir ve normalize matristeki her bir eleman bu kriter ağırlıklarıyla çarpılarak Ağırlıklandırılmış normalize matris elde edilir.

Ağırlıklandırılmış normalize matris (W_{ij}) Eşitlik 10'da gösterildiği gibidir.

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 x_{11} & w_2 x_{12} & \dots & w_n x_{1n} \\ w_1 x_{21} & w_2 x_{22} & \dots & w_n x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 x_{m1} & w_2 x_{m2} & \dots & w_n x_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Adım 4: Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerinin elde edilmesi; pozitif ideal çözüm değerleri belirlenirken eğer amaç maksimizasyon ise W_{ij} matrisinde her bir sütunda en büyük değerler, eğer amaç minimizasyon ise W_{ij} matrisinde her bir sütunda en küçük değerler pozitif ideal çözüm değerlerini oluşturmaktadır.

Negatif ideal çözüm değerleri belirlenirken ise, eğer amaç maksimizasyon ise W_{ij} matrisinde her bir sütunda en küçük değerler, eğer amaç minimizasyon ise W_{ij} matrisinde her bir sütunda en büyük değerler negatif ideal çözüm değerlerini oluşturmaktadır.

Pozitif ideal çözüm değerleri Eşitlik 11'de ve negatif ideal çözüm değerleri Eşitlik 12'de gösterilmiştir.

$$A^+ = \left\{ \left(\max_i w_{ij} \mid j \in J \right), \left(\min_i w_{ij} \mid j \in J^* \right) \right\} \quad (11)$$

$$A^+ = \{w_1^+, w_2^+, \dots, w_n^+\}$$

$$A^- = \left\{ \left(\min_i w_{ij} \mid j \in J \right), \left(\max_i w_{ij} \mid j \in J^* \right) \right\} \quad (12)$$

$$A^- = \{w_1^-, w_2^-, \dots, w_n^-\}$$

Her iki formülde J maksimizasyonu, J^* ise minimizasyon değerini göstermektedir.

Adım 5: Pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm noktalarına olan uzaklıkların belirlenmesi; ağırlıklandırılmış normalize matriste her bir değer pozitif ideal çözüme ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları Öklidyen Uzaklık Yaklaşımı kullanılarak Eşitlik 13 ve Eşitlik 14'teki gibi hesaplanmaktadır.

Pozitif ideal çözüme olan uzaklık:

$$T_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_{ij} - w_j^+)^2} \quad (13)$$

Negatif ideal çözüme olan uzaklık:

$$T_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_{ij} - w_j^-)^2} \quad (14)$$

Adım 6: İdeal çözüme nispi (Göreceli) yakınlığın hesaplanması; ideal çözüme nispi yakınlık Eşitlik 15'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_i^* = \frac{T_i^-}{T_i^- + T_i^+} \quad (15)$$

Burada $C_i^* = 1$ değeri ilgili alternatifin pozitif ideal çözüme mutlak yakınlığı,

$C_i^* = 0$ değeri ise ilgili alternatifin negatif ideal çözüme mutlak yakınlığı göstermektedir. C_i^* değeri 1'e yakın olan alternatif en iyi alternatif olarak, 0'a yakın olan alternatif en kötü alternatif olarak sıralanmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

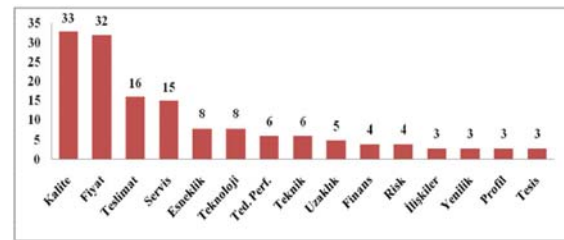
3.1. Dolum Hattı Makinelerinin Tedarikçi Seçim Problemi

Deterjan imalatı yapan bir fabrikaya 8 nozullu bir sıvı dolmuş makinesi siparişi verilecektir. Bu makine

siparişi için AHP ve TOPSIS yöntemleri entegre bir şekilde uygulanarak 5 adet kriter dikkate alınmış 3 adet alternatif tedarikçi firmaların önem sırası belirlenmiştir.

3.1.1. Kriterlerin Tanımlanması

Yapılan literatür taramasına göre en iyi tedarikçi firmanın seçiminde Şekil 3'te verilen kriterler dikkate alınmaktadır.



Şekil 3. Tedarikçi seçimi ve değerlendirilmesinde kullanılan kriter sıklıkları [3]

Buna göre en çok kullanılan kriterler kalite, fiyat, teslimat, süre, esneklik, teknoloji, teknik, uzaklık vb. olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ise sıvı dolmuş makinesi tedariki için fabrikada yer alan satın alma uzmanlarının görüşleri doğrultusunda bu kriterlerden maliyet, kalite, teknoloji, süre ve ödeme yöntemi kriterleri daha fazla önem arz ettiği belirlenmiştir.

Maliyet: Tedarikçi firmaların seçiminde en önemli etkenlerden biridir.

Kalite: Tedarikçi firmaları, ürün ve imalat aşamalarının talebin gerektirdiği gerekliliklere cevap verebilme ve değerliliği açısından değerlendirilmektedir.

Teknoloji: Teknoloji, firmaların teknik ve donanımsal olarak hangi seviyede olduğunu net bir şekilde gösteren kritik bir faktördür.

Süre: Süre, birçok alanda tedarikçi seçerken kullanılan önemli bir kriterdir. Özellikle hızlı tüketim sektöründe hayati bir öneme sahiptir.

Ödeme yöntemi: Ödeme yöntemi, son yıllarda finans ve bankacılık faaliyetlerinin gelişmesiyle daha çok önemsenen bir kriter haline gelmiştir.

3.1.2. İkili Karşılaştırma Karar Matrisinin Oluşturulması

Kriterlerin ikili karşılaştırmalarında Saaty tarafından önerilen önem skalası kullanılmıştır.

Öncelikle kriterler için gerçekleştirilen değerlendirmeler sonucunda Çizelge 3'te verilen ikili karşılaştırma matrisi elde edilmiştir.

Çizelge 3. Kriterler arası karşılaştırma matrisi

Kriterler arası karşılaştırma matrisi					
Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi	Maliyet	Kalite	Teknoloji	Süre	Ödeme yöntemi
Maliyet	1	2	7	4	3
Kalite	0,50	1	5	3	2
Teknoloji	0,142857	0,20	1	0,25	0,25
Süre	0,25	0,333333	4	1	0,2
Ödeme yöntemi	0,333333	0,50	4	5	1
Toplam	2,226190	4,033333	21	13,25	6,45

Daha sonra kriterler için normalleştirme matrisi oluşturulmuştur (Çizelge 4)

Çizelge 4. Kriterler arası normalleştirilme matrisi

Kriterlerin normalize matrisi					
Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi	Maliyet	Kalite	Teknoloji	Süre	Ödeme yöntemi
Maliyet	0,449197	0,495867	0,333333	0,301886	0,465116
Kalite	0,224598	0,247933	0,238095	0,226415	0,310077
Teknoloji	0,064171	0,049586	0,047619	0,018867	0,038759
Süre	0,112299	0,082644	0,190476	0,075471	0,031007
Ödeme Yöntemi	0,149732	0,123966	0,190476	0,377358	0,155038
Toplam	1	1	1	1	1

Ardından kriterler arası normalleştirme matris öncelik değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 5)

Çizelge 5. Kriterler arası normalleştirilme matrisi ağırlık değerleri

Kriterlerin normalize matrisi	
Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi	Öncelikler vektörü
Maliyet	0,409080
Kalite	0,249424
Teknoloji	0,043800
Süre	0,098379
Ödeme Yöntemi	0,199314

Öncelik vektörleri incelendiğinde; maliyet ve kalite kriterlerinin diğer kriterlere oranla daha çok önem arz ettiği görülmektedir.

Daha sonra kriterlerin önem dereceleri belirlenirken tutarlılık testi ile uzman görüşlerinin tutarsızlık oranları hesaplanmıştır.

Çizelge 6. Kriterler arası tutarlılık değerleri

Tutarlılık oranı hesabı				
Tüm öncelikler matrisi	λ	λ_{max}	CI	CR
2,205998	5,392579	5,354394	0,088598	0,079105
1,366737	5,479573			
0,226549	5,172253			
0,498857	5,070728			
1,127490	5,656836			

Çizelge 6'da belirtilen tutarlılık oranı hesabına göre tutarlılık testinin sonucu 0,10'dan küçük olduğu için bu matris tutarlıdır.

Ardından her kriter için ayrı ayrı alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuş ve tutarlılıkları test edilmiştir.

Alternatifler için matrisler: Öncelikle maliyet kriteri için alternatifler değerlendirilmiş ve değerlendirme matrisi Çizelge 7'de gösterilmiştir.

Çizelge 7. Alternatifler için maliyet kriteri karşılaştırma matrisi

Maliyet kriteri			
Alternatifler	A	B	C
A	1	0,50	4
B	2	1	6
C	0,25	0,166666667	1
Toplam	3,25	1,666666667	11

Daha sonra bu matrisin normalleştirilme matrisi oluşturularak maliyet kriteri için alternatiflerin karşılaştırılması yapılmıştır ve Çizelge 8'de gösterilmiştir. Sırasıyla B ve A firmalarının maliyet kriteri için C firmasına göre daha uygun olduğu görülmektedir.

Çizelge 8. Alternatifler için maliyet kriteri normalleştirme matrisi

Normalize maliyet kriteri				Öncelikler vektörü
Alternatifler	A	B	C	
A	0,307692	0,3	0,363636	0,323776
B	0,615384	0,6	0,545454	0,586946
C	0,076923	0,1	0,090909	0,089277

Öncelik değerleri hesaplandıktan sonra tutarlılık testi yapılmış ve tutarlılık testinin sonucu 0,10'dan küçük olduğu için tutarlı olduğu Çizelge 9'da gösterilmiştir.

Çizelge 9. Alternatifler için maliyet kriteri tutarlılık testi

Maliyet kriteri tutarlılık oranı hesabı				
Tüm öncelikler matrisi	λ	λ_{max}	CI	CR
0,974358	3,009359	3,009212	0,004606	0,007942
1,770163	3,015885			
0,268045	3,002393			

Kalite kriterinin alternatifler arasında değerlendirilmesi için oluşturulan matris Çizelge 10'da gösterilmiştir.

Çizelge 10. Alternatifler için kalite kriteri karşılaştırma matrisi

Kalite kriteri			
Alternatifler	A	B	C
A	1	0,33	5
B	3	1	7
C	0,20	0,142857	1
Toplam	4,2	1,476190	13

Daha sonra bu matrisin normalleştirilme matrisi oluşturularak kalite kriteri için alternatiflerin karşılaştırılması yapılmıştır ve Çizelge 11'de gösterilmiştir.

Kalite kriterinde alternatifler arasından B firmasının diğer firmalara göre çok daha iyi olduğu hesaplanan öncelik vektöründen görülmektedir.

Çizelge 11. Alternatifler için kalite kriteri normalleştirme matrisi

Normalize kalite kriteri				Öncelikler vektörü
Alternatifler	A	B	C	
A	0,238095	0,225806	0,384615	0,282839
B	0,714285	0,677419	0,538461	0,643388
C	0,047619	0,096774	0,076923	0,073772

Öncelik değerleri hesaplandıktan sonra tutarlılık testi yapılmış ve tutarlılık testinin sonucu 0,10'dan küçük olduğu için matrisin tutarlı olduğu Çizelge 12'de gösterilmiştir.

Çizelge 12. Alternatifler için kalite kriteri tutarlılık testi

Kalite kriteri tutarlılık oranı hesabı				
Tüm öncelikler matrisi	λ	λ_{max}	CI	CR
0,866162	3,062386	3,065511	0,032755	0,056475
2,008310	3,121456			
0,222252	3,012691			

Teknoloji kriteri için alternatiflerin değerlendirilme matrisi Çizelge 13'te gösterilmiştir.

Çizelge 13. Alternatifler için teknoloji kriteri karşılaştırma matrisi

Teknoloji kriteri			
Alternatifler	A	B	C
A	1	0,33	2
B	3	1	5
C	0,50	0,20	1
Toplam	4,5	1,533333	8

Daha sonra bu matrisin normalleştirilme matrisi oluşturularak teknoloji kriteri için alternatiflerin karşılaştırılması yapılmıştır ve Çizelge 14'te gösterilmiştir.

Teknoloji kriterinde de yine alternatifler arasından B firmasının diğer firmalara göre daha iyi olduğu görülmektedir.

Çizelge 14. Alternatifler için teknoloji kriteri normalleştirme matrisi

Normalize teknoloji kriteri				Öncelikler vektörü
Alternatifler	A	B	C	
A	0,222222	0,217391	0,250000	0,229871
B	0,666666	0,652173	0,625000	0,647946
C	0,111111	0,130434	0,125000	0,122181

Teknoloji kriteri için oluşturulan matrisin tutarlılık testi yapılmış ve Çizelge 15'te gösterilmiştir.

Çizelge 15. Alternatifler için teknoloji kriteri tutarlılık testi

Teknoloji kriteri tutarlılık oranı hesabı				
Tüm öncelikler matrisi	λ	λ_{max}	CI	CR
0,690217	3,002626	3,003696	0,001848	0,003186
1,948470	3,007145			
0,366706	3,001317			

Tutarlılık testinin sonucunda CR değerinin 0,10'dan küçük olduğu için bu matrisin tutarlı olduğu görülmektedir.

Daha sonra süre kriteri için değerlendirme matrisi oluşturulmuş ve Çizelge 16'da gösterilmiştir.

Çizelge 16. Alternatifler için süre kriteri karşılaştırma matrisi

Süre kriteri			
Alternatifler	A	B	C
A	1	2,00	5
B	0,5	1	3
C	0,2	0,333333	1
Toplam	1,7	3,333333	9

Ardından bu matris için normalleştirme yapılmış ve öncelik vektörü hesaplanmıştır. Çizelge 17'de gösterilen bu matriste belirtilen öncelik vektörü değerlerine göre süre kriterinde alternatifler arasından A firmasının diğer firmalara göre daha iyi olduğu görülmektedir.

Çizelge 17. Alternatifler için süre kriteri normalleştirme matrisi

Normalize süre kriteri				Öncelikler vektörü
Alternatifler	A	B	C	
A	0,588235	0,6	0,555555	0,581263
B	0,294117	0,3	0,333333	0,309150
C	0,117647	0,1	0,111111	0,109586

Tutarlılık testi süre kriteri için oluşturulan matrise de uygulanmış ve CR değeri 0,10'dan küçük olduğu için bu matrisin tutarlı olduğu gösterilmiştir. (Çizelge 18.)

Çizelge 18. Alternatifler için süre kriteri tutarlılık testi

Süre kriteri tutarlılık oranı hesabı				
Tüm öncelikler matrisi	λ	λ_{max}	CI	CR
1,747494	3,006371	3,003696	0,001848	0,003186
0,928540	3,003523			
0,328888	3,001192			

Aynı adımlar en son kriter ödeme yöntemi için de uygulanmış ve ilk olarak değerlendirme matrisi Çizelge 19'da gösterilmiştir.

Çizelge 19. Alternatifler için ödeme yöntemi kriteri karşılaştırma matrisi

Ödeme yöntemi kriteri			
Alternatifler	A	B	C
A	1	0,50	4
B	2	1	6
C	0,25	0,166666	1
Toplam	3,25	1,666666	11

Daha sonra bu matrisin normalizasyonu gerçekleştirilmiş ve Çizelge 20'de hesaplanan öncelik vektörüne göre ödeme yöntemi kriterinde alternatifler arasından B firmasının diğer firmalara göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 20. Alternatifler için ödeme yöntemi kriteri normalleştirme matrisi

Normalize ödeme yöntemi kriteri				Öncelikler vektörü
Alternatifler	A	B	C	
A	0,307692	0,3	0,363636	0,323776
B	0,615384	0,6	0,545454	0,586946
C	0,076923	0,1	0,090909	0,089277

Ödeme yöntemi kriteri için oluşturulan matrisin tutarlılık testi yapılmış ve Çizelge 21'de gösterilmiştir.

Çizelge 21. Alternatifler için ödeme yöntemi kriteri tutarlılık testi

Ödeme yöntemi kriteri tutarlılık oranı hesabı				
Tüm öncelikler matrisi	λ	λ_{max}	CI	CR
0,974358	3,009359	3,009212	0,004606	0,007942
1,770163	3,015885			
0,268045	3,002393			

Tutarlılık testinin sonucu 0,10'dan küçük olduğu için bu matris tutarlıdır.

3.2. TOPSIS Yönteminin Uygulanması

Tedarikçi firmaların kriterlere göre değerlendirilmesi için karar matrisi oluşturulmuş ve uzman değerlendirilmesi sonucu oluşan karar matrisi Çizelge 22'de gösterilmiştir.

Çizelge 22. AHP kriter ağırlıkları ve TOPSIS puanlaması

	Kriter ağırlıkları				
	0,409080	0,249424	0,043800	0,098379	0,199314
	Maliyet	Kalite	Teknoloji	Süre	Ödeme yöntemi
A	5	6	6	6	5
B	7	8	7	5	6
C	3	4	4	4	3

Çizelge 22.' de firmalara maliyet, kalite, teknoloji, süre ve ödeme yöntemi kriterlerine 1-10 arasında değerler verilmiştir. Bu değerlere ve AHP metoduyla bulduğumuz kriter ağırlıkları değerleri eklenmiştir.

Çizelge 23. Normalleştirilmiş matris

	Normalize matris				
	Maliyet	Kalite	Teknoloji	Süre	Ödeme yöntemi
A	0,548821	0,557086	0,597022	0,683763	0,597614
B	0,768349	0,742781	0,696526	0,569802	0,717137
C	0,329292	0,371390	0,398014	0,455842	0,358568

Çizelge 23'te karar matrisinin normalleştirilmesi yapılmış ardından eklenen ağırlıklarla birlikte karar matrisinin ağırlıklandırılmış normalize matrisi Çizelge 24' te gösterilmiştir.

Çizelge 24. Ağırlıklı normalleştirilmiş matris

	Ağırlıklı normalize matris				
	Maliyet	Kalite	Teknoloji	Süre	Ödeme yöntemi
A	0,224512	0,138950	0,026150	0,067268	0,119113
B	0,314316	0,185267	0,030508	0,056057	0,142935
C	0,134707	0,092633	0,017433	0,044845	0,071467

Daha sonra TOPSIS yönteminin son adımı pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri hesaplanmış ve Çizelge 25'te gösterilmiştir. Bu değerler hesaplanırken maliyet ve süre kriterleri için minimum değerler kalite, teknoloji ve ödeme yöntemi için maksimum değerler çizelgede yer almaktadır.

Çizelge 25. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri

Pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri					
Pozitif ideal çözüm	0,134707	0,185267	0,030508	0,044845	0,142935
Negatif ideal çözüm	0,314316	0,092633	0,017433	0,067268	0,071467

Son olarak bu değerlerden yola çıkarak pozitif ideal uzaklık ve negatif uzaklık değerleri hesaplanmış ve ideal çözüme göreceli yakınlık Çizelge 26'da gösterilmiştir.

Çizelge 26. Yakınlık değerleri ve sıralama

	Pozitif ideal uzaklık	Negatif ideal uzaklık	İdeal çözüme göreceli yakınlık	Sıralama
A	0,106298	0,112054	0,513179	2
B	0,118259	0,397017	0,770493	1
C	0,184796	0,184796	0,5	3

Tüm kriterler için alternatiflerin değerlendirilmesi amacıyla yapılan tüm bu adımlar sonucunda firmaların sıralaması elde edilmiştir. Elde edilen değerlere göre B firmasının tüm kriterler üzerinden değerlendirilmesi sonucunda sıvı dolum makinesi alımı için diğer firmalara göre daha uygun olduğu belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmanın başında da belirtildiği gibi örnek bir uygulama yapılmıştır. Deterjan imalatı yapan bir fabrikada sıvı dolum makinesi alımı için tedarikçi seçim problemi ele alınmış, AHP-TOPSIS yöntemleri adım adım entegre bir şekilde uygulanarak sonuç bulunmuştur.

İncelediğimiz problemde öncelik, fabrikanın gerekliliklerine göre tedarikçi seçimi için kriterleri belirlemek olmuştur. Bunlar belirlenirken literatür taramalarından çıkan sonuçlar ve uzman görüşü harmanlanarak karar verilmiştir. Bu seçimden sonra karşılaştırma matrisleri, normalleştirme matrisleri ve tutarlılık testleri yapılmıştır. Bu matrisler yapılırken puanlamalar bu alandaki uzman kişi ile beraber yapıldığından dolayı oldukça tutarlı ve belirlenen kriterlere uygun şekilde yapılmıştır. AHP-TOPSIS yöntemlerinin entegre bir şekilde yapıldığı bu çalışmada A, B ve C firmalarından B firmasının seçilen kriterlerde diğer tedarikçi firmalara göre daha ideal olduğu ortaya çıkmıştır. Gelecek çalışmalarda tedarikçi seçiminde ana kriterlerin yanı sıra alt kriterlerin de dikkate alınarak çalışmalar yapılması önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Yüksel, F.Ş., Kalan, O., Işık, M., 2022. Havaalanlarında Dijital Dönüşüm Risklerinin Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(3),781-792.
2. Supçiller, A.A., Çapraz, O., 2011. AHP-TOPSIS Yöntemine Dayalı Tedarikçi Seçimi Uygulaması. İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik Dergisi, 13, 1-22.
3. Bagheri, F., Tarokh, M.J., 2010. A Fuzzy Approach for Multi-Objective Supplier Selection. International Journal of Industrial Engineering & Production Research, 21(1), 1-9.
4. Zeydan, M., Çolpan, C., Çobanoğlu, C., 2011. A Combined Methodology for Supplier Selection and Performance Evaluation. Expert Systems with Applications, 38(3), 2741-2751.
5. Tayyar, N., 2012. Pet Şişe Tedarikçisi Seçiminde Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS Yaklaşımı. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 17(3), 351-371.
6. Önder, E., Dag, S., 2013. Combining Analytical Hierarchy Process and TOPSIS Approaches for Supplier Selection in A Cable Company. Journal of Business, Economics & Finance, 2(2), 56-74.
7. Gökbek, B., 2014. Çok Ölçütlü Karar Verme Yaklaşımlarına Dayalı Tedarikçi Seçimi ve Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 176.
8. Junior, F.R.L., Osiro, L., Carpinetti, L.C.R., 2014. A Comparison Between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS Methods to Supplier Selection. Applied Soft Computing, 21, 194-209.
9. Koçak, D., 2014. Mobilya Sektöründe En Uygun Tedarikçi Seçimi İçin Çok Kriterli Karar Verme Tekniğinin Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Kayseri, 109.
10. Gündüz, H., Güler, M.E., 2015. Termal Turizm İşletmelerinde Çok Ölçütlü Karar Verme Teknikleri Kullanılarak Uygun Tedarikçinin Seçilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 30(1), 203-222.
11. Şahin, Y., Supçiller, A.A., 2015. Tedarikçi Seçimi İçin Bir Karar Destek Sistemi. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 3(2), 91-104.
12. Hamurcu, M., Geyik, O., Tosun, M., Ünlüsoy, S., Eren, T., 2016. Kitap Basımevi Seçiminde AHP ve TOPSIS Yöntemlerinin Kullanımı. Uluslararası Sosyal ve Eğitim Bilimleri Dergisi, 3(6), 106-126.
13. Çelik, C., Alkaç, A., Aladağ, Z., 2016. Otomotiv Sektöründe Faaliyet Gösteren Bir Firmada Tedarikçi Seçimi: AHP-BULANIK AHP ve TOPSIS Uygulaması. Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), 43-83.
14. Günay, Z., Ünal, Ö.F., 2016. AHP-TOPSIS Yöntemi ile Tedarikçi Seçimi (Bir Telekomünikasyon Şirketi Örneği). PESA Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2(1), 37-53.
15. Güneş, P., Çavdar, E., 2016. Kişiyeye Özel Lüks Giysiler Üreten Bir Konfeksiyon Mağazasında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri Kullanılarak Tedarikçi Seçimi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (30), 217-245.
16. Yerlikaya, M.A., Arıkan, F., 2017. AHP-KRİTİK TOPSIS Bütünleşik Yaklaşımı İle Akreditasyon-Temelli Tedarikçi Seçimi. The International New Issues in Social Sciences, 5(5), 627-635.
17. Aydın, Y., Eren, T., 2018. Savunma Sanayiinde Stratejik Ürün için Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Tedarikçi Seçimi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1), 129-148.
18. Alakaç, H.M., Bucak, M., Kızıltaş Ş., 2019. AHP-TOPSIS ve AHP-VIKOR Yöntemleri ile Ambulans Tedarik Firması Seçimi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 4(1), 93-101.
19. Öztürk, D., Tekin, M., 2021. Hammadde Tedarikçi Seçiminde AHP-TOPSIS Yöntemlerinin Kullanılması ve Gıda Sektöründe Bir Uygulama. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 25(2), 411-432.
20. Saaty, T.L., 1977. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. Journal of Mathematical Psychology, 15(3), 234-281.

21. Miç, P., Antmen, Z.F., Erdurak, M.Ö., 2019. Öğrencilerin Seçmeli Ders Seçimi Problemine Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı. In G. Başyigit Kılıç, A. Çiftçi, A. Yılmaz (Eds.), Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler. Gece Akademi, Ankara, 148.
22. Ayçin, E., 2019. Çok Kriterli Karar Verme: Bilgisayar Uygulamalı Çözümler. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 512.
23. Antmen, Z.F., Miç, P., 2018. Çocuk Yoğun Bakım Ünitesinde Çok Kriterli Karar Verme ile Mekanik Ventilator Seçimi ve Bir Uygulama Örneği. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(4), 17-30.
24. Saaty, T.L., 1990. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research, 48, 9-26.
25. Hwang, C.L., Yoon, K., 1981. Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications. Springer, Berlin Heidelberg.

Fuzzy Logic Modeling of Energy and Exergy Efficiencies in Drying Units Powered by Renewable Energy Sources

Ahmet ELBİR¹ ORCID 0000-0001-8934-7665

Feyza AKARSLAN KODALOĞLU*¹ ORCID 0000-0002-7855-8616

Mehmet Erhan ŞAHİN² ORCID 0000-0003-1613-7493

¹Suleyman Demirel University, YEKARUM, Isparta, Türkiye

²Isparta Applied Science University, Technical Vocational High School, Isparta, Türkiye

Geliş tarihi: 01.11.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: ELBİR, A., AKARSLAN KODALOĞLU, F., ŞAHİN, M.E., (2023). Fuzzy Logic Modeling of Energy and Exergy Efficiencies in Drying Units Powered by Renewable Energy Sources. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 981-991.

Abstract

Today, exergy analyses have become essential for addressing critical engineering and environmental issues, such as improving energy efficiency, sustainable resource utilization, and reducing environmental impacts. To enhance the potential of these studies in generating more effective and precise results, new methods, like fuzzy logic, have been successfully employed in the analysis and decision-making processes. This article examines the energy and exergy analyses and integrating these analyses with fuzzy logic. The Organic Rankine Cycle systems, denoted as ORC-1 and ORC-2, exhibit energy efficiencies of 10.66% and 10.92%, respectively, with ORC-2 displaying an exergy efficiency increase to 86.8%. The cooling system boasts a Coefficient of Performance (COP) of 3.64 and an exergy efficiency of 25.3%. With fuzzy logic method, the estimated exergy efficiency for ORC-1 reached 99.38%, and the energy efficiency was estimated at 97.33%. For ORC-2, the exergy efficiency was estimated at 98.66%, and the energy efficiency was estimated at 99.42%. The refrigerant quantity for the cooling system was estimated at 97.7%, and the COP was estimated at 98.03%.

Keywords: Renewable energy, Energy and exergy efficiency, Fuzzy logic, Sustainability

Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Beslenen Kurutma Ünitelerinde Enerji ve Ekserji Verimlerinin Bulanık Mantık Modellemesi

Öz

Günümüzde ekserji analizleri, enerji verimliliği artırma, kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve çevresel etkilerin azaltılması gibi kritik mühendislik ve çevre sorunlarını ele almak için vazgeçilmez hale gelmiştir. Bu çalışmaların daha etkili ve kesin sonuçlar üretme potansiyelini artırmak amacıyla, bulanık mantık gibi yeni yöntemler, analiz ve karar verme süreçlerine başarıyla uygulanmaktadır. Bu makalede, enerji ve ekserji analizleri ve bulanık mantık modellemesi incelenmiştir. ORC-1 ve ORC-2 olarak adlandırılan Organik Rankine Çevrimi sistemleri sırasıyla enerji verimliliği %10.66 ve %10.92'ye sahiptir, ancak ORC-2'nin

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Feyza AKARSLAN KODALOĞLU, feyzaakarслан@sdu.edu.tr

ekserji verimi %86.8'e yükselir. Soğutma sistemi ise 3.64'lük bir COP değeri ve %25.3'lük ekserji verimine sahiptir. Bulanık mantık metodu ile: ORC-1 için ekserji verimliliği %99,38, enerji verimliliği ise %97,33 olarak tahmin edilmiştir. ORC-2 için ekserji verimliliği %98,66, enerji verimliliği ise %99,42 olarak tahmin edilmiştir. Soğutma sistemi için soğutkan miktarı %97,7, COP ise %98,03 olarak tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, Enerji ve exerji verimi, Bulanık mantık, Sürdürülebilirlik

1. INTRODUCTION

The utilization of heat energy derived from renewable energy sources for drying units represents a significant objective in terms of energy efficiency. Consequently, energy efficiency and sustainability have become the focal points of industrial processes in recent years. In this context, our study aims to provide a new perspective on energy conversion and process efficiency by focusing on the unique combination of the Organic Rankine Cycle (ORC), refrigeration cycle, and drying unit. The detailed analysis of our integrated system highlights its features that enhance energy efficiency and emphasize environmental sustainability, thereby revealing significant potentials in industrial applications.

Some studies in the literature: In a study, Smart Fuzzy Controller and Fuzzy Rule Suram compared defuzzification methods based on environmental factors such as weather variables for the drying process. The results obtained show that the proposed approach has great potential in terms of performance. The smart fuzzy controller offered a smoother and more controllable performance than traditional controllers, and Fuzzy Rule Suram was found to be more efficient than the Smart Fuzzy Rule [1]. Another study provides a comprehensive review of fuzzy logic applications in the field of drying technology. Fuzzy logic applications are discussed systematically. Additionally, a road map for future studies for drying technology is presented [2]. Rahman et. al. He supported the experiments on vacuum drying of cocoa beans with mathematical models. The effects of temperature and pressure changes on drying speed and product quality were investigated. Experimental results showed that it is compatible with the fuzzy model. A suitable model for optimum drying has been proposed [3]. In another study, the convective-infrared drying

behavior of white mulberry was examined and experimental data were obtained with different parameters. Humidity rate predictions were made with mathematical models and artificial neural network (ANN), and the results showed that the fuzzy model provides more accurate predictions than ANN and mathematical models [4]. Zoukit et. al. Takagi-Sugeno fuzzy (TSF) model was developed for hybrid solar-electric dryer. This model to predict the drying temperature has been tested with experimental data and a successful application has been achieved for the two main modes of the dryer (electric and solar) [5]. Gao and Liu aimed to develop a model for adapting geothermal ORC systems to different conditions and off-design performance. An optimal control strategy was presented by using turbine guide blade angle, coolant pump speed and cooling water flow rate as control variables. The results showed that the flow rate of geothermal water, inlet temperature and cooling water temperature were associated with increased net power production. Supercritical ORC generally produced a higher net power than subcritical ORC, but the difference has been shown to decrease under some conditions [6]. Yaïc et. al. He focused on underground heat pumps (GSHP) and organic Rankine cycle systems (ORC) and suggested combining these two systems in a parallel structure. The proposed integrated system has achieved more than 80% energy savings compared to conventional GSHP systems in different Canadian cities (Edmonton, Halifax, Vancouver). The ORC system increased the performance of the GSHP, offering higher COP values and reducing operating times [7]. Khan and Kim presented the thermodynamic analysis of an organic Rankine cycle system and water heating system that can operate at high temperatures. This system can produce 585.7 kW net power and also provide hot water at 35°C for home use. Seasonal air temperature and water temperature data from Seoul,

South Korea were used for performance analysis. It is balanced according to the hot water need by using two different mass fractions. Performance analysis was carried out according to different working fluids and months [8]. In another study, the wool drying process in a heat pump dryer was examined. A fuzzy model was created using the fuzzy logic method, one of the artificial intelligence methods, to determine the effect of time, temperature, loading rate and air speed on the drying rate. Wet wool was used as the test material. While the air velocities at the inlet of the dryer varied between 0.8 m/s and 1.5 m/s, the material loading ratio (material/dryer volume) varied between 0.5 and 2.5. The inlet temperature of the dryer was varied between 40°C and 90°C. It was concluded that the obtained fuzzy logic results were compatible with the experimental results [9]. Kumaresan examined the optimization of the single-stage air source vapor compression heat pump system using genetic algorithm (GA) and fuzzy logic (FL) in order to use heat pumps, which offer economical alternatives to heat recovery from different sources, in industrial, commercial and residential applications. The properties required for thermodynamic optimization were calculated using fuzzy logic. Thermodynamic properties obtained by fuzzy logic were compared with real results. Then, the most suitable operating conditions of the heat pump system were determined by genetic algorithm [10].

This study constitutes a system developed with the aim of integrating the heat obtained from renewable energy sources into a drying unit, which is required for its operation. Simultaneously, it seeks to provide a detailed analysis of the energy and exergy efficiencies of the integrated sub-cycles using fuzzy logic methods. This study represents an important step in understanding the feasibility of the drying process with alternative energy exchange.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. System Description

In Figure 1, the design of the integrated system undergoing thermodynamic analysis is provided.

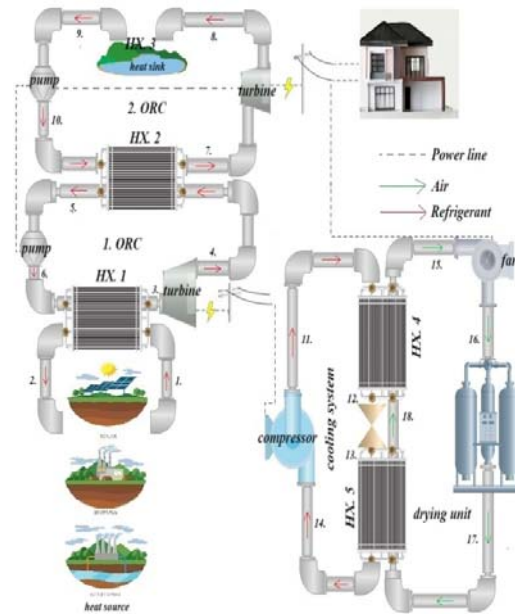


Figure 1. Integrated system undergoing thermodynamic analysis.

In the system in Figure 1, the heat taken from the heat source (solar, biomass, geothermal) at the 1st point is transferred to a sub-1st ORC system. The power of the cooling system was met with the electrical power obtained in the ORC. The drying cycle is completed by connecting the cooling system to the drying unit. In addition, the electrical power of the fan in the drying unit and the indoor space in the facility was supplied by the 2nd ORC system connected to the 1st ORC.

2.2. Energy and Exergy Analyzes

In steady state, the mass balance equation can be given as follows [11,12]:

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (1)$$

where m is the mass flow rate, the indices g and ζ are the inlet and outlet conditions, respectively. The energy balance is given in the equation below.

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_\zeta + \dot{W}_\zeta + \sum \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2)$$

Here, Q is the heat transfer rate, W is the power, h is the specific enthalpy, v is the velocity, z is the height, and g is the gravitational acceleration.

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} s_{in} + \sum_k \frac{\dot{Q}}{T_k} + \dot{S}_{gen} = \sum_{ex} \dot{m}_{ex} s_{ex} \quad (3)$$

where s is the specific entropy and \dot{S}_{gen} is the entropy generation rate. The exergy balance equation can be written as:

$$\sum \dot{m}_{in} ex_{in} + \sum \dot{E} x_{Q,in} + \sum \dot{E} x_{W,in} = \sum \dot{m}_{ex} ex_{ex} + \sum \dot{E} x_{Q,ex} + \sum \dot{E} x_{W,ex} + \dot{E} x_D \quad (4)$$

The specific flow exergy can be written as:

$$ex = x_{ph} + ex_{ch} + ex_{pt} + ex_{kn} \quad (5)$$

The kinetic and potential parts of the exergy are assumed to be negligible. Also, the chemical exergy is assumed to be negligible. The physical or flow exergy (ex_{ph}) is defined as:

$$ex_{ph} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (6)$$

where h and s represent specific enthalpy and entropy, respectively, in the real case. h_o and s_o are enthalpy and entropy at reference medium states, respectively.

Exergy destruction is equal to specific exergy times mass;

$$\dot{E} x_D = ex * m \quad (7)$$

$\dot{E} x_D$, are work-related exergy ratios and are given as:

$$\dot{E} x_D = T_o \dot{S}_{gen} \quad (8)$$

$\dot{E} x_W$, are work-related exergy ratios and are given as:

$$\dot{E} x_W = \dot{W} \quad (9)$$

$\dot{E} x_Q$, are the exergy rates related to heat transfer and are given as below.

$$\dot{E} x_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \dot{Q} \quad (10)$$

System thermal efficiency (η);

$$\eta = \frac{\text{energy in exit outputs}}{\text{total energy inlets}} \quad (11)$$

The exergy efficiency (ψ) can be defined as follows;

$$\psi = \frac{\text{exergy in exit outputs}}{\text{total exergy inlets}} \quad (12)$$

2.3. Assumptions and Fixed Parameters

1. The temperature in the heat exchangers is balanced, there is no heat loss.
2. Pressure losses in all parts of the system are neglected.
3. The isentropic efficiency of the pumps and compressor is 75%, and the isentropic efficiency of the turbine is 85%.
4. Changes in kinetic and potential energy are neglected.
5. System performance is assumed to be constant and regular.
6. The dead state of the fluids (air, R600a) circulating in all cycles was taken as temperature 293.2 K and 1 bar atmospheric pressure.

2.4. Fuzzy Logic

Fuzzy systems are knowledge-based systems constructed using fuzzy "if-then" rules, facilitating a systematic process of transforming information from non-linear functions to a knowledge base [13]. The fuzzy logic theory enables the incorporation of expert human knowledge into computer systems through the use of "if-then" rules. This, in turn, enables the successful utilization of linguistic data found in natural language and human thoughts. Fuzzy systems are composed of four main components: a fuzzy rule base, a fuzzy inference engine (decision-making unit), a fuzzifier, and a defuzzifier. The general structure of a fuzzy system is illustrated in Figure 2.

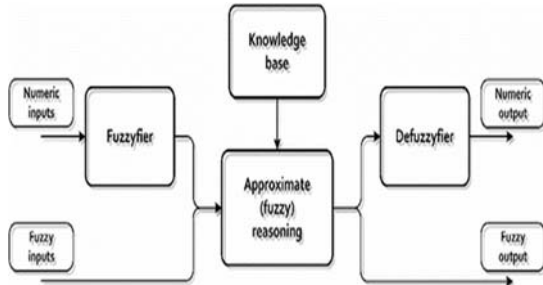


Figure 2. The typical structure of a fuzzy system [14]

Fuzzification is defined as the process of converting a crisp real value into a fuzzy set. In this process, the range of input variables is transformed into an appropriate universal set, allowing input values to be converted into suitable linguistic terms. During the fuzzification stage, preliminary preparations are made for the processing of externally received data using the information in the fuzzy rule base of the system. Various membership functions are employed in the fuzzification stage for this purpose. The most commonly used types of membership functions in applications are Triangular, Trapezoidal, Bell Curve, Gaussian, Sigmoidal, and Pi (π) membership functions [15]. Researchers often prefer heuristic methods and artificial intelligence techniques such as ant colony algorithms, clonal selection algorithms, tabu search algorithms, genetic algorithms, and artificial neural networks to determine these membership functions [16-19]. In this study, based on a detailed literature review and expert opinions in the field, triangular membership functions were employed.

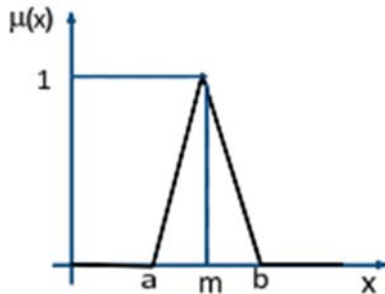


Figure 3. Triangular membership function

In the fuzzy inference section, a rule base is used in conjunction with an inference mechanism for information presentation. Once the incoming data is prepared for processing within the fuzzy rule base, it is then processed by the inference mechanism according to the "if-then" rules defined. The variables, the number of membership functions, and the number of rules are the components in this context, and structural learning occurs based on these defined parameters. Within the fuzzy inference mechanism, information is modeled through various methods. These inference methods, known as Mamdani method, Larsen method, Tsukamoto method, and Tagaki-Sugeno-Kang method, are utilized [20,21]. Within the Mamdani inference method used in this study, the threshold values for rules are calculated using the "and (intersection)" operator first, followed by the "or (union)" operators.

The defuzzification stage involves the process of converting the fuzzy set obtained in the fuzzy inference engine into a precise value. To apply the resulting fuzzy set back to real-world scenarios, it must be represented numerically. The most commonly encountered defuzzification methods include the centroid method, the largest membership principle, the mean of maxima, the weighted average method, the smallest of largest, and the largest of maxima methods [22]. In this study, the centroid method was employed.

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_c(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_c(y_i)} \quad (13)$$

The formula (13) is used to compute it, where y_i represents the defined output variable value, $\mu_c(y_i)$ stands for the membership degree of the output variable, and y^* denotes the defuzzified value.

3. RESULTS

Figure 4 shows the T-s diagram for ORC-2 in the integrated system.

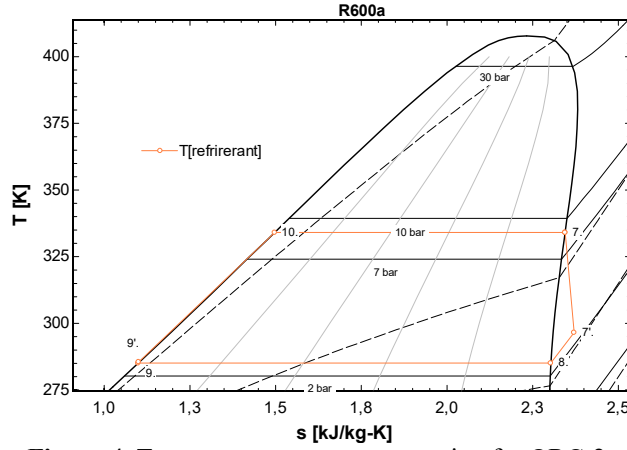


Figure 4. Temperature entropy conversion for ORC-2.

Thermodynamic properties of the positions in the T-s diagram in Figure 4 are given in Table 1. Figure 5 shows the T-s diagram for the cooling part of the integrated system.

Thermodynamic properties of the positions in the T-s diagram in Figure 5 are given in Table 2.

Figure 6 shows the T-s diagram for ORC-1 in the integrated system.

Table 1. Thermodynamic properties for ORC-2

Location	T [K]	P [bar]	x	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	ex[kj/kg]	m [kg/s]	Refrigerant
T0	293,2	1	-	590,6	2,487	-	-	R600A
7.	343,1	8,876	1	635,4	2,345	86,49	0,4646	R600A
7'.	296,5	2,345	100	590,9	2,371	34,19	0,4646	R600A
8.	285,1	2,345	1	571	2,303	34,36	0,4646	R600A
9.	285,1	2,345	0	227,9	1,099	44,14	0,4646	R600A
9'.	285,5	8,876	-100	229,4	1,101	45,28	0,4646	R600A
10.	334,1	8,876	0	352,3	1,497	51,85	0,4646	R600A

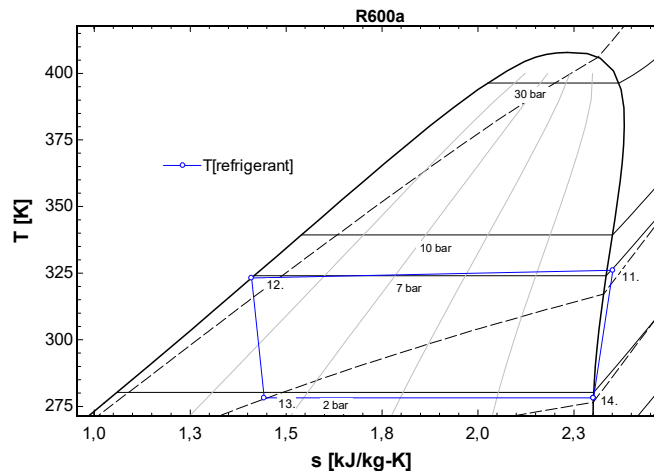


Figure 5. Temperature entropy cycle for cooling system

Table 2. Thermodynamic properties for the cooling system

Location	T [K]	P [bar]	x	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	ex[kj/kg]	m [kg/s]	Refrigerant
T0.	293,2	1	-	590,6	2,487	-	-	R600A
11.	326,1	6,853	100	291,7	2,351	76,61	0,3429	R600A
12.	323,2	6,853	0	323,1	1,41	48,35	0,3429	R600A
13.	278,2	1,867	0,3182	323,1	1,443	38,71	0,3429	R600A
14.	278,2	1,867	1	561,8	2,301	25,85	0,3429	R600A

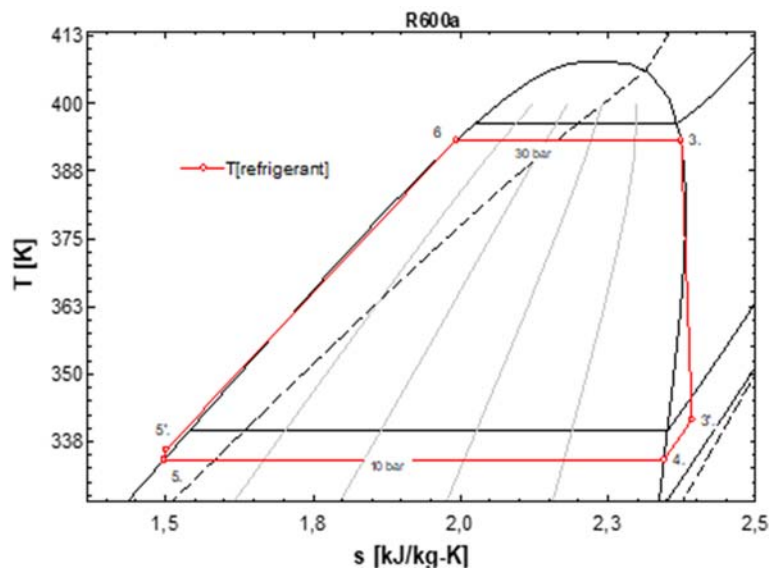


Figure 6. Temperature entropy conversion for ORC-1

Table 3 gives the thermodynamic properties of the positions of the T-s diagram in Figure 6.

In Table 4, thermodynamic properties for the drying unit are presented from the sub-components in the

integrated system designed in Figure 1.

Table 5 presents energy and exergy efficiency values for a drying unit, two Organic Rankine Cycle (ORC) systems and a cooling system.

Table 3. Thermodynamic properties for ORC-1

Location	T [K]	P [bar]	x	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	ex[kj/kg]	m [kg/s]	Refrigerant
T0.	293,2	1	-	590,6	2,487	-	-	R600A
3.	393,2	28,4	1	687,1	2,374	129,7	0,6305	R600A
3'.	341,6	8,876	100	651,4	2,392	88,62	0,6305	R600A
4.	334,1	8,876	1	635,4	2,345	86,49	0,6305	R600A
5.	334,1	8,876	0	352,3	1,497	51,85	0,6305	R600A
5'.	336,1	28,4	-100	357,5	1,501	55,9	0,6305	R600A
6.	393,2	28,4	0	537,3	1,993	91,66	0,6305	R600A

Table 4. Thermodynamic properties for the drying unit

Location	T [K]	P [bar]	x	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	ex[kj/kg]	m [kg/s]	Refrigerant
T0.	293,2	1	-	293,4	6,846	-	-	Air
15.	323,2	1	-	323,6	6,944	1,447	9,9333	Air
16.	323,2	1	-	323,6	6,944	1,447	9,9333	Air
17.	320,9	1	-	321,3	6,936	1,24	9,9804	Air
18.	312,8	1	-	313,1	6,911	0,6314	9,9804	Air

Table 5. Energy and exergy efficiencies of all components

Component	Energy efficiency [%]	Exergy efficiency [%]
Drying Unit	22.1	22.4
ORC-1	10.66	40.1
ORC-2	10.92	86.8
Cooling Unit	COP	3.64
		25.3

In terms of thermodynamics, the results of the calculations in table 1, table 2, table 3 and table 4 are as follows: The drying unit uses 22.1% of the energy effectively, while its exergy efficiency is 22.4%. Moreover, Organic Rankine Cycle systems

called ORC-1 and ORC-2 have energy efficiency of 10.66% and 10.92% respectively, but the exergy efficiency of ORC-2 increases to 86.8%. The cooling system has a COP value of 3.64 and an exergy efficiency of 25.3%.

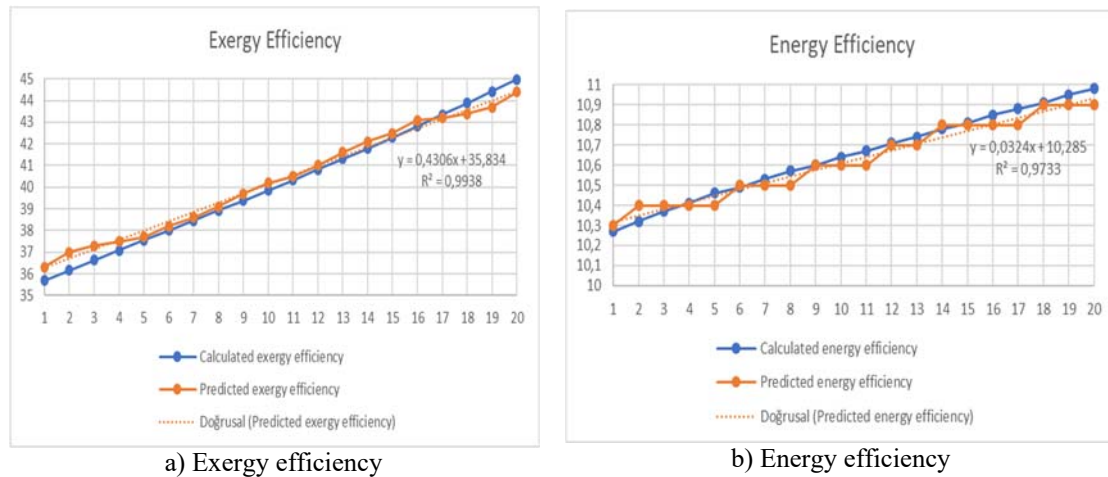


Figure 7. Comparative results of a) exergy efficiency and b) energy efficiency analysis results calculated for ORC-1 and estimated values as a result of the fuzzy model

Comparative results of the calculated exergy and energy analysis results for ORC-1 and the predicted values as a result of the fuzzy model are shown in

the Figure 7. Accordingly, exergy efficiency was estimated at 99.38% and energy efficiency was estimated at 97.33%.

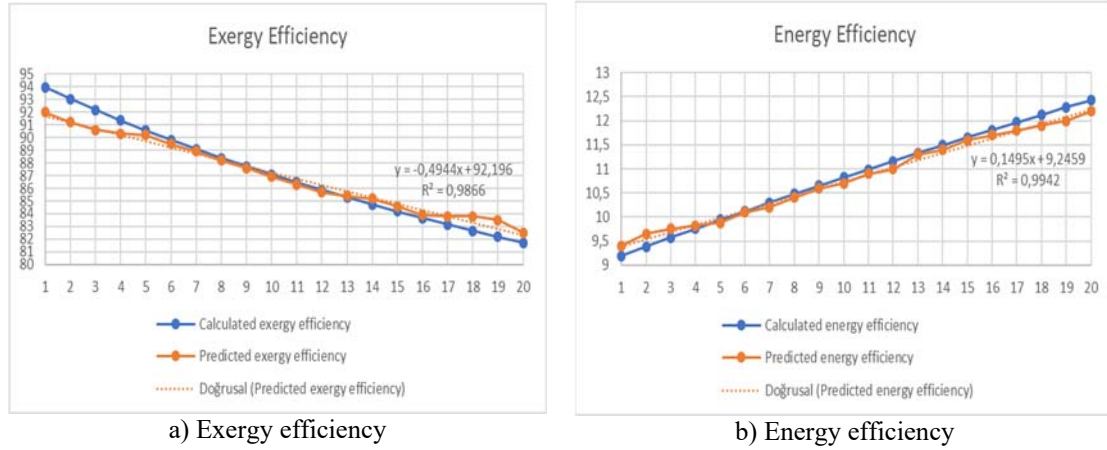


Figure 8. Comparative results of a) exergy efficiency and b) energy efficiency analysis results calculated for ORC-2 and estimated values as a result of the fuzzy model

Comparative results of the calculated exergy and energy analysis results for ORC-2 and the predicted values as a result of the fuzzy model are shown in

the Figure 8. Accordingly, exergy efficiency was estimated at 98.66% and energy efficiency was estimated at 99.42%.

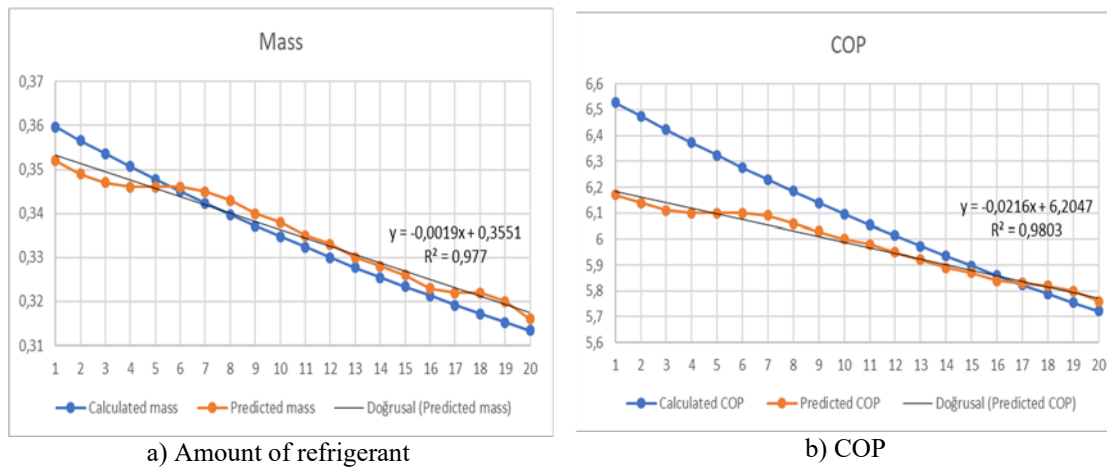


Figure 9. Comparative results of a) refrigerant amount and b) COP results calculated for the cooling system and the estimated values as a result of the fuzzy model

Comparative results of the calculated refrigerant amount and Coefficient of Performance results for cooling and the predicted values as a result of the fuzzy model are shown in the figure 9. Accordingly, the refrigerant amount was estimated at 97.7% and COP was estimated at 98.03%.

4. CONCLUSION

In this study, an integrated system has been designed for a drying unit that utilizes renewable energy sources as the required energy. The energy and exergy efficiencies of the sub-cycles of the

integrated system have been thoroughly analyzed using fuzzy logic methods. The obtained results provide an important roadmap for enhancing the performance of energy systems and utilizing resources more efficiently. This work contributes to the more effective use of these analyses to achieve sustainable energy efficiency and environmental conservation goals. In this context, the results obtained for the designed system are as follows:

- Result of thermodynamic calculations: The drying unit uses 22.1% energy effectively, while its exergy efficiency is 22.4%. Moreover, Organic Rankine Cycle systems called ORC-1 and ORC-2 have energy efficiency of 10.66% and 10.92% respectively, but the exergy efficiency of ORC-2 increases to 86.8%. The cooling system has a COP value of 3.64 and an exergy efficiency of 25.3%.
- Fuzzy logic method results: exergy efficiency for ORC-1 was estimated at 99.38% and energy efficiency was estimated at 97.33%. For ORC-2, exergy efficiency was estimated at 98.66% and energy efficiency was estimated at 99.42%. The amount of refrigerant for the cooling system was estimated at 97.7% and COP was estimated at 98.03%.

Today, energy and exergy analyzes have become essential tools to provide effective solutions to important engineering and environmental problems such as sustainable energy use and environmental protection. In order to make the results of these analyzes more precise and efficient, modern calculation methods such as fuzzy logic are successfully used. In this article, in the integrated system designed in thermodynamic calculations; By examining a wide range of applications ranging from Organic Rankine Cycle systems, cooling systems and drying units, the use of fuzzy logic in energy and exergy analyzes has been contributed.

5. REFERENCES

1. Situmorang, Z., Husein, A.E., 2023. Comparison of Intelligent Fuzzy Controller and Fuzzy Rule Suram Algorithms in the Drying Process. *Information Sciences Letters*, 12(6), 2603-2621.
2. Hosseinpour, S., Martynenko, A., 2022. Application of Fuzzy Logic in Drying: A review. *Drying Technology*, 40(5), 797-826.
3. Rahman, S.A., Nassef, A.M., Rezk, H., Assad, M.E.H., Hoque, M.E., 2021. Experimental Investigations and Modeling of Vacuum Oven Process Using Several Semi-Empirical Models and a Fuzzy Model of Cocoa Beans. *Heat and Mass Transfer*, 57, 175-188.
4. Jahedi Rad, S., Kaveh, M., Sharabiani, V.R., Taghinezhad, E., 2018. Fuzzy Logic, Artificial Neural Network and Mathematical Model for Prediction of White Mulberry Drying Kinetics. *Heat and Mass Transfer*, 54, 3361-3374.
5. Zoukit, A., El Ferouali, H., Salhi, I., Doubabi, S., Abdenouri, N., 2019. Takagi Sugeno Fuzzy Modeling Applied to an Indirect Solar Dryer Operated in Both Natural and Forced Convection. *Renewable Energy*, 133, 849-860.
6. Gao, T., Liu, C., 2017. Off-Design Performances of Subcritical and Supercritical Organic Rankine Cycles in Geothermal Power Systems Under an Optimal Control Strategy. *Energies*, 10(8), 1185.
7. Yaici, W., Annuk, A., Entchev, E., Longo, M., Kalder, J., 2021. Organic Rankine Cycle-Ground Source Heat Pump with Seasonal Energy Storage Based Micro-Cogeneration System in Cold Climates: The Case for Canada. *Energies*, 14(18), 5705.
8. Khan, B., Kim, M.H., 2022. Energy and Exergy Analyses of a Novel Combined Heat and Power System Operated by a Recuperative Organic Rankine Cycle Integrated with a Water Heating System. *Energies*, 15(18), 6658.
9. Akarslan Kodaloğlu, F., Elbir, A., Sahin, M.E., 2023. Wool Drying Process In Heat-Pump-Assisted Dryer by Fuzzy Logic Modelling. *Thermal Science*, 27(4 Part B), 3043-3050.
10. Kumaresan, G., 2013. Optimizing Design of Heat Pump Using Fuzzy Logic and Genetic Algorithm. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3, 1184-1189.
11. Dincer, I., Rosen, M.A., 2012. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier Science, 551.

12. Cengel, Y.A., Boles, M.A., Kanoğlu, M., 2011. Thermodynamics: an Engineering Approach. New York: McGraw-Hill, 445.
13. Wang L.X., 1997. A Course in Fuzzy Systems and Control. New Jersey: Prentice Hall, 424.
14. Czabanski, R., Jezewski, M., Leski, J., 2017. Introduction to Fuzzy Systems. Theory and Applications of Ordered Fuzzy Numbers. 356, 23-43.
15. Elmas, Ç., 2003. Bulanık Mantık Denetleyiciler. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 230.
16. Arslan, A., Kaya, M., 2001. Determination of Fuzzy Logic Membership Functions Using Genetic Algorithms. Fuzzy Sets and Systems, 118(2), 297-306,
17. Bağış, A., 2003. Determining Fuzzy Membership Functions With Tabu Search an Application to Control. Fuzzy Sets and Systems, 139(1), 209-225.
18. Jiang, H., Deng, H., He, Y., 2008. Determination of Fuzzy Logic Membership Function Using Extended Ant Colony Optimization Algorithm. Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). Shandong, China, 1, 581-585,
19. Acilar A.M., Arslan, A., 2011. Optimization of Multiple Input-Output Fuzzy Membership Functions Using Clonal Selection Algorithm. Expert Systems with Applications, 38(3), 1374-1381.
20. Ross, T.J., 2004. Fuzzy Logic with Engineering Applications. John Wiley Sons Ltd, Chichester, 628.
21. Sivanandam, S.N., Sumathi, S., Deepa, S.N., 2007. Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB. Springer, Berlin, 430.
22. Şen, Z., 2020. Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme. Su Vakfi, 368.
23. Klein, S.A., 2020. Engineering Equation Solver (EES) F-Chart Software, Version 10.835-3D.

Aluminum Forming by Vaporizing Foil Actuator Welding

Ganime Tuğba ÖNDER*¹ ORCID 0000-0002-7504-7394

Mustafa Kemal KÜLEKÇİ² ORCID 0000-0002-5829-3489

¹Cukurova University, Adana Vocational School, Department of Electricity and Energy, Air Conditioning and Refrigeration Technology Program, Adana, Türkiye

²Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mersin, Türkiye

Geliş tarihi: 28.07.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: ÖNDER, G.T., KÜLEKÇİ, M.K., (2023). Aluminum Forming by Vaporizing Foil Actuator Welding. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 993-1003.

Abstract

Aluminum, has a wide range of uses, from industry to medical industrial products such as automotive, defense-aviation, and space. Aluminium has become a preferred material in applications where weight needs to be reduced. It is also used as a material in metal cladding and shaping applications. However, the high thermal conductivity coefficient of aluminum may cause some difficulties in the production process. These difficulties due to thermal conductivity may not allow to manufacture of desired products. In this study formability of aluminum with vaporizing foil actuator welding (VFAW) has been investigated as an alternative process to the traditional and solid state welding processes. By using different voltage values and separation distance parameters, the effects of these parameters on the formability of aluminum and copper sheet metal pairs with VFAW were examined experimentally. Experimental data show that voltage value is an important parameter in the VFAW process where a DC capacitor is used. In the VFAW process, where a 375 V voltage value is used, it has been determined that welding occurs in processes performed with three different separation distances (0.4 mm- 0.9 mm -1.5 mm). It was determined that 0.4 mm and 0.9 mm separation distances were effective in joining Al/Cu metal sheets with 0.1 mm thickness.

Keywords: Solid state welding, Vaporizing foil actuator welding, Aluminum, Sheet metal forming

Buharlaştırılmış Folyo Aktüatör Kaynağı ile Alüminyum Şekillendirme

Öz

Endüstrinin vazgeçilmez malzemelerinden olan alüminyum, otomotiv, savunma-havacılık ve uzay endüstrisinden medikal endüstriyel ürünlere kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle parça ağırlığının azaltılması gereken uygulamalarda ihtiyaç duyulan bir malzeme konumuna gelmiştir. Ayrıca metal giydirmeye, şekillendirme uygulamalarında yapısal bileşen olarak da kullanılmaktadır. Ancak alüminyumun yüksek ısı iletim katsayısı, üretim sürecinde bazı zorluklara neden olabilmektedir. Geleneksel imalat teknikleri, özellikle bu termal sorun nedeniyle sağlıklı ürün elde etmekte zorluklar yaşanmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, hem geleneksel hem de katı hal kaynak yöntemlerine alternatif olarak folyo buharlaştırma tekniği (VFAW) ile alüminyumun şekillendirilebilirliği incelenmiştir.

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Ganime Tuğba ÖNDER, gercoskun@cu.edu.tr

Farklı gerilim değerleri ve durdurma mesafesi parametreleri kullanılarak, bu parametrelerin alüminyum ve bakır sac metal çiftinin VFAW ile şekillendirilebilirliği üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel veriler DC kapasitörlerin kullanıldığı kaynak yönteminde, gerilim değerinin önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. 375 V gerilim değerinin kullanıldığı VFAW prosesinde üç farklı ayırma mesafesi ile gerçekleştirilen işlemlerde (0.4 – 0.9 – 1.5 mm) kaynak oluşumunun gerçekleştiği tespit edilmiştir. 0.1 mm kalınlığa sahip Al/Cu sac metal levhaların birleştirilmesinde 0.4 mm ve 0.9 mm ayrılma mesafesinin etkili olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı hal kaynağı, Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı, Alüminyum, Sac metal şekillendirme

1. INTRODUCTION

In the USA, the Corporate Average Fuel Economy (CAFE) standards, which aim to improve the fuel economy of passenger cars and light goods vehicles (such as pickup trucks, minibuses, and panel vans), started to be implemented, in 1975. In this direction, significant incentives were provided for the use of lightweight materials [1,2]. In addition, an orientation was provided to the materials and manufacturing sector for the development of various products and technologies to increase fuel efficiency in different ways. Studies have come to the fore to ensure the balance of size, weight, and power in vehicles [3-9]. Aluminum and magnesium alloys, advanced high-strength steels (AHSS), fiber-reinforced polymer composites (including carbon and glass fibers), and advanced polymers (without fiber reinforcement) are currently the most effective material groups for reducing vehicle weight. For each material to enter the industrial market, there are important technical barriers such as performance, manufacturability, cost, and modeling [1].

Conventional cars are mostly made of steel, but their weight can be reduced by using materials that provide better strength-to-weight ratios such as aluminum or magnesium in a direct or combination construction [4,5]. Aluminum is among the most important non-ferrous materials and has a density of 2.69 g/cm³, almost one-third of the density of steel (7.83 g/cm³), making it possible to manufacture lightweight cars based on aluminum [5,9,10]. In addition, lightweight materials have an effective place in the manufacturing world, as they require very little energy and raw materials in their manufacture.

Sheet metal forming is among the important manufacturing technologies for large industry applications such as aerospace, and automotive [6]. Aluminum is one of the ideal materials for sheet metal forming. However, aluminum is very susceptible to melting problems, including the annealing stage, since it does not give a signal such as a color change before melting in heat shaping. Today, extrusion, rolling, and casting processes are used to shape aluminum, so aluminum is converted into various semi-products and products [7,8]. The extrusion process causes damage to both the material and the molds due to compression forces, and sometimes due to thermal reasons. The rolling process, technically, applies direct pressure to the material surface. During casting processes, air holes are formed due to material flow and porosity is the most common defect in parts cast from aluminum alloys. In addition, during the casting process, self-withdrawal, that is, size variations, occurs during solidification. With current manufacturing technologies, these production problems create difficulties in obtaining healthy products [11].

Vaporizing foil actuator welding (VFAW) is a pulse welding technology applied under similar conditions to explosion welding (EXW) and magnetic pulse welding (MPW) [4,12-14]. In VFAW, the drive mechanism is a wire or foil material. In this respect, it differs from other pulse welding methods driven by an explosive or electromagnetic coil [4,15,16]. Forming, cutting, powder compacting and welding applications have different application requirements. Basically, the actuator foil, target, flying metal materials, and a standoff plate separating these materials, are sandwiched between fixtures (Figure 1) [17,18]. VFAW, which is the same as EXW with this layout,

gains superiority in that it does not require a chemical explosive and can be carried out in laboratory conditions.

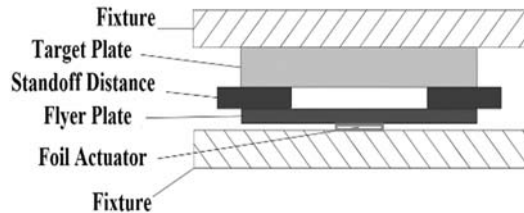


Figure 1. VFAW general application scheme

Among the methods used today to join similar or different sheet metals, friction-based welding, impact welding, and roll bonding are the three solid-state welding methods [19]. VFAW technique is a rival technology to MPW [13].

This study aims to apply a new solid-state welding technique, VFAW [12], especially for forming and welding different metal sheets. For this purpose, it is aimed to create a mechanical locking between aluminum and copper with the experimental setup manufactured. In the study, four different voltages and three different standoff distance values were used through the VFAW process, and the formability of these parameters of aluminum sheet metal was evaluated with the results of SEM analysis with the experiments carried out. In the literature, visual tests are commonly used to evaluate the joining process, and mechanical tests are used for strength [12,13,20,21].

2. MATERIAL AND METHOD

In this study, aluminum (Al) and copper (Cu), two different materials in terms of chemical and physical properties, were combined with a low-cost VFAW prototype manufactured by us. In this study, aluminum (Al) and copper (Cu), two different materials in terms of chemical and physical properties, were combined with a low-cost VFAW prototype manufactured by us. The experimental setup was created by the general application scheme [12] of VFAW technology. Unlike the literature,

DC capacitors instead of AC capacitors are chosen to store energy. The aim here is to create an alternative to the classical application for the efficient use of energy.

For the experiments, an aluminum alloy (AA) sheet measuring 50 mm x 50 mm x 0.1 mm was used as a flyer, and a pure copper plate measuring 50 mm x 50 mm x 0.1 mm was used as a target (Table 1). The foil actuator is the most important element for this joining method. Actuator dimensions and design should serve to ensure joining. The actuator designed and used here is an aluminum foil of 0.1 mm thickness and has a 10 mm x 50 mm wide impact area. In Figure 2, the geometric shape of the foil actuator is depicted, while Table 2 provides the chemical properties of the aluminum material utilized as both the foil and the flyer. The wide sides (30 mm) in Figure 2, while providing the connection with the copper terminal, the narrowing middle section is called the active zone and geometrically helps the electrical discharge to occur in the area we want. The active zone is evaporated during the experiments.

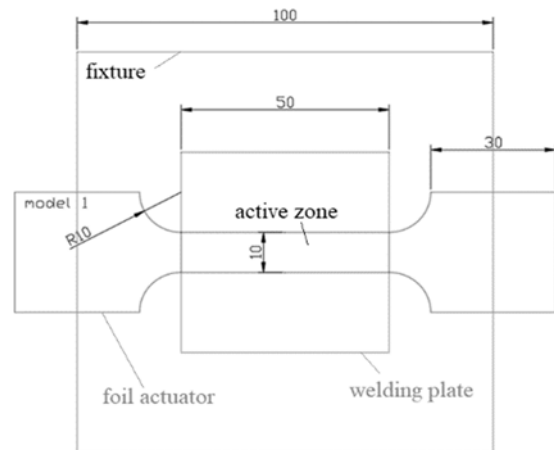


Figure 2. Actuator foil

In the manufactured VFAW process, the capacitor bank is built with direct current (DC) capacitors with a total capacitance of 10.000 μF , a short-circuit current rise time of 6.55 μs , an inductance of 20 nH, a resistance of 10 m Ω , 1.01 kJ max charging energy and 450 V max charging capacity (Table 3).

Table 1. Mechanical properties

Material name	Thickness mm	Elongation %	Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Density g/cm ³
Aluminum	0.1	4.4	365	233	2800
Copper	0.1	5	250	295	89100

Table 2. AA chemical composition

Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	B
Contents (%)	0.238	1.082	0.0015	0.0066	0.0013	0.0018	0.0026	0.021	0.012	0.0016
Elements	Be	Bi	Ba	Cd	Ga	Na	V	Zr	As	Al
Contents (%)	0.00004	0.0026	0.00010	0,0007	0,010	0,0005	0,0088	0,0023	0,0087	98,59

For capacitors, the short-circuit current rise time is the time it takes for the current in the circuit to rise from zero to its first peak. A shorter current rise time means a higher current is reached sooner. Welding speed is an important privilege for welding technologies. The short-circuit current rise time (t) for a capacitor can be quickly estimated by the following Equation 1 [21]. Here R is the internal resistance of the circuit, L is the internal inductance and C is the capacitance.

$$t = \pi \left(2 \sqrt{\frac{L}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \right)^{-1} \quad (1)$$

The energy stored in the capacitors, and the maximum amount of energy, can be calculated with the formula Equation 2. Here E is the discharge energy, C is the capacitance, and V is the input voltage [22].

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

After the actuator is insulated with insulating tape, it is fixed on both sides of the copper terminals in contact with the capacitors. Here, attention has been paid to the terminal-fixture-welding metals-actuator

surfaces that should be conductive and insulating. Metals should not contact each other at unwanted points. Figure 3, shows how the fixture, copper terminals, and aluminum foil are placed. At the same time, the location of the weld metals can be seen in this figure. The aluminum foil is positioned under the flyer plate, which is the primary weld metal. Standoff distance is a gap that separates two weld metals and is formed with a PVC material. Two standoffs are used on the right and left of the foil. The target plate, which is the second weld metal, is placed on this standoff material. The stack created parallel to each other should be fixed between the fixtures.

The copper terminals are in connection with the capacitor bank at one end and the pneumatic switch at the other end. System components are presented in Figure 4. Pneumatic switch 1 is used to perform controlled discharge with remote control. Pneumatic switch 2 is used to ground the residual voltage value in the capacitors and thus protect both the system and the environment. The voltage values can be adjusted using a power unit. The alternating current is converted to direct current with the power unit, and charged to the capacitors via cables.

Table 3. Capacitor specifications

Capacitor	R	L	C	Nominal short circuit current rise time (µs)	Max charge voltage (kV)	Max charge energy (kJ)
	Impedance (Ω)	Internal inductance (H)	Capacitance (F)			
	0.01	0.00000002	0.010	6.55	0.045	1.0125

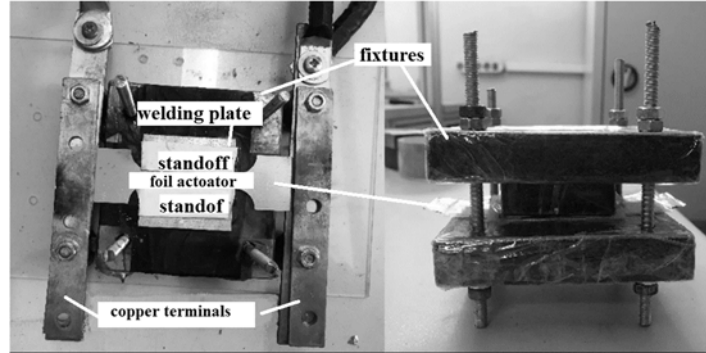


Figure 3. Fixture and actuator foil placement

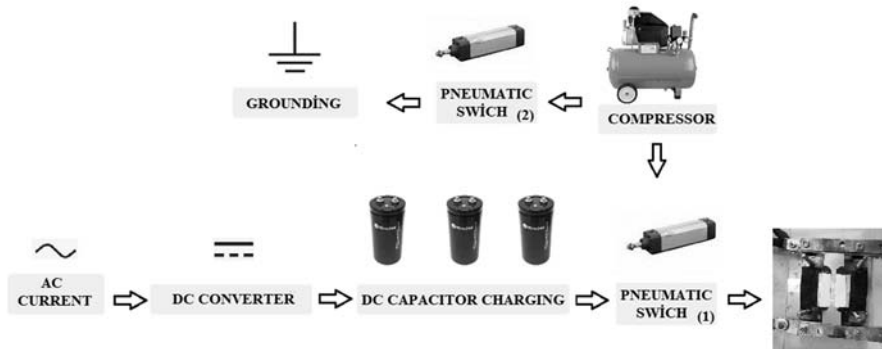


Figure 4. System components

In the experimental study, to examine the formability of the sheet metal with the VFAW method, some of the input values were kept constant in the experiments in which the "0.1 mm model 1 AA actuator foil" was evaporated. While keeping a constant 15 mm lateral distance, 6 kJ input energy, weld metals, and thicknesses, three different (0.4 -0.9-1.5 mm) standoff distances, four different

(in the range of 350–425 V) voltage values were determined as variable (Table 4).

The lateral distance is the horizontal distance between two standoff materials (Figure 5). While creating this distance, it is ensured that it is larger than the width of the actuator foil, which is 10 mm.

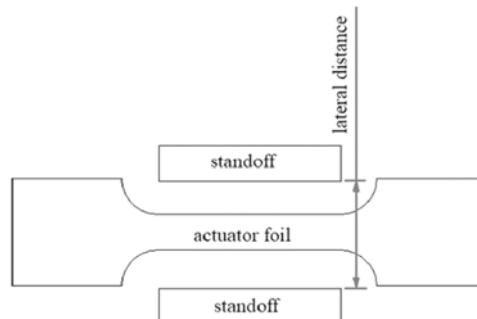


Figure 5. Lateral distance

Table 4. Experiment input parameters

Experiment	Actuator	Stand-off distance (mm)	Lateral distance (mm)	Flyer plate (mm)	Target plate (mm)	Input Voltage (Volt)	Input energy (kJ)
1.1	Model 1 0.1mm AA	0.4	15	AA 0.1	Cu 0.1	350	6
1.2						375	
1.3						400	
1.4						425	
2.1		0.9				350	
2.2						375	
2.3						400	
2.4						425	
3.1		1.5				350	
3.2						375	
3.3						400	
3.4						425	

3. RESULTS AND DISCUSSION

Traditional methods used when joining sheet metals, folding/tab-joint, pulling and pressing of a rivet, self-clinching, screw joint, and welding joints are countable [19]. With VFAW, a new joining technology, sheet metals can be shaped. This situation has been demonstrated in many studies in the literature for many materials and material combinations such as aluminum and its alloys, magnesium and its alloys, steel, and titanium [4,23-26]. In the present study, a combination of copper and aluminum has been created.

In VFAW, the heat generated during the process is very low, so thermal deformation does not occur in the joint area and therefore the metals. In this way, the base metal properties of the weld zone are preserved [27,31]. In addition, many studies are showing that the VFAW technique is a cost-effective and high-performance welding method [28-30]. In our study, what are the ideal joining conditions with VFAW for the Al/Cu material pair were investigated. System components for the designed VFAW prototype have been kept as simple and accessible as possible.

Table 5 is a list of outputs from the experiments. Here "input voltage" is the voltage value at which

capacitors are charged, "residual voltage" is the voltage measured across capacitors after discharge has taken place. In the experiments, according to the same input voltage values, an average of 109 V for 0.4 mm standoff distance value, 161 V average for 0.9 mm standoff distance, quality connections are provided at 180 V values for 1.5 mm standoff distance. In addition, when all the test results were examined, it was seen that the voltage value between 100 V and 185 V was spent with DC capacitors with 6 kJ input energy to combine Al/Cu materials and it was sufficient for welding. In addition, in the data obtained, It was observed that the increase in voltage increased with increasing distance. The metals needed more voltage to make contact with each other as the distance increased. The values used at a distance of 1.5 mm are the highest voltage values.

In Figure 6, scanning electron microscopy (SEM) images of bonding surfaces for aluminum and copper weld metals obtained with VFAW are given. In this study, SEM images were imaged without sectioning. When the images are examined, It is observed that the so-called "mechanical locking" [14,32] welding occurs between the weld metals. However, to characterize the obtained bond strengths, cross-section images should be examined and searched for more regular couplings with

different input energies. The materials to be joined for VFAW are in the first installation position, They are separated by a standoff distance between the flyer and the target plate to provide the necessary flyer acceleration [33]. In the study, when the images and input parameters are examined to determine the appropriate "standoff distance".

At 0.4 mm standoff distance, while creating an ideal welding image at 350 V-375 V-400 V values (Figure 6a,b,c), a connection was formed at 425 V values (Figure 6d), but melting was observed in places. Pulse welding processes do not require heating and melting events, melting and formation of brittle intermetallic compounds (IMC) can be largely avoided if appropriate welding parameters are provided [33,34]. IMCs cause the weld metal to have poor mechanical properties (tensile,

ductility, fracture toughness, fatigue strength, fracture) [37]. For this reason, welding methods that prevent the formation of IMC during welding are of great importance. The gas that expands as a result of the rapid evaporation of the foil creates a driving force for the flyer to be thrown toward the target [12]. The excessive kinetic energy of the flyer results in melting and continuous intermetallics at the weld interface [12,14]. This indicates that there is an upper limit for kinetic energy. Optimum conditions for welding should be investigated for each material separately. For this, there are studies in the literature that created a limit map called "weldability window" [14,35,36]. Welding can only take place when the parameters are in the appropriate welding range. The study was created in this direction.

Table 5. Experiment outputs

Experiment	Input voltage (Volt)	Residual voltage (Volt)	Used voltage (Volt)	Condition
1.1	350	250	100	Optimal
1.2	375	268	107	Optimal
1.3	400	280	120	Optimal
1.4	425	302	123	Irregular connection
2.1	350	240	110	No Welding
2.2	375	253	122	Optimal
1.3	400	222	178	Optimal
1.4	425	240	185	Optimal
3.1	350	183	167	No Welding
3.2	375	195	180	Optimal
3.3	400	210	190	Irregular connection
3.4	425	232	193	Irregular connection

At 0.9 mm standoff distance, 350 V sufficient and smooth coupling could not be formed (Figure 6f), the ideal connection was formed at 375 V-400 V-425 V values (Figure 6g,h,i). 350 V and 0.9 mm could not provide jet formation together. Jet is one of the basic criteria required for the formation of the source [14,27,34,36], and rather than being a stand-alone criterion, it emerges when optimum conditions are met with other entry conditions. At a 1.5 mm standoff distance, the distance between 350 V and metals could not create

sufficient bonding (Figure 6i), the ideal connection was provided at 375 V (Figure 6j), and the connection was formed at 400 V and 425 V voltage values (Figure 6k,m), but a regular surface shape and contact along the entire surface could not be achieved. Close contact is required for weld formation [27]. To achieve this close contact, the 1.5 mm distance contributed little to jet generation compared to the 0.4 and 0.9 mm separation distances.

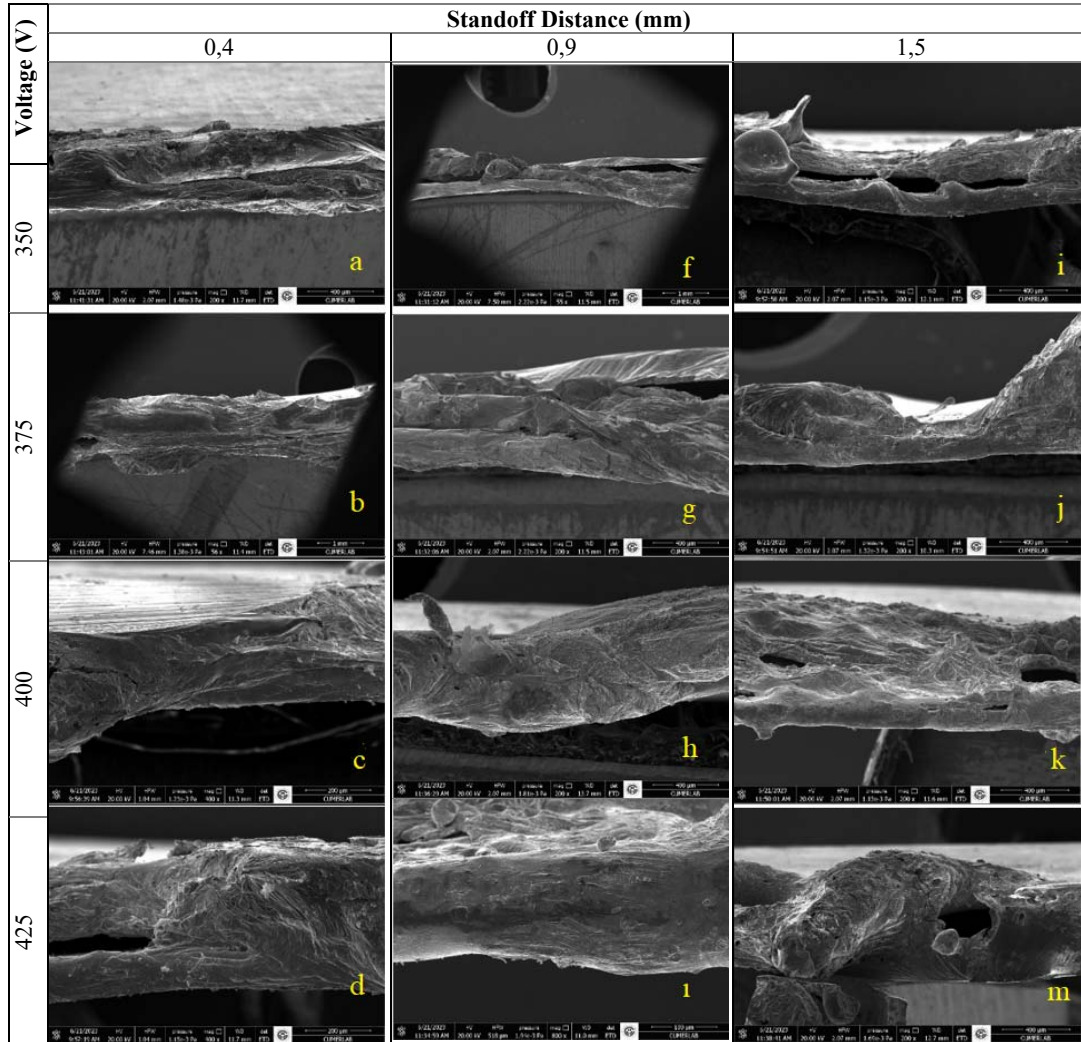


Figure 6. SEM micrograph showing pulsed welding of 0.1mm Al-0.1mm Cu weld sample by VFAW method at different voltages and standoff distances of VFAW

4. CONCLUSION

VFAW is a new and developing welding technology for the manufacturing world. Due to its structure, it has an important place because it is safer and easier to use compared to explosion welding, it has high performance especially when working with small and thin parts, there is no heat-affected welding zone and IMC formation is minimal.

In the study, VFAW has successfully resulted in the forming of aluminum and copper sheet metals. For this study, a welding prototype was created, using DC capacitors, unlike the literature, the ability of VFAW to combine thin metals with different properties such as Al/Cu was demonstrated. In metals, with the characterization of process parameters, VFAW technology will inevitably reach an important point in the manufacturing industry. The study is expected to be useful in situations where vehicle weight reduction is

required and especially in applications where aluminum is required to combine with different metals. The success of this study serves as a guide for future studies on the VFAW shaping of several different metals and the characterization of process parameters.

In the method, 6 kJ input energy was created with 10.0000 μF / 450V / DC capacitors, three different (0.4-0.9-1.5 mm) standoff distances, and four different (350, 375, 400, 425 V) voltage values were used. The results obtained are as follows:

- Good microstructures and mechanical connections were obtained in VFAW formation utilizing the prototype manufactured using Al/Cu welding and DC capacitors.
- It has been shown that VFAW is affected by input parameters.
- When the effects of the voltage parameter on the formability of the sheet metal were examined, it was observed that the 375 V voltage value supported the weld formation at three different separation distances. It has been revealed that the voltage value is an important parameter in creating the most suitable welding conditions.
- When the effects of the standoff distance parameter on the formability of the sheet metal are examined, by staggering the standoff distance-tension value together, it has been observed that 0.4 mm and 0.9 mm standoff distance, together with a voltage value of 375-400 V, are efficient for joining Al/Cu metals with a wall thickness of 0.1 mm. The 1.5 mm standoff distance could not create enough jets for these metals.

4. ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported within the scope of TÜBİTAK "1002-A Rapid Support Module" within the scope of the project numbered 222M455 and the project numbered INSTITU.21.001 of the Tarsus University Scientific Research Projects (BAP) Coordination Unit.

5. REFERENCES

1. Joost, W.J., 2012. Reducing Vehicle Weight and Improving US Energy Efficiency Using Integrated Computational Materials Engineering. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 1032-1038.
2. Turkish Composites Manufacturers Association, Overview of the Transport Industry, 2020. www.kompozit.org.tr, Access date: 12.07.2023.
3. Ahmed, R.M., Stater, M., 2022. Automobile Technology and Tradeoffs How Does Automobile Footprint Affect Its Fuel Economy?. SSRN 4202197.
4. Liu, B., Vivek, A., Daehn, G.S., 2017. Joining Sheet Aluminum AA6061-T4 to Cast Magnesium AM60B by Vaporizing Foil Actuator Welding: Input Energy, Interface, and Strength. Journal of Manufacturing Processes, 30, 75-82.
5. Zhang, W., Xu, J., 2022. Advanced Lightweight Materials for Automobiles: A review. Materials & Design, 110994.
6. Çelik, G., Kaftanoğlu, B., Karadoğan, C., Alkaş, C.O., 2001. AA2024 Alüminyum Alaşımı için Şekillendirilebilme Sınır Diyagramlarını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi. 2001; 12(1): 28-33.
7. Gronostajski, Z., Pater, Z., Madej, L., Gontarz, A., Lisiecki, L., Łukaszek-Sołek, A., Łuksza, J., Mróz, S., Muskalski, Z. Muzykiewicz, W., Pietrzyk, M., Śliwa, R.E., Tomczak, J., Wiewiórowska, S., Winiarski, G., Zasadziński, J., Ziółkiewicz, S., 2019. Recent Development Trends in Metal Forming. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 19(3), 898-941.
8. Şen, M., Altan, M., 2017. A Novel Application in Sheet Metal Forming: Shaping Metals by Plastic Injection Molding based on Fluid Pressure Forming, Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, 32(4), 241-252.
9. Mallick, P.K. (Ed.), 2020. Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. Woodhead Publishing, 2nd Edition, India, 504.
10. Armao, F.G., 2002. Design & Fabrication of Aluminum Automobiles. Welding Innovation, 19(2), 2-6.

11. Uludağ, A., 2007. Basınçlı Döküm Yönteminde Kalıp Sistem Tasarımı ve Simülasyon Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 91.
12. Vivek, A., Hansen, S.R., Liu, B.C., Daehn, G.S., 2013. Vaporizing Foil Actuator: A Tool for Collision Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), 2304-2311.
13. Hahn, M., Weddeling, C., Taber, G., Vivek, A., Daehn, G.S., Tekkaya, A.E., 2016. Vaporizing Foil Actuator Welding as a Competing Technology to Magnetic Pulse Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 230, 8-20.
14. Wang, H., Wang, Y., 2019. High-Velocity Impact Welding Process: A Review. *Metals*, 9(2), 144.
15. Nairne, E., 1774. VII. Electrical Experiments by Mr. Edward Nairne, of London, Mathematical Instrument-Maker, Made with a Machine of His Own Workmanship, a Description of Which is Prefixed. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (64), 79-89.
16. Anderson, J.A., Smith, S., 1926. General Characteristics of Electrically Exploded Wires. *Astrophysical Journal*, 64, 295.
17. Önder, G.T., Külekci, M.K., 2023. Vaporizing Foil Actuator Welding Prototype Manufacturing and Applications Risk Analysis, *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci.*, 12(4), 1079-1091.
18. Vivek, A., Daehn, G.S., 2014. Vaporizing Foil Actuator: A Versatile Tool for High Energy-Rate Metal Working. *Procedia Engineering*, 81, 2129-2134.
19. Biradar, A., Rijesh, M., 2022. Joining by Forming of Sheet Metals. *Engineering Principles: Welding and Residual Stresses*, 227.
20. Benzing, J.T., He, M., Vivek, A., Taber, G.A., Mills, M.J., Daehn, G.S., 2017. A Microsample Tensile Test Application: Local Strength of Impact Welds Between Sheet Metals. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 1229-1235.
21. Hansen, S.T., 2018, Vaporizing Foil Actuator Process Parameters: Input Characteristics, Energy Deposition, and Pressure Output, Dissertation, Graduate Program in Materials Science and Engineering, The Ohio State University, 145.
22. Zhou, Y., Li, C., Wang, X., Liao, Z., Shi, X., Yao, C., 2021. Investigation of Flyer Plate Dynamic Behavior in Electromagnetic Pulse Welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 189-197.
23. Hansen, S.R., Vivek, A., Daehn, G.S., 2015. Impact Welding of Aluminum Alloys 6061 and 5052 by Vaporizing Foil Actuators: Heat-Affected Zone Size and Peel Strength. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 137, 1-6.
24. Vivek, A., Liu, B.C., Hansen, S.R., Daehn, G.S., 2014. Accessing Collision Welding Process Window for Titanium/Copper Welds with Vaporizing Foil Actuators and Grooved Targets. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(8), 1583-1589.
25. Chen, S., Huo, X., Guo, C., Wei, X., Huang, J., Yang, J., Lin, S., 2019. Interfacial Characteristics of Ti/Al Joint by Vaporizing Foil Actuator Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 73-81.
26. Nirudhoddi, B.S., Prasad, K.S., Vivek, A., Daehn, G.S., 2021. High Strength Welds in Titanium & Nickel Based Alloys by Impact Welding-A Practical Method. *Journal of Advanced Joining Processes*, 3, 100056.
27. Du, F., Deng, L., Wang, X., Zhang, M., Jin, J., Zhang, J., 2022. Study on Interfacial Characteristics and Properties of NiTi/Al-Mg Joint by Vaporizing Foil Actuator Welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 3429-3440.
28. Meng, Z., Gong, M., Guo, W., Liu, W., Huang, S., Hua, L., 2020. Numerical Simulation of the Joining Interface of Dissimilar Metals in Vaporizing Foil Actuator Welding: Forming Mechanism and Factors. *Journal of Manufacturing Processes*, 60(Nov), 654-665.
29. Wang, K., Shang, S.L., Wang, Y., Vivek, A., Daehn, G., Liu, Z.K., Li, J., 2020. Unveiling Non-Equilibrium Metallurgical Phases in Dissimilar Al-Cu Joints Processed by Vaporizing Foil Actuator Welding. *Materials and Design*, 86, 108-306.
30. Chen, S., Daehn, G.S., Vivek, A., Liu, B., Hansen, S.R., Huang, J., Lin, S., 2016. Interfacial Microstructures and Mechanical Property of Vaporizing Foil Actuator Welding

- of Aluminum Alloy to Steel. *Materials Science and Engineering A*, 659, 12-21.
31. Li, J., Panton, B., Mao, Y., Vivek, A., Daehn, G., 2020. High Strength Impact Welding of NiTi and Stainless Steel Wires. *Smart Materials and Structures*, 29(10), 105023.
 32. Inal, O.T., Szecket, A., Viguera, D.J., Pak, H. R., 1985. Explosive Welding of Ti-6Al-4V to Mild-Steel Substrates. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 3(6), 2605-2609.
 33. Liu, B., Vivek, A., Presley, M., Daehn, G.S., 2018. Dissimilar Impact Welding of 6111-T4, 5052-H32 Aluminum Alloys to 22MnB5, DP980 Steels and the Structure-Property Relationship of a Strongly Bonded Interface. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49, 899-907.
 34. Bahrani, A.S., Black, T.J., Crossland, B., 1967. The Mechanics of Wave Formation in Explosive welding. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 296(1445), 123-136.
 35. Athar, M.H., Tolaminejad, B., 2015. Weldability Window and the Effect of Interface Morphology on the Properties of Al/Cu/Al Laminated Composites Fabricated by Explosive Welding. *Materials & Design*, 86, 516-525.
 36. Wittman, R.H., 1973. The Influence of Collision Parameters of the Strength and Microstructure of an Explosion Welded Aluminium Alloy. In *Proceedings of the Proc. 2nd Int. Sym. on Use of an Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials*, Marianske Lazne, Czech Republic, 9-12 October 1973, 153-168.
 37. Tümer, M., Kerimak, M.Z., 2017. The Effects of Different Filler Metals on the Toughness and Microstructure Properties of Dissimilar Welding of Nickel Base Super Alloy, Inconel 625 and Stainless Steel, AISI 304L. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 4(1), 116-126.

Investigation of Seismic Behaviour of a Construction of a Conveyor Line in a Coal Power Plant

Erinç ULUDAMAR^{*1} ORCID 0000-0001-5247-5057

Sinan EGÜZ² ORCID 0009-0009-0500-9534

Kerimcan ÇELEBİ³ ORCID 0000-0001-6294-0872

Sedat KARAAHMETLİ⁴ ORCID 0000-0002-5906-8216

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering,
Department of Mechanical Engineering, Adana, Türkiye

²İSKEN - Sugözü Power Plant, Adana, Türkiye

³Cukurova University, Faculty of Ceyhan Engineering, Department of Mechanical Engineering,
Adana, Türkiye

⁴Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering,
Department of Civil Engineering, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 25.09.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: ULUDAMAR, E., EGÜZ, S., ÇELEBİ, K., KARAAHMETLİ, S., (2023). Investigation of Seismic Behaviour of a Construction of a Conveyor Line in a Coal Power Plant. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 1005-1012.

Abstract

The conveyor line that carries raw materials from storage area to inside of a facility is the main vessel of a coal power plant. Therefore, this critical line should be designed by considering the many loads likely to be exposed in the field in order for the plant to operate uninterruptedly. In this study, seismic behaviour of a construction of a conveyor line was investigated by using Finite Element Analysis. The structure of coal carrier conveyor line of a coal power plant, operating in Adana, Türkiye was considered as a case study. In the study, the parts of the conveyor line were modelled as 1-D. The modified acceleration history of Golcuk-1999 earthquake was applied on the structure on lateral direction. The results showed that the maximum stress is slightly higher than the elastic limit of the steel and less than the ultimate strength. Although the construction of the conveyor line withstands the applied loads, modification should be carried out to prevent the damage on the construction.

Keywords: Seismic behaviour, Earthquake, Finite element analysis, Power plant, Conveyor line

Bir Kömür Santrali Konveyör Hattının Sismik Davranışının İncelenmesi

Öz

Hammaddeleri depolama alanından tesis içine taşıyan konveyör hattı, bir kömür santralinin ana damarıdır. Bu nedenle kritik öneme sahip bu hat, santralin kesintisiz çalışabilmesi için sahada maruz kalması

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Erinç ULUDAMAR, euludamar@atu.edu.tr

muhtemel birçok yük dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Bu çalışmada, bir konveyör hattı konstrüksiyonunun sismik davranışı Sonlu Eleman Analizi kullanılarak incelenmiştir. Türkiye, Adana'da faaliyet gösteren bir kömürlü termik santralinin kömür taşıyıcı konveyör hattının yapısı örnek olay olarak ele alınmıştır. Çalışmada, konveyör hattının parçaları 1-B olarak modellenmiştir. Gölcük-1999 depreminin ivme geçmişi değiştirilerek yapıya yanal yönden uygulanmıştır. Sonuçlara göre maksimum gerilmenin çeliğin elastik sınırından biraz daha yüksek ve nihai dayanımdan daha düşük olduğunu göstermiştir. Konveyör hattının konstrüksiyonu uygulanan yüklere dayanmasına rağmen konstrüksiyona zarar vermemek için modifikasyon yapılmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Sismik davranış, Deprem, Sonlu elemanlar analizi, Enerji santrali, Konveyör hattı

1. INTRODUCTION

Every year, approximately 500.000 detectable earthquakes, which 100.000 of them can be felt by human, is located around the globe [1]. Large-scale natural disasters such as earthquakes are frequently occurred in many regions of Turkey as well. Post-earthquake damages of power plants have posed an increasing concern by engineers since the power supply to damaged settlement by earthquakes is crucial for rescue works and aids.

The main active tectonic feature of Adana Basin is the left lateral of Toprakkale and Yumurtalık faults [2]. The coal power plant is located approximately 10 km from the centre of Yumurtalık-Sugözü town of Adana Province.

Earthquakes are a frequent natural disaster that poses a significant threat to infrastructure, including power plants. Therefore, in the present study, the seismic behaviour of a steel constructed coal conveyor line of a coal power plant was investigated as a case study.

In previous studies, Weng et. al., studied on system identification method for material constitutive nonlinear structures subject to unknown input earthquake excitation [3]. In the study, they modelled the nonlinear fiber beam-column model, and the input earthquake is parametrized by Chebyshev orthogonal polynomials and they optimized the process. As a result, the proposed model recognized the earthquake input and sensitivity analysis to accelerate optimization.

Mazzieri et. al., performed the case study of the Tahtalı dam in İzmir earthquake 2020 [4]. They considered an abstract mathematical, three dimensional, elasto-acoustic coupled wave-propagation model. Ansys software program is commonly used by researchers for seismic analysis. Yan et. al., performed the program to investigate the structural dynamics of 10 MW offshore wind turbines with monopile, tripod and jacket substructures [5]. They resulted that the tower top displacement is the most with monopile, followed with jacket and tripod, respectively under 7 measured on a Richter scale earthquake and compared to monopile, the maximum stresses of the jacket and tripod are 5.7 and 2.3 times, respectively whereas the average stress is 0.74 and 0.56 times, respectively. Xunqiang et. al., developed a method and implemented in the ANSYS Release 11.0 software program [6]. They developed the method for nonlinear seismic analysis of large 3-D structures which are rises on unbounded visco-elastic soil. For a broad frequency range, better convergence during the extraction process and convenient modelling of bounded soil without selecting a particular artificial damping was assured with the formulations. Das et. al., investigated damping effectiveness of installed deep liquid tanks on the roof of asymmetric high-rise buildings on controlling the seismic response [7]. In the study they coupled Fluent and Mechanical solvers in ANSYS software program. According to their findings, response is 79.37% reduced with traditional tuned liquid dampers, whereas the tuned mass damper 100% reduction. They recommended that eccentrically placed deep liquid tanks may

provide better control in L-shaped high-rise buildings. Yang et. al., 2023 studied on the seismic performance of height-to-diameter ratios, storage categories, and site soil categories of column-bearing concrete vertical silos [8]. They modelled the silos using ANSYS Workbench and found out that the seismic performance of the building increased with the fibers in concrete.

Morelli et. al., investigated the impact of retrofitting an existing industrial steel building using the steel self-centering device (SSCD) on the global seismic response. A parametric analysis is conducted to emphasize the effect of various parameters defining the device's hysteresis cycle on the overall behaviour of the structure. The structure's performance is primarily assessed based on three parameters: maximum displacements, residual displacements, and the seismic energy absorbed by the structure. The results obtained underscore the effectiveness of SSCDs in enhancing the seismic performance of the building and increasing its resilience by reducing residual displacements [9].

Li et. al., produced three 1:2 scale steel frame samples and tested them on a shaking table at five different ground acceleration levels. Then, the damage modes, dynamic responses, displacement responses, strain responses and acceleration responses of various steel structures with different connection types were analysed. Experimental results were verified using the finite element method. This study aims to provide a guide on the seismic design of steel frames with ductile connections [10].

Yang et. al., emphasized in previous studies that seismic design methods of steel silos are not included in detail in current regulations. Therefore, they aimed to develop a new understanding of the interaction mechanism and response of grain cast steel silos under earthquake loads [11].

The purpose of this study is to investigate the seismic behaviour of a coal conveyor system with a steel structure in a coal power plant and to understand how stress levels on this system are related to the supporting height. The findings highlight the importance of evaluating the seismic performance of the conveyor system by demonstrating that high stress levels lead to the bending of the bridge profiles. Furthermore, the study emphasizes the need to make infrastructure of this kind more resilient to seismic risks and underscores the importance of taking appropriate measures to mitigate the potential effects of earthquakes. This study can be considered as an important step in understanding and improving the seismic behaviour of critical infrastructure.

2. MATERIAL AND METHOD

Each of the steel profile of conveyor line was prepared as 1-D and analysed in ANSYS Workbench software program. In Figure 1, the modelled conveyor line was shown in the field. In the model, it was considered that there is no pre-deformation and corroded material in the structure of the line. The conveyor line on the field was shown in Figure 1. The investigated part of the conveyor line was named as shown in Figure 2.



Figure 1. The conveyor line

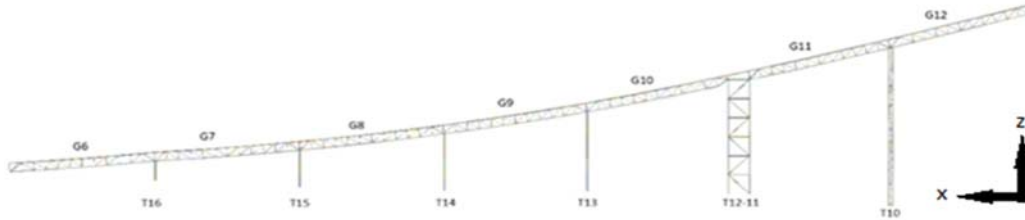


Figure 2. Model of the conveyor line

The material of the conveyor line is SABS 1431 300WA quality steel. The chemical composition and mechanical properties of the steel were presented in Tables 1 and 2, respectively.

Table 1. Chemical composition of SABS 1431 300WA steel as percent

C	Mn	Si	P	S	Nb	V	Nb	Al	Cu	Ni	Cr	Mo
0.2	1.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1

Table 2. Mechanical properties of the steel

Density		7850	kg/m ³
Young's modulus		200	GPa
Poisson's ratio		0.3	
Minimum yield strength	3<t<16	300	MPa
	16<t<40	300	MPa
	40<t<63	290	MPa
	63<t<80	280	MPa
Elongation	50 mm	24	%
	200 mm	20	%
	5.65 So	22	%
Tensile strength		450	MPa

In the meshing operation, each of the steel profile was divided into 20 elements. Thus 67264 nodes and 34321 elements were obtained on the model.

- The boundary conditions and assumption of the modal is as follows (Figure 3);
- All degrees of freedom of the ground contact points of carriers T10, T11, T12, T13, T14, T15, T16 were fixed.
- Displacement at x-, y-, and z- directions of the idle points of G6 and G12 conveyors were assumed as 0.
- The own weight of the line (67,357 kg)
- 29,000 kg distributed weight to simulates the weight of parts (fasteners, tape, rollers, etc.) which were not included in the model,
- 10,500 kg distributed weight to simulate coal weight.
- Earthquake acceleration from lateral direction.

Standard earth gravity and acceleration data was applied on the model. The acceleration data includes the most severe 6.41 seconds long of Gölcük-1999 (Mw=7.4) earthquake with 0.01 second intervals. The graph of time history data of applied acceleration was illustrated in Figure 4.

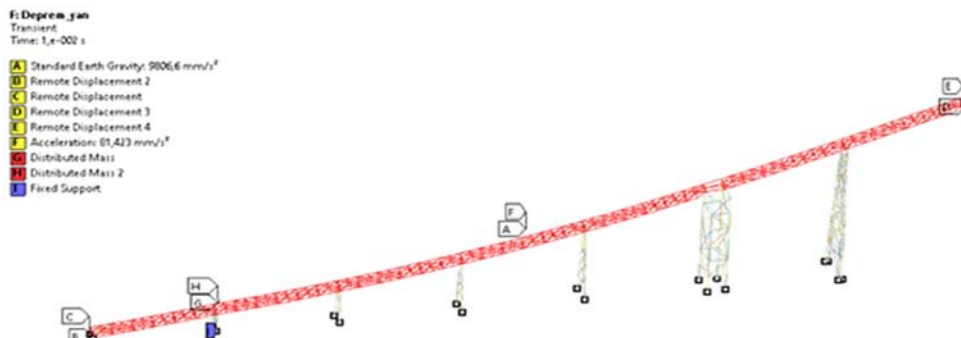


Figure 3. Boundary conditions of the model

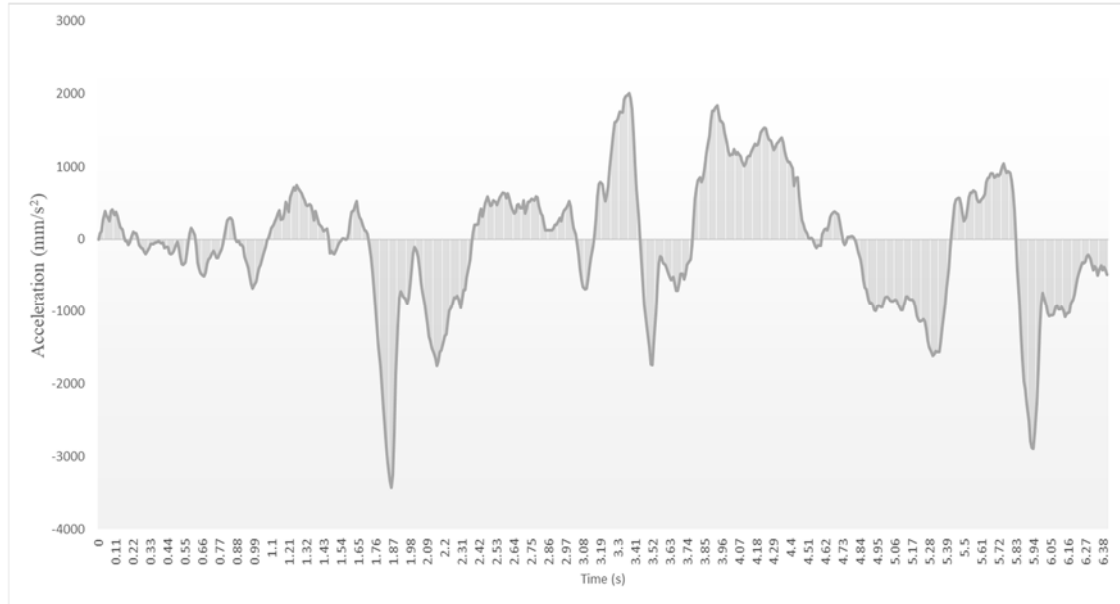


Figure 4. Time history of applied acceleration

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

According to results of numerical method, stress of all carriers is at acceptable levels. The analyses result showed that the highest stress increased primarily with the height of the carriers. Moreover, the stresses that occurred in gantries also increased with the height of the carriers. This increment may relate with the high deformation of carriers forces to elongate and buckling of gantries' profiles.

Unfavourably, the stress level increases beyond the yield strength of the material in G9 and G11. The highest stress was occurred in G11 as 425.9 MPa. In G9 the highest stress was 347.8 MPa. For the other gantries, the highest stress is lower than the yield strength of the material however, modification

should be performed on the gantries considering the safety factor. Although it was observed that the stresses of G12 were lower than G11, it was evaluated that the main reason for this may be due to the boundary condition taken as 0 displacement at x-, y-, and z- directions, in the connection point of G12 to the building which is not included in the model. It has been evaluated that the deformation and stresses occurring in G12 may vary according to the building oscillation, and G12 should also be considered as risky.

The highest stress and deformation results of each part were shown in Table 3. Moreover, in Figures 5 and 6 the stress history of G9 and G11 were presented, respectively. The stress distribution at 3.64 seconds, when the highest stress was observed, was shown in Figure 7.

Table 3. The highest stress and deformation results

		Max.	Min.
T16	<i>Direct Stress</i>	22.5 MPa	-52.2 MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	21.8 MPa	-60.8 MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	28.8 MPa	-50.7 MPa
	<i>Total Deformation</i>	1.8376 mm	-
T15	<i>Direct Stress</i>	62.8 MPa	-69.9 MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	62.5 MPa	-85.8 MPa

	<i>Maximum Combined Stress</i>	72.1	MPa	-69.7	MPa
	<i>Total Deformation</i>	6.0295	mm	-	
T14	<i>Direct Stress</i>	113.8	MPa	-115.7	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	113.5	MPa	-123.7	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	120.3	MPa	-115.4	MPa
	<i>Total Deformation</i>	18.629	mm	-	
T13	<i>Direct Stress</i>	83.4	MPa	-85.0	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	83.1	MPa	-91.9	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	88.7	MPa	-84.9	MPa
	<i>Total Deformation</i>	17.758	mm	-	
T12-11	<i>Direct Stress</i>	110.2	MPa	-126.3	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	108.8	MPa	-137.9	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	128.7	MPa	-125.5	MPa
	<i>Total Deformation</i>	51.398	mm	-	
T10	<i>Direct Stress</i>	104.4	MPa	-98.0	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	103.1	MPa	-109.3	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	120.9	MPa	-97.6	MPa
	<i>Total Deformation</i>	51.398	mm	-	
G6	<i>Direct Stress</i>	86.0	MPa	-52.5	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	84.0	MPa	-217.2	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	196.5	MPa	-51.09	MPa
	<i>Total Deformation</i>	20.243	mm	-	
G7	<i>Direct Stress</i>	87.4	MPa	-48.3	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	84.7	MPa	-125.4	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	123.2	MPa	-43.4	MPa
	<i>Total Deformation</i>	20.7	mm	-	
G8	<i>Direct Stress</i>	86.7	MPa	-57.4	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	84.2	MPa	-278.5	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	232.2	MPa	-56.0	MPa
	<i>Total Deformation</i>	29.518	mm	-	
G9	<i>Direct Stress</i>	87.7	MPa	-74.4	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	85.1	MPa	-347.8	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	292.24	MPa	-73.1	MPa
	<i>Total Deformation</i>	39.27	mm	-	
G10	<i>Direct Stress</i>	91.2	MPa	-76.4	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	88.2	MPa	-235.8	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	226.1	MPa	-74.6	MPa
	<i>Total Deformation</i>	52.301	mm	-	
G11	<i>Direct Stress</i>	103.9	MPa	-87.4	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	103.0	MPa	-421.9	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	425.9	MPa	-81.0	MPa
	<i>Total Deformation</i>	76.776	mm	-	
G12	<i>Direct Stress</i>	123.3	MPa	-141.5	MPa
	<i>Minimum Combined Stress</i>	119.2	MPa	-263.7	MPa
	<i>Maximum Combined Stress</i>	248.3	MPa	-139.4	MPa
	<i>Total Deformation</i>	55.898	mm	-	

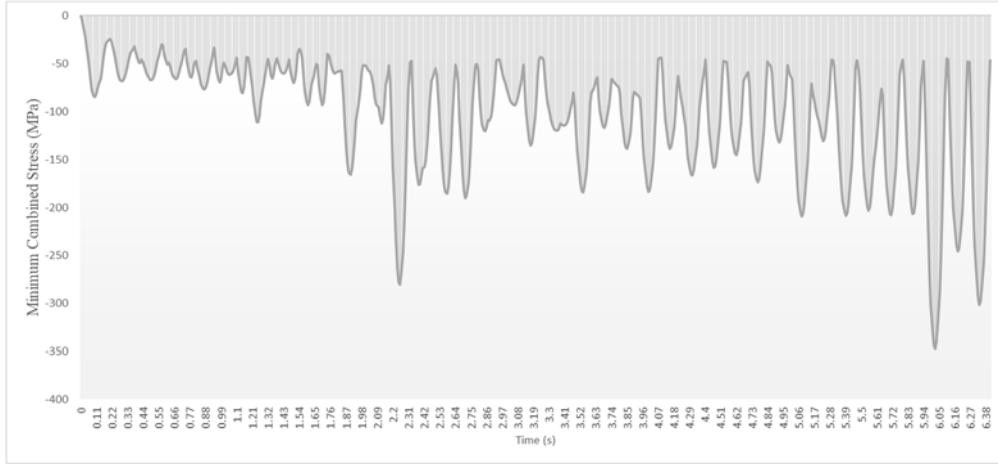


Figure 5. Stress history of G9

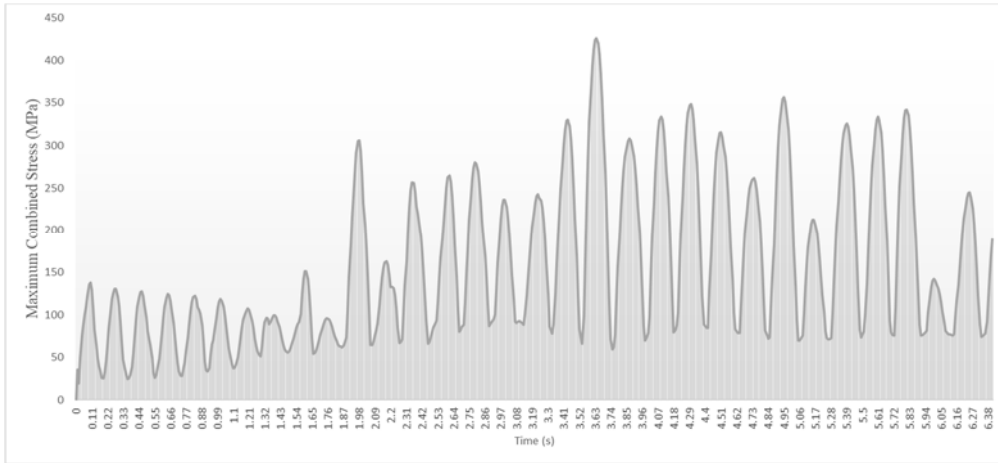


Figure 6. Stress history of G11

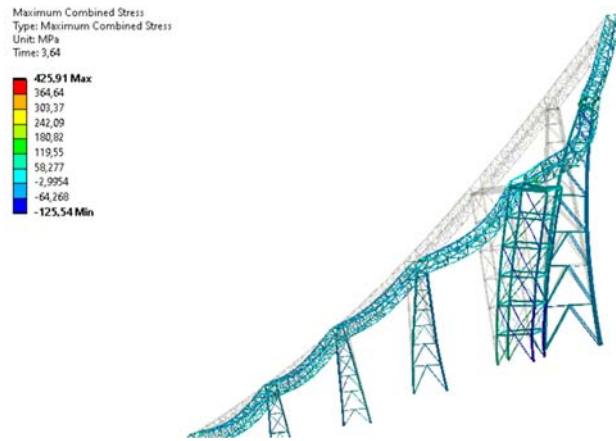


Figure 7. Stress distribution

4. CONCLUSION

In this study, seismic behaviour of a steel constructed coal conveyor line of a coal power plant was investigated. The results showed that the stress levels in all carriers were increased primarily with the height of the carriers, leading to buckling of the gantries' profiles.

The stress level increased beyond the yield strength of the material in G9 and G11. Additionally, stress level of G12 should be considered as high as the connected building model did not include in the analysis. In other gantries, modifications should also be considered to increase the safety factor.

The findings of this study demonstrate the need for improvement of the conveyor line should be evaluated. It is crucial to ensure that infrastructure is designed and constructed to withstand the forces generated by seismic events and to identify potential risks and take appropriate measures to mitigate them. In conclusion, this study highlights the importance of understanding the seismic behaviour of critical infrastructure and minimize the damage and impact of earthquakes.

5. REFERENCES

1. Sivapriya, J., Sruth, S., 2020. Seismic Vibration Reduction of Beam Column Joint in Buildings with Step-backs. *Materials Today: Proceedings*, 24, 1100-1111.
2. Yönlü, Ö., 2017. Geological and Geomorphological Evidence for the Southwestern Extension of the East Anatolian Fault Zone, Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*, 469, 1-14.
3. Weng, S., Chen, Z., Yan, Y., Xiao, C., Li, R., Li, J., 2022. Sensitivity-Based Constitutive Parameter Identification of Nonlinear Structures with Unknown Input Earthquake Excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 537, 117188.
4. Mazziere, I., Muhr, M., Stupazzini, M., Wohlmuth, B., 2022. Elasto-Acoustic Modeling and Simulation for the Seismic Response of Structures: The Case of the Tahtalı Dam in the 2020 Izmir Earthquake. *Journal of Computational Physics*, 466, 111411.
5. Yan, Y., Yang, Y., Bashir, M., Li, C., Wang, J., 2022. Dynamic Analysis of 10 MW Offshore Wind Turbines with Different Support Structures Subjected to Earthquake Loadings. *Renewable Energy*, 193, 758-777.
6. Xunqiang, Y., Jianbo, L., Chenglin, W., Gao, L., 2013. ANSYS Implementation of Damping Solvent Stepwise Extraction Method for Nonlinear Seismic Analysis of Large 3-D Structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44, 139-152.
7. Das, A., Maity, D., Bhattacharyya, S.K., 2022. Deep Liquid Tanks in Seismic Response Control of Asymmetric High-Rise Buildings. *Structures*, 45, 1279-1286.
8. Yang, J., Zhang, F., Li, P., Jing, H., 2023. Seismic Performance of Column-Bearing Silo Structure with Granular Materials Considering SSI Effect. *Structures*, 47, 595-606.
9. Morelli, F., Piscini, A., Salvatore, W., 2017. Seismic Behavior of an Industrial Steel Structure Retrofitted with Self-centering Hysteretic Dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 139, 157-175.
10. Li, J., Wang, Y., Zhang, Z., Mou, B., 2023. Seismic Behavior of Steel Frames with Different Joints: Shaking Table Test and Finite Element Analysis. *Journal of Building Engineering*, 70, 106377.
11. Yang, J., Feng, G., Jing, H., Zhang, F., 2023. Seismic Response and Theoretical Analysis of Grain Bulk Material-steel Silostructure under Earthquake Action. *Journal of Constructional Steel Research*, 211, 108207.

Helisel Kazıklarda Helis Çapının Basınç Yüküne Etkisinin Laboratuvar Deneyleri ile Araştırılması

Yakup TÜREDİ¹ ORCID 0000-0001-9197-5214

Buse EMİRLER^{*2} ORCID 0000-0002-0234-7177

Murat ÖRNEK¹ ORCID 0000-0002-0809-2531

Abdulazim YILDIZ² ORCID 0000-0002-6755-1902

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, Hatay

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi:05.09.2023

Kabul tarihi:25.12.2023

Atıf şekli/How to cite: TÜREDİ, Y., EMİRLER, B., ÖRNEK, M., YILDIZ, A., (2023). Helisel Kazıklarda Helis Çapının Basınç Yüküne Etkisinin Laboratuvar Deneyleri ile Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 1013-1022.

Öz

Geleneksel kazıklara karşı alternatif bir temel olarak kullanımları giderek artan helisel kazıklar, zemine tork kuvveti ile döndürülerek yerleştirilen çelik temel sistemleridir. Bu çalışmada, gevşek ve sıkı kumlu zemine yerleştirilen dört farklı çaptaki helisel kazığın basınç yükü altındaki davranışı laboratuvar model deneyleri ile araştırılmıştır. Ayrıca her iki zemin sıklığında düz (helissiz) kazık için deneyler yapılmıştır. Nihai yük değerleri, literatürdeki analitik yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Helis çapı artışının kazık kapasitesini önemli oranda artırdığı görülmüştür. Özellikle sıkı zeminde, düz kazık çapının (şaft çapı) 5,5 katı büyüklüğünde helis plakası mevcudiyetinin, nihai yük kapasitesini yaklaşık 17 kata kadar artırdığı belirlenmiştir. Sıkı zemine yerleştirilmiş helisel kazığın kapasitesinde gevşek zemine kıyasla 10 kata varan artış elde edilmiştir. Analitik yaklaşımın, deneyden elde edilen nihai yük değerleriyle uyum içinde olduğu görülmüş ve ayrıntı taşıma yönteminin ise her iki zemin sıklığında başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Helisel kazık, Basınç yükü, Kumlu zemin, Nihai yük

Investigation of the Effect of Helix Diameter on Compression Load in Helical Piles by Laboratory Tests

Abstract

Helical piles, which are increasingly being used as an alternative foundation to traditional piles, are steel foundation systems that are placed on the ground by rotated with torque force. In this study, the behavior of model helical piles with four different diameters placed in loose and dense sandy soils under compression load has been investigated by laboratory model tests. In addition, tests have been carried out for straight

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Buse EMİRLER, bemirler@cu.edu.tr

piles (without helix) at both soil densities. The ultimate load values have been compared with analytical approaches in the literature. It has been seen that the increase in helix diameter significantly increased the pile capacity. It has been determined that the presence of a helix plate with a size of 5.5 times the straight pile diameter (shaft diameter) increases the ultimate load capacity up to approximately 17 times, especially in dense soil. An increase of up to 10 times has been achieved in the capacity of helical piles placed in dense soil compared to loose soil. It has been seen that the analytical approach was compatible with the ultimate load values obtained from the test, and it has been concluded that the individual bearing method was successful in both soil densities.

Keywords: Helical pile, Compression load, Sandy soil, Ultimate load

1. GİRİŞ

Helisel kazıklar, kurulum ve galvaniz teknolojisinin gelişmesiyle birlikte popüleritesi giderek artan bir temel sistemi olarak geoteknik mühendisliğinin birçok uygulama alanında tercih edilmektedir. Çelikten üretilen helisel kazıklar, üzerinde çoğunlukla bir veya daha fazla helis plakası bulunduran konik uç kısım ve bağlantı aparatları ile bağlanan uzatma bölümlerinden oluşmaktadır. Birçok zemin çeşidi ve inşaat alanında, hemen hemen tüm hava koşullarında, yer altı suyunun bulunduğu ortamlarda, sınırlı ve dar alanlarda, geçici yapıların desteklenmesinde, eğimli yüzeylerde vb. ortamlarda kurulumları yapılabilir. Ayrıca kurulumlarının gürültüsüz yapılabilmesi, herhangi bir bakım ve kalıp maliyetlerinin olmaması, birçok farklı temel sistemi ile çalışabilmesi, basınç, çekme ve yanal yüklerle karşı koyabilmesi gibi birçok avantajları mevcuttur. Enerji yapıları (kompresör temelleri, rüzgâr santralleri, güneş tarlaları, trafo merkezi temelleri, gergi kabloları vb.), altyapı (demiryolu tabelaları, zemin çivilemesi, istinat yapıları, yaya köprüleri, güvenlik bariyerleri, aydınlatma direkleri vb.), deniz yapıları, konutlar (yeni yapı temelleri, tarihi yapıların temelleri) ve sanayi yapıları gibi kullanım alanları mevcuttur [1-6].

Helisel kazıklar, çekme ve yanal gibi farklı yüklerin etkisi altındaki yapılara destek sağlarken birçok alanda da basınç yüklerine karşı yapıları desteklemektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, basınç yüküne maruz helisel kazıklarla ilgili deneysel, analitik ve sayısal analiz çalışmaları mevcuttur. George ve arkadaşları [7] tarafından kohezyonsuz zemine yerleştirilen helisel kazıkların eksenel çekme ve basınç

kapasitelerini etkileyen faktörleri incelemek için laboratuvar model deneyleri yapılmıştır. Şaft çapı, helis çapı ve zemin sıklığı gibi parametrelerin kazık kapasitesi üzerinde önemli bir etki yaptığı belirlenmiştir. Livneh ve El Naggar [8] tarafından yapılan çalışmada arazi ortamında çekme ve basınç yükleri altında on dokuz adet kazık yükleme deneyi yapılarak helisel kazıkların eksenel yük taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Mittal ve Mukherjee [9] yaptıkları çalışmada kum zemine yerleştirilen basınç yükü etkisindeki helisel kazıkların davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Gömülme oranı ve yerleşim düzenindeki değişimlerin araştırıldığı çalışmada, helis sayısı ve gömülme oranının artmasıyla kapasitenin arttığı belirlenmiştir. George ve arkadaşları [10] tarafından kum zemine gömülü helisel kazıkların davranışı sayısal analizlerle parametrik olarak araştırılmıştır. Zemin sıklığı ve helis varlığının kazık kapasitesini önemli oranda etkilediği, şaft çapının ise helis çapına kıyasla kapasite üzerinde önemli bir rol oynamadığı tespit edilmiştir.

Basınç yükü altındaki helisel kazıklarda eksenel taşıma gücünü belirlemeye yönelik “silindirik kayma” ve “ayrık taşıma” olmak üzere iki analitik yaklaşım mevcuttur. Kazıklardaki helis plakalarının birbirine olan uzaklıklarına ve bağımsız veya grup halinde çalışmalarına bağlı olarak bu ayrım ortaya çıkmaktadır (Şekil 1). Silindirik kayma ve ayrık taşıma yöntemleri arasındaki belirleyici parametre helis aralığı olmakla birlikte birden fazla helis plakası bulunan helisel kazıklarda silindirik yenilme modelinin kullanılması önerilir [11]. Şekil 1a’da verilen silindirik kayma yüzeyinde oluşan kayma dayanımı ve üst helisin üzerindeki şaft dayanımı toplamı, taşıma gücünü vermektedir.

Mitsch ve Clemence [12] tarafından kohezyonsuz zeminler için önerilen nihai basınç kapasiteleri aşağıdaki eşitlikte verilmiştir (Eşitlik 1).

$$Q_c = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \phi + \gamma' H A_h N_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (1)$$

Burada;

Q_c = nihai basınç kapasitesi, D_a = ortalama helis çapı, γ' = efektif birim hacim ağırlık, H_b = en alttaki helisin derinliği, H_t = en üstteki helisin derinliği, K_s = yanal zemin basıncı katsayısı, ϕ = içsel sürtünme açısı, H = gömülü kazık derinliği, A_h = en alttaki helisin net yüzey alanı, N_q = taşıma kapasitesi faktörü, P_s = şaft çevre uzunluğu, H_{eff} = efektif şaft boyu olarak ifade edilmiştir.

Gömülme oranı (H/D) 5'ten az (yüzeysel durum) ise Nasr [13] şaft sürtünmesinin ihmal edilebileceğini ortaya koymuştur. Böylece eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır (Eşitlik 2).

$$Q_c = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \phi + \gamma' H A_h N_q \quad (2)$$

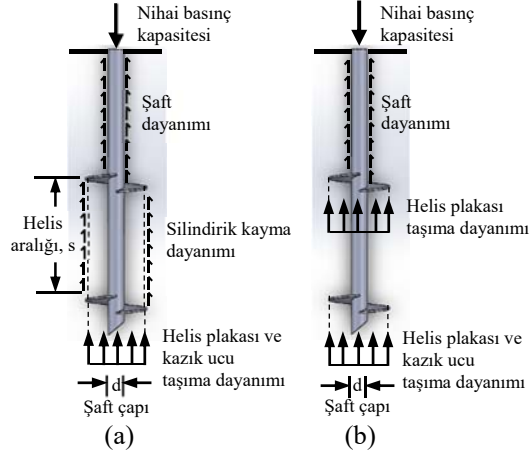
Şekil 1b'de gösterilen ayrıık taşıma yöntemi, her bir helis plakasının bağımsız davranması durumunu dikkate alır. Toplam nihai kapasite, şaft dayanımı ile helis kapasitelerinin toplamından oluşmaktadır [8,14,15].

Kohezyonsuz zeminlerde helisel kazıkların basınç kapasitesi, ayrıık taşıma yöntemi ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir (Eşitlik 3).

$$Q_c = \gamma' H_i A_i N_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (3)$$

Burada;

Q_c = nihai basınç kapasitesi, γ' = efektif birim hacim ağırlık, H_i = helis derinliği, A_i = helis net yüzey alanı, N_q = taşıma kapasitesi faktörü, P_s = şaft çevre uzunluğu, H_{eff} = efektif şaft boyu, K_s = yanal zemin basıncı katsayısı, ϕ = içsel sürtünme açısı olarak ifade edilmiştir.



Şekil 1. Helisel kazık için önerilen analitik yaklaşımlar (a) Silindirik kayma (b) Ayrıık taşıma [16]

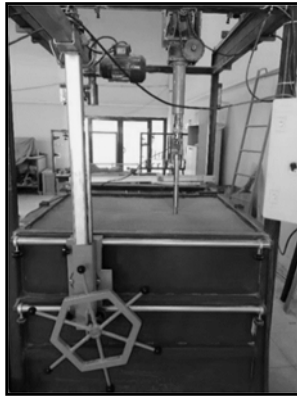
George ve arkadaşları [7] tarafından yapılan çalışmada bir kazığın nihai kapasitesinin genel olarak zemin tipine, kazık boyutuna ve kazık kurulum yöntemine bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bu amaçla taşıma kapasitesi faktörlerinin (N_q ve N_γ) $0,7R_q$ ve $0,55R_\gamma$ azaltma faktörleri ile (%30 ve %45 azalma olduğu varsayımı) çarpılması sayesinde kurulum yönteminin etkisi formülasyona yansıtılmıştır. Elsherbiny ve El Naggat [17] tarafından yapılan çalışmada da benzer bir taşıma kapasitesi azaltma faktörü (R) kullanılarak kum zemindeki helisel kazıklar için ayrıık taşıma yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada ayrıık taşıma yöntemi için N_q değerleri $0,7R_q$ azaltma faktörü ile çarpılarak hesaplamalar yapılmıştır. Azaltma faktörü eklenmiş haliyle eşitlik, aşağıdaki gibi olmuştur (Eşitlik 4).

$$Q_c = \gamma' H_i A_i N_q R_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (4)$$

Bu çalışmada, sıkı ve gevşek kumlu zemine yerleştirilen düz (helissiz) ve dört farklı çaptaki helisel kazıkların basınç yüklemesi altındaki davranışları incelenmiştir. Şaft çapı $d=22$ mm olan düz ve helis çapı $D=60-80-100-120$ mm olan helisel kazıklar kullanarak on adet model deney yapılmıştır. Deney sonuçları literatürde sunulan iki farklı analitik yaklaşım (silindirik ve ayrıık) ile değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmalar, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneyler, 1500 mm×1200 mm×1000 mm (uzunluk×genişlik×yükseklik) boyutlarında olan dikdörtgen kesitli kasa içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Deney kasası

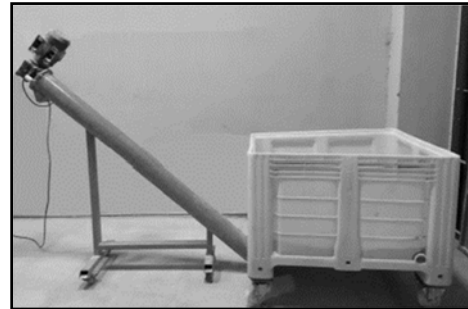
Çalışmada kullanılan kum zemin, taş ocağından alınarak ve laboratuvarında özel elek sistemi ile 0,18 mm-2,00 mm arasında elenerek elde edilmiştir. Zemine ait elek analizi ve mukavemet parametre sonuçları Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Deney kumunun mühendislik özellikleri

Parametre	Değer
D_{10} (mm)	0,26
D_{30} (mm)	0,44
D_{60} (mm)	0,78
Üniformluk katsayısı, C_u	2,97
Süreklilik katsayısı, C_r	0,96
Özgül ağırlık, G_s	2,72
Maksimum kuru birim hacim ağırlık, γ_{kmaks} (sıkı) (gr/cm^3)	1,68
Minimum kuru birim hacim ağırlık, γ_{kmin} (gevşek) (gr/cm^3)	1,55
İçsel sürtünme açısı, ϕ (sıkı) ($^\circ$)	41-44
İçsel sürtünme açısı, ϕ (gevşek) ($^\circ$)	30-32
Zemin sınıfı (USCS)	SP

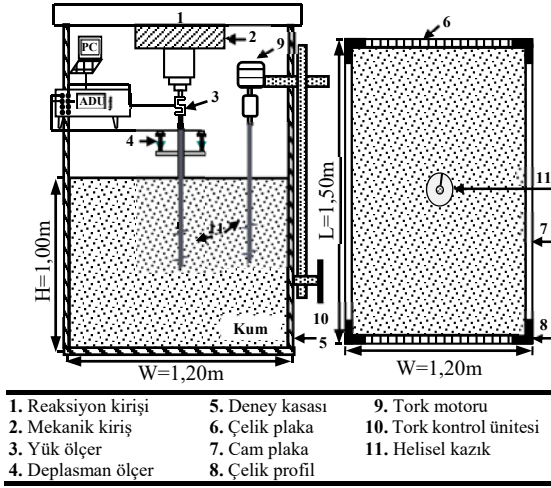
Deneyler sıkı ve gevşek zemin sıklıklarında gerçekleştirilmiştir. Zemin içerisine yerleştirilen

helisel kazıklar çelik malzemeden üretilmiş, şaft ve helis plakası olmak üzere iki parçadan meydana gelmiştir. $d=22$ mm sabit şaft çapında ve $D=60-80-100-120$ mm farklı helis çaplarında kazıklar kullanılmıştır. Deneylerde, yük ve deplasman verileri sırasıyla 2 ton kapasiteli S-tipi yük ölçer ile 10 mm ve 200 mm'ye kadar deplasman ölçebilen iki farklı deplasman ölçer kullanılarak elde edilmiştir. Kum zemin, özel aktarma düzeneği vasıtasıyla deney kasasına aktarılmıştır. Zemin aktarma düzeneği, deneysel çalışmalar sırasında deney kasasına yakın yerdeki haznenin zemin malzemesinin alınarak deney kasasına homojen biçimde aktarılması ve iş gücü açısından kolaylık sağlanması için tasarlanmıştır. Düzeneğin üst kısmında 50 d/dk. hızda dönme yapabilen elektrik motoru yer almaktadır. Motorun devamında 25 cm çapında 45° eğimli, zemini aktarmaya yarayan helizonlu çelik boru mevcuttur. Borunun alt kısmında ise zemini helizonlu sisteme iletmesi için 25° eğimli bir hazne bulunmaktadır (Şekil 3).

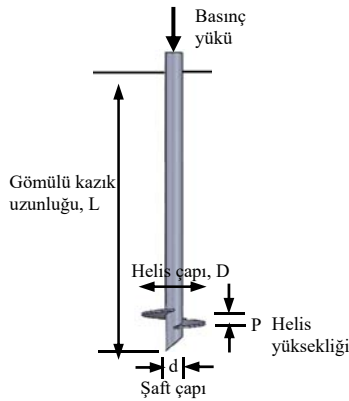


Şekil 3. Zemin aktarma düzeneği

Sıkı zemin özel olarak imal edilen kompaktör kullanılarak, gevşek zemin ise yağmurlama tekniğiyle göz açıklığı 5 mm×5 mm boyutlarında elek kullanılarak hazırlanmıştır. Deney kasasına yerleştirilen zeminin düzgünlüğü su terazisi ile kontrol edildikten sonra kazıklar helisel kazık tork motoru montaj düzeneği yardımıyla döndürülerek zemine yerleştirilmiştir. Helisel kazıkların zemine kurulumundan sonra yük hücresi helisel kazık üzerindeki uç kısma girecek şekilde, deplasman ölçerler ise yükün uygulandığı eksenin her iki tarafına yerleştirilerek yük-deplasman ilişkileri incelenmiştir. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 4'te, kazık geometrisi ve deney planına ait bilgiler ise Şekil 5 ve Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 5. Helisel kazık kesiti

Çizelge 2. Laboratuvar model deneyleri

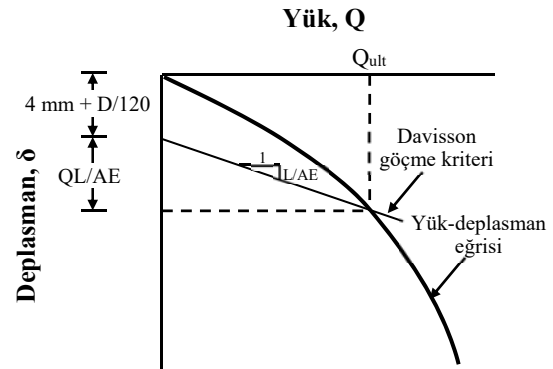
Zemin sıklığı	Deney kodu	Helis çapı, D (mm)
Sıkı	LBSD-1	-
	LBSD-2	60
	LBSD-3	80
	LBSD-4	100
	LBSD-5	120
Gevşek	LBGD-1	-
	LBGD-2	60
	LBGD-3	80
	LBGD-4	100
	LBGD-5	120

LBSD : Laboratuvar-Basınç-Sıkı-Deney
LBGD : Laboratuvar-Basınç-Gevşek-Deney

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kazıkların aksel basınç kapasitelerini belirlemek için kazık yükleme deneyi sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrilerinden yararlanılan; Davisson göçme kriteri [18], Brinch Hansen yöntemi [19], L1-L2 yöntemi, FHWA (%5D) yöntemi [20] ve ISSMFE (%10D) [21] yöntemi gibi kapasite tespit yöntemleri bulunmaktadır.

Davisson göçme kriterinde, nihai yük kapasitesi doğrudan toplam yer değiştirmeye, diğer bir ifadeyle kazığın elastik sapmalarına ve ötelenmenin toplamına bağlıdır (Şekil 6). Nihai yük kapasitesi Eşitlik 5 kullanılarak belirlenmektedir.



Şekil 6. Davisson göçme kriteri [18]

$$Q_{ult} = QL/AE + (4 + D/120) \text{ (mm)} \quad (5)$$

Burada;

Q_{ult} = nihai yük, Q = uygulanan yük, L = kazık boyu, A = kazık kesit alanı, E = elastisite modülü, D = kazık çapıdır.

FHWA (%5D) yönteminde, kazık uç çapının %5'i kadar deplasmana karşılık gelen yük değeri, nihai aksel basınç kapasitesi olarak kabul edilmektedir. Helisel kazıklarda helis çapına, çakma kazıklarda ise şaft çapına eşit olarak alınmaktadır [20].

Livneh ve El Naggari [8] tarafından küçük çaplı helise sahip ince helisel kazıklara yönelik olarak %8D yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde nihai yük değeri, kazığın elastik sapması ile en büyük helis çapının %8'inin oluşturduğu kazık başı hareketine karşılık gelen yük değerinin toplamı olarak

tanımlanmıştır. Göçme anındaki deplasman değeri (S) Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır.

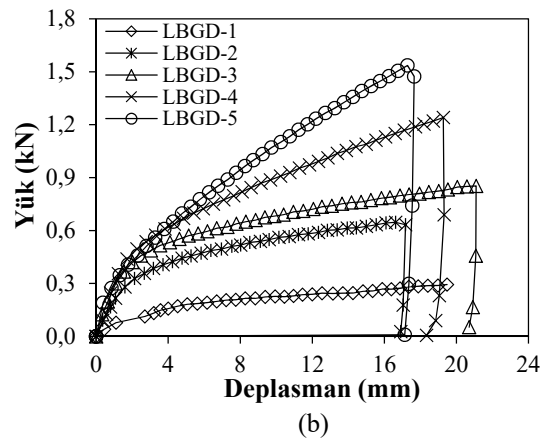
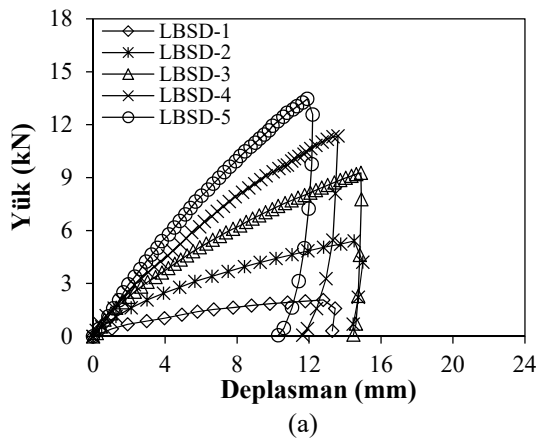
$$S = \frac{PL}{AE} + 0,08D \quad (6)$$

Burada;

P= göçme anında uygulanan yük, L= kazık uzunluğu, A= kazık kesit alanı, E= elastisite modülü, D= en büyük helis çapıdır.

ISSMFE (%10D) yönteminde, kazık çapının %10'u kadar deplasman değerine karşılık gelen yük değeri, nihai kazık kapasitesi olarak ifade edilmektedir [21].

Bu çalışmada; Davisson göçme kriteri [18] ile FHWA (%5D) [20], %8D [8] ve ISSMFE (%10D) [21] yöntemleri kullanılmıştır.



Şekil 7. Helis çapının etkisi (a) Sıkı zemin (b) Gevşek zemin

Sıkı ve gevşek zemine gömülü helisel kazıkların, eksenel basınç altındaki davranışları laboratuvar model deneyler ile araştırılmıştır. Deneylerde, helis çapı (D) ve zemin sıklığı (D_r) parametrelerinin helisel kazıkların basınç kapasitesi üzerine etkileri incelenmiştir.

Eksenel basınç deneyleri sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrileri Şekil 7'de grafik olarak verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, her iki zemin sıklığı için helis çapının artmasına bağlı olarak yük değerlerinde büyük ölçüde artışlar meydana geldiği görülmüştür. Kazık kapasitesinin önemli oranda helis plakası ve gömülü olduğu zemin bölgesinden gelmesi, ayrıca çapın artması ile helisin etkilediği zemin bölgesinin büyümesi kapasitedeki artışın sebebi olarak düşünülmüştür.

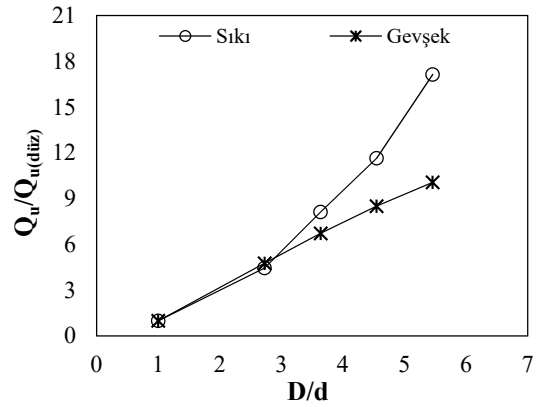
Yük-deplasman eğrilerinden Davisson göçme kriteri ile %5D, %8D ve %10D yöntemleri

kullanılarak elde edilen nihai basınç yükü değerleri ile analitik yaklaşım (silindirik ve ayrıık) yük değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Sıkı ve gevşek zeminde %5D yöntemine göre tespit edilen nihai yük değerlerinin, düz kazık nihai yük değerlerine göre oranları belirlenmiş ve helis çapının etkisi Şekil 8'de grafik olarak sunulmuştur. Şekil 8 incelendiğinde, $D/d=1$ (helis çapı/şaft çapı) düz kazık durumunu ifade etmektedir. D/d oranının artmasıyla sıkı zeminde nihai yük değerlerinin sırasıyla yaklaşık olarak 4,5-8,1-11,7 ve 17,1 kat arttığı görülmüştür. Gevşek zemin durumunda ise artış miktarları 4,8-6,7-8,5 ve 10,8 kat olarak tespit edilmiştir. Nihai yük artış oranlarına bakıldığında her iki zemin sıklığında da çapın artış oranından daha fazla bir artışın meydana geldiği gözlenmiştir. Sıkı zeminde D/d oranının 2,73'ten 5,45'e yaklaşık 2 kat arttığı durumda nihai yük değerinde yaklaşık 4 kata varan bir artış olduğu görülmüştür. Ayrıca helis çapının artması, sıkı zeminde gevşek zemine

kıyasla nihai yükü daha fazla artırmıştır. Çizelge 3'te %5D yöntemi sonuçları dikkate alındığında sıkı zeminde gevşek zemine kıyasla yaklaşık 10 kata varan artış elde edilmiştir. Bu durum, sıkı zemindeki yüzey sürtünmesinin gevşek zemine oranla daha fazla olmasıyla açıklanabilir. Kazığın gömülü olduğu derinlik boyunca kasa içerisine yerleştirilen zeminin, sıklığının artmasıyla birlikte birim hacim ağırlığı arttığından ve kazık yüzeyi boyunca direnç gösterilen zemin kütlesi daha fazla olduğundan sıkı zeminde kapasite gevşek zemine kıyasla daha fazla meydana gelmiştir.

Çizelge 3'te sıkı ve gevşek zemin için verilen deneysel ile analitik nihai yük değerleri, grafik olarak Şekil 9'da sunulmuştur. Şekil 9 incelendiğinde analitik yaklaşımların, göçme yöntemlerinden elde edilen nihai yük değerlerine yakın değerler verdiği görülmüştür. Sıkı zeminde silindirik kayma yöntemi %8D yöntemine, ayırık taşıma yöntemi ise Davisson göçme kriteri ve %5D yöntemine daha yakın çıkmıştır. Gevşek zeminde silindirik kayma yöntemi deney sonuçlarına uzak, ayırık taşıma yöntemi ise %10D yöntemine yakın sonuçlar vermiştir. Ayırık taşıma yönteminin her iki

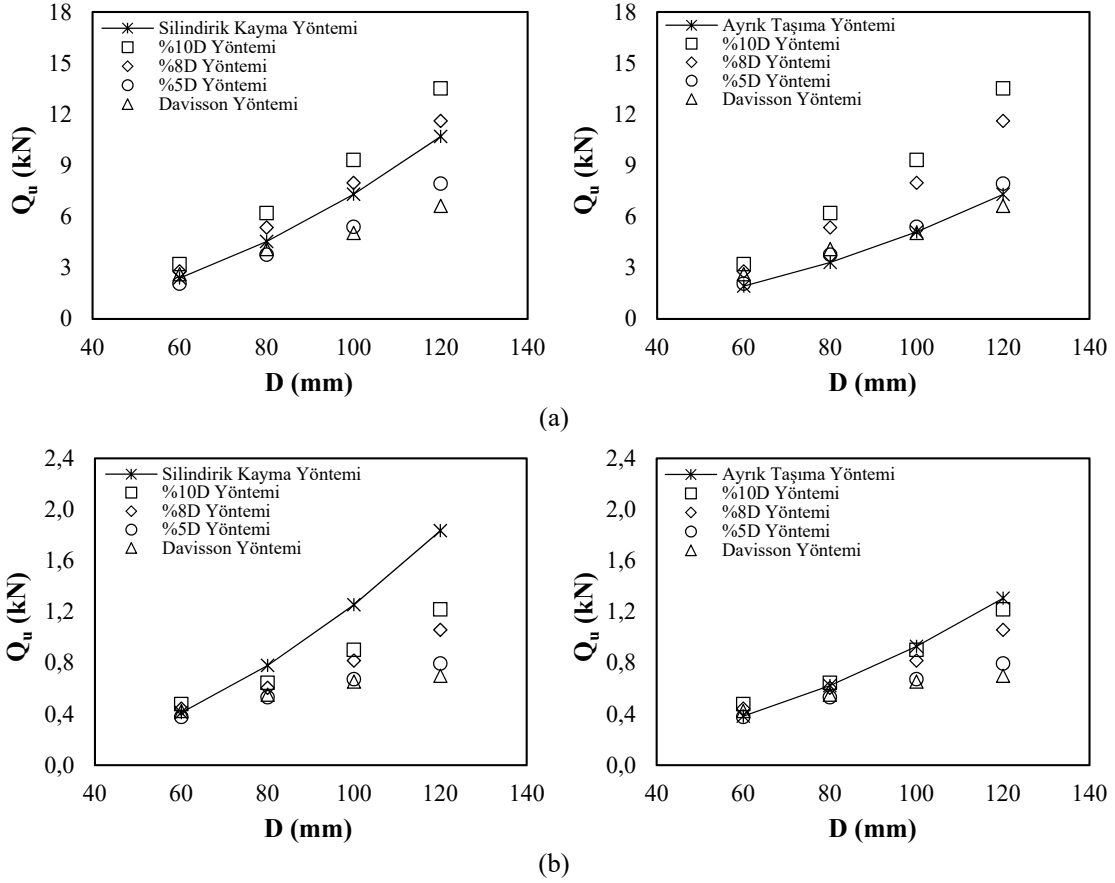
zemin sıklığındaki başarısı; tekli helisel kazığın silindirikten ziyade ayırık göçme mekanizması göstermeye yakın olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca literatürde [7,17] yöntem formülüne yapılan ilaveyle sıkı zemin için R_q azaltma faktörü kullanılarak kazıkların kurulum etkisinin analitik yaklaşımda da dikkate alınması başarının sebeplerinden biri olarak gösterilebilir.



Şekil 8. Helisel kazık nihai yüklerinin düz kazık nihai yüklerine göre artış oranları

Çizelge 3. Göçme yöntemlerine göre nihai yük değerleri

Zemin sıklığı	Deney kodu	Nihai yük (Deneysel) (kN)				Nihai yük (Analitik) (kN)	
		Davisson göçme kriteri	%5D yöntemi	%8D yöntemi	%10D yöntemi	Silindirik kayma yöntemi	Ayırık taşıma yöntemi
Sıkı	LBSD-1	1,050	0,463	0,646	0,740	-	-
	LBSD-2	2,618	2,066	2,792	3,217	2,397	1,926
	LBSD-3	4,092	3,765	5,362	6,206	4,550	3,321
	LBSD-4	5,047	5,397	7,986	9,325	7,318	5,113
	LBSD-5	6,632	7,939	11,611	13,522	10,702	7,304
Gevşek	LBGD-1	0,158	0,079	0,078	0,084	-	-
	LBGD-2	0,424	0,377	0,443	0,478	0,411	0,384
	LBGD-3	0,551	0,532	0,605	0,644	0,780	0,623
	LBGD-4	0,654	0,673	0,818	0,902	1,255	0,930
	LBGD-5	0,699	0,796	1,058	1,219	1,835	1,306



Şekil 9. Deneysel-analitik sonuçlar (a) Sıkı zemin (b) Gevşek zemin

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı sıklıktaki (sıkı ve gevşek) kum zemine yerleştirilmiş düz (helissiz) kazık ve dört farklı çaptaki helisel kazığın basınç yükü altındaki davranışları incelenmiştir. Deney sonuçlarından dört farklı göçme yöntemi ile nihai yükler tespit edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca, literatürde sunulan analitik yaklaşımlar ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlara istinaden;

- Her iki zemin sıklığında helis çapının artmasıyla taşıma gücü önemli oranda artmıştır. Düz kazıklara kıyasla helis çapının şaft çapına göre 2,73d-3,64d-4,55d ve 5,45d kat artması, sıkı zeminde nihai yük değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak 4,5-8,1-11,7 ve 17,1 kat, gevşek

zeminde ise sırasıyla 4,8-6,7-8,5 ve 10,8 kat artışa sebep olmuştur. Her iki zemin sıklığında yük miktarındaki artış, çap artış oranından daha fazla meydana gelmiştir.

- Sıkı zemine yerleştirilmiş kazığın taşıma kapasitesinde gevşek zemine göre yaklaşık 10 kata varan bir artış meydana geldiği görülmüştür.
- Analitik sonuçların, deneyden elde edilen nihai yük değerleriyle uyumlu sonuçlar verdiği ve deney sonuçlarını büyük oranda yakın tahmin ettiği belirlenmiştir. Ayrık taşıma yöntemi sıkı zeminde Davisson göçme kriteri ve %5D yöntemine, gevşek zeminde ise %10D yöntemine yakın tahminler ortaya koymuştur. Ayrık taşıma yönteminin her iki zemin sıklığındaki başarısı; tekli helisel kazığın

silindirikten ziyade ayırık göçme mekanizması göstermeye yakın olmasıyla ve özellikle sıkı zeminde R_q azaltma faktörünü kullanarak kazıkların kurulum etkisini analitik yaklaşımda da dikkate almasıyla açıklanabilir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 218M571 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunarlar.

6. KAYNAKLAR

1. Perko, H.A., 2009. Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation. John Wiley & Sons, New Jersey, 528.
2. Singh, S., Laddha, A., Hiranandani, P., Purohit, D.G.M. 2017. A Review on Pull-out Capacity of Helical Anchors in Clay and Sand. Journal of Architecture and Civil Engineering, 3(6), 24-32.
3. Lutenegeger, A.J., 2017. Uplift Behavior of Round Shaft Single-helix screw-piles for elevated Ground Mount Solar Panel Systems. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, 615-618.
4. Yılmaz, B., 2016. Helisel Kazıklar. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı, İstanbul, 137.
5. Blessen, J., Deardorff, D., Dikeman, R., Kortan, J., Malone, J., Olson, K., Waltz, N., 2017. Supportworks Technical Manual. Third Edition, Nebraska, 338.
6. Niroumand, H., Kassim, K.A., 2016. Design and Construction of Soil Anchor Plates. Butterworth-Heinemann, Oxford, 202.
7. George, B.E., Banerjee, S., Gandhi, S.R., 2019. Helical Piles Installed in Cohesionless Soil by Displacement Method. International Journal of Geomechanics, 19(7), 04019074.
8. Livneh, B., El Naggar, M.H., 2008. Axial Testing and Numerical Modeling of Square Shaft Helical Piles under Compressive and Tensile Loading. Canadian Geotechnical Journal, 45(8), 1142-1155.
9. Mittal, S., Mukherjee, S., 2015. Behaviour of Group of Helical Screw Anchors under Compressive Loads. Geotechnical and Geological Engineering, 33(3), 575-592.
10. George, B.E., Banerjee, S., Gandhi, S.R., 2020. Numerical Analysis of Helical Piles in Cohesionless Soil. International Journal of Geotechnical Engineering, 14(4), 361-375.
11. Mooney, J.S., Adamczak, S., Clemence, S.P., 1985. Uplift Capacity of Helical Anchors in Clay and Silt. In: Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, Proceedings of a Session Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention, Michigan, 48-72.
12. Mitsh, M.P., Clemence, S.P., 1985. The Uplift Capacity of Helix Anchors in Sand. In: Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, Proceedings of a Session Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention, Michigan, 26-47.
13. Nasr, M.H., 2004. Large Capacity Screw Piles. International Conference: Future Vision and Challenges for Urban Development, Cairo, 1-15.
14. Sakr, M., 2009. Performance of Helical Piles in Oil Sand. Canadian Geotechnical Journal, 46(9), 1046-1061.
15. Sakr, M. 2011. Installation and Performance Characteristics of High-Capacity Helical Piles in Cohesionless Soils. DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute, 5(1), 39-57.
16. Türedi, Y., 2021. Basınç Yüküne Maruz Helisel Kazık Davranışının Laboratuvar ve Arazi Deneyleri ile Araştırılması. Doktora Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 170.
17. Elsherbiny, Z.H., El Naggar, M.H., 2013. Axial Compressive Capacity of Helical Piles from Field Tests and Numerical Study. Canadian Geotechnical Journal, 50(12), 1191-1203.
18. Davisson, M.T., 1972. High Capacity Piles. Lecture Series, Innovations in Foundation

- Construction, American Society of Civil Engineers, Illinois Section, Chicago, 81-112.
19. Brinch Hansen, J., 1963. Discussion of "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils". Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 89(4), 241-242.
 20. O'Neill, M.W., Reese, L.C., 1999. Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure, Publication No. FHWA-IF-99-025, 537.
 21. ISSMFE, 1985. Axial Pile Loading Test - Part I: Static Loading. Geotechnical Testing Journal, 8(2), 79-90.

Friction and Wear Behavior of High-Silicon Lamellar Graphite Cast Iron Truck Brake Discs

Ali GÜNEN*¹ ORCID 0000-0002-4101-9520
Melik ÇETİN² ORCID 0000-0002-6952-2523
Tarkan SUBAŞ³ ORCID 0009-0001-2395-9439

¹Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Metallurgical and Materials Engineering, Hatay, Türkiye.

²Karabük University, Faculty of Technology, Manufacturing Engineering, Karabük, Türkiye.

³Ekdöksan Döküm Metal Automotive San. Tic. Ltd. Şti., Konya, Türkiye

Geliş tarihi: 21.10.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: GÜNEN, A., ÇETİN, M., SUBAŞ, T., (2023). Friction and Wear Behavior of High-Silicon Lamellar Graphite Cast Iron Truck Brake Discs. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 1023-1033.

Abstract

In this study, the chemical compositions of high-silicon lamellar graphite cast irons commonly used in truck brake discs and the effects of applied heat treatments on their friction and wear behaviors were investigated. For this purpose, samples with two different chemical compositions (first with 2.43 C and 4.5 Si; second with 2.5 C and 4.2 Si) were produced, and homogenization annealing was applied at 900°C for 30, 45, and 60 minutes followed by air cooling. Hardness, tensile testing, and wear testing were performed on the heat-treated samples. Wear tests were conducted at room temperature and dry sliding conditions (20 N load, 250 mm sliding distance, and 200 mm/min sliding speed) using a ball-on-disk wear apparatus against 52100 bearing steel. The increase in homogenization heat treatment time resulted in an increase in hardness and tensile strength values for both lamellar graphite cast iron grades. The wear test results indicated that both the chemical composition and the duration of applied heat treatment influenced the friction coefficient and wear volume losses. Since high friction coefficient and low wear volume losses are desired in brake discs, it was determined that the best result among the compared samples was achieved in the sample produced with a chemical composition of 2.5 C and 4.2 Si, and then homogenized at 900°C for 30 minutes.

Keywords: High-silicon lamellar graphite cast iron, Brake disc, Friction, Wear

Yüksek Silisli Lamel Grafit Dökme Demir Kamyon Fren Disklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışı

Öz

Bu çalışmada, kamyon fren disklerinde yaygın olarak kullanılan yüksek silisli lamelli grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimleri ve uygulanan ısı işlemlerin sürtünme ve aşınma davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla iki farklı kimyasal bileşime sahip (birincisi 2,5 C ve 4,2 Si; ikincisi 2,43

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Ali GÜNEN, aligunen2013@gmail.com

C ve 4,5 Si) numuneler üretilmiş ve 900°C'de 30, 45 ve 60 dakika homojenizasyon tavlama ve ardından havada soğutma yapılmıştır. Isıl işlem görmüş numunelere sertlik, çekme testi ve aşınma testleri uygulandı. Aşınma testleri, oda sıcaklığında ve kuru kayma koşullarında (20 N yük, 250 mm kayma mesafesi ve 200 mm/dak kayma hızı) disk üzerinde bilyalı aşınma aparatı kullanılarak 52100 rulman çeliğine karşı gerçekleştirildi. Homojenizasyon ısıl işlem süresinin artması, her iki lamel grafitli dökme demir kalitesi için sertlik ve çekme mukavemeti değerlerinde artışa neden olmuştur. Aşınma testi sonuçları, hem kimyasal bileşimin hem de uygulanan ısıl işlem süresinin sürtünme katsayısını ve aşınma hacmi kayıplarını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Fren disklerinde yüksek sürtünme katsayısı ve düşük aşınma hacmi kayıpları istendiğinden, karşılaştırılan numuneler arasında en iyi sonucun 2,5 C ve 4,2 Si kimyasal bileşimi ile üretilip daha sonra 900°C'de 30 dakika süre ile homojenleştirilen numunede elde edildiği belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Yüksek silisli grafitli dökme demir, Fren disk, Sürtünme, Aşınma

1. INTRODUCTION

Cast irons are alloys of Fe-C, where iron (Fe) is the primary constituent, and they may additionally incorporate other elements like carbon (C), silicon (Si), manganese (Mn), chromium (Cr), nickel (Ni), sulfur (S), phosphorus (P), and nitrogen (N). Within cast irons, there exist carbon crystals known as graphite. The microstructural characteristics of cast irons, including the shape and distribution of graphite, as well as the microstructure of the metal matrix, are contingent upon the chemical composition, casting procedure, and cooling circumstances [1-3]. Graphite is part of the microstructure of cast iron and according to this structure cast irons are classified into different types. Gray cast iron, white cast iron and ductile cast iron are classifications based on graphite structure. Gray cast irons have a lamellar graphite structure, white cast irons have a lamellar structure and ductile cast irons have a spherical graphite structure.

The shape of graphite in the structure is very important. Because the mechanical properties of cast irons vary depending on their chemical composition and graphite structure [4-6]. Although these alloys can be produced at low cost, the ability to achieve mechanical properties close to steels has made cast irons a popular material group used in a variety of industrial and engineering applications. Gray cast irons are used in a wide variety of applications. Examples include automobile engine parts, pipe fittings, construction materials, valves, pump housings, machine construction, brake linings and many other industrial and structural

applications. Gray cast irons are low cost, well machinable, highly wear resistant and can be used in a variety of applications. However, cast irons also have some disadvantages, such as low strength and brittleness. Therefore, it is important to select the right type and apply appropriate heat treatments depending on the application requirements [2,3].

For this purpose, many studies have recently been carried out on the production of high silicon lamellar graphite cast irons. As the name suggests, this type of cast iron contains high amounts of silicon and lamellar (sheet-like) precipitated graphite [3]. Silicon is the alloying element that improves the mechanical properties of cast iron because it inhibits carbide formation and promotes graphite formation. It also improves wear resistance and provides resistance to oxidation. The lamellar precipitation of graphite gives lamellar graphite cast iron good vibration damping ability, high compressive strength [4-6], but also contributes to stress concentration and crack formation, thus affecting its mechanical properties [4]. The wear resistance of cast iron can be adversely affected by the undesirable characteristic resulting from the graphite morphology, particularly during dry sliding wear at high applied loads [7].

In the ferrite structure, silicon, one of the elements dissolved, enhances the hardness of ferritic gray cast iron [8]. The presence of silicon leads to an increase in the hardness of cast iron by promoting the formation of harder ferrite [8]. Nevertheless, silicon also induces the coarsening of graphite, causing a reduction in the hardness of cast iron [9]. An increase in ferrite formation corresponds to a

decrease in wear resistance, while enhanced graphite formation contributes to increased wear resistance [10]. This phenomenon involves the equilibrium between hardness attributed to ferrite influence and graphite influence, as well as the equilibrium between wear rates associated with ferrite and graphite influences.

While carbon is the most important element affecting the structure of cast irons, high levels of silicon also cause significant changes in the structure. In addition to increasing the fluidity of liquid cast iron, silicon has a significant effect on the carbon equivalent with C, and P. Based on the carbon equivalent ($CE = \%C + (\%Si + \%P) / 3$), this means that every 1% of silicon in the chemical composition will shift the eutectic point in the Fe-C equilibrium diagram of the alloy to the left by 0.3%. This means that cast iron compositions with a C content below 4.3% can solidify like a cast iron with a supra-eutectic composition. However, as the amount of silicon in the structure increases, the tensile strength of the cast iron decreases due to the decrease in the amount of austenite in the structure.

Although high silicon lamellar graphite cast iron can be produced with silicon in addition to iron and carbon, when cast irons used in industrial applications are examined, it can be seen that many different elements such as Cr, Mn and Cu are included in the structure besides these elements. There are reasons for adding these elements to the structure. Cr, being a strong carbide former, reduces the amount of graphite in the structure even when added in small amounts and may trigger freckle formation. Cu, on the other hand, in the range of 0.5-2.5% in liquid cast iron reduces freckle formation, while thinning the graphite structure and increasing its fluidity in the liquid state. However, if present in high proportions, Cu can cause embrittlement and especially edge cracks due to hydrogen sickness, which can cause major problems in casting. Mn, on the other hand, is not only a strong austenite former like Ni, but also an element that minimizes the negative effects of sulfur, as it enables sulfur, which causes brittleness in cast irons, to form the MnS compound primarily instead of FeS, so it is one of the elements that must be present in cast irons [11].

Due to the above-mentioned properties, high silicon lamellar graphite cast iron is a preferred material type, especially in heavy industry and engineering applications [12-15]. High silicon lamellar graphite cast irons are especially used in applications requiring high wear resistance [15]. Such cast irons are used in industrial pump parts, valve bodies, truck brake linings, medical devices and many other sectors. However, it is important to make sure that the grade and processing method chosen is suitable for the requirements of the application [13].

This investigation is centered on the application of high silica lamellar graphite cast irons in the manufacturing of truck brake discs. The rationale behind opting for high silica lamellar graphite cast irons lies in their multifaceted advantages, including notable wear resistance, a low coefficient of friction, high-temperature resilience, effective noise control, and the ease of casting [12,13]. In terms of wear resistance, the elevated silica content in these cast irons endows them with exceptional durability, thereby mitigating the wear and tear of brake discs subjected to friction and heat during wheel or disc brake application [14,15]. Additionally, the low coefficient of friction characteristic allows brake discs to smoothly interact with brake components, facilitating controlled braking for the driver. The high temperature resistance of high-silica lamellar graphite cast irons ensures the durability of brake discs under conditions of elevated temperatures during braking [16,17]. Addressing noise control concerns, this cast iron variety contributes to a quieter and more comfortable driving experience during brake disc utilization. Moreover, the ease of casting associated with high silica lamellar graphite cast irons enables the production of brake discs in diverse and intricate designs. Consequently, the utilization of high silica lamellar graphite cast irons in brake disc manufacturing emerges as a prevalent choice for ensuring the production of dependable and enduring brake system components. This material not only enhances brake performance but also contributes to the creation of long-lasting brake discs, thereby augmenting overall driving safety [14,15].

In this study, lamellar graphite cast iron specimens produced with two different chemical contents for use in brake linings were subjected to homogenization at 900°C for 30, 45 and 60 minutes and then air cooling processes. Considering brake lining applications, wear tests were carried out against a 6.3 mm diameter ball of 52100 bearing steel at 20 N load, 200 mm/sec speed and 250 m sliding distance.

2. EXPERIMENTAL METHODS

2.1. Materials

The samples of high-silicon lamellar graphite cast iron, with chemical compositions provided in Table 1, were melted in an induction furnace. After necessary chemical control and modification processes made, they were poured into sand molds prepared in the form of a molten metal brake disc model at 1390°C.

Table 1. %wt. chemical composition of high-silica content lamellar graphite cast irons (balance Fe)

Material	C	Si	Mn	Cu	Cr	S
D	2.43	4.5	0.49	0.19	0.27	0.066
T	2.5	4.2	0.5	0.2	0.26	0.068

In order to ensure the homogeneity of the samples produced by the sand mold casting method homogenization heat treatment was applied. The alloy containing 2.43 C 4.5 Si was annealed at 900°C for 30, 45 and 60 minutes and was not left to cool in the open air. These samples are coded as D1, D2 and D3, respectively. Similarly, the 2.5 C 4.2 Si alloy was annealed at 900°C for 30, 45 and 60 minutes and left to cool in open air. These samples are coded as T1, T2 and T3, respectively.

2.2. Applied Tests

After completing the heat treatment, specimens of appropriate dimensions for hardness measurements, tensile tests, and wear tests were extracted using a laser cutting machine. The surfaces of the specimens were then processed using a surface grinding machine. Subsequently, the surface roughness values of the specimens were measured

using a 2D profilometer at a speed of 2 mm/s and a length of 4.8 mm. Hardness values were determined with a 1 kg load applied for 15 seconds. Tensile test specimens prepared according to the TSE EN ISO 6892-1 standard from the samples after heat treatment were subjected to tensile testing at a speed of 2 mm/min using a Shimadzu tensile testing machine with a capacity of 50 kN. The hardness values obtained and the tensile strength results from the experiments are presented in Table 2.

Table 2. Surface roughness, microhardness, and tensile strength of the samples before the wear process.

Sample	Surface roughness (μm)	Microhardness (HV)	Tensile strength (MPa)
D1	2.21	150	205
D2	2.75	170	270
D3	1.98	177	308
T1	2.66	220	307
T2	2.55	242	315
T3	2.50	255	340

Dry sliding wear tests were conducted on high-silicon lamellar graphite cast iron samples considering the wear conditions experienced by brake disc. The wear test parameters involved a computer-controlled ball-on-disk wear apparatus (Turkyus POD&HT&WT, Turkey) against a 52100 bearing steel ball with a diameter of 6.3 mm, a sliding speed of 200 mm/s, a load of 20 N, a wear track diameter of 7.7 mm, and a sliding distance of 250 m. The tests were carried out at room temperature under normal atmospheric conditions. During the wear test, friction coefficients (COF) were automatically recorded for each test using the computer interface of the wear apparatus. For each parameter, three repeated test data were averaged using an Excel program to create COF graphs.

The width and depth of the traces formed in the abrasion test were taken with a 2D profilometer and optical microscope, as the average of at least 4 traces on each sample, in the 0, 90, 270 and 360° parts of the circle. As can be seen from the optical profilometer images given in Section 3.1, the wear scar was evaluated to be in the shape of a half ellipse, and based on previous studies, the wear scar area was calculated with the following formulas.

The wear volume and wear rates were calculated as stated in Reference 18 using Excel and are given in Table 3.

$$L=2\pi r \quad (1)$$

$$V=0.25\pi WD \quad (2)$$

$$Wr=V/FS \quad (3)$$

Where L: Circumferential length of the wear scar (mm). V: Wear scar volume (mm³). r: Wear scar radius (mm) W: average wear scar width (μm). D: Average wear scar depth (μm). F: applied load (N). S: Sliding distance (m). and Wr: Wear rate (mm³/Nm).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Friction Coefficient

The friction coefficient graphs of D1, D2 and D3 samples against 52100 bearing steel are given in Figure 1.

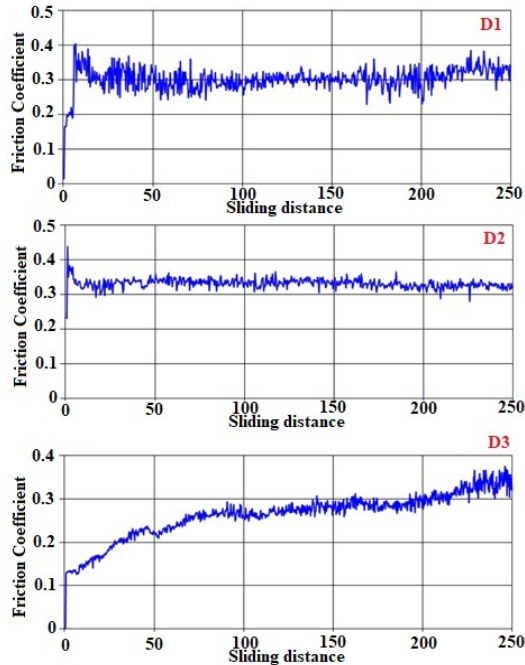


Figure 1. Friction coefficient graphs of samples D1, D2 and D3.

While the D1 and D2 samples maintained a stable friction coefficient around 0.3 throughout the test, it was observed that the D3 sample started at around 0.1 at the beginning of the test, followed a constantly increasing trend, and exceeded the 0.3 threshold at the end of the test. This shows that the homogeneity of sample D3 may be lower than other samples.

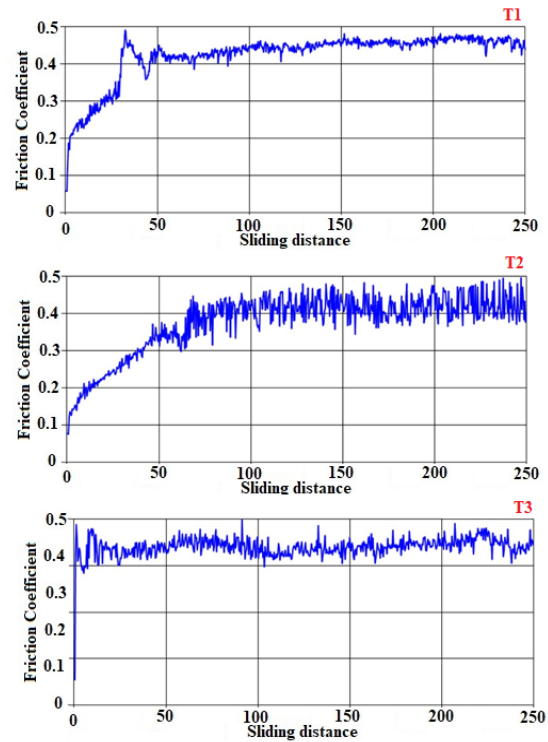


Figure 2. Friction coefficient graphs of samples T1, T2 and T3.

While the T1 and T2 samples started around 0.1 at the beginning of the test, reached a stable course of about 0.45 at the end of 50 m and continued in the range of 0.45-0.46 until the end of the test. On the other hand, the T3 sample followed a friction coefficient course in the range of 0.42-0.43 from the beginning to the end of the test. This is a result of the mechanical properties of T1 and T2 samples being close to each other. The fact that T3 showed more stable and a slightly lower coefficient of friction is a result of this sample having higher mechanical properties (hardness and tensile strength). As a matter of fact, the sample with

higher mechanical properties will show better resistance against the abrasive ball trying to sink into it, and the ball that does not sink into the substrate material will slide more easily [18,19].

Considering the graphs of the samples in Figure 1 and Figure 2 are compared with the studies in the literature, it can be seen that there is fluctuation in the friction coefficient of all the samples in this study. The situation of a continuous change with ups and downs has also been reported in studies in the literature [20-27]. Fluctuation in friction coefficient. It is related to the relationship between the deformation occurring during the test and the adhesive bond strength. Namely, the increasing trend of the friction coefficient is the result of the deformation occurring during the experiment and the adhesion of the abraded material to the surface. On the other hand, the decrease in the friction coefficient is the result of adhesive welding/bond breaking as the friction coefficient increases to high values. In their studies, Ping and his team [20] and Çetin et. al. [21] detected fluctuations in the friction coefficient during wear experiments and stated that this fluctuation was caused by the deformation that occurred during the experiment. They stated that graphite, which forms the matrix structure of cast iron, forms a graphite film on the wear surface. In this case, sliding does not occur regularly on the contacting surfaces and the formation of a film on the sliding surface of graphite does not prevent adhesive contact or adhesive bonding. However, they explained that it contributed to the bond being formed at a minimum level.

Anderson [22] describes this situation from a different perspective. He stated that it is caused by the formation of an oxide film on the surfaces that rub against each other during the wear process, due to the periodic and continuous change of temperature from the contact areas to the interior of the surfaces in contact during friction. It has been reported that a continuous change in the friction coefficient occurs due to the formation of the film and its breaking as a result of the acting forces. In another study reporting the fluctuation in friction coefficients [22], this situation was explained as welding of the asperities on the rubbing surfaces and the growth of these formations. The authors

reported that since the welding and separation process will be repeated continuously, an up-and-down graph will occur in the course of the friction coefficient. [20,23,24]. The continuous fluctuation of the friction coefficients measured in the wear tests was observed in both groups of lamellar graphite cast iron samples. It is thought that this is due to the microstructures not being homogeneous. Similar findings were reported by Jang et. al. [26] in their study on metal fiber brake discs. Because lamellar graphites have a lubricating effect, which indicates that the distribution of lamellar graphite's in gray cast iron can cause differences in the friction coefficient regime of the alloy. [9,10,26].

The behavior of materials under friction conditions is shaped depending on three main parameters [27]. These critical parameters are [21]:

- 1- Structure and surface properties: Factors such as the internal structure of the material, surface roughness, microstructure and chemical composition are the basic features that are effective in determining the friction behavior.
- 2- Friction type and test conditions: Factors such as the type of friction, that is, sliding or rolling, as well as the relative speed at which the experiment is carried out, the amount of load applied, the method of application and temperature, are other important parameters that affect the friction behavior.
- 3- Environmental conditions and lubrication: Conditions and lubrication surrounding friction have a significant effect on friction. Atmospheric conditions, humidity, degree of pollution and type of lubrication play an important role in determining friction behavior.

The combination of these factors requires a comprehensive evaluation to understand and optimize the friction performance of the material.

Additionally, as seen in Table 2, increasing the hardness of the samples resulted in a general decrease in the surface roughness values. However, it was determined that such a clear trend was not observed in the friction coefficients (Table 3). This

means that the friction coefficient is too complex to be associated only with hardness and surface roughness, and that it can vary depending on the interaction of many mechanical parameters of materials such as hardness, elastic modulus, fracture toughness [28]. Additionally, as the amount of silicone increased, the hardness increased, as can be seen in Table 2, and in parallel, there was a slight increase in the friction coefficient values (see Figure 1 and Figure 2). As a matter of fact, studies in the literature have reported that as the amount of silicon increases, the hardness values of gray/lamellar graphite cast iron decrease, but some increases occur in the friction coefficients [25,26].

3.2. Characterization of Wear Traces

Figure 3- Figure 8 shows the optical appearance and 2D profilometer images of the wear marks after the wear test.

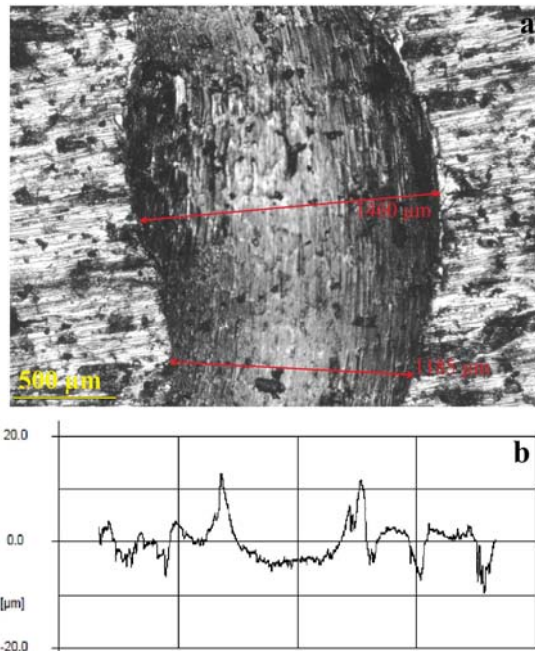


Figure 3. Illustration of wear scar width and depth of sample D1.

As Figure 3 is examined, it is noteworthy that there is some difference in the trace widths of the 3 samples taken from the D1 sample. This situation

can be attributed to the fact that the 30-minute homogenization anneal at 900°C applied to the D1 sample was insufficient. When the wear marks on the sample are examined, deep scratches, grooves and black areas are seen on the surface. This shows that the dominant wear mechanism in the sample is abrasive.

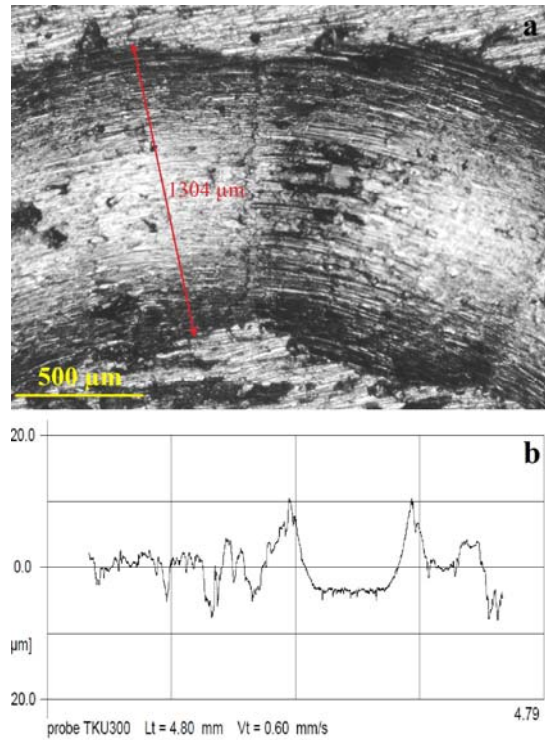


Figure 4. Illustration of wear scar width and depth of sample D2.

Whilst Figure 4 is inspected, although the trace widths taken from the D2 sample are similar to the D1 sample, they are closer to each other in the D2 sample. This shows that a 45-minute homogenization anneal at 900 °C minimizes the structural differences between the samples. This can be easily seen from the optical appearance of the wear marks on the sample. When the optical views are examined, it can be seen that the abrasive lines seen in the D1 sample are also seen in this sample, while the black areas that occur in the form of ruptures are not present.

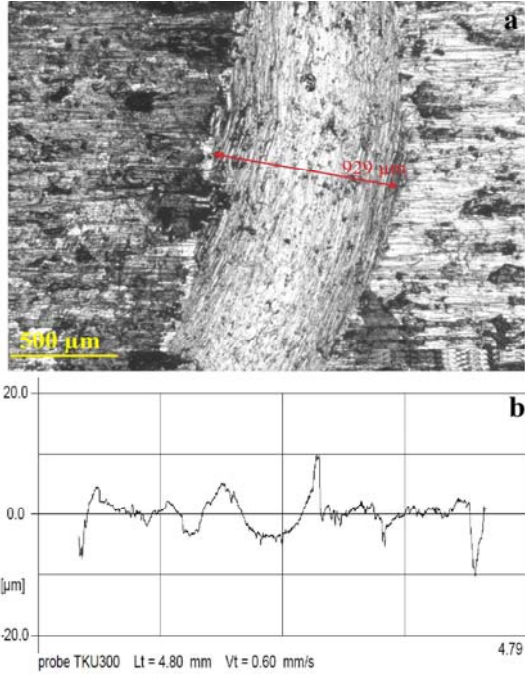


Figure 5. Illustration of wear scar width and depth of sample D3.

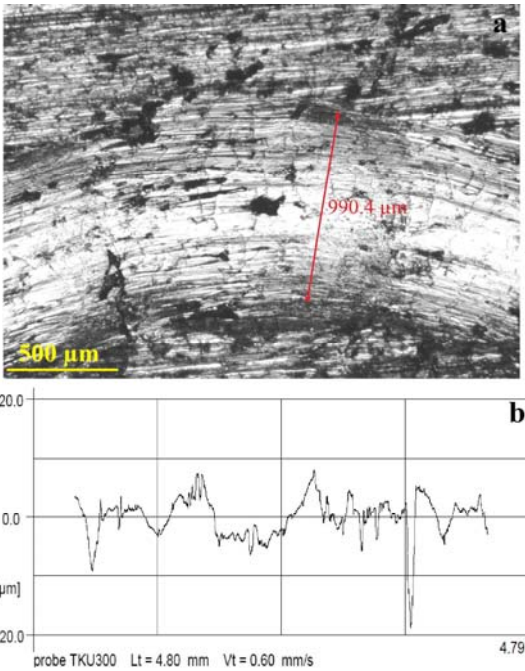


Figure 6. Illustration of wear scar width and depth of sample T1.

When Figure 5 is examined, it is seen that the wear scar width is quite low compared to D1 and D2 samples. This is a result of the D3 sample having a higher hardness value. Because. The high hardness of the material will better resist the plastic deformation of the ball trying to sink into it, depending on the applied load. However, if this hardness exceeds a certain degree, it will cause brittleness. As a matter of fact, when the worn surface optical images of the samples are examined, it is clearly seen that fractures (black areas) occur in places.

Once Figure 6 is assessed, it is determined that the trace widths of the 3 samples taken from the T1 sample is lower and shallower than the widths of the traces taken from the D1, D2, and D3 samples. This is a result of the high hardness values of the T1 sample in Table 2.

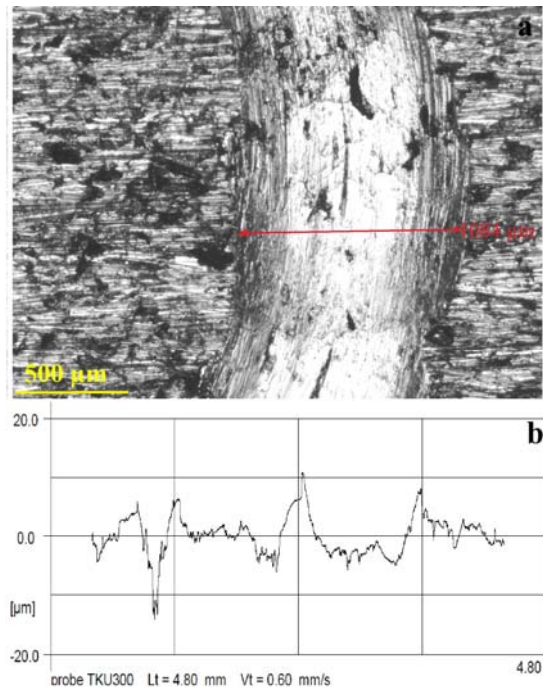


Figure 7. Illustration of the wear scar width and depth taken from the T2 sample.

Considering Figure 7, although values close to the wear scar widths taken on the T1 sample are obtained, the difference between the scars being

lower than T1 can be attributed to the fact that the 45-minute heat treatment period applied to the D1 samples obtained a more homogeneous structure compared to the 30-minute period. However, in the T2 sample, it is seen that the wear mechanism has evolved into fracture adhesive rather than abrasive.

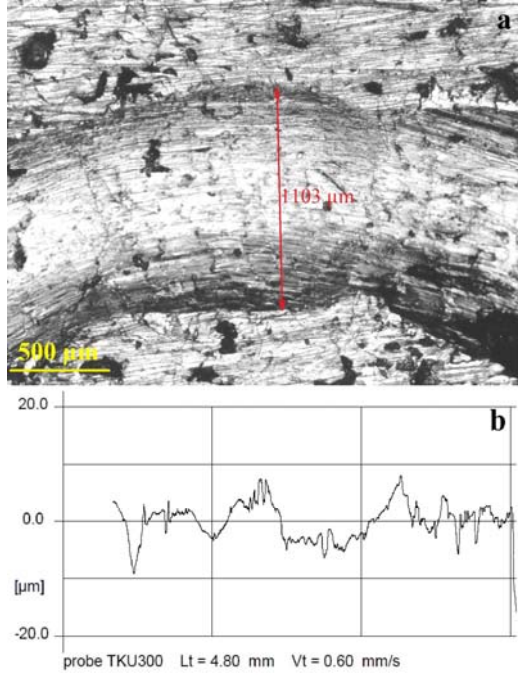


Figure 8. Illustration of the wear scar width and depth taken from the T3 sample.

As Figure 8 is examined, it can be seen that the wear scar widths taken from the T3 sample is wider than those of T1 and T2, but the wear scar depth is shallower. This may be due to the fact that the T3 sample has the highest hardness value, and therefore the abrasive ball, which does not sink into the sample easily, has worn out and created a larger contact area.

It is determined that the trace widths of the T samples (T1, T2 and T3) with higher Si content are lower and shallower than the widths of the traces taken from the D1, D2 and D3 samples. This is a result of the high hardness values of the T samples as seen in Table 2. Because samples with higher hardness values also have higher tensile stresses, they better resist the abrasive ball that tries to cause

plastic deformation on their surfaces. This results in less penetration of the ball into the material, resulting in lower wear scar width and depth. As a matter of fact, Table 3 supports this claim.

Table 3. Data obtained in wear test

Sample No	Mean COF	Wear scar width (µm)	Wear scar depth (µm)	Wear volume loss 10^{-2} (mm ³)	Wear rate mm ³ /Nm
D1	0.304	1244.50	15	35.45	7.09
D2	0.331	1304.00	14	34.67	6.93
D3	0.262	926.33	10	17.59	3.52
T1	0.464	990.67	10	18.81	3.76
T2	0.438	1009.00	12	22.99	4.60
T3	0.424	1046.67	11	21.86	4.37

As seen in Table 3, as a result of the wear tests, the lowest friction coefficient value was obtained in the D3 sample as 0.262, while the highest friction coefficient value was obtained in the T1 sample with 0.464. on the other hand, the lowest wear volume loss occurred in the D3 sample and the highest wear volume loss occurred in the D1 sample.

4. CONCLUSION

In this study, the chemical contents of high-silica lamellar graphite cast iron produced for truck brake discs and the effects of applied heat treatments on friction and wear volume losses were examined. The results obtained can be briefly summarized as follows.

- 1- The increase in the duration of the homogenization process applied at 900 °C caused an increase in the hardness values and tensile strength values of the samples.
- 2- The applied heat treatment is more effective on the friction coefficient and wear volume rates of T1, T2 and T3 samples with lower Si content than D samples.

- 3- The lowest friction coefficient and wear volume loss occurred in the D3 sample heat treated at 900°C for 60 m.
- 4- While the wear volume losses of T samples are close to each other, the wear volume rates of D samples differ from each other. This situation reveals that the applied heat treatment is appropriate for T samples, but different parameters should be tested for D samples.
- 5- It has been concluded that the most suitable sample in brake disc selection among the compared samples is the T1 sample, as the desired brake discs are required to show a high coefficient of friction, enable stopping in shorter distances and have a longer life with lower wear and volume loss.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Ekdöksan Döküm Metal Automotive San Tic Ltd Şti Konya-Turkey, which cast the truck brake pads.

6. AUTHORS' CONTRIBUTIONS

Ali GÜNEN and Melik Çetin designed the structure Tarkan SUBAŞ poured the sample according to the specifications. All authors carried out the experimental studies and the theoretical calculations and wrote up the article in collaboration. Ali GÜNEN and Melik ÇETİN are the overall supervisor of the project. All authors read and approved the final manuscript.

7. REFERENCES

1. Ertuğrul, O., Güzelipek, O., Soyusinmez, T., Akdoğan, A.T., Güneş, A.B., 2020. Dökme Demir Malzemelerin Karbür Uçlarla Delme İşleminde Proses Parametrelerinin Optimizasyonu, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(1), 251-262.
2. Collini, L., Nicoletto, G., Konečná, R.J.M.S., 2008. Microstructure and Mechanical Properties of Pearlitic Gray Cast Iron, Materials Science and Engineering: A, 488(1-2), 529-539.
3. Herring, D.H., Heat Treatment of Cast Iron. <https://industrialheating.com/articles/94644-heat-treatment-of-cast-irons>, Access date: 12.05.2023
4. Agunsoye, J.O., Isaac, T.S., Awe, O.I., Onwuegbuzie, A.T., 2013. Effect of Silicon Additions on the Wear Properties of Grey Cast Iron. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 1, 61-67.
5. Angus, H.T., 2013. Cast Iron: Physical and Engineering Properties. Elsevier, 542.
6. Davis, J.R., (Ed.). 1996. ASM Specialty Handbook: Cast Irons. ASM International, 494.
7. Mohamadzadeh, H., Saghafian, H., Kheirandish, S., 2009. Sliding Wear Behavior of a Grey Cast Iron Surface Remelted by TIG. Journal of Materials Science and Technology, 25(5), 622-628.
8. Singh, V., 1999. Physical Metallurgy. (1st ed.) Delhi: Globe Offset Press Chapter 11, 608-609.
9. Darmo, S., Setyana, L.D., Tarmono, T., Santoso, N., 2018. The Effects of Silicon on the Hardness and Wear of Ferritic Grey Cast Iron on Shoe Brake of Train. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 384(1), 012017, IOP Publishing.
10. Singhal, P., Saxena, K.K., 2020. Effect of Silicon Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Grey Cast Iron: An Overview, Materials Today: Proceedings, 26, 1393-1401.
11. Ünal, E., Yaşar, A., Karahan, İ.H., 2021. Elektrokimyasal Depolama Yöntemi ile AISI 304 Çeliği Yüzeyine Biriktirilen Ni-B/TiB₂ Kompozit Kaplamaların Kristal Yapı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 847-860.
12. Stoian, E.V., Bratu, V., Enescu, C.M., Ungureanu, D.N., 2018. Researches Regarding the Influence of Alloying Elements on the Mechanical Properties of Lamellar Graphite Cast Iron, Scientific Bulletin of 'Valahia' University. Materials and Mechanics, 16(15), 11-16.
13. Stefanescu, D.M., 2017. Classification and Basic Types of Cast Iron, ASM International.
14. Riposan, I., Stan, S., Anca, D., Stefan, E., Stan, I., Chisamera, M., 2023. Structure

- Characteristics of High Si Ductile Cast Irons. *International Journal of Metal Casting*, 1-24.
15. Ghasemi, R., 2016. The Influence of Microstructure on Mechanical and Tribological Properties of Lamellar and Compacted Irons in Engine Applications. Doctoral Dissertation, Jönköping University, School of Engineering, Jönköping, 94.
 16. Wang, G.Q., Liu, Z.L., Li, Y.X., Chen, X., 2022. Different Thermal Fatigue Behaviors between Gray Cast Iron and Vermicular Graphite Cast Iron. *China Foundry*, 19(3), 245-252.
 17. Elliott, R., 1988. *Cast Iron Technology*. Butterworths, Elsevier Science London, 847.
 18. Gunen, A., Ulutan, M., Gok, M.S., Kurt, B., Orhan, N., 2014. Friction and Wear Behavior of Borided AISI 304 Stainless Steel with Nano Particle and Micro Particle Size of Boriding Agents. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 20(3), 362-379.
 19. ELSawy, E., El-Hebeary, M.R., El Mahallawi, I.S.E., 2017. Effect of Manganese Silicon and Chromium Additions on Microstructure and Wear Characteristics of Grey Cast Iron for Sugar Industries Applications. *Wear*, 390, 113-124.
 20. Ping, L., Bahadur, S., Verhoeven, J.D., 1990. Friction and Wear Behavior of High Silicon Bainitic Structures in Austempered Cast Iron and Steel. *Wear*, 138(1-2), 269-284.
 21. Çetin, M., Gül, F., 2007. Kuru Kayma Şartlarında Matris Yapısının Küresel Grafitli Dökme Demirin Sürtünme Katsayısına ve Pim Sıcaklığına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3). 273-280.
 22. Anderson, A.E., 1992. Friction, Lubrication and Wear Technology. *ASM Handbook*, 8, 569-577.
 23. Stachowiak, G., Batchelor, A.W., 2013. *Engineering Tribology*. Elsevier, 871.
 24. Jacuinde, A.B., Rainforth, W.M., 2001. The Wear Behaviour of High-chromium White Cast Irons as a Function of Silicon and Mischmetal Content. *Wear*, 250(1-12), 449-461.
 25. Catalán, N., Ramos-Moore, E., Boccardo, A., Celentano, D., 2022. Surface Laser Treatment of Cast Irons: A Review. *Metals*, 12(4), 562.
 26. Jang, H., Ko, K., 2004. The Effect of Metal Fibers on the Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials. *Wear*, 256, 406-414.
 27. Tonghe, Z., Huixing, Z., Ji, H., Xiaoji Yuguang, W., Furong, M., Hong, L., Hanzhang, S., Jianzhong, S., 2000. Industrialization of Mevva Source Ion Implantation. *Surface and Coatings Technology*, 128-129, 1-8.
 28. Günen, A., Kurt, B., Milner, P., Gök, M.S., 2019. Properties and Tribological Performance of Ceramic-base Chromium and Vanadium Carbide Composite Coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 81, 333-344.

A Design of Crime Category Detection Framework using Stacking Ensemble Model

Recep Sinan ARSLAN*¹ ORCID 0000-0002-3028-0416
Burak DÜLGEROĞLU² ORCID 0009-0000-8201-9343

¹Kayseri University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Computer Engineering, Kayseri, Türkiye

²Kayseri University, Graduate School of Education, Kayseri, Türkiye

Geliş tarihi: 16.10.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atf şekli/How to cite: ARSLAN, R.S., DÜLGEROĞLU, B., (2023). A Design of Crime Category Detection Framework using Stacking Ensemble Model. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 1035-1048.

Abstract

Crime refers to an action legally defined as harmful to society, and it is important to understand the type of crime to prevent these actions. However, crime can occur at any time and place, making it difficult to predict. Data generated based on previously committed crimes contributes to overcoming this difficulty. This study proposes a novel model for classifying criminal activities using a Doc2Vec that can cause a numerical representation of texts regardless of length and a stacking ensemble model that includes 8 different machine-learning models. Unlike the literature, the model processes the features as text and converts them into vectors rather than categorically. In this way, it enables using features that cannot be used in the literature. The proposed model is tested using a distributed online competition database, Francisco Crime Classification, which contains crimes committed over 12 years. An accuracy value of 99.28% was obtained for the 15 crime categories with the highest crime records, while precision, recall, and f-score values were 99.18%, 99.38%, and 99.20%, respectively. With cross-validation (k=10), 99.80% performance was achieved with a std. value of 0.001. These performance values are higher than those of all the studies in the literature using categorical feature structures. The results show that converting criminal activity reports, which contain text-based features, into vectors that can be processed with natural language processing techniques such as Doc2vec instead of using them categorically in model training can directly contribute to the classification performance and provide a more efficient model with less preprocessing.

Keywords: Crime prediction, Criminology, Doc2vec, Stacking ensemble model

Suç Kategorisi Tespiti için Yığınlama Topluluk Öğrenimi Modeli Kullanan Çatı Tasarımı

Öz

Suç, toplum açısından kanuni olarak zararlı olarak tanımlanmış eylemi ifade eder ve bu eylemlerin engellenmesi için suç türünün anlaşılması oldukça önemlidir. Ancak suç herhangi bir zamanda ve yerde

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Recep Sinan ARSLAN, sinanarslanemail@gmail.com

meydana gelebilmektedir ve bu durum suçun tahmin edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Daha önce işlenmiş suçlara dayalı olarak oluşturulan verilerin kullanılması bu zorluğun aşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada suç faaliyetlerini sınıflandırma için uzunluğundan bağımsız olarak metinlerin sayısal temsili üretebilen Doc2Vec yapısı ve 8 farklı yapay öğrenme modelini içeren bir yığılma topluluk öğrenimi modelin kullanıldığı özgün bir model önerilmiştir. Model literatürden farklı olarak öznitelikleri kategorik olarak değil metin olarak işlemekte ve vektör haline dönüştürmektedir. Bu sayede literatürde kullanılmayan özniteliklerin kullanılmasını sağlamaktadır. Önerilen model 12 yıl boyunca işlenen suçları içeren, Francisco Crime Classification, isimli online dağıtım bir çevrimiçi yarışma veriseti kullanılarak test edilmiştir. En yüksek suç kaydının olduğu 15 suç kategorisi için %99,28 doğruluk değeri elde edilirken, kesinlik, geri çağırma ve f-değeri sırasıyla %99,18, %99,38 ve %99,28 olmuştur. Çapraz doğrulama (k=10) ile 0,001 std. değeri ile %99,8 başarımla yakalanmıştır. Bu performans değerleri kategorik özellik yapısının kullanıldığı literatürdeki tüm çalışmalardan yüksektir. Elde edilen sonuçlar metin tabanlı özellikler barındıran suç faaliyet raporlarının kategorik olarak model eğitimlerinde kullanılması yerine Doc2Vec gibi doğal dil işleme teknikleri ile işlenebilir vektörlere dönüştürülmesinin sınıflandırma performansına doğrudan katkı sunabildiğini göstermiş ve daha az ön işlem sayesinde daha verimli bir modelin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Suç tahminlemesi, Kriminoloji, Doc2Vec, Topluluk öğrenme

1. INTRODUCTION

Crime is a set of actions and behaviors that damage the general fabric of society, endanger the safety of people's property and lives, and have a penal equivalent according to the law. Accordingly, criminal behavior among people living in a community is one of the natural consequences of being a society. Governments, state security forces, and scientists have important duties in the fight against crime. There are numerous research studies in this field. The main purpose of these studies is to investigate why people commit crimes, the mental and physical structures of people who commit crimes, the material reasons that push people to commit crimes, and to help the security organs to the extent possible. First, crime is a human act since its source is human. People have been living in communities since the earliest ages of history. In the society in which people live, there are inequalities in physical, sociological, and, as a result, psychological aspects. This situation prepares the ground for people to commit crimes. For this reason, committing a crime is an action that has been occurring since the early periods of history and has become more and more common with the increasing population. Among social problems, crime is perhaps the most complex and interesting one. In addition to the causes of the crime

phenomenon, issues such as the rise and fall in crime rates and how crime is committed have been the subject of various studies [1].

Crime represents an important threat to humanity and is a concept that needs to be analyzed. Today, big cities attract people due to their wide range of opportunities, level of development, and work capacities. This situation brings about initiatives to facilitate people's lives in many areas, such as urban development, security, energy capacity, and environment. The most important of these initiatives is increasing the security capacity and strengthening the organizational structure. In this way, it will be possible to control the crime rates that determine the quality of life in cities and to create more livable cities. Many modern technological structures are used to ensure citizens' security in these cosmopolitan cities. It is still a big problem for today's cities, increasing daily. This problem is growing with the population [2]. It is the responsibility of security units to control and reduce this problem. However, to fulfill this responsibility, the crimes committed in cities should be analyzed in depth, and the threat levels to society should be determined. To make this analysis more detailed, country- and city-based crime statistics from the past to the present are prepared and shared with researchers [3-5]. In this way, it is possible to

determine the types of crime, to reveal the regional densities of every kind of crime, and to conduct research to determine their prevalence. Regardless of the country, many crime records are reported daily in big cities, and many correspond to real crimes in the legal sense. In addition, some of these may be records that do not involve a crime. Making this distinction may be beneficial in terms of crime intervention.

The San Francisco Crime Dataset, shared for a competition to analyze this problem, is an open-access dataset containing information on more than 800,000 crime records from 39 different crime types. It includes details of all crime reports made to the police over 12 years. With this database, it is possible to analyze crimes, evaluate, and model for the future with past crime records. In this way, it is possible to obtain information about the general situation of the city, and it helps to make plans for good protection [6].

The main purpose of this study is to propose, test, and share the results of a machine learning-based methodology for the units responsible for the security of a city to use their capacities more efficiently and to better predict and fight against crime. In this way, it will be possible to detect environmental and regional crimes and to reveal possible scenarios based on past data. The most basic of these scenarios is evaluating whether the reported crime records are real crimes. Because not every crime record will contain a real crime, it is very critical to predict whether this crime report is a real criminal incident with the help of the reported region and basic information. This way, it will be possible to intervene only in criminal incidents, and non-criminal incidents will be automatically evaluated without any loss of labor thanks to this prediction. To perform this modeling, a series of analyses such as; (1) converting the San Francisco dataset into a trainable form with machine learning models, (2) analyzing the regional distribution of criminal and non-criminal incidents in the dataset, (3) revealing the variability of the crime in terms of date time and day must be completed, and all these processes have been carried out in this study. Then, in the modeling phase, steps related to machine

learning models, such as data pre-processing, classifier selection, training and testing processes, and data balancing, were applied. Thus, detecting criminal and non-criminal cases with higher success was possible.

The main contributions of this work:

- 1- Since the features can be used without being categorized with the proposed model structure, all spatial and temporal information was used for classification.
- 2- Thanks to the doc2vec, unlike the literature, the data does not need to be categorized.
- 3- The proposed model differs from the literature's unique stacking ensemble model structure and 8 different classifier.
- 4- The 99% accuracy value obtained for 15 classes is higher than the studies in the literature.
- 5- A problem with 15 crime classes has been addressed for the first time in the literature and the problem was classified with higher performance than the 2-class problems.

2. LITERATURE REVIEW

Many studies have been conducted to develop future prediction models by using statistical data from past years to detect crime types. This section reviews and summarizes studies on crime analysis and classification in the literature. When the related literature is analyzed, more limited studies are found than most applied problems.

Junbo et. al. [7] comparatively examined the performance of different classifier models using the San Francisco dataset and analyzed the advantages and disadvantages of each model. The results indicate that, unlike other studies in the literature, Naive Bayes performs less than different classifiers. It has been stated that KNN and GB algorithms show higher performance, but their training and testing times are longer. Khan et. al. [8] compared the results of different classifiers for crime detection and category analysis. In the tests using the San Francisco dataset, the 10 categories with the highest number of crimes were selected, and the tests were

carried out. The GB algorithm achieved the highest performance and obtained a 98.5% accuracy value. The results support other studies in the literature and prove that the GB algorithm can be more successful for this problem. Wu et. al. [9] surveyed crime prediction by analyzing the San Francisco dataset. Spatial and temporal crime data were analyzed, and each crime category's probabilities were calculated. In the evaluation of a 36-class problem, an accuracy of 28.51% was obtained. In the binary classification tests, an error value of 2.78% was obtained and it is stated that the police departments work efficiently by evaluating the occurrence or non-occurrence of crime. It has been proved that time and spatial data contain serious information about crime. Yehya et. al. [10] used coordinate data, address, date, and day of the crime to analyze and predict crimes. Tests were carried out for different machine-learning models with the San Francisco dataset used in this study. As a result of the tests, a RMSE value of 2.39 was obtained for the Random Forest classifier. Arslan et. al. [11] conducted a study in which 10 features were used depending on the time and location of the crime and classification was made with Random Forest. In the study, 86.5% success was achieved in the tests performed using the San Francisco dataset, and the AUC value was 0.98.

Aldossori et. al. [12] analyzed potential crime situations to enable law enforcement officers to detect crimes and suspicious situations. It aims to detect regional crime categories using existing crime records with machine learning. In the tests where the CLEAR dataset of the Chicago Police Department was used and nine features were extracted and given to Naïve Bayes and Decision Tree classifiers, 91.68% success was achieved. Djon et. al. [13] aimed to analyze only theft crimes among different types of crimes. The prediction was made by using the spatio-temporal information of the crime. As a result of data preprocessing and hyperparameter optimization, an f-score of 86% was obtained with XGB. Forradellas et. al. [14] proposed a regional crime prediction model for Buenos Aires. The model is based on modeling the records obtained for crimes, such as homicide and theft, between 2016 and 2019 with machine learning models. The average MAE and MSE values obtained with the proposed model after a

series of preprocessing and very transformation processes were 0.4095 and 1.4602, respectively. Kim et. al. [15] analyzed Vancouver's crime records for the last 15 years. The data were obtained from the National Crime Records Bureau. Crime patterns were extracted and classified with various techniques using the data obtained. Among the structures using multiple models, the highest success rate was between 39% and 44% with KNN. Alves et. al. [16] studied crime prediction by examining the correlation structure between past crime records. Crime classification was performed with 97% success using the random forest-based model. While it was determined that urban structure is an issue that directly affects crime prediction and the main factor for Brazil is unemployment. This situation proves that models should be prepared using country and city-specific records.

Wu et. al. [17] aimed to predict the crime pattern and rate using data mining and machine learning based on regional historical crime records in YD Country. Using the records of 2012-2015 and the Bayesian network and Random Forest classifier models, the link between the type of crime and the job and gender of the offenders was estimated. As a result, it was observed that the Bayesian network has low correlation and poor performance in terms of various crimes and characteristics compared to other classifiers. Bandekar et. al. [18] proposed a structure based on machine learning models based on the location, time, and nature of crimes committed in India. They aim to reveal the connection between settlement locations and the type of crime. Thus, regional determination of risk factors and some predictions about crime were provided. As a result, location detection with Bayesian, Levenberg, and Scaled algorithm and statistical correlation with ANOVA achieved 78% success. Gül [19] examined the analysis and research methods used to prepare trend series related to crime and to make predictions on the development of crime and discussed the weaknesses and strengths of these methods, research results, and projections. In this study, it is examined important factors such as demographic variables, macroeconomic factors, technology, globalization, and new strategies in the fight against crime, which may impact the intensity and structure

of crime. In the conclusion section, it is suggested future research and crime forecasts to be conducted in Turkey. Iqbal et. al. [20] proposed a crime category prediction model using naive Bayes and decision tree classifiers that can work for different states of the United States. The results of both classifiers were compared with the model, and the highest performance was obtained for the decision tree classifier, with an accuracy of 83.95%. Saeed et al. [21] used data mining in crime and community datasets of the United States, Naive Bayes, and Decision Tree for crime prediction and analysis and compared the results. As a result of this comparison, they claimed that, unlike Iqbal, Naive Bayes performs better than Decision Tree. Another study with the same dataset [22] conducted an experimental study in which they calculated the AUC metric and used different classifiers for crime prediction and analysis. They compared the results by integrating other feature selection methods into the model. As a result, the highest performance was obtained for the Naive Bayes classifier, and the AUC value was 0.898.

When the studies in Table 1 were examined, it was seen that there were limited studies on the use of artificial intelligence techniques in crime analysis and detection. It is thought that the main reason for this is that datasets on the subject are not common, and the datasets do not have definite value. In addition, it has been seen in existing studies that classification is made with basic machine-learning models. The use of deep learning or ensemble models is quite limited. In addition, it has been observed that categorizable features are selected and used in the training and testing processes. This study aims to use non-categorical features to solve these two basic constraints and to develop a model with high classification success with the ensemble model structure. In addition, it has been understood that regional, city, and country-based studies have been carried out on crime analysis. Modeling on crime analysis varies from country to country due to changes in socio-economic conditions. In this study, analyses were made, and tests were carried out with the data set of the city of San Francisco.

Table 1. Literature review

Paper and year	Dataset usage	Classifier design	Results
Junbo (2018)	San Francisco Crime Dataset	Naïve Bayes, KNN, GB	KNN: 97.58% NB: 97.40% GB: 97.60%
Khan (2022)	San Francisco Crime Dataset (with 10 categories with the highest number of crimes)	GB	98.75%
Wu (2016)	San Francisco Crime Dataset with Spatial and Temporal Data	KNN, LR	28.51% for 36 class 97.12% for binary
Yehya (2016)	San Francisco Crime Dataset with coordinate data, address, date and day of crime	RF	97.61%
Aldossori (2020)	CLEAR (Chicago Police Department with 9 features)	NB, DT	91.68%
Djon(2023)	Chicago Crime Dataset with spatio-temporal features for analyzing only theft crime	XGB	86%
Forraddellas (2021)	Buenos Aires Crime Dataset (including 2016 and 2019 crime records)	K-means and neural network with 2 hidden layer	0.4095 (MAE) 1.4602 (MSE)
Kim (2018)	Vancouver crime dataset (15 years data)	KNN	44%
Alves (2018)	Brazil crime dataset (10 years data)	RF	97%
Bandekar (2020)	India crime dataset	Bayesian, Levenberg, Scaled algorithms, ANOVA	78% for crime location detection
Iqbal (2013)	United States dataset	Bayes, DT	83.95%
Saeed(2015)	USA Communities and Crime Unnormalized dataset	NB, DT and rule mining	80% to 95% (changing each crime type)
Shojaee (2013)	USA Communities and Crime Unnormalized dataset	Naïve Bayes	0.898 AUC
Arslan (2023)	San Fransisco Crime Datasets	Random Forest	86.5%

3. MATERIAL AND METHOD

Within the scope of this study, a model for crime category prediction was designed and tested. The flow chart for this model is shown in Figure 1. As the first stage of the model, the training dataset consists of San Francisco crime incidents retrieved from Kaggle [20]. To model in this published dataset, the features must be pre-processed and made trainable and vectorizable with the Doc2Vec model. To meet this requirement, a series of pre-processing stages such as stemming, lemmatization, tokenization, spelling correction, stop words removal, remove punctuations, common words removal, and rare words removal, which are commonly preferred in natural language processing processes, have been tried for testing purposes. Only stop word removal, lemmatization, and stemming operations were applied to the data

because they contributed positively to the classification. From the data resulting from this application, the 15 categories with the most records were selected and divided into 70% training and 30% testing. After this separation, the training and test data were trained separately with the Doc2Vec network and converted into vectors. A standardization process was applied to the data resulting from this transformation and was given to the stacking ensemble model, which includes different Machine Learning models. The model structure, which completed the learning phase with training data, was tested with test data, and its performance was measured according to different evaluation metrics for this problem with 15 classes. The main purpose of this model structure is to enable classification without converting the features into categorical ones, unlike the literature, and, as a result, to achieve high classification performance.

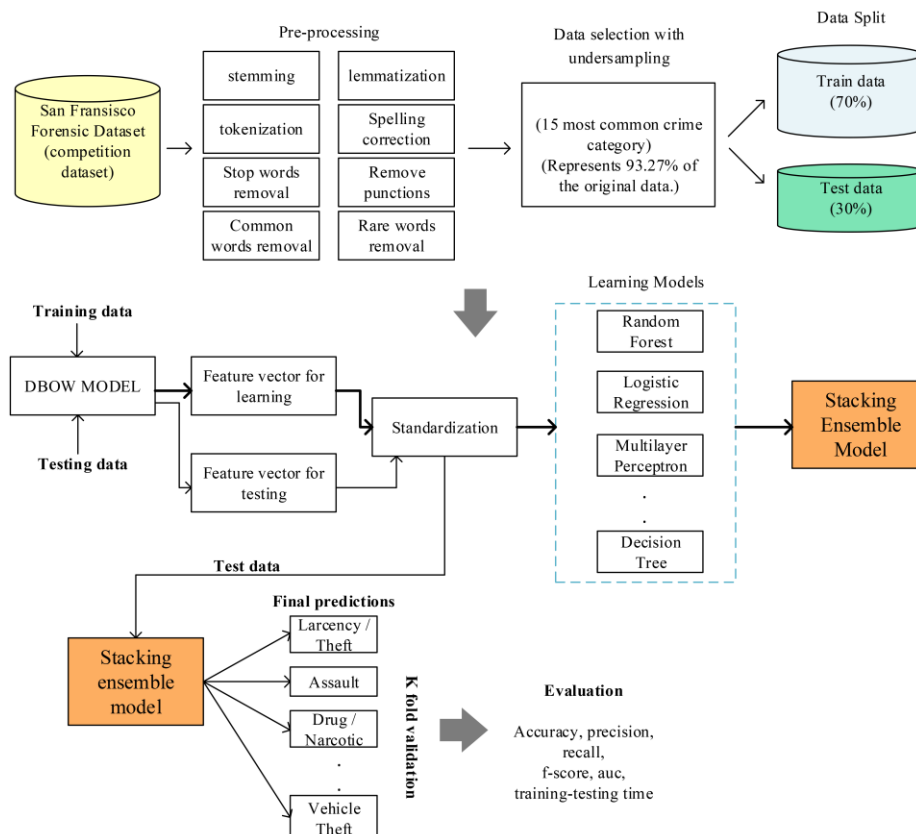


Figure 1. Methodology diagram of proposed model

3.1. Dataset Details

Learning models have been proposed recently for detecting and preventing crimes. It aims to predict crime types using these models and assist law enforcement with these predictions. Many datasets are openly distributed for this purpose. Some of these also attract attention as competition datasets. However, the main difference between these datasets is that each belongs to a different city and country. Their features are similar, but the records belong to different cities. In this study, datasets were examined, and it was desired to determine a dataset that was the most recent, collected in the widest year range, and had many samples. In addition, since a text-based classification and analysis will be carried out in this study, the presence of features that cannot be made categorical was an important criterion in selection. In line with these criteria, The San Francisco Dataset, which contains crime records of San Francisco, was selected because it is a competition dataset, contains records distributed over 12 years, and contains text-based data such as Address, PDDistrict, and Descript.

The San Francisco dataset contains 878 thousand crime records obtained from annual crime reports for 12 years between 2003 and 2015. There are 39 different crime types in this data set, with various numbers of crime records for each crime type and some have fewer than 1000 records. Within the scope of this study, the dataset was filtered for crime types with 10000 or more records to balance the number of samples between crime types and prevent the model from converging to any one class. As a result of this filtering, a problem with 15 classes, including 14 different criminal category and one non-criminal category, emerged.

The original record numbers for each class are shown in Table 2. When the original numbers were examined, it was seen that there was a serious imbalancing between crime categories. When model training is performed with this imbalanced data set, the models tend to be biased against the majority class. As a result, while the majority

classes are successful in prediction, the minority class may perform poorly. Thus, overfitting to certain types can cause generalization problems. When data is increased with over-sampling to solve this problem, the model may memorize the data and lead to overfitting. For all these reasons, balancing was made with data under-sampling. After that, the training and testing processes of the proposed model were carried out with a total of 280 thousand records, approximately 10 thousand records for each crime category.

Table 2. Dataset sample distribution for different types of offences and non-criminal offences

Crime type	Orjinal	After undersampling with "minority class"
LARCENY/THEFT	174900	10000
OTHER OFFENSES	126206	10000
ASSAULT	94525	10000
DRUG/NARCOTIC	53971	10000
VEHICLE THEFT	53779	10000
VANDALISM	78793	10000
WARRANTS	42212	10000
BURGLARY	75711	10000
SUSPICIOUS OCC	53694	10000
MISSING PERSON	25989	10000
ROBBERY	45503	10000
FRAUD	20974	10000
FORGERY/COUNTERFEITING	12293	10000
SECONDARY CODES	10000	10000
NON-CRIMINAL OFFENCES	139975	139975

For each record in the dataset, Dates (timestamp of crime), Descript (short description of crime), DayofWeek, PdDistrict (district of the city), Resolution (brief description of crime resolution), Address (Address of the crime), X (longitude) and Y (Latitude). In the first stage, these features were divided into sub-features, as shown in Table 3.

Table 3. Feature conversion from original dataset to proposed model

Original feature from dataset	Sub-category conversion
Dates Sample: (2015-05-13 23:53:00)	Year, Month, Day, Hour, Minutes, Seconds
Descript	Descript
Dayofweek Sample: (Wednesday)	Day of week
PdDistrict	PdDistrict
Resolution	Resolution
Address	Address
X	X
Y	Y

As a result of this segmentation, feature selection was made on 11 features that emerged except Address and Description.

There are many different approaches to feature selection [23]. Among these, the SHAP (SHapley Additive exPlanations) [24] feature selection method was used in this study. Shapley distributes the values more fairly than methods such as LIME and the difference between the estimate and the average estimate, and proves this by basing it on a theory. In addition, it enables comparative evaluation of each feature on a class basis.

SHAP value was calculated for 11 features obtained as a result of preprocessing for 280 thousand records, and classification contribution levels were calculated. The outcomes are given in Figure 2. The larger Shapley value indicates that the feature is more of a classifier. As shown in Figure 2, the second value does not contribute positively to any criminal or non-criminal classification classes. The main reason is that it has the same value for all data.

The “resolution” feature contains textual data with clues to the crime. This situation reduces the objectivity of the proposed model. For this reason, although “Resolution” has the discriminative ability, as shown in Figure 2, it was removed from the dataset. The remaining 9 features and “Address” and “Description” features were merged and converted into a single textual feature. The vector

resulting from this transformation was used in the training and testing processes of the Doc2Vec model. The main purpose of this two-layer long pre-processing process is to both reveal the most distinctive features and use them in classification by converting text-based features into vectors. This way, higher performance was achieved compared to categorical-based models, as given in this study.

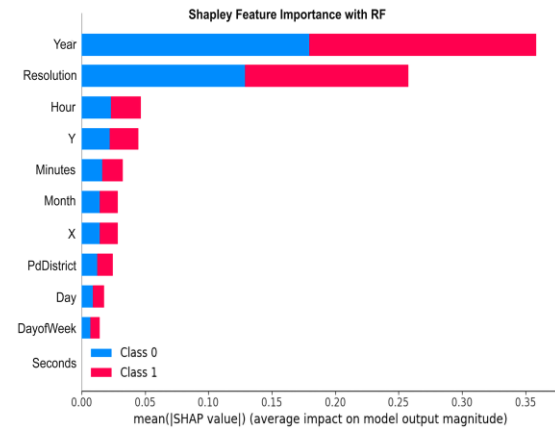


Figure 2. Feature importance plot for random forest according to Shap value (Class0: criminal, Class1: non-criminal)

3.2. Classifier Selection for Ensemble Model

In this study, for the 1st and 2nd layers to design the ensemble model, 8 different classifiers were used, namely Random Forest, Logistic Regression, Multilayer Perceptron, Support Vector Classifier, K-nearest neighbor, XGB, Gaussian Naïve Bayes, and Decision Tree, which have different architectural structures and are widely used to solve various problems [25-27]. After this, each classifier was tested independently of each other. During this testing process, hyperparameter optimization was performed. Therefore, the performance values in the next section show the highest achievements obtained due to optimization. To place 8 different classifiers in the stacking ensemble model, selecting the machine learning model to work as a decision-maker in the 1st and 2nd Layers is necessary. This selection was made according to the pre-test results, and the SVC classifier with the highest result was used as the decision-maker in the model.

3.3. DBOW Model

The DBOW (distributed bag of words) model is a variant of a popular word embedding method called Word2Vec [28] and the architecture of model is shown in Figure 3. Word2Vec is used to learn word vectors (numerical representations) and is often used in natural language processing (NLP) tasks. The DBOW model is one of the two main variants of Word2Vec [29, 30]. The working principle of the DBOW model is as follows:

1. Data Preparation: The first step is to create a vocabulary representing a large text dataset. Each word is assigned a unique vector.
2. Training: The DBOW model learns word vectors without considering the context of a word. It treats each word independently and tries to predict a random word within a "context window".
3. Prediction: Without capturing each word's context in the dataset, the model makes predictions using other words around that word. These predictions are used to capture word associations in the dataset.
4. Training Result: The model improves by comparing its predictions with the actual labels. This is used to update the word vectors at each step.

As a result, the DBOW model treats each word independently and learns word vectors instead of directly modeling word relations within the text. These vectors represent the word's semantic meaning and its position in the text. The DBOW model can be used in many NLP tasks, such as word similarity measurement, document classification, and text generation.

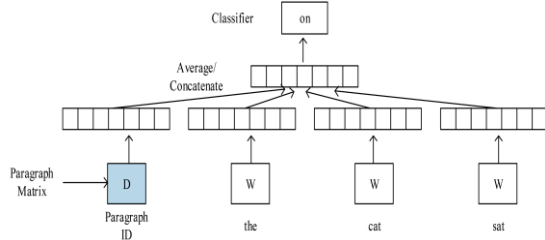


Figure 3. DBOW model architecture [28]

3.4. Stacking Ensemble Model Structure (Proposed Model)

Stacking ensemble model is an ensemble technique that aims to create a more powerful predictor by combining multiple machine learning models [31]. The basic components of the stacking ensemble model are as follows:

1. Base Models: The first step is to create multiple base models using different machine learning algorithms or the same algorithm with other parameters. For example, algorithms such as decision trees, random forests, support vector machines (SVM), or gradient boosting models can be used.
2. Meta Model (Stacking Model): The second step is to create a "meta-model" or "top model" using the predictions of the base models. This meta-model takes the projections of the base models as input and makes final predictions using these predictions. Usually, this meta-model can be a regression or a classification model because its purpose is to combine the projections of the base models and obtain a better result.
3. Training and Evaluation: The base models are trained separately, and then the meta-model is trained using the predictions of these models. The stacking model can be optimized, and its performance can be evaluated by techniques such as cross-validation.
4. Combining Predictions: In the last step, the stacking model is used to make predictions on new data. The predictions of the base models are given as input to the meta-model, and the meta-model uses these predictions to produce the final predictions.

The stacking ensemble model structure proposed in this study is shown in Figure-4. Stacking ensemble models allows different models to balance each other's shortcomings and achieve a stronger performance.

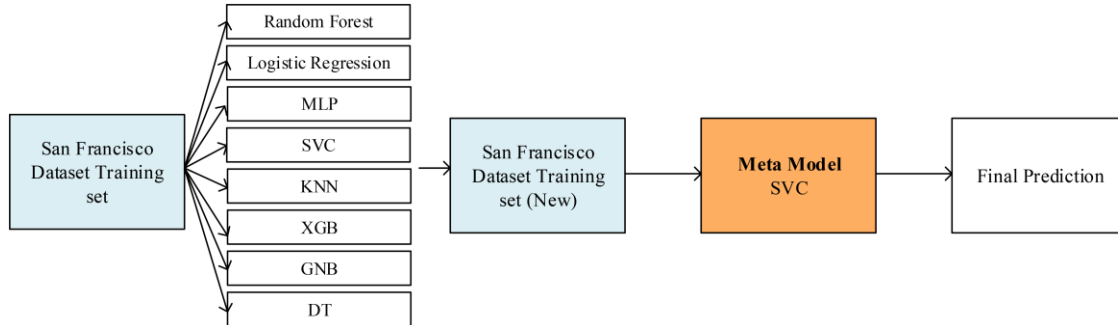


Figure 4. Stacking ensemble model structure

3.5. Evaluation Metrics

Evaluation metrics used to measure, analyze, or compare the performance of a model. These metrics determine how good or bad a model is and are usually based on comparing a model's predictions with actual values. The results of this study were measured with the accuracy, precision, recall, f-score and AUC value given in Equations 1-4 and were evaluated comparatively in the next section. For multiclass classification problems, TP, TN, FP, and FN numbers are found for each class, and metrics are calculated. In this study, performance measurement was carried out using the equations below for the 15-class dataset.

1. Precision: Precision measures how many of the samples predicted as positive are actually positive. It aims to reduce the number of false positives.

$$Precision = \frac{\sum_{i=1}^{15} TP_i}{\sum_{i=1}^{15} (TP_i + FP_i)} \quad (1)$$

2. Sensitivity (Recall): Sensitivity measures how many true positives are correctly predicted. It aims to reduce the number of false negatives.

$$Recall = \frac{\sum_{i=1}^{15} TP_i}{\sum_{i=1}^{15} (TP_i + FN_i)} \quad (2)$$

3. F-Score: F-Score is a metric that represents the balance between precision and sensitivity. It summarises the classification performance of the model.

$$F - score = \frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad (3)$$

4. Accuracy: Accuracy is the ratio of correct predictions to total predictions. It is generally used in classification problems.

$$Accuracy = \frac{\sum_{i=1}^{15} (TP_i + TN_i)}{\sum_{i=1}^{15} (TP_i + TN_i + FP_i + FN_i)} \quad (4)$$

5. ROC Curve and AUC: The ROC curve shows the relationship between sensitivity and specificity at different limiting thresholds. AUC measures the area under the ROC curve and evaluates the classification ability of the model.

Evaluation metrics are used to measure the model's success and improve the model quantitatively. Which metrics to use may vary depending on the data type, task, and objective. An evaluation metric is an important tool for understanding the model's performance and tuning the model.

4. TEST RESULTS

This study proposes a novel model for classifying criminal activities using a Doc2Vec structure that can produce a numerical representation of texts regardless of length and a stacking ensemble model with 11 different machine-learning models.

Using data pre-processing techniques on the San Francisco Crime Classification datasets, machine learning algorithms were used to analyze the data. Predictive classification was performed with the features extracted from the new datasets obtained using data augmentation techniques. All results

obtained for the San Francisco Crime Classification data are listed in Table 4.

Table 4. Classification results for different ML algorithms

Classifiers	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	Fscore (%)
Logistic Regression	98.83	98.83	98.83	98.83
Random Forest	98.12	98.13	98.12	98.12
Decision Tree	84.49	84.53	84.49	84.5
Gaussian NB	98.14	98.18	98.14	98.15
Linear Discriminant Analysis	98.64	98.64	98.64	98.64
Ada Boost	89.58	89.78	89.58	89.65
Extra Trees	98.69	98.69	98.69	98.69
SVC	98.89	98.89	98.89	98.89
KNeighbors	98.75	98.75	98.75	98.75
XGB	94.14	94.18	94.14	94.15
MLP	97.24	97.25	97.24	97.24
Voting Classifier	99.11	99.11	99.11	99.11
Stacking Classifier (Proposed Model)	99.28	99.18	99.38	99.2

When Table 3 is analyzed, it is seen that all classifiers generally give high performance with the feature vector extracted with Doc2Vec. Accuracy value varies between 89.58 and 99.31. Although there are normal values above 90%, the lowest value is the DecisionTreeClassifier model, with 84.49%. Precision, recall, and f-score values have similar values with accuracy. The Stacking Classifier model proposed in this study obtained the highest performance. According to the literature, achieving the highest performance for a model with 15 classes is an important output. The closest to the model we studied is the VotingClassifier model, with 99.11%. The critical point is that the features are extracted as text-based rather than definite and valuable information, such as address, which is included in the classification model. To verify these results with cross-validation, the results of 10-fold testing of all classifiers are given in Figure 5.

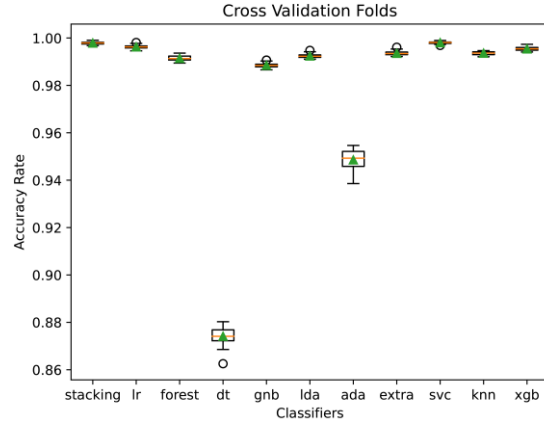


Figure 5. Cross validation results of ML models and proposed model

Figure 5 shows the results obtained by machine learning algorithms after 10-fold cross-validation on the San Francisco Crime Classification dataset. The graph can be interpreted based on accuracy value. In this case, the classifier with the highest accuracy value is the stacking ensemble, and the median value is 99.8%. Such graphs help us to analyze the statistical properties of the data. It allows us to comment on the accuracy value's central tendency, dispersion, and outliers. While the spread of the Ada classifier is the largest, the spread of the Stacking ensemble classifier is the smallest. In this case, the most homogeneous distribution in terms of accuracy value is in the Stacking ensemble classifier, while the most heterogeneous distribution is in the Ada classifier. Logistic regression, Decision Tree, and Extra tree classifiers have outliers. Outliers are the results that are outside the calculated minimum and maximum value. In general, when we look at the Q1 (first quartile), IQR (interquartile range), and Q3 (third quartile) values of all classifiers, it is also seen that they show a symmetrical distribution rather than a skewed distribution. The lowest accuracy value was observed in the Decision Tree classifier. The median (average) accuracy values are close to each other in logistic regression, SVM, and stacking ensemble classifiers. The orange line in the graph is the median value. It shows the central tendency of the accuracy value.

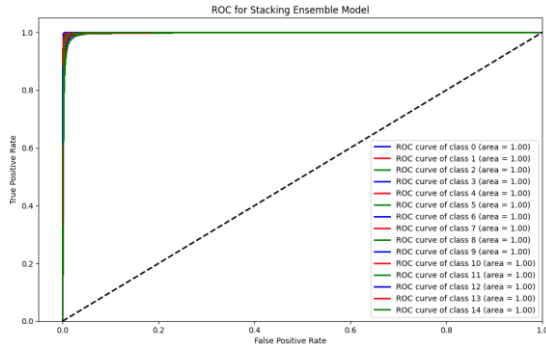


Figure 6. ROC for stacking ensemble model

Figure 6 shows the ROC Curve of the Stacking Ensemble Model. If we interpret the result using this graph, AUC value 1 was obtained in 15 classes. This indicates that the model has very good classification ability. This graph's upper left corner is where false positive and false negative predictions are minimized. In this region, balance is achieved for all classes in the diagram. In addition, 10000 samples were worked within each of the 15 classes and were equally distributed. There is no imbalance between classes. The fact that the graph curves of the 15 classes are similar shows that the model predicts all classes equally. The dashed line in the graph shows the random prediction of the model. Since the curves for 15 classes are located on this diagonal, it is clear that the classifier performs better than random predictions.

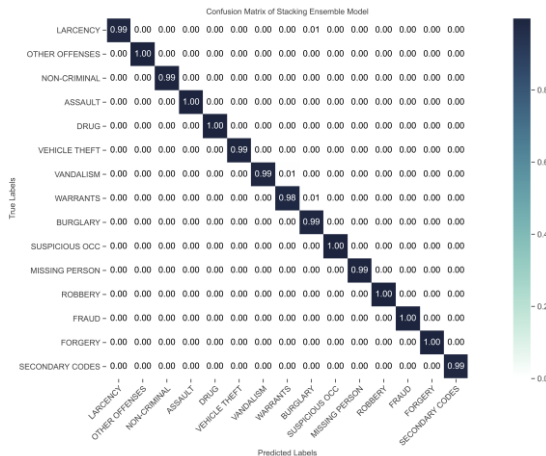


Figure 7. Confusion matrix of the stacking ensemble model

The confusion matrix for the stacking ensemble model is shown in Figure 7. When the results are analyzed according to this figure, the classes with the highest accuracy are assault, drugs, suspicious incidents, robbery, fraud, and forgery, with a 100% recognition rate. The class with the lowest recognition rate is warranted, with an accuracy rate of 98%. The overall success rate is 99%. In addition, 98% and above accuracy values were obtained in 15 classes.

5. CONCLUSION

The tests conducted in this study aim to determine the criminal and non-criminal status of crime reports in crime prediction. San Francisco Crime Classification, which includes crimes committed for 12 years, was used as a data set. Tests for 11 different machine learning models were performed. Accordingly, an accuracy value of 99.28% was obtained for the 15 offense categories with the highest crime records, while the precision, recall, and f-score values were 99.18%, 99.38%, and 99.20%, respectively. With cross-validation (k=10), 99.8% success was achieved with a std. Value of 0.001. These performance values are higher than those of all the studies in the literature using categorical feature structures. The obtained results show that the transformation of criminal activity reports, which contain text-based features, into vectors that can be processed with natural language processing techniques such as Doc2Vec instead of using them categorically in model training can directly contribute to classification performance and provides a more efficient model with less pre-processing. In addition, the proposed model can help security organizations to develop a more effective crime response system. These results prove that crimes can be assessed spatially for cities and that the probability of crime depends on regional conditions.

In the future, the same classification model can be tested on datasets from different cities and countries and evaluated whether it has similar performances. In addition, studies can continue transforming more crime-related data into features through feature

engineering. Increasing the number of crime types with a mixture of temporal and spatial analyses can make more temporal analyses of crime using time series. Studies can perform better using more complex and advanced classification models.

6. REFERENCES

1. İçli, T.G., 1993. Türkiye’de Suçlular (Sosyal Kültürel ve Ekonomik Özellikleri. Atatürk Kültür, Dil ve Tarih Kurumu Atatürk Kültür Merkezi Yayını, Ankara, 71.
2. Hochstetler, J., Hochstetler, L., Fu, S., 2016. An Optimal Police Patrol Planning Strategy for Smart City Safety. IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications, Sydney, Australia, 1256-1263.
3. Open Government, <https://www.data.gov/open-gov/>, Access date: Haziran 2023.
4. Data.world Crime Datasets, <https://data.world/datasets/crime>, Access date: Temmuz 2023.
5. All Data Related to Crime And Justice, <https://www.ons.gov.uk/peoplepopulationandcommunity/crimeandjustice/datalist?filter=data-sets>, Access date: Ağustos 2023.
6. Pradhan, I., Potika, K., Eirinaki, M., Potikas, P., 2019. Exploratory Data Analysis and Crime Prediction for Smart Cities. Proceedings of the 23rd International Database Applications and Engineering Symposium on - IDEAS '19, Athens, Greece, 1-9.
7. Ke, J., Li, X., Chen, J., 2018. San Fransisco Crime Classification (Report), Jacobs School of Engineering, San Diego, 7.
8. Khan, M., Ali, A., Alharbi, Y., 2022. Predicting and Preventing Crime: A Crime Prediction Model using San Francisco Crime Data by Classification Techniques. Complexity, 1-13.
9. Wu, X., 2016. An Informative and Predictive Analysis of the San Francisco Police Department Crime Data. M.Sc., University of California, Los Angeles, 11.
10. Abouelnaga, Y., 2016. San Francisco Crime Classification”, arXiv:1607.03626.
11. Arslan, R.S., Dülgeroğlu, B., 2023. Crime Classification using Categorical Feature Engineering and Machine Learning. International Ankara Congress on Multidisciplinary Studies-VI, Ankara, Turkey, 1-8.
12. Aldossari, B.S., Alqahtani, F.M., Alshahrani, N.S., Alhammam, M.M., Alzamanan, R.M., Aslam, N.I., 2020. A Comparative Study of Decision Tree and Naive Bayes Machine Learning Model for Crime Category Prediction in Chicago. Proceedings of 2020 6th International Conference on Computing and Data Engineering, Sanya, China, 34-38.
13. Deborah, D., Jitesh, J., Kieron, D., Vincent, T., 2023. A Comparative Analysis of Multiple Methods for Predicting a Specific Type of Crime in the City of Chicago. ArXiv: 2304.13464.
14. Reier Forradellas, R.F., Náñez Alonso, S.L., Jorge-Vazquez, J., Rodriguez, M.L., 2020. Applied Machine Learning in Social Sciences: Neural Networks and Crime Prediction. Social Sciences, 10(1), 4.
15. Kim, S., Joshi, P., Kalsi, P.S., Taheri, P., 2018. Crime Analysis through Machine Learning. 2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), Vancouver, Canada, 1-6.
16. Alves, L.G.A., Ribeiro, H.V., Rodrigues, F.A., 2018. Crime Prediction through Urban Metrics and Statistical Learning. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 505, 435-443.
17. Wu, S., Wang, C., Cao, H., Jia, X., 2020. Crime Prediction using Data Mining and Machine Learning. Intell. Syst. Comput., Springer Verlag, 905, 360-375.
18. Bandekar, S.R., Vijayalakshmi, C., 2020. Design and Analysis of Machine Learning algorithms for the Reduction of Crime Rates in India. Procedia Computer Science, 172, 122-127.
19. Gül, S., Polat, A., 2009. Kamu Güvenlik Politikalarının Oluşturulmasında Yeni Bir Yaklaşım: Suç Tahmini. Türk İdare Dergisi. 463 (81), 131-156.
20. Iqbal, R., 2013. An Experimental Study of Classification Algorithms for Crime Prediction. Indian Journal of Science and Technology, 6(3), 1-7.
21. Saeed, U., Sarim, M., Usmani, A., Mukhtar, A., Basit, S.A., Kashif Riffat, S., 2015. Application

- of Machine Learning Algorithms in Crime Classification and Classification Rule Mining. *Research Journal of Recent Sciences*, 4(3), 106-114.
22. Shojaee, S., Mustapha, A., Fatimah, S., Jabar, A., 2013. A Study on Classification Learning Algorithms to Predict Crime Status. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 7(9), 361-371.
 23. Arslan, R.S., 2021. Comparison of Feature Selection Methods in Security Analysis of Android. 2021 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK). Ankara, Turkey, 1-5.
 24. Lundberg, S., Lee, S., 2017. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA, 1-11.
 25. Hizlisoy, S., Arslan, R.S., 2021. Text Independent Speaker Recognition Based on MFCC and Machine Learning. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 20(03), 073-078.
 26. Hizlisoy, S., Tüfekci, Z., 2020. Türkçe Müzikten Duygu Tanıma. *European Journal of Science and Technology*, Special Issue, 6-12.
 27. Arslan, R.S., Yurttakal, A.H., 2020. K-Nearest Neighbour Classifier Usage for Permission based Malware Detection in Android. *Icontech International Journal*, 4(2), 15-27.
 28. Quoc, L., Tomas, M., 2014. Distributed Representations of Sentences and Documents. *Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning*, PMLR 32(2), 1188-1196.
 29. Arslan, R.S., 2021. Kötücül Web Sayfalarının Tespitinde Doc2Vec Modeli ve Makine Öğrenmesi Yaklaşımı. *European Journal of Science and Technology*, 27, 792-801.
 30. Arslan, R.S., 2021. Kötücül URL Filtreleme için Derin Öğrenme Modeli Tasarımı. *European Journal of Science and Technology*, 29, 122-128.
 31. Arslan, R.S., 2021. Identify type of Android malware with Machine Learning Based Ensemble model. 2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey, 1-5.

Analysis of One-Way Fluid-Structure Interactions for a Straight Pipe under Different Thermal and Pressure Conditions

Gökhan CANBOLAT*¹ ORCID 0000-0001-6491-095X

¹Alanya Alaaddin Keykubat University, Department of Mechanical Engineering,
Antalya, Türkiye

Geliş tarihi: 21.09.2023 Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: CANBOLAT, G., (2023). Analysis of One-Way Fluid-Structure Interactions for a Straight Pipe under Different Thermal and Pressure Conditions. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 1049-1060.

Abstract

Numerical studies on stress, deformation, and damages due to fluid flow have been highly carried out using Fluid-Structure Interaction (FSI) in recent years. FSI is highly efficient in investigating a solid domain deformed by the fluid flow. In this study, a one-way fluid-structure interaction study is performed by a straight pipe under different pressure and thermal conditions. Here, the thermophysical properties of the fluid and mechanical properties of the solid domain can be subjected to change during fluid flow. An aluminum straight pipe with a 1 mm wall thickness is operated under 1 Bar, 5 Bar, and 10 Bar with three different surface temperatures -10°C, 20°C, and 50°C. This study aims to investigate the structural variation of aluminum by the temperature and pressure change of operating fluid in the pipe. Variation of thermophysical properties of fluid by heated pipe surface is integrated into the numerical analysis by generated functions. Numerical analysis showed that the variation of temperature in operating fluid highly affects the fluid characteristic and the structural response of the solid domain by different temperatures. An increase in the operating pressure caused maximum deformation to approximately %100 from 1 Bar to 5 Bar, and approximately %120 from 1 Bar to 10 Bar for the adiabatic process as expected but in the heating conditions stress is nearly three times higher than cooling conditions. As a result, one-way FSI solutions are highly effective in investigating the deformed solid domain as a result of flow, thermal, and operating conditions.

Keywords: Structural response, Deformation, Heating, Adiabatic, Fluid-structure interaction

Farklı Isı ve Basınç Koşulları Altında Düz Bir Boru İçin Tek Yönlü Akışkan-Yapı Etkileşimleri Analizi

Öz

Son yıllarda, tek yönlü Akışkan Yapı Etkileşimleri (AYE) ile akış karakteristiklerinin yol açtığı gerilim, deformasyon ve hasarlar üzerine birçok nümerik çalışmalar yapılmıştır. AYE, akış koşulları ile deforme olan bir katı cisim araştırmak için oldukça verimlidir. Bu çalışmada, farklı basınç ve termal koşullar altında düz bir boru içindeki akışta tek yönlü akışkan yapı etkileşimi analizleri gerçekleştirilmiştir. Burada

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Gökhan CANBOLAT, gokhan.canbolat@alanya.edu.tr

akışkanın termofiziksel özellikleri ve katı bölgenin mekanik özellikleri akış sırasında değişime uğrayabilmektedir. 1 mm et kalınlığına sahip alüminyum düz bir boru 1 Bar, 5 Bar ve 10 Bar'lık basınçlar altında ve ayrıca yüzey sıcaklığı -10°C , 20°C ve 50°C olmak üzere farklı operasyon koşullarında analiz edilmiştir. Bu çalışmada boru içerisindeki akışkanın sıcaklık ve basınç değişimi ile alüminyumun yapısal değişiminin araştırılması amaçlanmıştır. Isıtılan boru yüzeyi ile akışkanın termofiziksel özelliklerinin değişimi, oluşturulan fonksiyonlarla sayısal analize entegre edilmiştir. Sayısal analiz, akışkandaki sıcaklık değişiminin, akışkan karakteristiğini ve katı bölgenin yapısal tepkisini farklı sıcaklıklar da oldukça etkilediğini göstermiştir. Çalışma basıncındaki artış ile deformasyondaki maksimum artış beklenildiği gibi adyabatik duruma göre 1 Bar'dan 5 Bar'a yaklaşık %100, 1 Bar'dan 10 Bar'a ise yaklaşık %120'ye ulaşmıştır. Ancak ısıtma koşullarında oluşan gerilimin, soğutma koşullarına göre yaklaşık üç kat daha fazla saptanmıştır. Sonuç olarak tek yönlü FSI çözümlerinin akış, ısı ve çalışma koşulları altında deforme olan katı bölgenin incelenmesinde oldukça etkili olduğunu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal tepki, Deformasyon, Isıtma, Adyabatik, Akışkan yapı etkileşimi

1. INTRODUCTION

Conveying fluids in pipes are commonly used in many engineering fields such as mechanical, nuclear, marine, civil, petroleum, and electric. In many applications, some failures may occur due to variations in fluid flow and thermal operating conditions. Here, variation of flow characteristic effects directly the solid domain under different operating conditions. Therefore, the interactions between fluid flow and solid domain with the pressure that occurred by the flow need to be taken into account during flow [1].

Fluid-structure interaction is a method that investigates deformation, stress, and failures in the solid domain due to the fluid flow. These interactions can occur in many natural phenomena and the system designed by the engineers. Fluid-structure interaction can be also defined as the interaction between rigid and deformable structures with internal or external flows and it is also a branch related to the loads that occur by the flow with the structural response [2]. In the piping systems, various dynamics forces occur. These forces may move the piping systems and deform so fluid and solid domains can not be solved separately in the engineering approach. FSI is an important method during engineering design with its multidisciplinary advantages [3-5].

One way of fluid-structure interaction is the workflow that results from the fluid model transfers to the solid domain as an external or internal load.

For one way fluid-structure interaction, fluid flow is calculated till the convergence criteria. The forces calculated from the fluid flow at the boundary are transferred to the solid domain. After that structure domain is solved till the convergence criteria of solid mechanics [6-7].

Various FSI studies on pipe flows are performed in the literature from various perspectives. In the study, a fluid-structure interaction study is performed to investigate a water hammer with a thick-walled pipe. The model of the study is based on conventional water-hammer with beam theories. The governing equations of straight pipes are derived according to the cross-sectional area by two-dimensional basic equations. They revealed that the FSI method is highly effective in pipe flow [8]. In a study, the FSI method is used in straight pipeline systems during the hydraulic transient. The interaction mechanism is modeled by the Poisson, friction, and junction coupling. The resistance due to the movement by inertia and dry friction is coupled with junction coupling. They concluded that the FSI solver is capable of resistance to the movement of straight pipelines [9]. In a study, it is specified that pipes are used to transport high velocity or pressurized fluid generally under different operating conditions. Therefore vibration problems highly occur in the piping system. It is aimed at the study that determines the behavior of fluid flow to valve closure excitation by the FSI method. It is concluded that structural velocity reduces when the FSI effects are taken into account in piping systems with fluid transients by valve

closure excitation [10]. In a study, the FSI method is used to assess flow erosion and deformation of pipes used in oil transportation. This study aims to investigate deformation, stress, and flow conditions. It is concluded that the flow field and deformation of the pipe are highly important for the structural domain [11]. In a study, the slug characteristics of crude oil grades were investigated numerically to assess the effect of change in the stresses. The study was performed by fluid-structure interactions with the horizontal carbon steel pipes. It is found that the increase in the density of the crude oil leads to the formation of slugs close to the inlet side of the tube with high velocities [12]. In a study, deformation and flow erosion in a pipe flow re investigated numerically in a gas-solid flow. Three-dimensional RANS equations are used to carry out the study of the motion of the continuous fluid phase. The FSI method is used for the analysis to calculate deformation. They concluded that erosion rate and deformation are connected to structural changes and inlet conditions [13]. In a study, a pipe flow is studied by using FSI to observe local damages. Poisson, friction, and joints were investigated by the different supports. They concluded that different supports caused the various structural responses [14].

In this study, a pipe with 50 mm diameter, 1000 mm length, and 1 mm thickness is analyzed by FSI. It is specified in various studies in the literature that the FSI method is highly effective in guiding deformation and stress in fluid-solid flows. A straight pipe that is aluminum is investigated under three different inlet pressures and three different surface temperatures. Here, the surface temperature of the wall is 263 K, 293 K, and 323 K while the fluid is at 293 K. The adiabatic case is also analyzed and the differences are shown in the study. The change in thermophysical properties of the fluid by the temperature in terms of density and viscosity is taken into account during the flow. The mesh sensitivity test is performed to obtain a sufficient mesh element number according to Wall Shear Stress (WSS) and y^+ . Results show that variations in the thermophysical properties of the fluid are quite dominant in deformation and stress that occur by solid domain. Here, deformations are between

the range of 0–0.0005 mm, 0.0005–0.001 mm, and 0.01–0.012 mm for adiabatic cases at 1 Bar, 5 Bar, and 10 Bar respectively.

2. MATERIAL AND METHOD

Geometry, generation of mesh, mesh sensitivity test, boundary conditions, governing equations, and numerical methods are presented in this section.

2.1. Domains, Mesh, and Mesh Sensitivity Test

Figure 1. shows the used geometry in numerical analyses. Here, the length (L) of the pipe is 1000 mm, the diameter (D) of the pipe is 50 mm, and the thickness (t) of the solid domain is 1 mm. As it is known, the length of the pipe needs to be a minimum of 10 times the diameter of the pipe for a turbulent flow [15]. For this reason, the pipe length is constructed as 20 times the diameter to obtain the fully developed flow in this turbulent flow. Here, the z direction is the flow direction in the coordinate system and the center of the pipe is constructed to the center of the coordinate system.

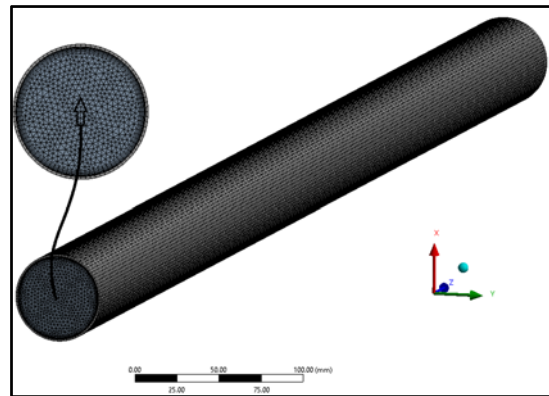


Figure 1. Mesh for the pipe and fluid domain

The generated mesh is shown in Figure 1 by using Ansys Fluent. The fluid domain is meshed by the triangular elements and the hexahedron mesh type is used for the solid domain. An important step is the mesh generation in a numerical analysis. A sufficient mesh element number is needed to be determined by the mesh sensitivity test. y^+ value and WSS are commonly used during the mesh generation [16–18].

Figure 2. shows the mesh sensitivity test performed in this study. As is shown, the mesh sensitivity test is performed according to WSS and y^+ values. When the blue bars indicate the y^+ values, orange bars indicate the WSS values. Here, the y^+ value is the dimensionless number to measure the distance of the first cell to the surface. Changing element size is combined with the seven different mesh element numbers. The first mesh is constructed with an 185025 mesh element number, and it is increased gradually to 3640452 element number. In the first mesh, the y^+ value is nearly 3.3 however it is decreased to 1.1 with the increase in element number. According to Figure 2., the change in WSS and y^+ values decreased after the mesh element number 2080735. So it is determined that the element number 2080735 is sufficient to perform numerical calculations. Here, an increase in element number does not affect the y^+ and WSS values. 9-layer inflation is used close to the pipe wall to predict the boundary layer in detail with a 1.2 growth rate. In this study, structural response and WSS are mainly investigated so a dense mesh is needed in the boundary layer [19].

So it is concluded that this mesh element number is sufficient to perform numerical analyses with a 1 mm element size. Thus it is avoided to perform the numerical calculation with the insufficient mesh

element number and it is also avoided the computational cost with large mesh element numbers.

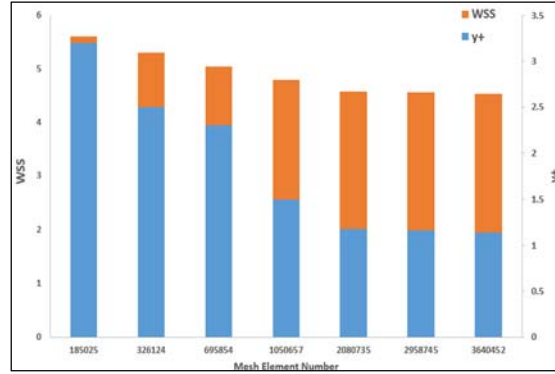


Figure 2. Sensitivity test for the constructed mesh

2.2. Boundary Conditions, Numerical Approach, and Governing Equations

In this study, an incompressible, fully developed, and homogeneous flow is analyzed. No slip boundary condition is implemented at the wall. The interface surface is the inner wall of the pipe for the fluid-structure interactions. So data transfer is provided from this surface as pressure to the solid domain. numbers.

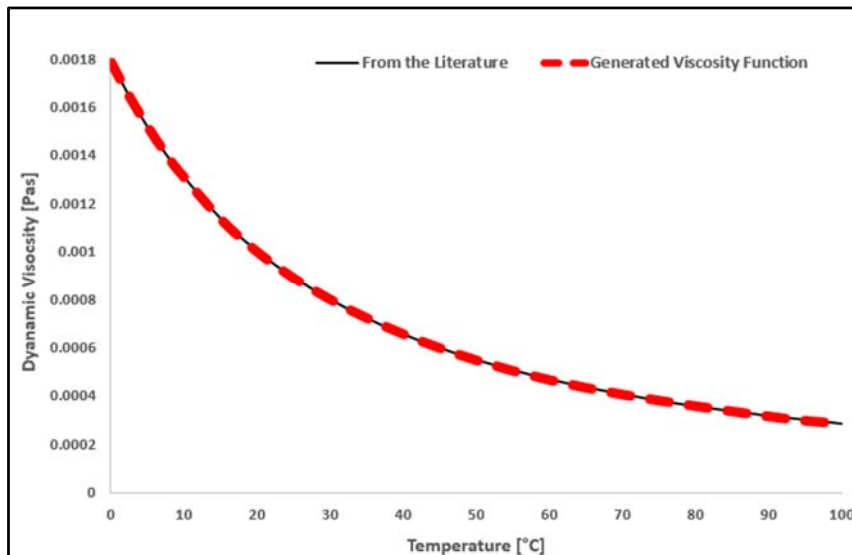


Figure 3. Comparison of generated viscosity function with the data from the literature [15]

Figure 3 shows the generated viscosity function of the water used in this numerical study as fluid. In this study, the viscosity of the water is changed with temperature because of different surface temperatures implemented on the pipe surface. A viscosity function is generated by using data of the

water according to temperature versus viscosity from the literature by using the Matlab Curve Fitting tool. Here, the Fourier Series is used to reflect the viscosity change of water by temperature. The general Fourier Series is shown below.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (1)$$

where,

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(n x) dx \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(n x) dx \quad (4)$$

By using the Fourier Series, a viscosity function is generated from n=1 to n=3. This generated function is integrated into Ansys to take into account variation of viscosity. The generated viscosity function is shown below.

$$\mu(T) = a_0 + a_1 * \cos(T*w) + b_1 * \sin(T*w) + a_2 * \cos(2*T*w) + b_2 * \sin(2*T*w) + a_3 * \cos(3*T*w) + b_3 * \sin(3*T*w) \quad (5)$$

The coefficients of the Fourier Series generated for the viscosity are $a_0=0.004028$, $a_1=-0.0006304$, $b_1=-0.005247$, $a_2=-0.001862$, $b_2=0.0008052$, $a_3=0.0002512$, $b_3=0.0002638$, and $w = 0.02094$ respectively. T is temperature and μ is the dynamics viscosity in the function.

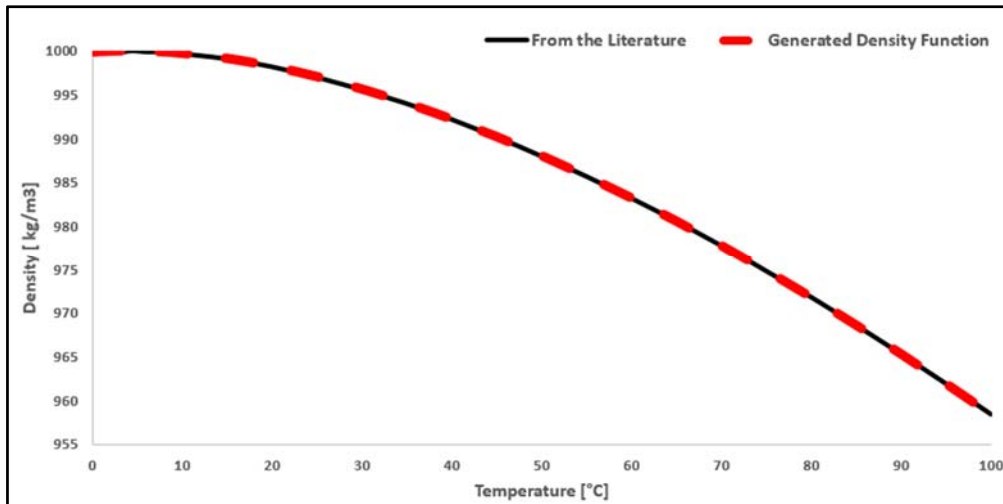


Figure 4. Comparison of generated density function with the data from the literature [15]

By using the Fourier Series, a density function is generated from n=1 to n=3. This generated function is integrated into Ansys to take into account variation of density. The generated density function is shown below.

$$\rho(T) = a_0 + a_1 * \cos(T*w) + b_1 * \sin(T*w) + a_2 * \cos(2*T*w) + b_2 * \sin(2*T*w) + a_3 * \cos(3*T*w) + b_3 * \sin(3*T*w) \quad (6)$$

The coefficients of the Fourier Series generated for the viscosity are $a_0=957.1$, $a_1=41.47$, $b_1=17.54$, $a_2=2.066$, $b_2=-6.523$, $a_3=-0.757$, $b_3=-0.3782$, and $w=0.02009$. T is the temperature and ρ is the density in the function.

The variation of the viscosity and the density of the water by temperature is integrated with the numerical analyses mentioned above. In this way,

the change in fluid characters is considered for the pipe flow. Otherwise, the variation of viscosity and density changes the numerical results then the transferred data from the fluid domain to the solid domain may not reflect the actual values.

Table 1 shows the thermophysical properties of the water used as the fluid in this numerical study. Density and viscosity are specified in Figure 3 and Figure 4 because of changes in the temperature. So it can not accept constant density and viscosity for the fluid in this study. Here, the change in thermal conductivity and the specific heat by temperature are ignored.

Table 1. Thermophysical properties of the fluid

Density	Figure 4	kg/m ³
Viscosity	Figure 3	MPa
Thermal conductivity	0.6	W/m-K
Specific heat	4182	J/kg-K

Table 1. Mechanical properties of the aluminum

Density	2719	kg/m ³
Young's modulus	71000	MPa
Thermal conductivity	237	W/m-K
Specific heat	871	J/kg-K
Poisson ratio	0.33	
Bulk modules	69608	MPa
Tensile ultimate strenght	310	MPa

Table 2 shows the mechanical properties of the Aluminum used in this study as the solid domain. The change in properties of the solid domain is ignored. The variation of fluid properties is taken into account and the effects of this variation are investigated in this study.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \tag{7}$$

The ratio of the inertial forces to viscous force is defined as the Reynolds (Re) number. Here, U , ρ , μ , and D_h are velocity [m/s], density [kg/m³], dynamic viscosity [Pas], and characteristic length [m]. In this study, high pressures are implemented on a pipe with a small diameter so Re numbers are highly large and this is a turbulent flow due to Reynolds numbers of 647000, 1200000, and 1900000 for the 1 Bar, 5 Bar, and 10 Bar respectively.

One-way FSI is used so ALE approach is needed to couple of fluid mechanics and solid mechanics. The equation of Cauchy's law for motion is derived to balance the forces. The product of the velocity and density is balanced with the divergence of the stress tensor and other body forces.

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right] = \nabla \cdot \sigma + \mathbf{f} \tag{8}$$

where ρ is the solid density, \mathbf{u} is the velocity vector, σ is the Cauchy stress tensor, and \mathbf{f} is the external body force. The displacement of the fluid-solid interface and fluid domain is derived from the ALE configuration [20].

$$\rho_f \left[\frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} + \mathbf{u}_f \cdot \nabla \mathbf{u}_f \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}_f \tag{9}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_f = 0 \tag{10}$$

where ρ_f is the fluid density, \mathbf{u}_f is the velocity vector, μ is the dynamic viscosity, and p is the pressure in the fluid domain.

$$\rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{d}_s}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma_s \tag{11}$$

where,

\mathbf{d}_s is the solid displacement, ρ_s solid density, σ_s is the Cauchy stress in the tube. The forces and velocities must be equal in the fluid-structure interface.

$$\mathbf{u}_f = \mathbf{u}_s \text{ at the interface of fluid-structure} \tag{12}$$

$$\sigma_s \cdot \mathbf{n} = \Gamma \cdot \mathbf{n} \tag{13}$$

where,

σ_s is the Cauchy stress tensor, \mathbf{n} is the unit normal, and Γ is the real stress.

In this study, the SST k- ω model was used to predict the turbulent flow. Transport equations for the SST k- ω model;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \tag{14}$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (15)$$

k and ω are the kinetic energy and specific dissipation rate in the SST $k-\omega$ turbulent model. G_k is defined as the generation of turbulence kinetic energy. G_ω is the generation of ω . Γ_ω and Γ_k are the effective diffusivity of ω and k , respectively. Y_ω and Y_k and are the dissipation of ω and k . S_k and S_ω are user-defined source terms in Equation [4,21].

All the second-order upwind discretization is used during the numerical simulation to discretize the momentum, turbulent kinetic energy, pressure, and turbulent dissipation rate. The criteria for the convergence is chosen 10^{-5} in the residuals. Steady-state and 3D flow analyses are performed.

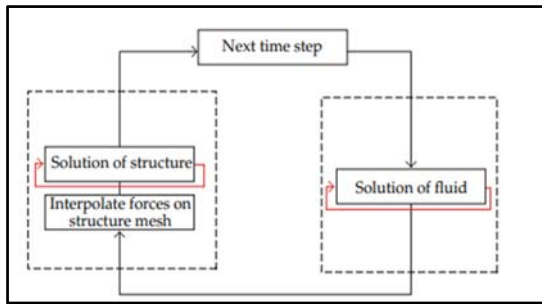


Figure 5. Algorithm of the one-way coupling FSI [6]

Figure 5 shows the algorithm of one-way FSI. In this model, the fluid domain is highly thrilled by structural deformations. In this way, structural calculations and CFD can be solved independently with data transfer. In the one-way coupling algorithm, only fluid pressure is transferred to the structural domain from the fluid domain [22].

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the main purpose is to investigate deformation and Von Mises stress according to changing flow parameters. The parameters such as

deformation and Von Mises stress are related to both the thermophysical properties of the fluid and elastic properties of the material in a coupled flow structure analysis. The pressure of 1 Bar, 5 Bar, and 10 Bar is implemented for the inlet of the pipe. Heating and cooling effects on the surface of the solid domain are studied with the same temperature of the fluid for the solid wall. The changing thermophysical parameters for the density and viscosity are used for the fluid to assess the effect of deformation and Von Mises stress. Fluid is at the temperature of 293 K in all cases and the surface of the solid domain is 263 K for cooling and 323 K for heating. Here, results are shown for the along the pipe length for these nine cases.

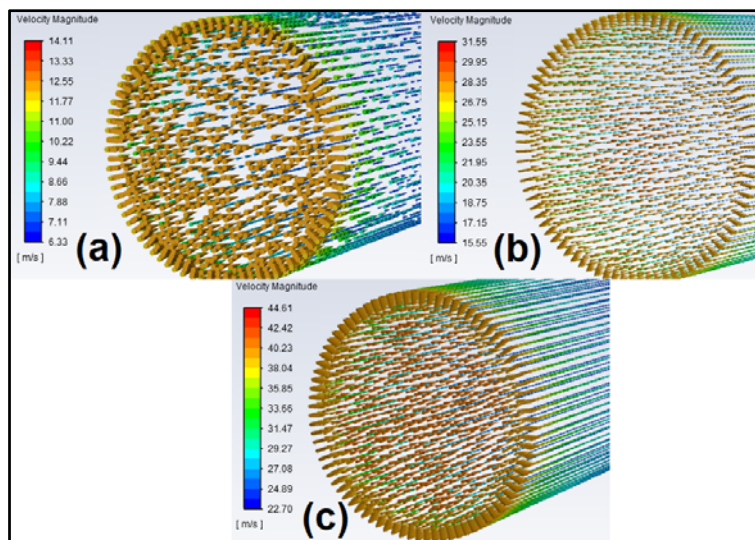


Figure 6. Velocity vectors of the inlet for different pressures a) 1 Bar, b) 5 Bar, and c) 10 Bar

Figure 6 shows the velocity vectors for the adiabatic cases solved in this study. Here fluid is at 293 K. The inlet velocities are around 13 m/s, 26 m/s, and 39 m/s.

The turbulent flow occurs in the pipe in all cases as mentioned by Re numbers. The velocity increases with an increase in pressure implemented for the inlet as expected.

The velocity contours present the flow paths here. Figure 7 presents the variation of the deformation by the constant surface temperature of the solid surface at the pressure of 1 Bar. Here, there are three thermal conditions they are heating at 323K, cooling at 263 K, and in the adiabatic case, there is no heat transfer. In the adiabatic case, the fluid at 293 K, and the surface is 293 K also. So there is no heat transfer here, energy equations are not solved

in this case. Here, the deformation is almost none for the adiabatic case. It is in the range of 0 – 0.0005 mm. However, the deformation is highly large for the heating and cooling cases. It is in the range of 0.012 mm – 0.014 mm in the middle of the pipe.

Figure 8 presents the variation of the Von Mises stress by the constant surface temperature of the solid surface at the pressure of 1 Bar. Here, there are three thermal conditions they are heating at 323K, cooling at 263 K, and in the adiabatic case, there is no heat transfer. In the adiabatic case, the fluid at 293 K, and the surface is 293 K also. So there is no heat transfer here, energy equations are not solved in this case. As it is seen, Von Mises stress is highly low for the adiabatic case. However, the stress is highly large for the heating and cooling cases. It is nearly 8 MPa for the cooling case and it is nearly 16 MPa for the heating case along the pipe. cases.

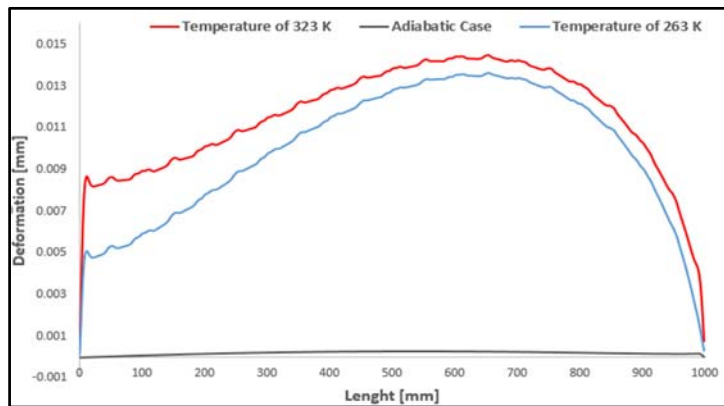


Figure 7. Deformations at the pressure of 1 Bar

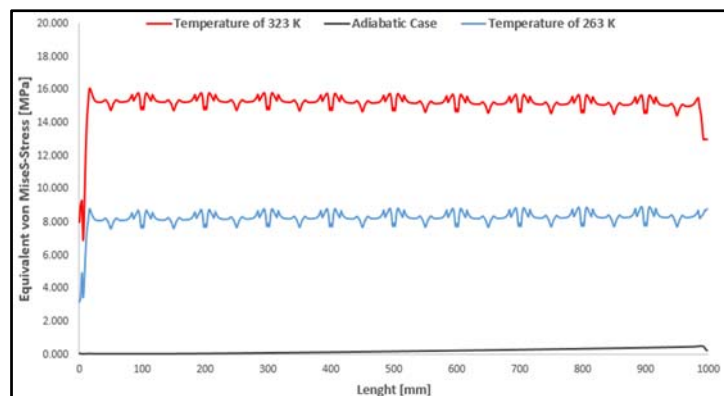


Figure 8. Von Mises stress at the pressure of 1 Bar

Figure 9 presents the variation of the deformation by the constant surface temperature of the solid surface at the pressure of 5 Bar. Here, there are three thermal conditions they are heating at 323K, cooling at 263 K, and in the adiabatic case, there is no heat transfer. In the adiabatic case, the fluid at 293 K, and the surface is 293 K also. So there is no heat transfer here, energy equations are not solved in this case. Here, the deformation increases according to the case of 5 Bar and its range of 0.0005 mm – 0.001 mm in the adiabatic case. When the heating and cooling cases are investigated, the deformation is highly large for the heating and cooling cases. It is in the range of 0.01mm – 0.012 mm in the middle of the pipe.

Figure 10 presents the variation of the Von Mises stress by the constant surface temperature of the solid surface at the pressure of 5 Bar. Here, there are three thermal conditions they are heating at 323K, cooling at 263 K, and in the adiabatic case, there is no heat transfer. In the adiabatic case, the fluid at 293 K, and the surface is 293 K also. So there is no heat transfer here, energy equations are not solved in this case. As it is seen, Von Mises stress is highly low for the adiabatic case. However, the stress is highly large for the heating and cooling cases. It is nearly 6 MPa for the cooling case and it is nearly 13 MPa for the heating case along the pipe.

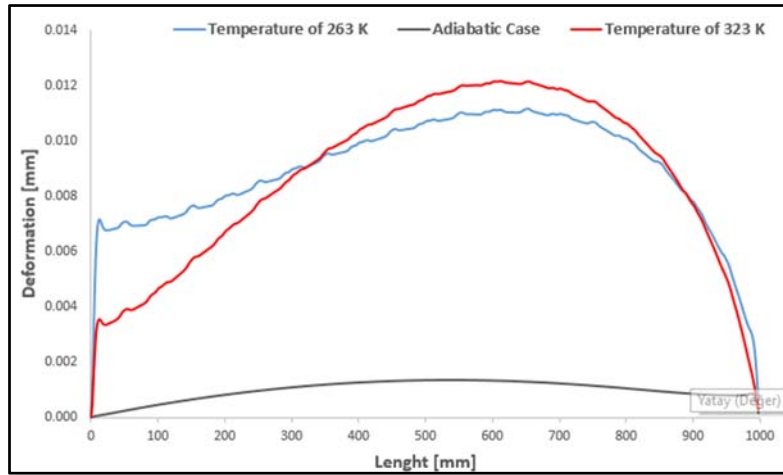


Figure 9. Deformations at the pressure of 5 Bar

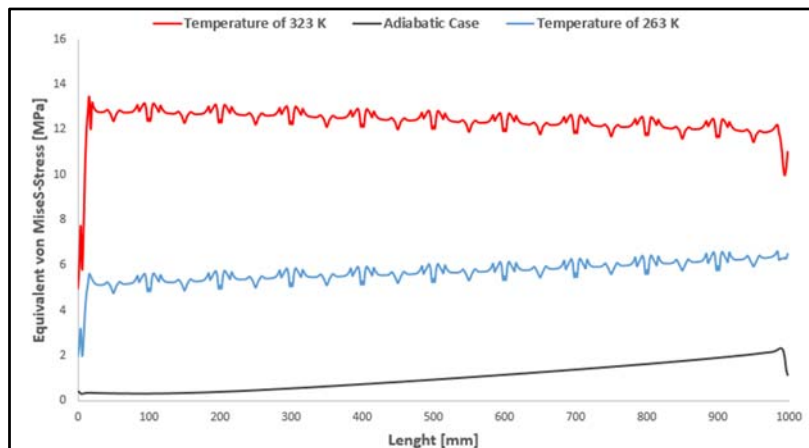


Figure 10. Von Mises stress at the pressure of 5 Bar

Figure 11 presents the variation of the deformation by the constant surface temperature of the solid surface at the pressure of 10 Bar. Here, there are three thermal conditions they are heating at 323K, cooling at 263 K, and in the adiabatic case, there is no heat transfer. In the adiabatic case, the fluid at 293 K, and the surface is 293 K also. So there is no heat transfer here, energy equations are not solved in this case. Here, the deformation increases according to the case of 10 Bar and its range of 0.001 mm – 0.002 mm in the adiabatic case. When the heating and cooling cases are investigated, the deformation is highly large for the heating and cooling cases. It is in the range of 0.01mm – 0.012

mm in the middle of the pipe. Figure 12 presents the variation of the Von Mises stress by the constant surface temperature of the solid surface at the pressure of 10 Bar. Here, there are three thermal conditions they are heating at 323K, cooling at 263 K, and in the adiabatic case, there is no heat transfer. In the adiabatic case, the fluid at 293 K, and the surface is 293 K also. So there is no heat transfer here, energy equations are not solved in this case. As it is seen, Von Mises stress is highly low for the adiabatic case. However, the stress is highly large for the heating and cooling cases. It is nearly 4 MPa for the cooling case and it is nearly 11 MPa for the heating case along the pipe.

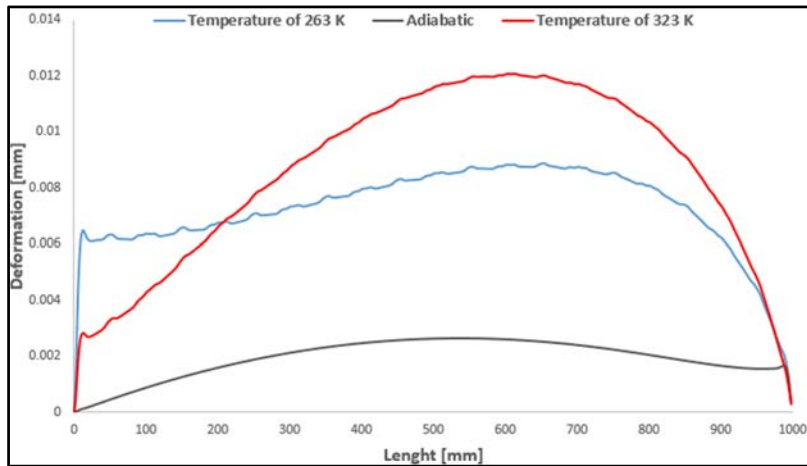


Figure 11. Deformations at the pressure of 10 Bar

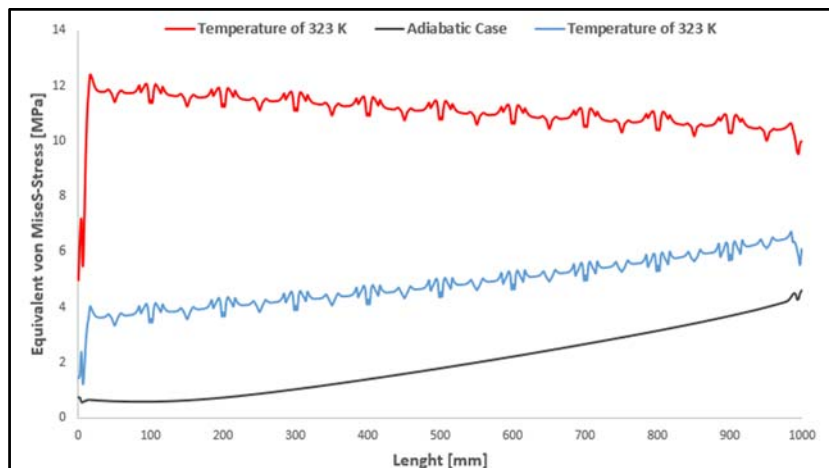


Figure 12. Von Mises stress at the pressure of 10 Bar

FSI analysis showed that deformations and Von Mises stress increase with the increase in pressure as expected for adiabatic cases. However, in all heating or cooling cases, huge differences are observed for the deformation and Von Mises stress due to variations in the thermophysical properties of the fluid. Variation in the thermophysical properties of the fluid affects the flow conditions considerably [23]. The advantages of FSI analysis are obvious according to the pure solid mechanics [24]. Pure solid mechanics calculations may result in lower or larger deformations or stress with unpredictable values [1].

When the figures of deformation and stress are discussed, the sudden rise in these results is observed at the inlet of the pipe. This can be interpreted by developing flow and hydraulic shock when a sudden pressure occurs at the pipe. Here, sudden pressure is a non-stationary flow and sudden change of velocity [25]. Excessive deformation and stress can occur by the abrupt acceleration in a pipe [26].

4. CONCLUSION

In this study, fluid mechanics and solid mechanics are coupled in pipe flow. Straight aluminum pipe is pressurized suddenly with different pressure values as 1 Bar, 5 Bar, and 10 Bar. The deformations and Von Mises stress are investigated under different operating temperatures as heating, adiabatic, and cooling cases by pressures by fluid-structure interactions. A fully developed flow condition is supplied by the length of the pipe. The variation of density and viscosity is taken into account by the generated function. In this way, the variations of these parameters are considered for the fluid during the flow.

According to the results, the following evaluations were reached:

- When the thermal conditions of the pipe are assessed for the heating, adiabatic, and cooling cases, the deformations and stress are highly low according to the thermal process. The results near the inlet showed an abrupt rise due to developing flow.

Therefore developing flow significantly increases the investigated parameters in a turbulent flow.

- An increase in the pressure, for the same flow conditions at the constant surface temperature decreases heat transfer to the fluid so deformation and stress present a decrease along the pipe. This can be achieved by variable thermophysical properties of the fluid. Unless these results may vary and lead to unpredictable values.
- Developing flow increases the heat transfer from the pipe to the fluid and also increases the deformation and stress for the solid domain.
- Even though a rise in the temperature affects the solid domain to deformation, the variation of the thermophysical properties of the fluid compensates for this effect due to a decrease in the viscosity.

FSI analyses are highly important in investigating a solid domain interaction with a fluid to observe structural response because the variation of thermophysical properties of the fluid directly changes pressure distribution on the surface of the solid domain.

5. REFERENCES

1. Li, S., Karney, B.W., Liu, G., 2015. FSI Research in Pipeline Systems - A Review of the Literature. *J. Fluids Struct.*, 57, 277-297.
2. Mohammed, A.O., Al-Kayiem, H.H., A.B., O., Sabir, O., 2020. One-Way Coupled Fluid-Structure Interaction of Gas-Liquid Slug Flow in a Horizontal Pipe: Experiments and Simulations. *J. Fluids Struct.*, 97, 103083.
3. Tijsseling, A.S., 1996. Fluid-Structure Interaction in Liquid-Filled Pipe Systems: A Review. *J. Fluids Struct.*, 10, 109-146.
4. Darıcık, F., Canbolat, G., Koru, M., 2022. Investigation of a Fiber Reinforced Polymer Composite Tube by Two Way Coupling Fluid-Structure Interaction. *Coupled Syst. Mech.*, 11,315-333.
5. Etli, M., Canbolat, G., Karahan, O., Koru, M., 2021. Numerical Investigation of Patient-Specific Thoracic Aortic Aneurysms and

- Comparison with Normal Subject via Computational Fluid Dynamics (CFD). *Med. Biol. Eng. Comput.*, 59, 71-84.
6. Benra, F.-K., Dohmen, H.J., Pei, J., Schuster, S., Wan, B., 2011. A Comparison of One-Way and Two-Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid-Structure Interactions. *J. Appl. Math.* 2011, 1-16.
 7. Ahamed, M., Atique, S., Munshi, M., Koironen, T., 2017. A Concise Description of One Way and Two Way Coupling Methods for Fluid-Structure Interaction Problems. *Am. J. Eng. Res.*, 86-89 .
 8. Tijsseling, A.S., 2007. Water Hammer with Fluid-Structure Interaction in Thick-Walled Pipes. *Comput. Struct.*, 85, 844-851.
 9. Ferras, D., Manso, P.A., Schleiss, A.J., Covas, D.I.C., 2017. Fluid-Structure Interaction in Straight Pipelines with Different Anchoring Conditions. *J. Sound Vib.*, 394, 348-365.
 10. Sreejith, B., Jayaraj, K., Ganesan, N., Padmanabhan, C., Chellapandi, P., Selvaraj, P., 2004. Finite Element Analysis of Fluid-Structure Interaction in Pipeline Systems. *Nucl. Eng. Des.*, 227, 313-322.
 11. Zhu, H., Zhang, W., Feng, G., Qi, X., 2014. Fluid-Structure Interaction Computational Analysis of Flow Field, Shear Stress Distribution and Deformation of Three-Limb Pipe. *Eng. Fail. Anal.*, 42, 252-262.
 12. Elfaki, M., Nasif, M.S., Muhammad, M., 2021. Effect of Changing Crude Oil Grade on Slug Characteristics and Flow Induced Mechanical Stresses in Pipes. *Appl. Sci.*, 11.
 13. Zhu, H., Zhao, H., Pan, Q., Li, X., 2014. Coupling Analysis of Fluid-Structure Interaction and Flow Erosion of Gas-Solid Flow in Elbow Pipe. *Adv. Mech. Eng.*, 6, 815945.
 14. Guo, Q., Zhou, J.X., Guan, X.L., 2020. Fluid-Structure Interaction in Z-Shaped Pipe with Different Supports. *Acta Mech. Sin.*, 36, 513-523.
 15. Yunus A.J., Cimbala, M., 2006. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. Hill Higher Education, Boston, 1031.
 16. Canbolat, G., Yıldızeli, A., Köse, H.A., Çadircı, S., 2020. Düz Bir Plaka Üzerindeki Hidrodinamik ve Isıl Sınır Tabaka Akışının Sayısal Olarak İncelenmesi ve Geçiş Kontrolü. *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci.*, 32, 390-397.
 17. Rzehak, R., Kriebitzsch, S., 2015. Multiphase CFD-Simulation of Bubbly Pipe Flow: A Code Comparison. *Int. J. Multiph. Flow.*, 68, 135-152.
 18. Elkarii, M., Boukharfane, R., Benjelloun, S., Bouallou, C., 2023. A CFD-Based Surrogate Model For Predicting Slurry Pipe Flow Pressure Drops. *Part. Sci. Technol.*, 41, 432-442.
 19. Canbolat, G., Etlı, M., Karahan, O., Koru, M., Korkmaz, E., 2023. Investigation of Vascular Flow in a Thoracic Aorta in Terms of Flow Models and Blood Rheology via Computational Fluid Dynamics (CFD), *J. Mech. Med. Biol.*, 2350094.
 20. Hughes, T.J.R., Liu, W.K., Zimmermann, T.K., 1981. Lagrangian-Eulerian Finite Element Formulation for Incompressible Viscous Flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 29, 329-349.
 21. ANSYS, 2013. *Ansys Fluent Theory Guide*, ANSYS, Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, 15317.
 22. Ezkurra, M., Ander Esnaola, J., Martinez Agirre, M., 2018. Analysis of One-Way and Two-Way FSI Approaches to Characterise the Flow Regime and the Mechanical Behaviour During Closing Manoeuvring Operation of a Butterfly Valve Structural Integrity of Offshore Renewable Energy Platforms View Project., 12, 409-415.
 23. Gorman, D.G., Reese, J.M., Zhang, Y.L., 2000. Vibration of a Flexible Pipe Conveying Viscous Pulsating Fluid Flow. *J. Sound Vib.*, 230, 379-392.
 24. Heinsbroek, A.G.T.J., 1997. Fluid-Structure Interaction in Non-Rigid Pipeline Systems. *Nucl. Eng. Des.*, 172, 123-135.
 25. Bureček, A., Hružík, L., Vašina, M., 2015. Simulation of Accumulator Influence on Hydraulic Shock in Long Pipe. *Manuf. Ind. Eng.*, 14, 1-4.
 26. Hružík, L., Bureček, A., Vašina, M., 2014. Non-Stationary Flow of Hydraulic Oil in Long Pipe. *EPJ Web Conf.*, 67, 1-5.

Güç Sistemlerinde Alanlar-Arası Salınımlar için bir Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) Tabanlı Geniş-Alan Sönümlenme Sistemi Tasarımı

Mahir Bülent BAŞEL¹ ORCID 0009-0000-8596-4690

Ahmet Naci METE^{*1} ORCID 0000-0002-0406-8577

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin

Geliş tarihi: 12.09.2023

Kabul tarihi:25.12.2023

Atıf şekli/How to cite: BAŞEL, M.B., METE, A.N., (2023). Güç Sistemlerinde Alanlar-Arası Salınımlar için bir Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) Tabanlı Geniş-Alan Sönümlenme Sistemi Tasarımı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 1061-1076.

Öz

Elektromekanik düşük frekanslı salınımlar, büyük çaplı enterkonnekte güç sistemlerinin kararlılığı için başlıca kaygılar arasındadır. Etki ettikleri sistem bileşenlerine bağlı olarak bu düşük frekanslı salınımlar, lokal salınımlar, alanlar arası salınımlar, kontrol modu salınımları veya burulma modu salınımları olarak sınıflandırılabilirler. Alanlar arası salınım, birbirlerine zayıf bağlantı hatları ile bağlı yüksek miktarda güç transferinin yapıldığı iki alanda bulunan generatör gruplarının birbirlerine karşı salınımları ile meydana gelmektedir. Generatörlerin uyarım sistemine ek bir sönümlenme sinyali eklenmesi için kurulan güç sistemi kararlılaştırıcıları (PSS) lokal modların sönümlendirilmesinde oldukça etkili bir çözüm iken alanlar arası modların sönümlendirilmesinde yetersiz kalmaktadırlar. Bunun nedeni alanlar arası modların gözlemlenebilirliğinin lokal sinyallerde düşük olmasıdır.

Güç sistemlerinde güç aktarım kontrolü ve geçici durum kararlılığı sağlama gibi amaçlarla kullanılan Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC) cihazlar, alanlar arası modların gözlemlenebilirliğinin yüksek olduğu sinyallere (global sinyaller) doğrudan erişimi sağlandığında bu modların sönümlendirilmesine katkı vermektedirler. Global sinyal tabanlı PSS ve TCSC cihazların koordineli kullanımıyla alanlar arası salınım modlarının sönümlendirilmesinde etkili sonuçlar alınmaktadır. Bu çalışmada alanlar arası salınım çalışmalarında referans model olarak kullanılan 2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi için TCSC tabanlı bir geniş alan sönümlenme kontrol sistemi tasarlanmıştır. Sönümlenme performansı öncelikle sistemde sadece TCSC aktif iken değerlendirilmiştir. Sonrasında global sinyal tabanlı bir PSS, TCSC üzerinden sisteme eklenmiş ve performans değerlendirmesi yeniden yapılmıştır. Benzetim sonuçları ile global PSS ve TCSC'nin koordineli kullanımıyla hem alanlar arası salınımın modlarının başarıyla sönümlendirildiği hem de alanlar arası güç aktarımının iyileştirildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alanlar-arası salınım, Geniş-alan sönümlenme kontrolü, Fazör ölçüm ünitesi (PMU), TCSC

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet Naci METE, mete@mersin.edu.tr

Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) Based Wide-area Damping System Design for Inter-area Oscillations in Power Systems

Abstract

Electromechanical low-frequency oscillations are among the primary concerns for the stability of large-scale interconnected power systems. Depending on the system components they affect, these low-frequency oscillations can be classified as local oscillations, inter-area oscillations, control mode oscillations, or torsional mode oscillations. Inter-area oscillation occurs when generator groups in two areas connected by weak tie lines involving large amount of power transfer experience oscillations relative to each other. While Power System Stabilizers (PSS) are an effective solution for damping local modes by adding an additional damping signal to the excitation system of generators, they are insufficient in dampening inter-area modes. This is due to the lower observability of inter-area modes in local signals.

Thyristor Controlled Series Compensators (TCSC) devices, which are used in power systems for purposes such as power transfer control and transient stability, also contribute to the damping of inter-area modes when direct access to signals with high observability (global signals) of inter-area modes are provided. Effective results in damping inter-area oscillation modes are achieved through the coordinated use of global signal based Power System Stabilizers (PSS) and TCSC devices. In this study, a wide-area damping control system based on TCSC was designed for a 2-area 4-generator power system, which is used as a benchmark model in inter-area oscillation studies. The damping performance was initially evaluated with only TCSC active in the system. Subsequently, a global signal-based PSS was added to the system via TCSC, and the performance evaluation was conducted again. Simulation results demonstrate that the coordinated use of global PSS and TCSC successfully dampens inter-area oscillation modes and improves inter-area power transfer.

Keywords: Inter-area oscillations, Wide-area damping control, Phasor measurement unit (PMU), TCSC

1. GİRİŞ

Birbirlerine zayıf bağlantı hatlarıyla bağlı olan büyük ölçekli güç sistemleri arasındaki salınımlar 1920 yılından bu yana raporlanmıştır [1]. Alanlar arası ya da lokal olarak sınıflandırılabilen bu elektromekanik salınımlar generatörlerin doğal özellikleri sonucu oluşmaktadır [2]. Alanlar arası salınım frekansları 0.1-1 Hz arasında olup genellikle düşük sönümleme karakteristiğine sahiptirler. Düşük frekanslı bu salınımları sönümlemek için farklı metotlar kullanılmaktadır. Yıllardır yapılan çalışmalarda güç sistemi kararlılaştırıcıların (PSS) kullanımı lokal salınımların sönümlenmesinde maliyet ve tasarım kolaylıkları açısından en etkili çözüm olarak kabul edilmektedir. Bu sönümleme kontrolü, generator hızı, aktif güç ya da bara frekansı gibi lokal sinyaller kullanılarak elde edilen ek bir sönümleme sinyalinin generatörlerin uyartım

sistemine eklenmesiyle gerçekleştirilmektedir. PSS'lerin alanlar arası salınım modlarının sönümleme kontrolüne etkisi, bu modların gözlemlenebilirliğinin lokal sinyallerde zayıf olduğu durumlarda oldukça düşük olmaktadır. Alanlar arası salınım modlarının bir alandan gözlemlenebilir, diğer alandan da kontrol edilebilir olduğu durumlarda da PSS'ler bu salınımların sönümlenmelerinde yetersiz kalmaktadırlar [3].

PSS'lerin alanlar arası salınım sönümleme kontrolünde daha etkili olabilmesi, global sinyal olarak da bilinen fazör ölçüm üniteleri (Phasor Measurement Unit (PMU)) tarafından sağlanan geniş alan ölçümlerinin kullanılmasıyla mümkün kılınabilmektedir. Bu durum yapılan birçok çalışma ile gösterilmiştir [4-6]. Alanlar arası salınım modunun gözlemlenebilirliğinin en yüksek olduğu global sinyalin, PSS giriş sinyali olarak seçimi ve bu modun kontrol edilebilirliğinin en yüksek

olduğu generatörün, PSS kurulum yeri olarak seçildiği durumda, ideal olarak en iyi sönümleme performansı elde edilir.

Büyük değerli kapasitor voltajlarını ya da indüktör akımlarını kontrol etmek için yüksek güçlü elektronik anahtarlar gibi kontrol edilebilen bileşenler ile donatılmış elektrik iletim şebekeleri esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) olarak adlandırılırlar. FACTS kontrolörlerin asıl fonksiyonları güç akışı ve voltaj kontrolü olsa da bu cihazlarla aynı zamanda alanlar arası salınım sönümleme kontrolü de yapılabilmektedir [7-9]. İletim sistemlerine bu cihazların kurulmasıyla alanlar arası modlar için yüksek gözlemlenebilirlik içeriğe sahip sinyallere doğrudan erişim sağlanabilir. Fakat yüksek kurulum maliyeti nedeniyle FACTS cihazlarının sayısı genellikle alanlar arası salınım mod sayısından daha azdır. Bu nedenle bütün modları içerecek şekilde birden fazla giriş sinyali kullanan kontrol stratejilerinin geliştirilmesi bir zorunluluktur [10].

Chow ve arkadaşları ilk olarak 1995 yılında geniş alan güç sistemlerinde TCSC cihazlar kullanılarak sönümleme kontrolü yapılmasını önermişlerdir [11]. Yine aynı yıl içerisinde, Paserba ve arkadaşları detaylı bir çalışmayla geliştirdikleri TCSC modeli ile güç sistemlerinde TCSC cihazlarının potansiyel uygulamalarını göstermişlerdir [12]. Takip eden yıllarda doğrusal olmayan kontrol [13], doğrusal matris eşitsizlikleri (LMI) [14], bulanık mantık [15] gibi çeşitli kontrol algoritmaları ile TCSC cihazların alanlar-arası salınım sönümleme için kullanıma yönelik teknikler geliştirilmiştir.

Prakash ve arkadaşları [16] yaptıkları çalışmada 2 alanlı 4 generatörlü güç sisteminde çeşitli senaryolarla oluşturulan alanlar arası salınım modları, K-ortalama algoritması kullanılarak gruplandırılmış ve daha sonra her bir grup için farklı bir global PSS tasarımı yapılmıştır. PSS çıkış sinyalleri Gauss dağılımı ile ağırlıklandırılmış şekilde birleştirilmiş ve TCSC referans sinyaline eklenmiştir. Benzetim sonuçları ile önerilen iki aşamalı tasarımın, tek çalışma noktası için tasarlanana sönümleme sistemine göre daha gürbüz sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

TCSC ve aktif bozucu reddetme kontrolü (Active Disturbance Rejection Control (ADRC)) tabanlı bir geniş alan sönümleme sistemi yapısı [17]'de önerilmiştir. Bu çalışmada giriş sinyali olarak kullanılan global sinyaller 100 ms sabit zaman gecikmeli olarak modellenmiş ve zaman gecikmesi Pade yaklaşımı ile doğrusal sistem modeline eklenmiştir. Alanlar arası güç aktarım miktarı ADRC kontrolöre giriş sinyali olarak seçilmiş ve üretilen kontrol sinyali TCSC bloğuna eklenmiştir. Yine aynı araştırma grubu tarafından yapılan çalışmada TCSC tabanlı geniş alan sönümleme sistemi için optimal global sinyal seçimi 2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi modeli kullanılarak gösterilmiştir [18]. Salınım modlarının gözlemlenebilirliğin yüksek olduğu sinyaller geometrik yöntem ile belirlenmiş ve artık (residue) metodu ile bu sinyaller için global PSS tasarımı yapılmıştır.

Sönümleme kontrolü için giriş sinyali seçiminde kullanılan geometrik ve artık ölçüm metodları yerine modal seyrek doğrusal kuadratik regülatör (MSLQR) tabanlı bir metotla sadece sönümlendirilmek istenen moda ait bilgileri içeren sinyalin elde edilebildiği tasarım yöntemi [19]'da önerilmiştir. Sistemin durum değişkenlerinin doğrusal kombinasyonlarıyla elde edilen giriş sinyali, sadece ilgilenilen salınım moduna ait bilgileri içermesi nedeniyle geniş alan kontrolörü olarak klasik PSS yerine sadece oransal kontrolün kullanımının yeterli olacağı 2 alanlı 4 generatörlü modelde eyleyici olarak TCSC'nin seçildiği benzetimle gösterilmiştir. Eyleyici olarak TCSC'nin seçildiği bir başka çalışmada geniş alan kontrolörü olarak uyarlamalı faz telafisi yapabilen fazör güç salınımı sönümleyicisi (P-POD) kullanılmıştır [20]. Çoklu modellenmiş uyarlamalı tahmin edici adı verilen yapıda, paralel çalışan Kalman filtreleri yardımıyla salınım modunun sönümlenmesi için gereken faz miktarı kestirilmekte ve sönümleme kontrol sinyalinin üretilmesi için kullanılmaktadır. Önerilen yapının başarımı, güç sistemindeki değişken çalışma noktaları ve zaman gecikmeli sinyaller kullanılarak sınanmıştır. [19]'a benzer şekilde salınım modunun sönümlendirilmesi için sadece o moda ait bilgilerin olduğu sinyali, modsal doğrusal kuadratik kontrolör (Modal LQR) kullanarak sentezleyen bu çalışmada, PMU tarafından ölçümlerin sağlanamadığı

durumlar için düşük dereceli gözleyici tasarımı da önerilmiştir [21]. Sistem benzetimde eyleyici olarak yine TCSC kullanılmıştır.

Alanlar arası salınım sönümlenmesi için TCSC cihazlarına uygulanacak kontrol sinyallerinin PMU'lar tarafından sağlanan global ölçümlerden seçilmesiyle daha etkin ve gürbüz (robust) sonuçlar elde edildiği yapılan çalışmalar ile raporlanmıştır [14,22]. Ayrıca salınım sönümleme performansının PSS ve FACTS cihazlarının koordineli çalışmasıyla daha da artırılacağı [23] ve [24] tarafından gösterilmiştir.

Sönümleme kontrolü için seçilen global PMU sinyallerinin ölçümü, işlenmesi ve iletimi aşamalarında kaçınılmaz olarak zaman gecikmeleri oluşur. PMU sinyallerinin gürültüden arındırılması ve Fazör Data Toplayıcıları (PDC) tarafından işlenmesi gibi faktörlerden kaynaklanan zaman gecikmeleri çoğunlukla deterministik yapıda olup sabit zaman gecikmesi olarak kabul edilebilmektedirler. Ancak iletişim ağından kaynaklı zaman gecikmesi ağ ortamı (fiber, PLC gibi), kullanılan protokol (UDP, TCP gibi) ve ağ trafik yoğunluğu gibi sebeplerden dolayı stokastik karakterdedir. Bu değişken zaman gecikmesi jitter olarak adlandırılır.

Zaman gecikmesinin sabit kabul edildiği durumlarda Pade yaklaşımı ile sonlu boyutta temsil edilen zaman gecikmesi güç sistemi modeline eklenir ve sönümleme kontrolör tasarımı bu modele göre yapılır [25]. Bu tasarımda Pade yaklaşımının derecesi zaman gecikmesini doğru şekilde temsil edebilecek büyüklükte olmalıdır. Smith tahmin edicileri sabit zaman gecikmelerinin olumsuz etkilerini bastırmak için kullanılan başka bir yöntemdir. Klasik ve birleşik Smith tahmin edicilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen sönümleme kontrol tasarımı teknikleri sırasıyla [26] ve [27] çalışmalarda önerilmiştir. Zaman gecikmesinin sabit kabul edilmesiyle tasarlanan salınım sönümleme kontrolörleri gerçek sistemlerdeki değişken zaman gecikmelerine karşı yeterli gürbüzlukte (robust) performans sağlayamamaktadırlar. Bu nedenle zaman gecikmelerinin belirsizlik olarak sistem tasarımına eklendiği H_2/H_∞ [28] ve μ sentezi [29] gibi optimal

ve robust kontrol teknikleriyle gerçekleştirilen salınım kontrol sistem tasarımları önerilmiştir. Bu yöntemlerle tasarlanan kontrolörler, değişken zaman gecikmelerine karşı etkin olmalarına rağmen gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılmaya uygun olmayan yüksek derecede ve karmaşık yapıdadırlar.

Değişken zaman gecikmelerine karşı yeterli gürbüzlukte olan ve aynı zamanda gerçek zamanlı sistemlerde kullanılacak pratik yapıda kontrolör tasarımı için zaman gecikmesinin ölçülmesi ve gerektiği kadar gecikme telafisi yapılmasına imkan sağlayan bir uyarlamalı kontrolör yapısı [30]'da yapılan çalışma ile önerilmiştir. Bu yapının çalışma prensibi, PMU sinyallerinin zaman gecikmelerinin zaman damgalarına göre gerçek zamanlı olarak hesaplanması ve zaman gecikmesinin bulunduğu aralığa göre daha önceden tasarlanmış olan Lead kontrolörlerin devreye alınmasıdır. Şimdiki çalışmanın yazarları tarafından yapılan bir başka çalışmada uyarlamalı zaman gecikmesi telafisi için zaman gecikmesi hesaplama periyotlarının seçimi ve eklenmesi gereken faz miktarının hesaplanmasına yönelik bir yöntem önerilmiştir [31]. Önerilen kontrolör yapısı tasarlanan değişik profillerdeki zaman gecikmelerine karşı sınanmış ve zaman gecikmesi telafisinin gerçek zamana yakın olduğu gösterilmiştir. Şimdiki çalışmada geniş alan sistemindeki zaman gecikmesi ihmal edilmiş, TCSC ve global PSS'in beraber kullanıldığındaki salınım sönümleme başarımı TCSC'nin tek başına kullanıldığı durumdaki sönümleme performansı ile kıyaslanmıştır. Zaman gecikmelerinin sistem sönümleme performansına etkisi ve pratik sistemlerde gerçeğe yakın olarak bu etkinin nasıl telafi edilebileceği ile ilgili teknikler [31]'de ve çalışmanın referanslarında detaylandırılmıştır.

Bu çalışmayla amaçlanan Global PSS ve TCSC'nin koordineli kullanımının alanlar arası salınımın sönümlenmesine ve alanlar arası güç aktarımının iyileştirilmesine yönelik etkilerinin farklı senaryolar altında araştırılmasıdır. Bunun için öncelikle sadece TCSC tabanlı bir sönümleme sistemi tasarlanmış ve sönümleme başarımı benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. Daha sonra bu sisteme global sinyal tabanlı PSS eklenmiş ve bu bloğun çıkış sinyali TCSC'nin referans sinyaline

eklenmiştir. Benzetim çalışmaları Matlab/Simulink platformunda alanlar arası salınım sönümlenme çalışmalarında referans model olarak kullanılan 2 alanlı 4 generatörlü Kundur güç sistemi modeli [7] temel alınarak yapılmıştır. Kundur modelinde alanlar arası salınının artırılması amacıyla bazı değişiklikler yapılmıştır.

Bu çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir; 2. Bölümde geniş alan kontrol sistemleri, modsal analiz, geometrik yöntem ve global PSS tasarımı ve son olarak TCSC hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Takip eden bölümde TCSC tabanlı geniş alan sönümlenme kontrol sisteminin seçilen test modeli için tasarlanması ve sönümlenme performansının benzetim sonuçları kullanılarak değerlendirilmesine yer verilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar verilmiştir.

2. YÖNTEM

2.1. Geniş Alan Kontrol Sistemleri

Bir elektrik şebekesi, optimal sayıda PMU yerleştirilmesiyle tamamen gözlemlenebilir hale getirilebilir. Şebeke dinamiklerinin gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilmesi salınım bulma, açılı sapmalarının belirlenmesi, voltaj/frekans karalılığı değerlendirmesi gibi birçok yeni uygulamanın ortaya çıkmasını ve durum tahmini, hata algılama gibi mevcut tekniklerin daha da geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Eşzamanlı ölçüm teknolojisi (İng. synchronized measurement technology (SMT)) kullanarak şebeke durum değerlerini ölçen, buna bağlı olarak kontrol sinyalleri üreten ve bunları akıllı elektronik cihazlar (İng. intelligent electronic devices (IEDs)) aracılığıyla gerçekleyen sistemler geniş alan gözlemlenme, koruma ve kontrol sistemleri (İng. Wide-area Monitoring, Protection and Control (WAMPAC)) olarak adlandırılırlar. WAMPAC sistemlerinin ilk kullanımına 1990'lı yılların ilk yarısında Amerika Birleşik Devletlerinde başlanmıştır. O zamandan bu yana birçok ülke kendi ulusal WAMPAC sistemlerini kurmak için büyük bütçeli projeler uygulamaya koymuşlardır.

Geniş alan kontrolünün etkili sonuçlar vermesinin beklendiği uygulamalardan bir tanesi, alanlar arası

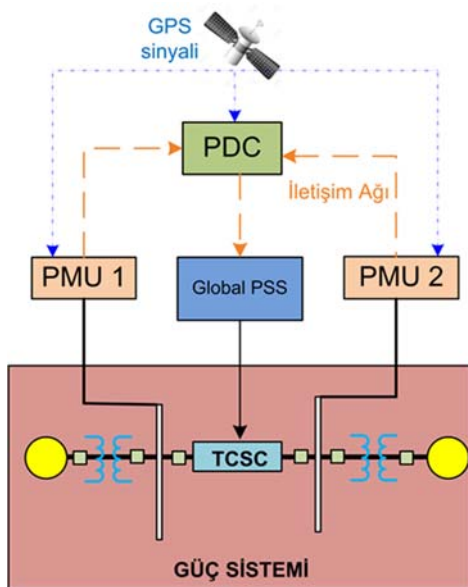
elektro-mekanik salınımların sönümlenme kontrolüdür. Şekil 1'de TCSC tabanlı örnek bir geniş alan sönümlenme sistemi gösterilmiştir. Bu sistemde güç sisteminde PMU'lar tarafından alınan GPS zaman etiketli ölçümler (voltaj, akım, frekans ve frekans değişim oranı) iletişim ağı ile Fazör Data Toplayıcısına (İng. Phasor Data Collector (PDC)) iletilir. Bir WAMPAC sisteminde hiyerarşik yapıya bağlı olarak birden çok seviyede PDC'ler bulunabilir ve PDC'ler arası bilgi alışverişi de yapılabilir. PDC'lerin SMT sistemlerinde aynı zamanda ölçüm değerlerinin arşivlenmesi, koruma cihazlarının durumunun daha sonra yapılabilecek analizler için saklanması gibi fonksiyonları da vardır. PDC'lere gelen ölçümler zaman etiketlerine göre düzenlendikten sonra sönümlenme kontrolörüne iletilir. Üretilen sönümlenme kontrol sinyali seçilen eyleyiciye ek bir referans sinyali olarak uygulanır. Bu çalışmada sönümlenme kontrolörü olarak global PSS ve eyleyici olarak da TSCS seçilmiştir.

Geniş alan sönümlenme kontrol sisteminin performansı sönümlenme kontrolü için kullanılan global sinyal ve üretilen kontrol sinyalinin uygulanacağı eyleyicinin konumu ile doğrudan ilintilidir. Bu seçimlerin en optimal yapılabilmesi için geliştirilen teknikler takip eden bölümde açıklanmıştır.

2.2. Modsal Analiz

Alanlar arası salınım sönümlenme kontrolünde atılacak ilk adım kararsız ve düşük sönümlenme karakteristiğine sahip olan modların belirlenmesidir. Modların belirlenmesinde ölçüm tabanlı ve model tabanlı olmak üzere iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Ölçmeye dayalı sistemler mod tahmininde zaman alanındaki ölçümleri kullandıkları için güç sistemi büyüklüğünün bu yöntemler için kısıtlayıcı bir yönü bulunmamaktadır. Kullanılan data tipine göre (ambiyans, ringdown veya her ikisi) geliştirilmiş olan Prony, Matrix Pencil, Yule-Walker gibi tahmin algoritmaları WAMPAC sistemlerde başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar [32]. Klasik modsal analiz metodu güç sisteminin belirlenen bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılması ile edilen durum-uzay modelini kullanır. Bu doğrusal model

çalışma noktası etrafındaki küçük değişimler için elektro-mekanik modları doğru şekilde belirleyebilmektedir. Ayrıca sönümleme kontrolü için seçilebilecek yüksek gözlemlenebilir içerikli giriş sinyallerinin seçimi için de bu model önemli bilgiler vermektedir. Büyük ölçekli sistemler için doğrusal model elde etmekteki güçlük bu yöntemin handikabıdır. Bu çalışmada kullanılan güç sistemi modelinin boyutu modsal analiz için uygun olduğu için bu yöntem tercih edilmiştir.



Şekil 1. TCSC tabanlı geniş alan salınım sönümleme kontrol sistemi

Doğrusal olmayan güç sistemi modelinin seçilen çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmasıyla (1) ile verilen durum-uzay modeli elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

Burada, A nxn boyutlu sistem matrisi, B nxp boyutlu giriş matrisi, C qxn boyutlu çıkış matrisi, x $nx1$ boyutlu durum vektörü, u $px1$ boyutlu giriş vektörü ve y $qx1$ boyutlu çıkış vektörüdür. Doğrusal modele ait özdeğerler (modlar) sistem matrisi A için I nxn boyutlu birim matris olmak üzere (2) ile verilen karakteristik denklemin çözümü ile elde edilir.

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (2)$$

Sistem matrisi A 'nın öz değerlerinin incelenmesiyle güç sistemine ait salınım modları belirlenir. Öz değerler en genel halde kompleks olarak $\lambda = \sigma \pm j\omega$ formatında elde edilirler. Salınım modlarının karakteristiği, öz değerlerin gerçekte kısımlarının incelenmesiyle belirlenir. Negatif reel değerli öz değerler zamanla sönümlenen (kararlı) yapıda salınım modlarıdır. Özdeğerlerin tümü kompleks düzlemin sol yarı açık kısmında yer alıyorsa sistem kararlıdır denir. Salınım modunun frekans bilgileri bu modların sanal kısımlarından elde edilir. Güç sistemindeki salınımın frekansı f ve sönümleme oranının ξ hesaplanmasında kullanılan eşitlikler (3)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} f &= \frac{\omega}{2\pi} \\ \xi &= \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

Öz değerlerin belirlenmesinden sonra modsal analiz öz vektörlerin hesaplanması ile devam eder. Öz vektörler, her bir öz değer λ_i için (4) ile verilen eşitlikleri sağlayan birer sütun vektörü olarak tanımlanırlar. Sistem matrisi A ile sağdan çarpılan öz vektörler, sağ öz vektör (φ_i) ve sistem matrisi A ile soldan çarpılan öz vektörler, sol öz vektör (ψ_i) olarak adlandırılırlar. Salınım modunun güç sisteminde hangi durum değişkeni üzerinde etkili olduğu sağ öz vektörlerin değerlendirilmesiyle bulunur. Sol öz vektör ise salınım modunun şekli hakkında bilgi vermektedir.

$$\begin{aligned} A\varphi_i &= \lambda_i\varphi_i \\ \psi_i A &= \lambda_i\psi_i \end{aligned} \quad (4)$$

2.3. Geometrik Yöntem ve Global PSS Tasarımı

Geniş alan sönümleme kontrol sistemleri tasarımında, giriş sinyali seçimi ve oluşturulan kontrol sinyalinin uygulanacağı eyleyicinin konum seçimi en önemli parametrelerdir. Salınım modlarını tamamen sönümlendirmek için ideal olan bütün generatörlere kontrol sinyalinin uygulanmasıdır. Ancak bu yaklaşım maliyet açısından uygulanabilir değildir. Bu nedenle en az sayıda kontrolör kullanılarak en etkili sönümleme performansı elde edebilmek için kontrolörün kurulacağı bölgenin ve giriş sinyalinin seçimi çok önemlidir.

Modsal analiz sonucu elde edilen bilgilerle salınım modlarının gözlemlenebilirliğinin en yüksek olduğu sinyallerin ve kontrol edilebilirliğin en büyük olduğu lokasyonu tespit etmek için sıklıkla kullanılan iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler Artık (residue) yöntemi [33] ve Geometrik yöntemdir [34]. Yapılan çalışmalarda Geometrik yöntemin daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir [4]. Bu çalışmada da Geometrik yöntem kullanılmıştır.

Buna göre; doğrusallaştırılmış sisteme ait A, B ve C matrisleri (1)'deki gibi verilmiş olsun. A matrisinin n tane ayrık öz değere $\lambda_i, (i=1,2,\dots,n)$ sahip olduğu varsayımıyla bu öz değerlere ait sağ öz vektörler (4)'de tanımlandığı gibi φ_i ve sol öz vektörler ψ_i olsun. Ortogonal olan öz vektörlerin normalize edilmesi ile $EF^H = FE^H = I_n$ eşitliği sağlanır. Burada, $E = [\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \dots \varphi_n], F = [\psi_1 \psi_2 \psi_3 \dots \psi_n]$ ve I_n ise $n \times n$ boyutunda birim matris olarak verilir. Geometrik yaklaşımda i . moda göre kontrol edilebilirlik indeksi (mci) ve gözlemlenebilirlik indeksi (moi) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [35]:

$$mci(k) = \cos(\theta(\psi_i, b_k)) = \frac{|b_k^T \psi_i|}{\|\psi_i\| \|b_k\|} \quad (5)$$

$$moi(l) = \cos(\theta(c_l^T, \varphi_i)) = \frac{|c_l^T \varphi_i|}{\|\varphi_i\| \|c_l\|} \quad (6)$$

Burada b_k, B matrisinin k . sütununu, c_l, C matrisinin l . satırını, $\theta(\psi_i, b_k)$ giriş vektörü b_k , ile sol öz vektör ψ_i arasındaki açıyı ve $\theta(c_l^T, \varphi_i)$ ise çıkış vektörü c_l ile sağ öz vektör φ_i arasındaki açıyı temsil etmektedir.

Global sinyal seçiminde ölçüt olarak gözlemlenebilirlik indeksi (moi) yanında sinyal ölçüm kolaylığı, ölçüm kalitesi gibi faktörler de gözletilmek durumundadır. Kurulum yeri olarak sönümlenmek istenen moda göre kontrol edilebilirlik indeksi (mci) en yüksek olan generatör seçilir. Global PSS, alanlar arası modun kompleks düzlemdeki konumunun daha sol tarafa ötelenmesiyle sönümleme faktörünü artırmak üzere tasarlanmış bir lead kontrolör olarak tanımlanır. PSS kurulum yerinin ve global sinyalin seçiminden sonra global PSS tasarımı salınım frekansını değiştirmeden sönümleme oranını artırmak için

eklenmesi istenen faz miktarı θ olmak üzere [4]'de önerildiği şekilde şu bağıntılarla tasarlanır:

$$H_{GPSS} = K_w \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left(\frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} \right)^m \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1 - \sin\left(\frac{\theta}{m}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\theta}{m}\right)}, \quad T_1 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}}, \quad T_2 = \alpha T_1 \quad (8)$$

Burada m lead kontrolör blok sayısı, ω_i salınım frekansı, K_w, T_w ise washout filtresine ait kazanç ve zaman sabiti değerleri olarak tanımlanmıştır. Salınım modunun aynı frekansta sönümleme oranını artırmak için gereken faz miktarı θ , artık-faz metodu ile şu şekilde hesaplanır: A, B ve C (1) ile verilen doğrusal modele ait durum-uzay modeli matrisleri olmak üzere, sisteme ait transfer fonksiyonu (9) ile verildiği şekildedir.

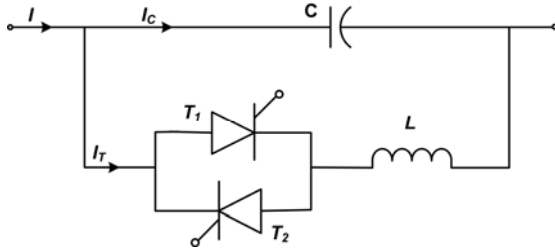
$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (9)$$

Burada, $R_i = C\phi_i\Psi_i B$ eşitliği ile verilen R_i, A matrisinin i . özdeğeri λ_i 'ye ait artık (residue) değeri olarak tanımlanır. Bu durumda λ_i modunun sönümlenmesi için gereken faz miktarı θ_i , Eşitlik 10'da verildiği şekilde hesaplanır.

$$\theta_i = 180^\circ - \arg(R_i) \quad (10)$$

2.4. TCSC

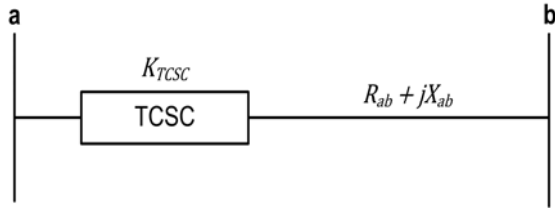
Tek hat şeması Şekil 2'de verilmiş olan TCSC, FACTS cihazlar ailesinin bir üyesidir. Bu cihazların güç sistemine bağlantıları seri olarak yapılmaktadır. Hat empedansının kontrol edilebilmesi nedeniyle değişken yük durumlarında TCSC'ler, çok iyi bir hat akımı kontrolü sağlamaktadır. Empedans ayarlanması bir endükdansa seri bağlı ters paralel bağlantılı iki tristör bloğu (tristör kontrollü reaktör (TCR)) ve hatta seri bağlı kapasitör aracılığıyla yapılmaktadır. TCSC'ler tetikleme açısı değiştirilerek endüktif ya da kapasitif olarak çalıştırılabilirler. Kapasitif çalışma için TCR reaktansı, kapasitör reaktansından büyük bir değere ayarlanır. Bu durumun tersi sağlandığında TCSC endüktif olarak çalışır.



Şekil 2. TCSC tek hat şeması

Kalıcı durumda iletim hattına bağlı bir TCSC modeli Şekil 3'te gösterilmiştir. İki bara arasındaki iletim hattının empedansı $Z_{ab}=R_{ab}+jX_{ab}$ olarak verilsin. TCSC'in reaktansı X_{TCSC} ve hatta sağladığı reaktans kompanzasyonu $K_{TCSC}=X_{TCSC}/X_{ab}$ olarak tanımlansın. Bu durumda TCSC'nin bağlı olduğu iletim hattının empedansı kalıcı durumda (11)'deki gibi verilir.

$$Z_{ab} = R_{ab} + jX_{ab}(1 - K_{TCSC}) \quad (11)$$



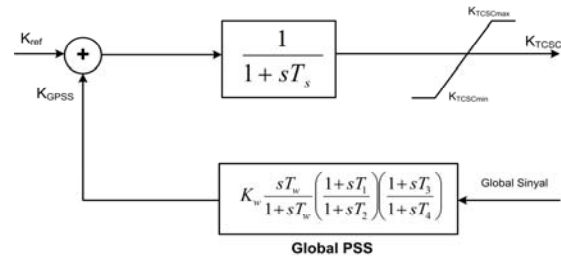
Şekil 3. İletim hattında kalıcı durum TCSC modeli

TCSC kullanımı güç sistemlerinde, mevcut güç transfer kapasitesini termal limitler dahilinde en yüksek değere artırabilmek ve geçici durum kararlılığını geliştirmek gibi faydaların yanında lokal ve alanlar-arası salınım modlarının sönümlenmesine de katkı sağlamaktadır. TCSC'lerin global PSS ile beraber kullanıldığı sistemlerde alanlar arası salınım sönümleme performansının daha yüksek olduğu yapılan çalışmalarla gösterilmiştir [23,24].

Alanlar arası salınım sönümleme kontrolü için TCSC ve global PSS'in beraber kullanıldığı bir kontrolör yapısı Şekil 4'de verilmiştir. Bu çalışmada da kullanılan yapıda global PSS tarafından üretilen kontrol sinyali TCSC referans sinyaline eklenmiştir. Bu bağlantıyla TCSC'nin dinamik modeli Eşitlik 12'de verildiği şekilde ifade edilir.

$$\frac{dK_{TCSC}}{dt} = \frac{1}{T_s} (K_{ref} + K_{GPSS} - K_{TCSC}) \quad (12)$$

Burada, K_{TCSC} TCSC tarafından sağlanan yüzdelik kompanzasyonu, K_{ref} yüzdelik kompanzasyon referans değerini, K_{GPSS} global PSS tarafından sağlanan ek kompanzasyon değerini ve T_s ise TCSC'nin zaman sabitini temsil etmektedir.



Şekil 4. TCSC ve Global PSS sönümleme kontrolörü

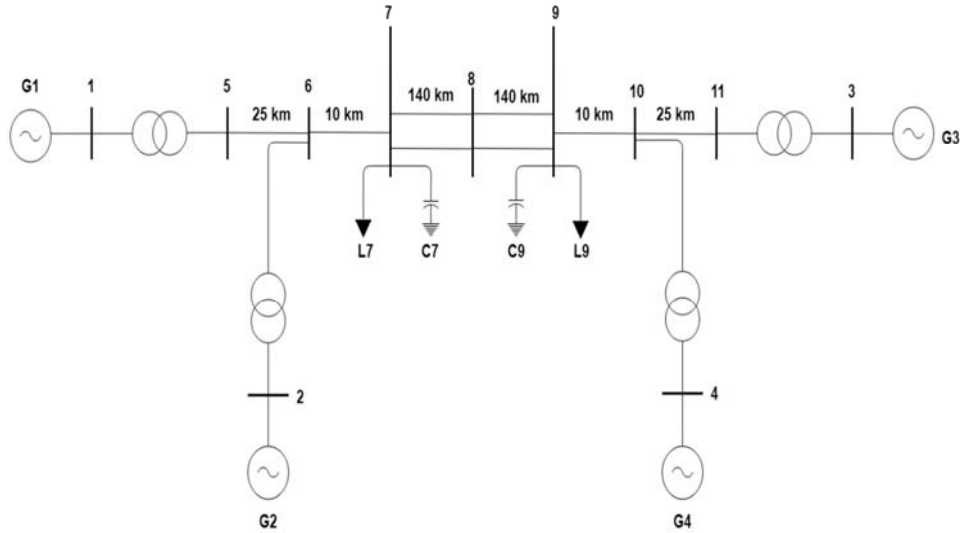
3. SİSTEM TASARIMI VE BENZETİM SONUÇLARI

TCSC tabanlı sönümleme kontrol sistemi etkinliğinin değerlendirilmesi için alanlar arası salınım çalışmalarında temel model olarak kullanılan 2 alanlı 4 generatörlü model, bazı değişiklikler yapılarak kullanılmıştır. Tek hat şeması Şekil 5'de verilen modelde 7. ve 9. Bara arasındaki hat uzatılarak 280 km'ye çıkarılmış, 9. Baraya ek olarak 187 Mvars büyüklüğünde kapasitif yük eklenmiş ve generatörlerin atalet sabitleri $H_{1,3,4} = 7.5$ ve $H_2 = 3.5$ olarak değiştirilmiştir. Bu değişiklikler, alanlar arası mesafeyi ve güç transfer miktarını artırarak sistemin daha ağır şartlarda çalışmasını sağlamaya yöneliktir.

Generatör modeli olarak 6 durum değişkenli model kullanılmıştır. Generatör modeli için tanımlanan durum değişkenleri Çizelge 1'de verilmiştir. Tüm generatörlerin aynı tip statik uyarım sistemine (IEEE ST3A) ve aynı tip hız regülatörüne (THR) sahip oldukları varsayılmıştır. Lokal PSS kontrolörler (7) ile verilen formda iki kompanzasyon bloğu ($m=2$) ile generatörlere eklenmiştir. Kontrol ve uyarım sistemleri için tanımlanan durum değişkenleri Çizelge 2'de verilmiştir. Buna göre tüm kontrol, uyarım ve tahrik sistemlerinin aktif olduğu güç sistemi

modelinde her bir generatör için toplam 15 durum değişkeni tanımlanmıştır. Bu durum için elde edilen doğrusal modeldeki sistem matrisi A , 60×60

boyutundadır. Benzetim modelinde kullanılan generatörler, kontrol ve uyarım sistemlerine ait nümerik veriler [36]'da verilmiştir.



Şekil 5. Düzenlenmiş 2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi tek hat şeması

Çizelge 1. Generatör durum değişkenleri

Sembol	Durum değişkeni
δ	Rotor açısı
ω	Rotor hızı
E'_q	q Eksenli geçici (transient) gerilim
ψ''_d	d Eksenli alt geçici (subtransient) akı
E'_d	d Eksenli geçici (transient) gerilim
ψ''_q	q Eksenli alt geçici (subtransient) akı

Benzetim modelinde, generatörlere lokal PSS kontrolör eklenmeden önce elde edilen doğrusal model ile yapılan modsal analizde toplam 48 moddan sönümlenme katsayısı %10'un altında olan 3 salınım modu belirlenmiştir. Çizelge 3'de verilen bu salınım modlarından iki tanesi lokal mod, bir tanesi ise alanlar arası moddur.

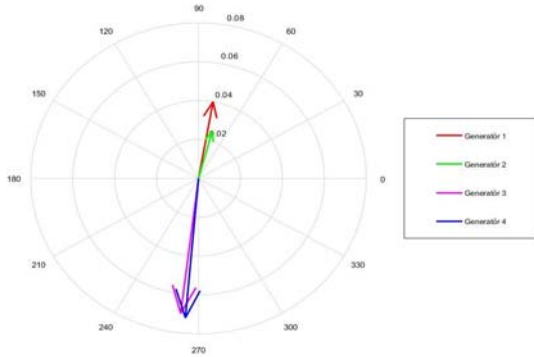
Çizelge 2. Generatör uyarım, tahrik ve kontrol sistemlerine ait durum değişkenleri

	Sembol	Durum değişkeni
Uyarıcı	V_TR	Gerilim transdüser çıkışı (pu)
	V_As	Regülatör gerilimi durum değişkenleri (pu)
	V_R	Regülatör çıkış gerilimi (pu)
PSS	pss1	Washout filtre durum değişkeni
	pss2	İlk ileri/geri kontrolörün durum değişkeni
	pss3	İkinci ileri/geri kontrolörün durum değişkeni
THR	tg1	Regülatör durum değişkeni
	tg2	Servo durum değişkeni
	tg3	Ara ısıtıcı (reheater) durum değişkeni

Çizelge 3. Salınım mod parametreleri

Mod tipi	Özdeğer	Salınım frekansı (Hz)	Sönümlenme katsayısı
Lokal mod 1	$-0.39 \pm j5.96$	0.94	0.06
Lokal mod 2	$-0.51 \pm j7.55$	1.2	0.06
Alanlar arası mod	$-0.09 \pm j2.06$	0.32	0.04

Şekil 6 ile verilen alanlar arası salınım moduna ait kompas çiziminde görüldüğü gibi aynı alanda bulunan generatör 1 ve generatör 2 diğer alanda bulunan generatör 3 ve generatör 4 ile salınım halindedirler.



Şekil 6. Alanlar arası salınım mod şeklinin kompas görünümü

Lokal modların sönümlenmesi için her bir generatöre transfer fonksiyonları (13) ile verilen lokal PSS kontrolörler eklenmiş ve modsal analiz tekrarlanmıştır. Çizelge 4’de görüldüğü gibi eklenen PSS’ler lokal modları başarıyla sönümlenmiş ama alanlar arası modun sönümlenmesi için yetersiz kalmışlardır.

$$\begin{aligned}
 H_{PSS_{G1}} &= 10 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.174s}{1+0.106s} \right)^2 \\
 H_{PSS_{G2}} &= 10 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.02s}{1+0.05s} \right) \left(\frac{1+3.5s}{1+5.4s} \right) \\
 H_{PSS_{G3}} &= 10 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.173s}{1+0.111s} \right)^2 \\
 H_{PSS_{G4}} &= 10 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.02s}{1+0.05s} \right) \left(\frac{1+3.5s}{1+5.4s} \right)
 \end{aligned} \quad (13)$$

Çizelge 4. PSS’ler eklendikten sonra belirlenen salınım mod parametreleri

Mod tipi	Özdeğer	Salınım frekansı (Hz)	Sönümleme katsayısı
Lokal mod 1	-0.4±j0.62	0.09	0.54
Lokal mod 2	-0.38±j0.61	0.97	0.52
Alanlar arası mod	-0.07±j2.52	0.4	0.02

Alanlar arası modun sönümlendirilmesi ve güç transferi için 7. ve 9. Bara arasındaki hattın orta noktasına TCSC eklenmiştir. Benzetimde TCSC’ye ait fazör modeli kullanılmıştır [37]. Eklenen TCSC kapasitif modda çalıştırılmakta ve hat empedansı kompanzasyonunu %40 seviyesinde sağlamaktadır. TCSC’ye ait dinamik veriler Çizelge 5 ile verilmiştir.

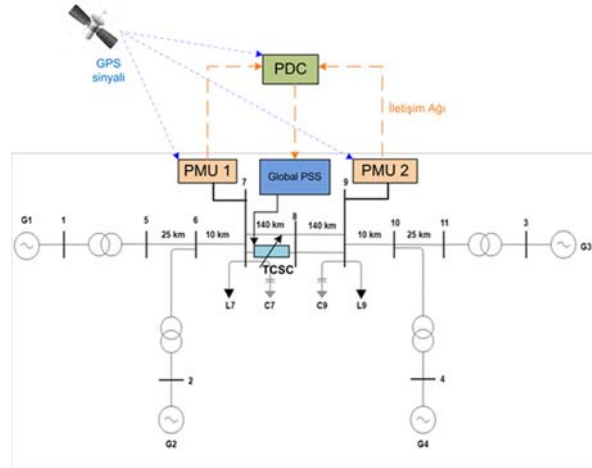
Çizelge 5. TCSC dinamik verileri

Açıklama	Sembol	Değer	Birim
Yüzdelerlik kompanzasyon		%40	
Kapasitans	C	45	µF
Endüktans	L	25	mH
X_L/X_C		0.16	
Rezonans frekansı	f_r	150	Hz
Ateşleme açısı	α	70°	
PI kontrolör kazancı	K_P	0.8	
PI kontrolör integral kazancı	K_I	4.6	

Yine alanlar arası modun sönümlenmesine katkıda bulunmak ve güç aktarımını artırabilmek için bir global PSS tasarlanmış ve güç sistemine Şekil 4’de gösterildiği gibi TCSC üzerinden eklenmiştir. TCSC referans sinyaline ek olarak uygulanan bu sinyalle beraber TCSC’nin dinamik denklemi Eşitlik 12’de verildiği şekilde değişmiştir. Global PSS tasarımı için artık faz yöntemi ile salınım modunun sönümlenmesi için gereken faz miktarı Eşitlik 10 ile verilen bağıntıda salınım moduna ait artık (residue) vektörünün hesaplanmasıyla belirlenir. Hesaplanan faz kazancını elde etmek için Eşitlik 7 ve 8’de verilen yöntem ile global PSS tasarımı yapılır. Benzetim modelinde 30° derecelik faz kazancı için tasarlanan global PSS’e ait transfer fonksiyonu Eşitlik 14 ile verilmiştir.

$$H_{GPSS} = 6 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+1.1s}{1+0.65s} \right)^2 \quad (14)$$

Global PSS’e giriş sinyali olarak alanlar arası salınımın gözlenebilirliğinin yüksek olduğu iki alan arasında aktarılan güç miktarı global sinyal olarak seçilmiştir. Global PSS’in de benzetim modeline eklenmesiyle geniş alan salınım sönümleme kontrol sistemi Şekil 7’de verilen yapıda oluşturulmuştur. Bu yapıda 7. ve 8. baralarda bulunan PMU’lar ile zaman etiketli ölçümlerin iletişim ağıyla PDC’ye gönderildiği, PDC’de zaman etiketlerine göre düzenlenen ölçümlerin yine iletişim ağı ile geniş alan sönümleme kontrolörü olarak tasarlanan global PSS’ye iletilmesi varsayılmıştır. Bu çalışmada iletişim ağı kaynaklı zaman gecikmesi ihmal edilmiştir. Zaman gecikmesinin sönümleme performansına etkisi ve bunun telafisi için gerçek zamanlı sistemlere uygun uyarlamalı bir kontrolör yapısı [31]’de önerilmiştir.



Şekil 7.2 alanlı 4 generatörlü model için TCSC tabanlı geniş alan salınım söndürme sistemi

Tasarlanan geniş alan sönümlenme kontrol sisteminin performans değerlendirilmesi için iki farklı arıza türünü içeren üç senaryo şu şekilde oluşturulmuştur;

Senaryo 1: 8. baradan 0.4 saniyelik faz-toprak arası kısa devre arızası uygulanmıştır.

Senaryo 2: Generatör 1'in referans voltajında 0.2 saniye boyunca %5'lik artış uygulanmıştır.

Senaryo 3: 9. baradan 0.4 saniyelik faz-toprak arası kısa devre arızası uygulanmıştır.

Uygulanan her senaryo için benzetim modelinde sadece lokal PSS'lerin aktif olduğu, lokal PSS ve

TCSC'nin aktif olduğu ve son olarak da bu kontrol elemanlarına global PSS'nin eklendiği durumlar için sönümlenme performansları, iki alan arasında iletilen güç miktarının zamanla değişimi kullanılarak belirlenmiştir. Performans değerlendirmeleri için salınım tepe değerleri, oturma zamanı (%5'lik bant), aktarılan güç miktarı, gibi kriterlerle beraber hata sinyali tabanlı performans fonksiyonlarından mutlak hata toplamı (IAE), hata karelerinin toplamı (ISE), zaman ağırlıklı mutlak hata toplamı (ITAE) ve zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı (ITSE) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6 ile verilmiştir.

Çizelge 6. Kontrolör yapılarının performans değerlendirmeleri

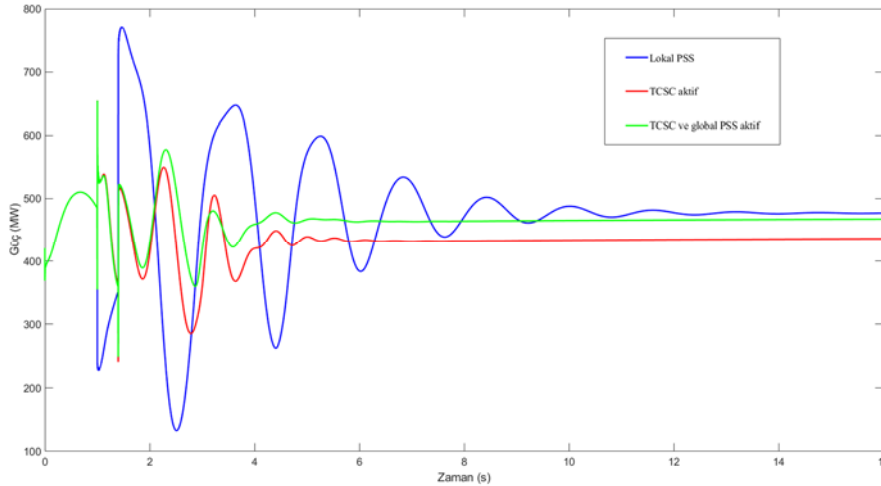
Senaryo	Kontrolör	Oturma zamanı (sn)	Aktarılan güç (MW)	Salınım tepe noktası (MW)	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Senaryo 1	Sadece lokal PSS	7.5	477	770	4.31	13.04	26.66	95.4
	TCSC aktif	2.9	435	654	1.32	1.68	1.34	1.68
	TCSC ve global PSS aktif	2.7	467	577	1	1	1	1
Senaryo 2	Sadece lokal PSS	6.1	475	548	1.41	1.98	1.29	1.82
	TCSC aktif	3.7	432	551	1.01	1.83	2.78	5.03
	TCSC ve global PSS aktif	3.1	477	518	1	1	1	1
Senaryo 3	Sadece lokal PSS	16	480	665	2.04	1.87	1	1
	TCSC aktif	8	432	813	1	1	1.67	1.23
	TCSC ve global PSS aktif	9.7	480	813	1.19	1.17	1.98	1.61

Senaryo 1:

Bu senaryoda alanlar arası salınım modunu tetiklemek için 8. baradan 0.4 saniyelik faz-toprak arası kısa devre arızası uygulanmıştır. Şekil 8'de uygulanan arıza sonrası benzetim sistemindeki alanlar arası güç aktarımı grafiği verilmiştir. Güç sisteminde sadece lokal PSS'lerin olduğu durumda beklenildiği gibi alanlar arası mod nedeniyle güç aktarımında tepe noktası 770 MW'a ulaşan salınımlar oluşmuş ve bu salınımın sönümlenmesi 7.5 sn (%5 lik oturma zamanı) sürmüştür. Sisteme TCSC eklendiğinde, alanlar arası güç aktarımındaki salınımın 2.9 saniyede sönümlendiği ve tepe noktasının 654 MW'a düştüğü görülmüştür. Ancak güç akış analizine göre 480 MW olması gereken aktarılan güç 435 MW seviyesinde kalmıştır. Güç aktarımındaki bu düşüşün ikinci alanın frekansının birinci alandan daha yüksek olması nedeniyle bu

alandaki reel güç ihtiyacının az olması nedeniyle olabileceği düşünülmektedir.

Global PSS'in sönümleme kontrolü için sisteme eklenmesiyle uygulanan arıza sonrası oluşan salınımın tepe noktası 577 MW'a düşmüş ve salınım 2.7 saniyede sönümlendirilmiştir. Alanlar arası aktarılan güç miktarı da 467 MW'a çıkmıştır. Hata sinyali tabanlı yapılan performans değerlendirmesinde IAE, ISE, ITAE ve ITSE kriterlerinin hepsine göre en etkili sönümleme performansının yine TCSC ve global PSS'in beraber kullanımı ile elde edildiği görülmüştür. Değerlendirilmesi yapılan benzetim sonuçlarına ait nümerik veriler Çizelge 6 ile verilmiştir. Çizelgede hata sinyali tabanlı değerlendirme kriterlerine ait değerler normalize edilerek verilmiştir.

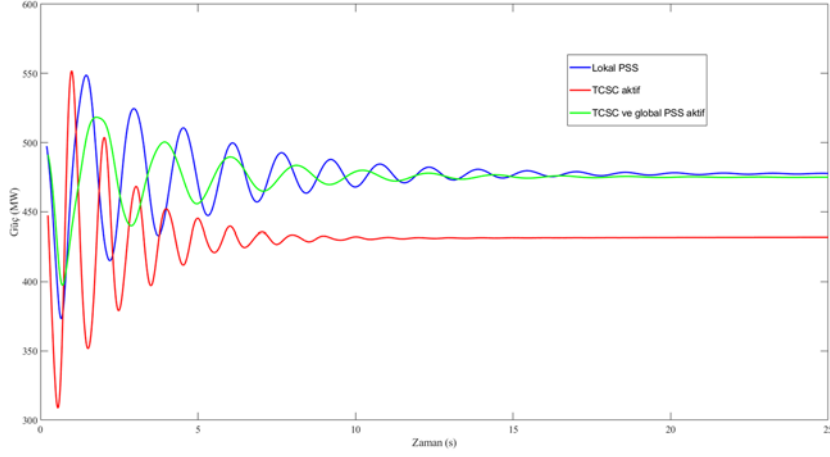


Şekil 8. Senaryo 1 ile elde edilen güç aktarımı

Senaryo 2:

Alanlar arası salınım modunun, generatör 1'in referans voltajındaki %5 artırılmasıyla tetiklendiği bu senaryoda gerçekleştirilen güç transferinin zamanla değişimi Şekil 9 ile verilmiştir. Güç sisteminde sadece lokal PSS'lerin aktif olduğu durumda tepe noktası 548 MW olan salınım 6.1 saniyede sönümlendirilmiştir. TCSC'nin aktifleştirilmesiyle salınımın sönümlendirilmesi 3.7 saniyeye düşürülmüş ancak salınım tepe değerinde bir iyileşme görülmemiştir. Aktarılan güç miktarı

ise Senaryo 1'de olduğu gibi azalmış ve 432 MW olarak gerçekleştirilmiştir. Global PSS kontrolörün güç sistemine eklenmesiyle güç aktarımı 477 MW'a çıkarılmıştır. Ayrıca salınım tepe noktası 518 MW'a düşürülmüş ve 3.1 saniyelik oturma zamanı ile daha etkili bir sönümleme performansı elde edilmiştir. TCSC ve global PSS'in birlikte kullanıldığı sönümleme kontrol sistemi IAE, ISE, ITAE ve ITSE kriterlerine göre de en iyi sönümleme performansına sahiptir.

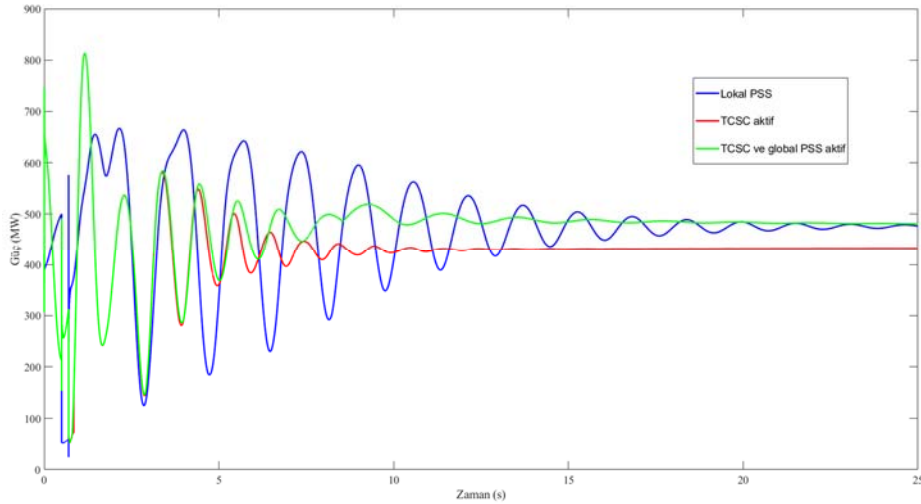


Şekil 9. Senaryo 2 ile elde edilen güç aktarımı

Senaryo 3:

Faz-toprak arası kısa devre arızasının 9. Baraya uygulanmasıyla oluşan alanlar arası güç aktarımı Şekil 10'da verilmiştir. Salınımın en hızlı sönümlendirilmesi 8 saniye ile TCSC'nin aktif olduğu durumda gerçekleşmiştir. Global PSS'in güç sistemine eklenmesiyle güç aktarımı

artırılabilmiş ancak salınım sönümlenme süresi 9.7 saniyeye çıkmıştır. Ayrıca salınım tepe noktaları hem TCSC'nin hem de global PSS'nin aktif olduğu iki durum içinde 813 MW olarak görülmüştür. TCSC, IAE ve ISE kriterlerine göre en etkili sönümleme performansı göstermiştir.



Şekil 10. Senaryo 3 ile elde edilen güç aktarımı

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, birbirlerine zayıf bağlantı hatları ile bağlı yüksek miktarda güç transferinin yapıldığı iki

alanda bulunan generatör gruplarının birbirlerine karşı salınımları ile meydana gelmekte olan alanlar arası salınımların sönümlendirilmesi için TCSC tabanlı bir geniş alan sönümleme kontrol sistemi

tasarımı yapılmış ve benzetim sonuçlarıyla performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Benzetim modeli olarak 2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi bazı parametreleri değiştirilerek kullanılmıştır. Performans başarımları üç farklı senaryo altında belirlenmiştir.

Benzetim modelinde hiçbir lokal kontrol elemanı yokken elde edilen doğrusal model ile yapılan modsal analizle iki tane lokal bir tane de alanlar arası mod belirlenmiştir. Generatörlere eklenen lokal PSS'ler, lokal modları sönümlendirmişler ancak alanlar arası modun sönümlendirilmesinde etkisiz olmuşlardır. Alanlar arası bağlantı hattının ortasına eklenen TCSC ile alanlar arası mod sönümlendirilmiş ancak güç aktarımı düşmüştür. Alanlar arası güç transferini artırmak ve salınım modunun sönümlenme performansını artırmak için bir global PSS artık faz metodu ile tasarlanmış ve TCSC'nin referans sinyali üzerinden sisteme eklenmiştir. PSS için global sinyal olarak alanlar arası aktarılan güç miktarı seçilmiştir. TSCS ve global PSS'in beraber kullanımıyla hem güç transfer miktarının artırıldığı hem de alanlar arası modun sönümlenme performansının iyileştirildiği belirlenen üç senaryodan ikisinde yapılan benzetimlerle gösterilmiştir. Senaryo 3'de global PSS, salınımın sönümlenmesini 9.7 saniyeye düşürse de TCSC'nin tek başına kullanıldığı durumdaki 8 saniyelik oturma zamanından daha yavaş bir performans gösterilmiştir. Bu durum salınım modunun gözlemlenebilirliğinin daha yüksek olduğu bir global sinyal seçimi ile telafi edilebilir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2018-2-TP2-2973 numaralı araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. IEEE Special Publication, 1995. Inter-area Oscillations in Power Systems (95-TP-101-1995).
2. Klein, M., Rogers, G.J., Kundur, P., 1991. A Fundamental Study of Inter-area Oscillations in

- Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 6(3), 914-921.
3. Heniche, A., Kamwa, I., 2002. Control Loops Selection to Damp Inter-area Oscillations of Electrical Networks. 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, USA, 240.
4. Aboul-Ela, A.S., McCalley, J., Fouad, A., 1996. Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals. IEEE Transactions on Power Systems, 11(2), 767-773.
5. Kamwa, I., Grondin, R., Hebert, Y., 2001. Wide-Area Measurement Based Stabilizing Control of Large Power Systems - A Decentralized/ Hierarchical Approach. IEEE Transactions on Power System, 16(1), 136-153.
6. Dobrescu, M., Grondin, R., Heniche, A., Kamwa, I., Lefebvre, D., Trudel, G., 2005. Assessing the Technical Value of FACTS-based Wide Area Damping Control Loops. 2005 IEEE PES General Meeting, 1636-1645.
7. Kundur, P., 1994. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, New York, 1176.
8. Paserba, J., 1996. Analysis and Control of Power System Oscillation. CIGRE Special Publication (38.01.07).
9. Chow, J.H., Larsen, E.V., Sanchez-Gasca, J. J., 1995. Concepts for Design of FACTS Controllers to Damp Power Swings, IEEE Transactions on Power Systems. 10, 948-955.
10. Chow, J., Ren, H., Sanchez-Gasca, J.J., Wang, S., 2000. Power System Damping Controller Design Using Multiple Input Signals. IEEE Control Systems Magazine, 20(4), 82-90.
11. Taranto, G.N., Chow, J.H., 1995. A Robust Frequency Domain Optimization Technique for Tuning Series Compensation Damping Controllers. IEEE Transactions on Power Systems, 10(3), 1219-1225.
12. Paserba, J.J., Miller, N.W., Larsen, E.V., Pivko, R.J., 1995. A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 10(3), 1471-1478.
13. Lei, X., Jiang, D., Retzmann, D., 2007. Stability Improvement in Power Systems with Non-linear TCSC Control Strategies. European Transactions on Electrical Power, 10, 339- 345.

14. Chaudhuri, B., Pal, B.C., 2004. Robust Damping of Multiple Swing Modes Employing Global Stabilizing Signals with a TCSC. IEEE Transactions on Power Systems, 19(1), 499-506.
15. Wivutbudsiri, S., Hongesombut, K., Rungrangpitayagon, J., 2014. Wide-area Power System Control Using Thyristor Controlled Series Capacitor Based Fuzzy Logic Controller Designed by Observed Signals. 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Chonburi, 1-4.
16. Prakash, A., Moursi, M.S.E., Parida S.K., El-Saadany, E.F., 2023. Design of Wide Area Damping Controller Based on Clustering of Inter-Area Oscillations. 2023 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies-Middle East (ISGT Middle East), Abu Dhabi.
17. Kumar, K., Prakash, A., Parida, S.K., 2023. Wide-Area Damping Controller Design with TCSC Using Active Disturbance Rejection Control. 2023 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET), London, 1-5.
18. Prakash, A., Singh, P., Kumar K., Parida, S.K., 2021. Design of TCSC Based Optimal Wide Area Power System Stabilizer for Low-Frequency Oscillation. 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Kuala Lumpur, 1-6.
19. Prakash, A., Moursi, M.S.E., Parida, S.K., Kumar K., El-Saadany, E.F., 2023. Damping of Inter-Area Oscillations With Frequency Regulation in Power Systems Considering High Penetration of Renewable Energy Sources. IEEE Transactions on Industry (Erken Görünüm)
20. Haugdal, H., Uhlen K., Jóhannsson, H., 2023. A Novel Phasor Power Oscillation Damper With Adaptive Phase Compensation, Achieved Using Multiple Model Adaptive Estimation. IEEE Transactions on Power Systems, 38(4), 3179-3188.
21. Prakash, A., Kumar, K., Parida, S.K., 2023. A Modal Transformation Approach to Design Reduced Order Functional Observer-Based WADC for Low-Frequency Oscillations. IEEE Transactions on Power Systems, 38(4), 3593-3604.
22. Yang, N., Liu Q., McCalley, J.D., 1998. TCSC Controller Design for Damping Interarea Oscillations. IEEE Transactions on Power Systems, 13(4), 1304-1310.
23. Cai, L.J., Erlich, I., 2005. Simultaneous Coordinated Tuning of PSS and FACTS Damping Controllers in Large Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 20, 294-300.
24. Davalos, R.J., Ramirez, J.M., Valenzuela, V., 2000. Coordination of FACTS-based Stabilizers for Damping Oscillations. IEEE Power Engineering Review, 20, 46-49.
25. Dotta, D., Decker, I.C., Silva, A.S., 2008. Wide-area Measurements-based Two-level Control Design Considering Signal Transmission Delay. IEEE Trans. Power Syst., 24(1), 208-216.
26. Chaudhuri, B., Majumder, R., Pal, B.C. 2007. Implementation and Test Results of a Wide-area Measurement-based Controller for Damping Interarea Oscillations Considering Signal-transmission Delay. IET Gener Trans Distr, 1(1), 1-7.
27. Chaudhuri, B., Majumder, R., Pal, B. 2004. Wide-Area Measurement-based Stabilizing Control of Power System Considering Signal Transmission Delay. IEEE Transactions on Power Systems, 19(4), 1971-1979.
28. Beiraghi, M., Ranjbar, A., 2016. Adaptive Delay Compensator for the Robust Wide-area Damping Controller Design. IEEE Transactions on Power Systems 31(6), 4966-4976.
29. Zhang, S., Vittal, V., 2014. Design of Wide-Area Damping Control Robust to Transmission Delay Using μ -synthesis Approach. 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, IEEE, 1-5.
30. Chow, J.H., Ghiocel, S.G., 2012. An Adaptive Wide-Area Power System Controller using Synchrophasor Data, Book Chapter in Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids. Springer, Power Electronics and Power Systems, 3(3), 327-342, 371.
31. Başel, M.B., Mete, A.N., 2022. An Adaptive Network Latency Compensator Design for Wide Area Damping Control of Power System

- Oscillations. *Electrical Engineering*, 36(2), 2793-2803.
32. Sanchez-Gasca, J.J. (Ed)., 2012. Identification of Electromechanical Modes in Power Systems”, IEEE Task Force Report, Special Publication (TP462).
 33. Pagola, F.L., Perez-Arriaga, I.J., Verghese, G.C., 1989. On Sensitivities, Residues and Participations: Applications to Oscillatory Stability Analysis and Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4, 278-285.
 34. Hamdan, A.M.A., Elabdalla A.M., 1988. Geometric Measures of Modal Controllability and Observability of Power System Models. *Electric Power System Research*, 15, 147-155.
 35. Heniche, A., Kamwa, I., 2008. Assessment of Two Methods to Select Wide-Area Signals for Power System Damping Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2), 572-581.
 36. Başel, M.B., 2019. Alanlar Arası Salınım Sönümlenmesi için TCSC ve PSS Tabanlı İki Farklı Geniş Alan Kontrol Sistemi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elk-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin, 73.
 37. Jovicic, D., Pillai, G.N., 2005. Analytical Modeling of TCSC Dynamics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), 1097-1104.

Production of Hydrogel with Alginate and Pericardial Fluid for use in Tissue Engineering Applications

Dilek SÖNMEZER AÇIKGÖZ*¹ ORCID 0000-0002-9017-2943
Fatma LATİFOĞLU² ORCID 0000-0001-7582-7537

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, Adana, Türkiye

²Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, Kayseri, Türkiye

Geliş tarihi: 02.10.2023 Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: SÖNMEZER AÇIKGÖZ, D., LATİFOĞLU, F., (2023). Production of Hydrogel with Alginate and Pericardial Fluid for use in Tissue Engineering Applications. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 1077-1082.

Abstract

Hydrogels are used in the treatment of soft tissue damage, controlled drug release systems, tissue/organ production with 3D bioprinters, smart material production, and many other tissue engineering studies. Although polymers obtained from natural polymers or synthetically produced polymers are used in hydrogel production, they may have various biocompatibility problems. In this study, Pericardial fluid structure (PFS) was used to increase the biocompatibility of the alginate and was used in the production of bioink for use in 3D bioprinters. PFS is a structure isolated from pericardial fluid (PF) and consists of complex components that are very similar to natural Extracellular Matrix (ECM) both morphologically and in content. According to the results of SEM images, the collagen-elastin fiber network was clearly observed in the groups with PFS added, since PFS contains high levels of collagen and elastin proteins. It was concluded that the biocompatibility of the material was also increased thanks to the structure similar to the natural ECM in the alginate hydrogels with PFS added.

Keywords: Alginate, Pericardial fluid, Hydrogel, 3D bioprinter, Tissue engineering

Doku Mühendisliği Uygulamalarında Kullanılmak üzere Aljinat ve Perikardiyal Sıvı ile Hidrojel Üretimi

Öz

Yumuşak doku hasarının tedavisinde, kontrollü ilaç salınım sistemlerinde, 3D biyoyazıcılarla doku/organ üretiminde, akıllı malzeme üretiminde ve daha pek çok doku mühendisliği çalışmalarında hidrojeller kullanılmaktadır. Doğal polimerlerden elde edilen polimerler ya da sentetik olarak üretilen polimerler hidrojel üretiminde kullanılıyor olmasına rağmen çeşitli biyouyumluluk problemleri taşıyabilmektedir. Bu çalışmada 3D biyoyazıcılarda biyomürekkep üretiminde kullanılan aljinatın biyouyumluluğunu artırmak için Pericardial fluid structure (PFS) kullanılmıştır. PFS Perikardiyal sıvıdan (PF) izole edilen bir yapı olup

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Dilek SÖNMEZER AÇIKGÖZ, dsonmezer@cu.edu.tr

doğal Ekstrasellüler Matrikse (ECM) hem morfolojik hem de içerik olarak çok benzeyen kompleks bileşenlerden oluşmaktadır. Dondurarak kurutulmuş olan PFS değişen oranlarda aljinat ile karıştırılarak oluşturulan grupların karşılaştırması ve analizi için SEM görüntüleme yapılmıştır. SEM görüntüleri sonuçlarına göre PFS yüksek oranda kolajen ve elastin proteini içerdiği için kolajen-elastin fiber ağı PFS eklenen gruplarda belirgin bir şekilde gözlenmiştir. PFS eklenen aljinat hidrojellerinde doğal ECM'ye benzeyen yapı daha iyi oluşturularak malzeme biyoyoumluluğunun da artırıldığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aljinat, Pericardiyal sıvı, Hidrojel, 3D biyoyazıcı, Doku mühendisliği

1. INTRODUCTION

3D bioprinters are one of the tissue engineering methods widely used in artificial tissue/organ production. Bioprinting requires a structure that allows cell viability and proliferation and best mimics native ECM. Hydrogels are used in the production of bio-inks for bioprinting by providing 3D and hydrophilic properties, as well as cell viability, cell proliferation, differentiation, and interaction with other cells. Hydrogels are three-dimensional polymer materials that contain high amounts of water and maintain their structural integrity through physical and chemical cross-links between polymer chains. The water retention potential of hydrogels is due to their hydrophilic structure and cross-links in their structure [1].

Hydrogels have a wide range of applications in the medical field, with properties such as swelling-shrinkage, response to stimuli, liquid-gel transitions, shape memory, and protection of biomolecules or drugs from the external environment [2]. Additionally, it is used as bioink for 3D bioprinters due to its similarities to natural ECM and its ability to create a three-dimensional environment for cells [1-3]. Natural polymers such as alginate, chitosan, collagen, fibrin, hyaluronic acid, and synthetic polymers such as PEO, PEG, polyvinyl alcohol (PVA), and polyacrylic acid (PAA) can be used in the production of hydrogels. Hydrogels are made of synthetic and natural polymers. With their biodegradation, bioabsorption, mechanical properties, and high biocompatibility, they are widely used in tissue engineering as drug release materials, wound dressing materials, bioinks, and scaffolds for bioprinters [1,4,5].

Hydrogels are generally produced by using natural ECM components, which are collagen, hyaluronic

acid, elastin, and fibrin, or by using Matrigel as a commercial product. Matrigel is extracted from mouse tumor cells, which include a protein source. In addition, hydrogels can be produced by using decellularized tissues that are enzymatically broken down and gelling at appropriate pH or temperature values [6,7].

Collagen, gelatin, fibrin, elastin, chitosan, and alginate, which are natural polymers, are widely used in tissue engineering studies due to their biocompatibility. Natural polymers are used together with synthetic polymers because their structures can be damaged during the production phase, their degradation is rapid, and they are mechanically weak polymers. Synthetic polymers are preferred due to their high mechanical strength, ease of manipulation, and slow degradation. Polyurethane (PU), PEG, PGA, PLGA, polyvinyl alcohol (PVA), PLA, and PCL are synthetic polymer types used in tissue engineering studies [8,9].

Due to their similarity to natural ECM, gelatin-containing hydrogel structures such as chitosan-gelatin, fibrin-gelatin, alginate-gelatin, and dextran-gelatin are also used in tissue engineering studies [10-12]. Alginate, a hydrophilic, anionic, and linear polymer, is a polysaccharide obtained from brown seaweed. Alginate consists of subunits of mannuronic acid (M) and glucuronic acid (G) [13-15]. G monomer blocks in the structure of alginate react with divalent cations (Ca²⁺, Mg²⁺, Ba²⁺, or Sr²⁺), forming cross-links, and gelation occurs [1,16-21].

Alginate is used in many biomedical applications such as cell encapsulation, tissue engineering, and drug delivery due to its gel-forming ability, hydrophilic structure, low toxicity, lack of

immunological effects, and lack of resources [22,23]. Because alginate allows cell growth and has high biocompatibility, it is also used to create 3D scaffolds in bioprinting studies [15,24]. In order to increase cell growth and proliferation, alginate can be used by mixing with other biocompatible materials such as collagen, chitosan, and fibrin [25-29]. The definition of PFS, a PF component, was first introduced in a study conducted in 2023. In that study, it was shown that PFS has similarities to native ECM according to morphological and contained materials [30]. In this study, hydrogel groups produced by mixing alginate and PFS in varying proportions. Groups of hydrogels for the production of bioinks for use in 3D bioprinting were compared and analyzed.

2. MATERIAL AND METHOD

The harvesting of PF from bovine hearts and isolation PFS from the PF was described in our previous studies [31-34]. PFS samples were frozen at -80°C before being freeze-dried in a freeze drier (Alpha 1-2 LD Plus, Martin. Christ, Germany).

2.1. Preparation of Hydrogels Samples

Freeze-dried PFS was dissolved in varying amounts (50, 100, and 150mg) in Dulbecco's PBS (DPBS) purchased from Thermo Fisher Scientific (USA) and mixed with 3% Alginate (A) (Alginic Acid Sodium Salt, Sigma, Germany) solution. Thus, four different hydrogel groups were formed: A, A-50mg PFS, A-100mg PFS, and A-150mg PFS. The Alginate (A) hydrogel was used as a control for comparison with the PFS-added hydrogel groups. Alginate and alginate-PFS hydrogels were synthesized by cross-linking reactions. After preparing the hydrogel solution, the hydrogels were cross-linked in CaCl_2 (2%; v/v) for 15 min [35,36].

Figure 1 shows the flow images showing the formation of the hydrogel structure obtained from A-PFS solutions. Firstly, A-PFS hydrogel solutions were prepared, and then the gelation processes were done for all hydrogel groups.

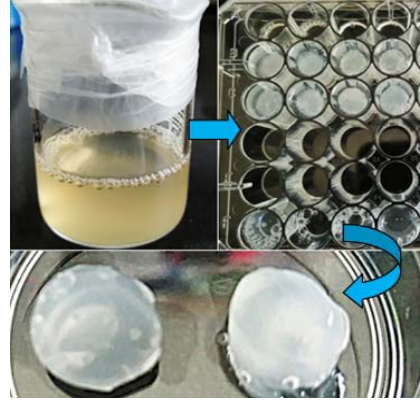


Figure 1. Images of the production of A-PFS hydrogel structures.

2.2. SEM Imaging of Hydrogels

Scanning electron microscopy (SEM) was used for imaging and examining the microarchitecture of the hydrogels. Hydrogel samples were frozen at -80°C before being freeze-dried in a freeze drier (Alpha 1-2 LD Plus, Martin. Christ, Germany). After freeze drying to hydrogel samples were mounted onto microscope stubs and coated with gold (3-6 nm). SEM images (SEM; Evo ls-10 Life Science Zeiss, Germany) were taken at 500x and 2500x magnification with a resolution of 1024x768 in 8-bit grayscale.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the present study, the morphology of hydrogels was observed by SEM. SEM images of hydrogel groups are shown in Figure 2.

Figure 2.a-b shows the SEM image of the honeycomb-like porous structure of the hydrogel prepared using alginate. The alginate hydrogel structure consists of a porous and very smooth morphology. Figure 2.c-d shows that although PFS is mixed homogeneously with alginate in the A-50mg PFS hydrogel, its amount is low. In Figure 2.e-f, although PFS is seen more densely in the A-100mg PFS hydrogel compared to the previous group, PFS fiber networks are not seen much. Figure 2.g-h shows that PFS is more dense and homogeneously distributed in a porous structure in

the A-150mg PFS hydrogel. Additionally, the PFS fiber network appears to be very clearly dispersed within the hydrogel. It is seen that the PFS distribution in the A-50mg PFS and A-100mg PFS hydrogel groups is less due to the amount. SEM images show that the PFS distribution is better in the A-150mg PFS hydrogel. The PFS fiber networks are composed of collagen, elastin, fibrinogen, glycosaminoglycans (GAGS), and proteoglycans [30]. These collagen fiber networks can be seen in detail in our previous study, in which PFS was characterized and analyzed.

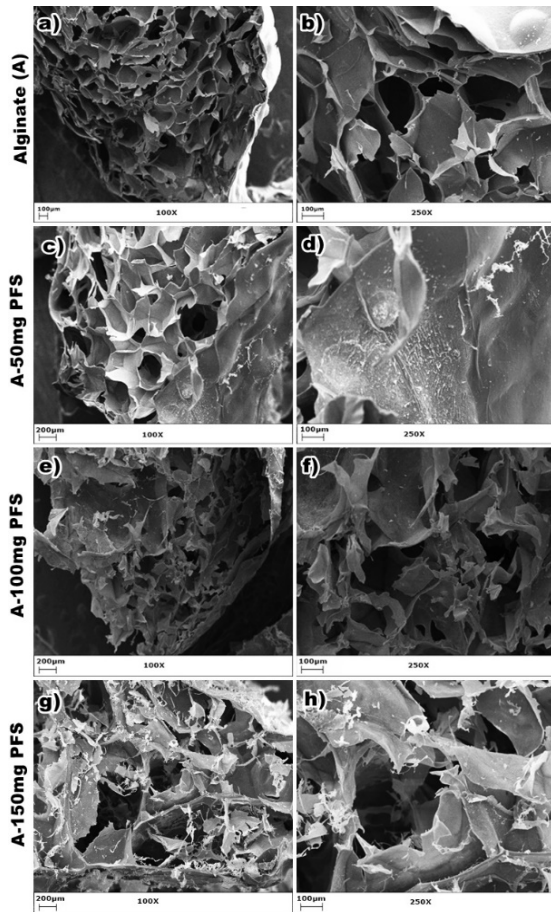


Figure 2. SEM images of hydrogel groups. a, b; SEM images of Alginate (A) hydrogel. c, d; SEM images of A-50mg PFS; e, f; SEM images of A-100mg PFS; g, h; SEM images of A-150mg PFS hydrogels with magnification at 100x and 250x.

4. CONCLUSION

In our previous study, pericardial fluid was characterized and analyzed, which has similarities to native ECM. That study demonstrated that PF includes collagen types I, III, and IV, elastin, fibrin, fibrinogen, GAGs, proteoglycans, and albumin. In addition to similarities in content, PF also has morphological similarities to native ECM [30].

In this study, we pretended to use PF in hydrogel production and also show that it can be used as a natural biomaterial. PFS was used for the production of hydrogel to increase the biocompatibility of alginate, which is widely used in bioink production in 3D bioprinters. When the SEM images of the hydrogel groups produced by adding varying amounts of PFS were examined, the hydrogels produced using alginate had a smooth and porous structure, while the hydrogel groups with PFS added had a rough structure consisting of porous and fiber networks. Additionally, it was observed that as the amount of PFS increased, the density of the PFS fiber network in the hydrogel structure also increased. Thus, by increasing cell adhesion in the cell-laden bioink produced using PFS, it will be possible to create the desired tissue with 3D bioprinters, allowing cell proliferation, differentiation, and migration. PFS, the PF component, has the potential to be used not only in 3D bioprinters but also as a natural biomaterial in various tissue engineering studies and as a scaffold to mimic natural ECM.

5. ACKNOWLEDGMENT

This study produced from doctoral thesis. This work was supported by the Scientific Research Projects Unit of Erciyes University with the project ÖNAP, FOA-2016-6692, Turkey. We would like to thank Erciyes University Genome and Stem Cell Centre (GENKOK) and Nanotechnology Centre (ERNAM) in Turkey.

6. REFERENCES

1. Drury, J.L., Mooney, D.J., 2003. Hydrogels for Tissue Engineering: Scaffold Design Variables and Applications, *Biomaterials*, 24, 4337-4351.

2. Wu, C.J., Gaharwar, A.K., Chan, B.K., Schmidt, G., 2011. Mechanically Tough Pluronic F127/Laponite Nanocomposite Hydrogels from Covalently and Physically Cross-Linked Networks. *Macromolecules*, 44(20), 8215-8224.
3. Tibbitt, M.W., Anseth, K.S., 2009. Hydrogels as Extracellular Matrix Mimics for 3D Cell Culture. *Bioengineering and Biotechnology*, 103, 655-63.
4. Pawan, P., Mayur, P., Ashwin, S., 2011. Role of Natural Polymers in Sustained Release Drug Delivery System: Applications and Recent Approaches. *International Research Journal of Pharmacy*, 2(9), 6-11.
5. Hoffman, A.S., 2002. Hydrogels for Biomedical Applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 54(1), 3-12.
6. Zhang, Y., Dai, J., Yan, L., Sun, Y., 2020. Intra-Articular Injection of Decellularized Extracellular Matrices in the Treatment of Osteoarthritis in Rabbits. *PeerJ*, 8, e8972.
7. Peña, B., Laughter, M., Jett, S., Rowland, T.J., Taylor, M., Mestroni, L., Park, D. 2018. Injectable Hydrogels for Cardiac Tissue Engineering. *Macromolecular Bioscience*, 18(6), e180079.
8. Awad, N.K., Niu, H., Ali, U., Morsi, Y.S., Lin, T., 2018. Electrospun Fibrous Scaffolds for Small-Diameter Blood Vessels: A Review. *Membranes*, 8(1), 15.
9. Sankaran, K.K., Krishnan, U.M., Sethuraman, S., 2014. Axially Aligned 3D Nanofibrous Grafts of PLA-PCL for Small Diameter Cardiovascular Applications. *Journal of Biomaterials Science*, 25(16), 1791-1812.
10. Yahia, L., 2015. History and Applications of Hydrogels. *Journal of Biomedical Sciences*, 4(2), 13.
11. Das, S., Pati, F., Choi, Y.J., Rijal, G., Shim, J. H., Kim, S.W., Ray, A.R., Cho, D.W., Ghosh, S. 2015. Bioprintable, Cell-Laden Silk Fibroin-Gelatin Hydrogel Supporting Multilineage Differentiation of Stem Cells for Fabrication of Three-Dimensional Tissue Constructs. *Acta Biomaterialia*, 11, 233-246.
12. Sanmartín-Masiá, E., Poveda-Reyes, S., Gallego Ferrer, G., 2017. Extracellular Matrix-Inspired Gelatin/Hyaluronic Acid Injectable Hydrogels. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 66(6), 280-288.
13. Augst, A.D., Kong, H.J., Mooney, D.J., 2006. Alginate Hydrogels as Biomaterials. *Macromolecular Bioscience*, 6(8), 623-633.
14. Grant, G.T., Morris, E.R., Rees, D.A., Smith, P.J.C., Thom, D., 1973. Biological Interactions Between Polysaccharides and Divalent Cations: The Egg Box Model. *FEBS Letters*, 32, 195-198.
15. Kulseng, B., Skjåk-Braek, G., Ryan, L., Andersson, A., King, A., Faxvaag, A., Espevik, T., 1999. Transplantation of Alginate Microcapsules: Generation of Antibodies Against Alginates and Encapsulated Porcine Islet-Like Cell Clusters. *Transplantation*, 67, 978-984.
16. Paige, K.T., Cima, L.G., Yaremchuk, M.J., Vacanti, J.P., Vacanti, C.A., 1995. Injectable Cartilage. *Plastic Reconstructive Surgery*, 96, 1390-1400.
17. Paige, K.T., Cima, L.G., Yaremchuk, M.J., Schloo, B.L., Vacanti, J.P., Vacanti, C.A., 1996. De Novo Cartilage Generation Using Calcium Alginate-Chondrocyte Constructs. *Plastic Reconstructive Surgery*, 97, 168-180.
18. Skjak-Braerk, G., Grasdalen, H., Smidsrod, O., 1989. Inhomogeneous Polysaccharide Ionic Gels. *Carbohydrate Polymers*, 10, 31-54.
19. Saul, J.M., Williams, D.F., 2011. Hydrogels in Regenerative Medicine. In: Modjarrad K, Ebnesajjad S, Editors. *Handbook of Polymer Applications in Medicine and Medical Devices*. Elsevier; 279-302.
20. Venkatesan, J., Bhatnagar, I., Manivasagan, P., Kang, K.H., Kim, S.K., 2015. Alginate Composites for Bone Tissue Engineering: A Review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 269-281.
21. Wang, Y., 2018. Programmable Hydrogels. *Biomaterials*, 178, 663-680.
22. Gombotz, W.R., Wee, S.F., (1998). Protein Release from Alginate Matrices. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 31, 267-285.
23. Lee, K.Y., Mooney, D.J., 2012. Alginate: Properties and Biomedical Applications. *Prog. Polym. Sci.*, 37, 106-126.

24. Leone, G., Torricelli, P., Chiumiento, A., Facchini, A., Barbucci, R., (2008) Amidic Alginate Hydrogel for Nucleus Pulposus Replacement. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 84(2), 391-340.
25. Venkatesan, J., Jayakumar, R., Anil, S., Chalisserry, E.P., Pallela, R., Kim, S.-K., 2015. Development of Alginate-Chitosan-Collagen Based Hydrogels for Tissue Engineering. *Journal of Biomaterials and Tissue Engineering*, 5, 458-464.
26. Montalbano, G., Toumpaniari, S., Popov, A., Duan, P., Chen, J., Dalgarno, K., Scott, W.E., Ferreira, A.M., 2018. Synthesis of Bioinspired Collagen/Alginate/Fibrin Based Hydrogels for Soft Tissue Engineering. *Materials Science and Engineering: C, Materials for Biological Applications*, 91, 236-246.
27. Yang, X., Lu, Z., Wu, H., Li, W., Zheng, L., Zhao, J., 2018. Collagen-Alginate as Bioink for Three-Dimensional (3D) Cell Printing Based Cartilage Tissue Engineering. *Materials Science and Engineering: C, Materials for Biological Applications*, 83, 195-201.
28. Mahou, R., Vlahos, A.E., Shulman, A.S., Sefton, M.V., 2018. Interpenetrating Alginate-Collagen Polymer Network Microspheres for Modular Tissue Engineering. *American Chemical Society. Biomaterials Science and Engineering*, 4(11), 3704-3712.
29. Kim, G., Ahn, S.H., Kim, Y., Cho, Y., Chun, W., 2011. Coaxial Structured Collagen-Alginate Scaffolds: Fabrication, Physical Properties, and Biomedical Application for Skin Tissue Regeneration. *Journal of Materials Chemistry*, 21, 6165-6172.
30. Sönmezer, D., Latifoğlu, F., Toprak, G., Baran, M., 2023. A Native Extracellular Matrix Material for Tissue Engineering Applications: Characterization of Pericardial Fluid. *J Biomed Mater Res.*, 111(9), 1629-1639.
31. Sönmezer, D., Latifoglu, F., Toprak, G., Düzler, A., Işoglu, I.A., 2021. Pericardialfluid and Vascular Tissue Engineering: A Preliminary Study. *BiomedMater Eng.*, 32(2), 101-113.
32. Sönmezer, D., Latifoglu, F., Işoglu, I.A., Düzler, A., Toprak, G., Ceylan, D., 2016. Vascular Tissue Production by Using Cell Component and Biomaterial. *Med Technol Cong (Tıptekno'16)*, 205-208.
33. Latifoglu, F., Sönmezer, D., Toprak, G., Düzler, A., Işoglu, I.A., Ceylan, D., 2018. Cell Isolation from Bovine Pericardial Fluid and Culturing for Next Tissue Engineering Applications. *Eurasia Proc Sci Technol Eng Math.*, 4, 224-229.
34. Sönmezer, D., Latifoglu, F., Toprak, G., Düzler, A., 2019. Effect of Vascular Endo-Thelial Growth Factor (VEGF) on Cells Isolated From Pericardial Fluid. *Med. Technol Cong.*, 177-180.
35. Hvass, U., O'Brien, M.F., 1998. The Stentless Cryolife-O'Brien Aortic Porcinexenograft: A Five-Year Follow-up. *Ann Thorac Surg.*, 66, 134-138.
36. Garlick, R.B., O'Brien, M.F., 1997. The CryoLife-O'Brien Composite Stentlessporcine Aortic Xenograft Valve in 118 Patients. *Jpn Circ J.*, 61, 682-686.

Wideband Channel Estimation with Imperfect Hardware for Reconfigurable Intelligent Surfaces

Eren BALEVİ*¹ ORCID 0000-0002-2097-051X

¹Middle East Technical University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics, Ankara, Türkiye

Geliş tarihi: 12.06.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: BALEVİ, E., (2023). Wideband Channel Estimation with Imperfect Hardware for Reconfigurable Intelligent Surfaces. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 1083-1091.

Abstract

Channel estimation is central part of reconfigurable intelligent surface (RIS) aided communication for active and passive beamforming. The primary challenge behind channel estimate is large dimensionality stemming from not only massive number of RIS elements but also many antennas in base station. Large dimensionality leads to excessive usage of pilot tones for OFDM signals implying high overhead and decreased throughput. To alleviate the high usage of pilots for channel estimation, in this study we propose to have a low complexity transmitter at the RIS simplified with an aggressive clipping policy and a robust channel estimator against clipping. For robust channel estimation, a generative machine learning model is adapted to exploit prior information to compensate the information loss due to clipping. The simulation results clearly indicate that the proposed estimator has quite a large resiliency for clipped transmitted signals as compared to linear channel estimators.

Keywords: Channel estimation, Reconfigurable intelligent surface, Machine learning, Clipping

İdeal Olmayan Donanıma Sahip Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzeyler için Geniş Bant Kanal Kestirimi

Öz

Kanal kestirimi, aktif ve pasif huzme oluşturma amaçlı kullanılan yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler (RIS) destekli iletişimin merkezi bir parçasıdır. Kanal kestiriminin arkasındaki temel zorluk, çok fazla RIS öğelerinden ve aynı zamanda baz istasyonundaki birçok antenden kaynaklanan büyük boyutluluktur. Büyük boyutluluk, OFDM sinyalleri için pilot tonların aşırı kullanımına yol açar, bu da fazla ek yük ve azalan veri hızı anlamına gelir. Kanal kestiriminde pilotların fazla kullanımını azaltmak için bu çalışmada, RIS'de düşük karmaşıklığa sahip bir vericiye sahip olmak için agresif bir kırpma politikası ve kırpmaya karşı dayanıklı bir kanal kestirimi öneriyoruz. Dayanıklı kanal tahmini için, kırpmadan kaynaklanan bilgi kaybını telafi etmek üzere önceki bilgileri kullanan üretken bir makine öğrenimi modeli uyarlanmaktadır. Simülasyon sonuçları, önerilen kanal kestiriminin, doğrusal kanal kestirimleri ile karşılaştırıldığında kırılmış iletilen sinyaller için oldukça büyük bir esnekliğe sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kanal kestirimi, Yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler, Makine öğrenimi, Kırpma

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Eren BALEVİ, abalevi@metu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Optimizing propagation environments via deploying reconfigurable intelligent surface (RIS) on various objects have spurred great interest for achieving diverse communication objectives, including coverage, capacity and energy efficiency [1]. RIS can be viewed as a planar array, implemented either with reflect arrays [2] or metamaterials [3], consisting of many nearly-passive discrete elements. By adjusting the amplitude and phase of these elements according to wireless channels in real-time, the incident signals on RIS are constructively reflected to be aligned with the main data streams between a base station and users while eliminating interference by destructively reflecting signals to non-intended receivers. This reflection based passive beamforming obviously enhances the received signal power at the expense of increased pilot overhead due to the need for channel state information (CSI) between RIS and a base station as well as RIS and users.

The existing approaches to acquire CSI have centered on estimating cascaded user-RIS-base station channel, i.e., the end-to-end channel from a user to a base station through a RIS at the base station with a least-squares (LS) estimator [4-6], minimum mean square error (MMSE) estimator [7], and compressed-sensing algorithms [8,9]. Although estimating the concatenated end-to-end channels is usually sufficient to obtain the beamformers [5], this leads to lengthy pilot sequences mainly because of the large dimensional channel between base station and RIS. Furthermore, many papers model the overall RIS as completely passive. As opposed to these, RIS is designed nearly-passive [1], meaning that although RIS elements do not have a dedicated transmitter and receiver, there can be a separate low complexity transmitter and receiver module to communicate with a central station to periodically obtain the appropriate amplitude and phase shift values of each element.

The main contribution of this paper is to design a channel estimator if there exists a low-complexity transmitter in the RIS. Our approach is quite different than [10], which suggests to employ a

number of receivers for some RIS elements. Our motivation behind having a transmitter instead of a receiver at the RIS side is to communicate one pilot symbol per transmitter irrespective of the number of base station antennas and move the signal processing complexity out of RIS. Once the channel matrix between a base station and RIS is estimated, the other channels can be estimated relatively easily with a few pilots.

In this work, we first propose a low-complexity transmitter model with imperfect hardware that is placed in the RIS. Then, we develop a hardware-aware channel estimator motivated by the fact that the performance of LS and MMSE estimators deteriorates quite a lot at low complexity hardware [11-12]. Lastly, we show the energy efficiency of our proposed approach and provide the related simulation results.

2. SYSTEM MODEL

In an RIS-aided communication system, a base station can accommodate multiple users by ensuring a certain data rate to each user if the elements of the RIS are optimized properly to constructively reflect the main data streams in addition to the beamformers in the base station. We assume that a base station equipped with M antenna elements communicates with U single antenna users via an RIS with N elements over K subcarriers where $U \ll M \ll N$.

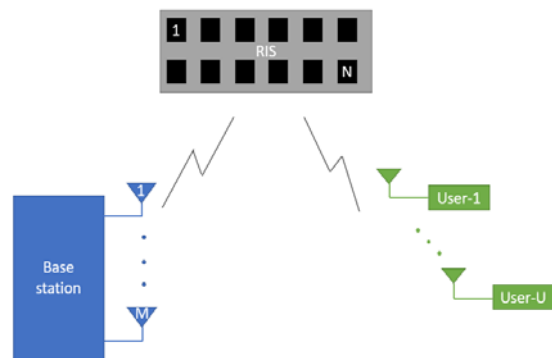


Figure 1. The system model that has a base station with M antennas, U number of single-antenna users and an RIS with N elements.

To estimate the uplink channel in Figure 1, e.g., the channel from a user to the base station, the received signal in the frequency domain for the k^{th} subcarrier can be expressed as

$$R_k = (D_k + H_k \Theta G_k) Y_k^{1/2} X_k + V_k \quad (1)$$

where D_k is the $M \times U$ matrix due to the direct channel between all the users and the base station, H_k is the $M \times N$ channel matrix between the RIS and the base station, and G_k is the $N \times U$ channel matrix between the RIS and all the users. Further, Y_k is a $U \times U$ diagonal matrix, whose diagonals represent the transmitted power at the k^{th} subcarrier for the u^{th} user, and X_k is the $U \times 1$ transmitted signal vector. The zero mean Gaussian noise vector is denoted as V_k with variance σ_n^2 .

Each RIS element is decomposed as

$$\theta_n = \beta_n \exp(j\phi_n) \quad (2)$$

where ϕ_n denotes the phase shift value selected from a finite set and $\beta_n \in [0, 1]$ is the attenuation. This constitutes the diagonal matrix

$$\Theta = \begin{pmatrix} \theta_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \theta_N \end{pmatrix} \quad (3)$$

to adjust the amplitude and phase of each RIS element in equation (1). The fundamental challenge to optimize the matrix Θ in equation (1) lies in estimating the channels D_k , H_k , G_k . Notice that this leads to sending at least $N + 1$ pilot vector per coherence time with the classical LS or LMMSE estimators [4], [7]. Such a pilot overhead dramatically decreases data rate and hence energy efficiency since $N \gg 1$, and can even override the benefits of deploying an RIS to support the weaker links.

Optimizing the matrix Θ requires channel estimation. In this study, we focus on estimating H_k for $k = 1, \dots, K$ with reasonable number of pilots. This is challenging due to large dimensionality. Our methodology to tackle this problem is as follows:

- Employ a low-complexity transmit RF chain at the RIS side, and
- Send a single pilot tone per coherence bandwidth from this transmitter.

Since it is not plausible to have a sophisticated transmitter at the RIS, we need simple transmit architecture and hence developing a robust channel estimator against hardware impediments is mandatory to estimate the channel between an element of the RIS and the BS, i.e., n^{th} column of H_k which is a $M \times 1$ vector denoted by $H_{k,n}$.

Note that after estimation of $H_{k,n}$ the entire channel matrix H_k can be found in many different ways without sending any pilots from the other RIS elements. One typical approach is to make use of compressed sensing [10]. Additionally, a few transmit RF chains can be utilized instead of a single transmit RF to make a compromise between finding the missing entires of the channel more accurately versus having slighty more hardware cost at the RIS. It is trivial to adapt all the proposed ideas in case of there is a few transmit RF chains. Optimizing this number and finding more efficient methods than compressed sensing are interesting problems for future research.

The main advantage of having a transmit RF chain instead of a receive RF chain at the RIS is to carry over the computational complexity of signal processing for channel estimation to base station. Although one may argue that channel can be estimated with the help of a server communicated with an RIS, the delay due to message exchange between an RIS and server may not be tolerable for channel estimation. Also our approach avoids feedback overhead for base station beamforming.

3. HARDWARE TOLERANT CHANNEL ESTIMATOR

Employing a full-fledged transmit RF chain can be too costly for the RIS. Thus, we first propose a simplified transmitter model. Then, we develop a hardware tolerant estimator to make a reliable channel estimation despite the simplified transmitter, and show the energy efficiency.

3.1. A Low Complexity Transmitter Model

The main complexity of a transmitter comes from digital-to-analog converters (DACs) and power amplifiers. To alleviate the complexity of these elements, clipping can be employed. Clipping essentially limits the signal to lie above or below a predetermined threshold at the expense of bringing nonlinear distortion. If the signal is considerably clipped, it is possible to devise low complexity DACs and power amplifiers. Grounded with this idea, we investigate the impacts of transmitting clipped signals on channel estimation for the RIS.

In order to better perceive how clipping can simplify DACs, the clipping threshold $\bar{\Gamma}_{\text{thr}}$ can be associated with quantization yielding

$$\Delta_q = \frac{2^* \Gamma_{\text{thr}}}{2^{n-1}} \quad (4)$$

where n is the the DAC resolution in number of bits and the average quantization noise power for a uniform quantization distribution between $-\Delta_q/2$ and $\Delta_q/2$ is $\Delta_q^2/12$. From equation (4), one can infer that that decreasing the clipping threshold enables us to reduce the DAC resolution without increasing the quantization noise, e.g., decreasing Γ_{thr} 8-fold means approximately 4-bit less quantization resolution since the threshold is multiplied by 2.

Another serious challenge in designing a simple transmitter is large peak-to-average power ratio (PAPR) for OFDM signals, causing an expensive linear power amplifier with large back-off. With a high PAPR only a large back-off can ensure to operate in the linear regime of the power amplifier to avoid signal distortion and out-of-band emission [13]. On the other hand, a large clipping greatly decreases the PAPR of the signals, and this results in utilizing a cheap nonlinear power amplifier similar to the ones used in constant-envelope modulations [14]. Furthermore, clipping facilitates the design of an automatic gain controller (AGC), which aims to balance the quantization and clipping distortion.

Keeping all these in mind with an aggressive clipping, it is possible to design a low-complexity transmitter regarding the DAC and power amplifier for the RIS. To measure the level of clipping, as a performance indicator we define

$$\Gamma_{\text{clip}} = \frac{\Gamma_{\text{thr}}}{\sigma_{\text{ris}}} \quad (5)$$

where

$$\sigma_{\text{ris}}^2 = \sum_{k=1}^K \psi_k \quad (6)$$

and ψ_k is the power of OFDM signal at the k^{th} subcarrier at the RIS before clipping.

Eventually, clipping encapsulates and dominates many transmitter impairments. Thus, defining Γ_{clip} works as a proxy for low complexity hardware design. However, clipping is a nonlinear operation and yields out-of-band emissions that aliases with the in-band signal in case of Nyquist sampling rate. Because of this, the linear channel estimators in OFDM such as least-squares (LS) and linear minimum mean square error (LMMSE) perform very poorly as illustrated in Section 4. We now propose a robust channel estimator against clipping.

3.2. Channel Estimation

The main problem for this part is to estimate the channel between the RIS and the base station presented in Figure 1. More mathematically, the goal is to estimate H_k for $k = 1, \dots, K$. To this end, pilot symbols on frequency domain are utilized as $P = [P_1, \dots, P_K]^T$ over subcarriers to estimate the channel between an RIS element and the base station by assuming without any loss of generality that coherent bandwidth is at subcarrier level. Modulating the K -dimensional pilot vector P with the $K \times K$ inverse discrete Fourier transform (IDFT) matrix F^H and clipping results in such a transmitted signal

$$S = C_{\text{dist}} \circ F^H P \quad (7)$$

where C_{dist} is the distortion operator and \circ denotes the Hadamard product. Notice that $S = [S_1, \dots, S_K]^T$

such that S_k is the signal transmitted from RIS at the k^{th} subcarrier, whereas X_k in equation (1) is the transmitted signal from the users at the k^{th} subcarrier.

OFDM signals are composed of real and imaginary parts, therefore clipping can be applied separately to the quadrature and in-phase components given by

$$\begin{aligned} & [C_{dist} \circ F^H P]_k \\ & = \text{Re}([F^H P]_k) \mathbb{T}_{[-\Gamma_{thr} \leq \text{Re}(F^H P)]_{k \leq \Gamma_{thr}}} \\ & + \text{Im}([F^H P]_k) \mathbb{T}_{[-\Gamma_{thr} \leq \text{Im}(F^H P)]_{k \leq \Gamma_{thr}}} \end{aligned} \quad (8)$$

where \mathbb{T} is the function such that it is 1 if the condition is ensured; otherwise it sets the related component to either Γ_{thr} or $-\Gamma_{thr}$. Re and Im are the real and imaginary part of the signal in the time domain.

Transmitting the clipped signal followed by discrete Fourier transform (DFT) produces the received signal in the frequency domain at the m^{th} antenna of the base station as

$$Y_m = \sqrt{\rho} F H_m S + Z_m \quad (9)$$

where Y_m is a $K \times 1$ vector, i.e., the m^{th} column of the $K \times M$ matrix $Y = [Y_1, \dots, Y_M]$, $\sqrt{\rho}$ is the received signal-to-noise-ratio (SNR), H_m is the $K \times K$ channel matrix between the active element of the RIS and the m^{th} base station antenna, and Z_m is additive white Gaussian noise (AWGN) defined as the m^{th} column of the $K \times M$ matrix $Z = [Z_1, \dots, Z_M]$.

The main goal of this part is to estimate the channel H_m from the observations Y_m in (9) for $m = 1, \dots, M$ by using a single pilot vector. This is challenging because of the clipped pilot signals that lead to inter-carrier interference and SNR degradation. To compensate these losses, we use an estimator that exploits prior knowledge from the channel either by using a measured dataset or by using the generated samples from a statistically known channel, and injects this knowledge to the associated channel estimator. In this respect, we make use of the recently proposed GAN-based channel estimator [15,16].

Our main differences from these works are as follows: (i) the goal of [15] and [16] is to reduce the number of pilots for the narrowband and wideband channels respectively, whereas our goal is to cope with the clipping distortion; (ii) [15] and [16] do not consider RIS aided communication. Furthermore, the statistics of the wideband channel between the two static nodes, i.e., the RIS and the base station changes very slowly and this avoids frequent training of the GAN. More precisely, for our case only the number and location of the scatterers can affect the channel, and as shown in [16] these changes do not require retraining of the GAN. This means that a machine learning based channel estimator with a training process seems quite appropriate to estimate the channel between the RIS and the base station.

To adapt the GAN-based channel estimation, we formulate (9)

$$Y_m = \sqrt{\rho} [S^T \otimes F] \underline{H}_m + Z_m \quad (10)$$

where \otimes is the Kronecker product, and \underline{H}_m is the vectorized channel acquired by concatenating the columns. Then, we formulate the problem as

$$z^* = \arg \min_z \|Y_m - \sqrt{\rho} [S^T \otimes F] G(z)\|_2^2 \quad (11)$$

where G is the pretrained generator network of the GAN and z is its input. Note that a GAN is composed of two networks, namely a discriminator D and a generator G . Optimizing (11) yields the channel estimate

$$\underline{H}_m = G(z^*) \quad (12)$$

The simple block diagram of the channel estimator relying on equation (11) and (12) is provided in Figure 2 for completeness. In this framework, the generator and discriminator networks are first trained and then the generator is utilized for channel estimation.

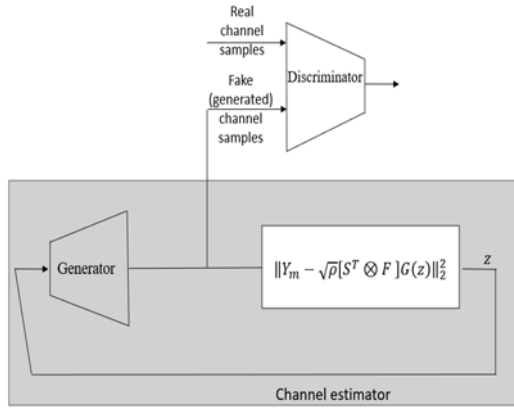


Figure 2. Proposed estimator.

It is worth noting that this method can also be trivially adapted to estimate the channels between user and RIS as well as the channels between the user and base station. Alternatively, simple LS estimator can also be used for these uplink channels with a few pilots due to the single antenna users.

3.3. Energy Efficiency

In this part, the effect of having a low-complexity transmit RF chain in the RIS is studied in terms of energy efficiency, which is defined as

$$\mu_{EE} = \frac{\text{spectral efficiency } (\mu_{SE})}{\text{total power consumption}} \quad (13)$$

Employing a single or a few transmit RF chain increases the total power consumption of the RIS. This, however, improves the energy efficiency of the link due to the decreased number of pilots as compared to the conventional approach of having no transmitter and receiver in the RIS and estimating the cascaded channel by sending a single pilot for each RIS element.

For uplink channel estimation, the conventional method utilizes $N + 1$ pilots for each user, namely N pilots for the indirect channel between RIS and base station, 1 pilot for the direct channel between a user and base station. To balance the channel estimation quality with the burden of sending pilots, it is generally a good choice to use the half of the coherent time for pilots and the other half is for data

transmission [17]. With all these, according to the equation (1) the energy efficiency becomes

$$\mu_{EE} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k,u=1}^{K,U} \log_2 \left(1 + \frac{P_k}{\sigma_n^2} \frac{\|(\mathbf{D}_{k,u} + \mathbf{H}_k \Theta \mathbf{G}_{k,u})\|_2^2}{\sum_{j \neq u} \|(\mathbf{D}_{k,j} + \mathbf{H}_k \Theta \mathbf{G}_{k,j})\|_2^2 + \sigma_n^2} \right)}{P_t + P_{BS} + P_{UE} + P_{RIS}} \quad (14)$$

where $D_{k,u}, G_{k,u}$ are the u^{th} column of the associated D_k, G_k matrices, and the total transmission power is

$$P_t = \sum_{k=1}^K \|Y_k E[X_k^H X_k]\|_2^2 \quad (15)$$

Additionally, P_{BS}, P_{UE}, P_{RIS} represent the power consumed by the base station, user, and RIS, respectively.

In our proposed scheme N_{xmit} number of low-power transmit RF chains are utilized at the RIS essentially for channel estimation purpose. This brings additional power consumption at the RIS shown by P_{xmit} . On the other hand, this can decrease the number of pilots from $N + 1$ to $N_{xmit} + 1$ with the proposed estimator. Hence, the energy efficiency in equation (14) scales with

$$\mu_{EE}^{(proposed)} = \frac{N + 1}{N_{xmit} + 1} \frac{P_{tot}}{P_{tot} + P_{xmit}} \mu_{EE} \quad (16)$$

where

$$P_{tot} = P_t + P_{BS} + P_{UE} + P_{RIS} \quad (17)$$

Since P_{xmit} consumes substantially low power with respect to P_{tot} , when $N \gg N_{xmit}$, it is apparent from equation (16) that

$$\mu_{EE}^{(proposed)} > \mu_{EE} \quad (18)$$

4. NUMERICAL RESULTS

4.1. Simulation Settings

The considered system composed of a base station, RIS and users shown in Figure 1 communicates via OFDM waveform over a TDL channel model similar to [16]. The relevant communication parameters utilized for our simulations are given in Table 1.

Table 1. Simulation parameters

Parameters	Values
Number of subcarriers, K	64
Subcarrier spacing	15 kHz
Bandwidth	20 MHz
Number of users, U	16
Number of base station antennas, M	64
Base station antenna type	Uniform rectangular array
Antenna spacing	$\lambda/2$
Maximum doppler shift	5Hz
Delay spread	100ns
Delay profile	TDL-E

For the proposed channel estimator in Figure 2, we train a Wasserstein GAN [18,19] with DCGAN architecture [20]. Then, the discriminator network D is discarded and the generative part G is utilized as explained in Section 3.2. The GAN parameters for training are illustrated in Table 2.

Table 2. GAN training parameters

Parameters	Values
Number of training samples	5000
Optimizer	RMSprop
Learning rate	0.00005
Epochs	3000
Batch size	200
Latent dimension	15

4.2. Comparisons

The proposed estimator is compared with the linear LS and MMSE estimators that are commonly utilized for many sorts of applications. The estimation quality is measured in terms of normalized mean square error (NMSE) defined for the m^{th} antenna as

$$NMSE, m = E \left[\frac{\|H_m - \hat{H}_m\|_2^2}{\|H_m\|_2^2} \right] \quad (19)$$

Notice that averaging (19) over receive antennas yields NMSE. To implement a simplified transmitter model at the RIS, clipping is considered with different levels in terms of Γ_{clip} as stated in equation (5).

In Figure 3, the transmitted signal is clipped by setting the clipping threshold to 1/4 of the standard deviation of the transmitted signal. Although LS and LMMSE estimators are greatly impacted from this amount of clipping as compared to unclipping, our proposed GAN based estimator shows quite robust performance as can be observed in Figure 3.

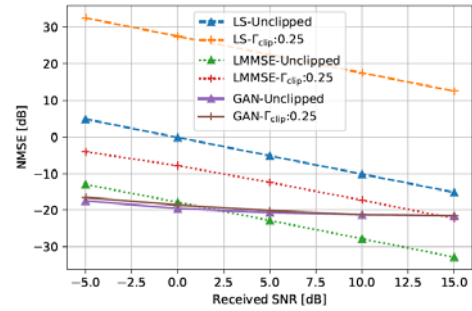


Figure 3. The performance comparison of the proposed method with respect to the LS and LMMSE estimators

Next the performance of the proposed estimator is plotted for various clipping ratios for 2 different received SNRs at 5dB and -5dB. Promisingly, our estimator does not degrade much even if too aggressive clipping exists at the transmitter as depicted in Figure 4, where

$$\text{Clipping Ratio} = 10 \log_{10}(\Gamma_{clip})^2. \quad (20)$$

Note that in Figure 4, Γ_{clip} and hence Γ_{thr} in equation (5) are variables. This verifies that having a very low complexity transmitter at the RIS does not decrease the channel estimation performance at the base station for our estimator.

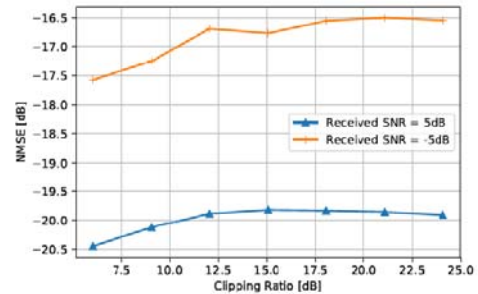


Figure 4. The performance of the proposed estimator with respect to different clipping ratios.

5. CONCLUSION

In this study, RIS aided communication is considered for channel estimation problem. We argue that the primary challenge of high dimensional estimation leading to many pilot symbols is tackled with an estimator that works well with clipped transmitted signals relying on a GAN based estimator that can leverage the channel structures in the training phase and use it as prior information to compensate the information loss due to clipping. The effectiveness of the proposed approach is clearly presented via simulation results.

6. REFERENCES

1. Renzo, M.D., Debbah, M., PhanHuy, D.T., Zappone, A., Alouini, M.S., Yuen, C., Sciancalepore, V., Alexandropoulos, C.G., Hoydis, J., Gacanin, H., Rosnyde, J., Bounceur, A., Lerosey, G., Fink, M., 2019. Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable AI Meta-Surfaces: An Idea Whose Time Has Come. *EURASIP Journal on Wireless Commun. Netw.*, 129, 1-20.
2. Wu, Q., Zhang, R., 2019. Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming. *IEEE Trans. On Wireless Communications*, 18(11), 5394-5409.
3. Liaskos, C., Nie, S., Tsioliariidou, A., Pitsillides, A., Ioannidis, S., Akyildiz, I., 2018. A New Wireless Communication Paradigm Through Software Controlled Metasurfaces. *IEEE Commun. Mag.*, 56(9), 162-169.
4. Mishra, D., Johansson, H., 2019. Channel Estimation and Low-Complexity Beamforming Design for Passive Intelligent Surface Assisted MISO Wireless Energy Transfer. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics Speech Signal Process. (ICASSP)*, 12-17 May 2019, Brighton, UK.
5. Jensen, T.L., Carvalho, E.D., 2020. On Optimal Channel Estimation Scheme for Intelligent Reflecting Surfaces Based on a Minimum Variance Unbiased Estimator. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics Speech Signal Process. (ICASSP)*, 4-8 May, Barcelona.
6. Zheng, B., Zhang, R., 2020. Intelligent Reflecting Surface-Enhanced OFDM: Channel Estimation and Reflection Optimization. *IEEE Wireless Commun. Letters*, 9(4), 518-522.
7. Nadeem, Q.U.A., Kammoun, A., Chaaban, A., Debbah, M., Alouini, M.S., 2019. Intelligent Reflecting Surface Assisted Multiuser MISO Communication. *IEEE Open Journal of Communication Society*, 1, 661-680.
8. Chen, J., Liang, Y.C., Cheng, H.V., Yu, W., 2020. Channel Estimation for Reconfigurable Intelligent Surface Aided Multi-User MIMO Systems. *IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 26-29 May 2020, Atlanta, GA, USA.
9. Wan, Z., Gao, Z., Alouini, M.S., 2020. Broadband Channel Estimation for Intelligent Reflecting Surface Aided MMwave Massive MIMO Systems. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 7-11 June 2020, Dublin, Ireland.
10. Taha, A., Alrabeiah, M., Alkhateeb, A., 2019. Enabling Large Intelligent Surfaces with Compressive Sensing and Deep Learning. *arXiv preprint arXiv:1904.10136*.
11. Li, Y., Cimini, L., Sollenberger, N., 1997. Robust Channels Estimation for OFDM Systems with Rapid Dispersive Fading Channels. *IEEE Trans. Commun.*, 46, 902-915.
12. Kay, M. S., *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume 1: Estimation Theory*. Pearson Education, 608.
13. Dardari, D., Tralli, V., Vaccari, A., 2000. A Theoretical Characterization of Nonlinear Distortion Effects in OFDM Systems. *IEEE Trans. Commun.*, 48(10), 1755-1764.
14. Mohammed, S.K., Larsson, E.G., 2013. Per-antenna Constant Envelope Precoding for Large Multi-User MIMO Systems. *IEEE Trans on Comm*, 61(3), 1059-1071.
15. Balevi, E., Doshi, A., Jalal, A., Dimakis, A., Andrews, J.G., 2021. High Dimensional Channel Estimation Using Deep Generative Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(1), 18-30.

16. Balevi, E., Andrews, J.G., 2021. Wideband Channel Estimation with a Generative Adversarial Network. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(5), 3049-3060.
17. Bjornson, E., Hoydis, J., Sanguinetti, L., 2017. *Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency*. Foundations and Trends in Signal Processing, Now Publishers, Inc, 516.
18. Arjovsky, M., Chintala, S., Bottou, L., 2017. Wasserstein Generative Adversarial Networks. *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, PMLR, 06-11 August 2017, Sydney, Australia.
19. Gulrajani, I., Ahmed, F., Arjovsky, M., Dumoulin, V., Courville, A.C., 2017. Improved Training of Wasserstein Generative Adversarial Networks. *Proceedings of 30th Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 4-9 Dec, 2017, Long Beach, California.
20. Radford, A., Metz, L., Chintala, S., 2017. Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks. *arXiv preprint arXiv:1511.06434*.

Seyhan Nehrinin Su Kalitesi ve İz Element Konsantrasyonlarının Değerlendirilmesi

Veli KESKİN¹ ORCID 0000-0003-2769-5044

Sedat TÜRKMEN^{*2} ORCID 0000-0002-9867-5545

¹DSİ 17. Bölge Müdürlüğü, Yeraltı Suları Şubesi, Van

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 09.10.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/How to cite: KESKİN, V., TÜRKMEN, S., (2023). Seyhan Nehrinin Su Kalitesi ve İz Element Konsantrasyonlarının Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 1093-1106.

Öz

Bu çalışmada, kaynağını Adana ilinin kuzey kesiminde bulunan Orta Toroslar'dan alan (Aladağ/Adana) ve Tuz gölü lagünü yakınlarında Akdeniz'e dökülen Seyhan Nehri'nin kaynağı ile boşalım noktası arasında belirlenen 28 farklı noktadan nehir yatağı boyunca su kimyasında meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla yerinde fiziksel parametre ölçümleri yapılarak su örnekleri alınmıştır. Alınan örneklerin laboratuvarında ICP-MS, spektrofotometre, iyon kromatografisi ve titrasyon yöntemleri kullanılarak majör anyon/kasyon değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, grafiksel yöntemler ve Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Akarsu örneklerinde yapılan iz element analizlerine göre; iz element konsantrasyonlarının nehrin aktığı havza boyunca değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Nehrin kaynak kısmında konsantrasyon değişimleri, bu bölümlerde şehirleşme ve tarım arazilerinin nispeten daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak Pb, As, Cd gibi iz element yoğunluğu kaynak kısmından boşalım noktası olan Akdeniz doğru artış göstermektedir. Bu artışın sebebinin tarımda kullanılan verim artırıcı çeşitli kimyasallar, evsel ve endüstriyel atıklar ile tarım ve ulaşımda yakıt olarak kullanılan petrol türevleri olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Seyhan Havzası, İz element, Antropojenik kirlenme, Hidrojeokimya

Evaluation of Water Quality and Trace Element Concentrations of the Seyhan River

Abstract

In this study, at 28 different points along the Seyhan river, which takes its source from the Central Taurus (Aladağ / Adana) in the northern part of Adana province and discharges into the Mediterranean Sea near the Tuz Gölü Lagoon, water samples were collected after in-situ physical parameter measurements to reveal changes in water chemistry. Major anion/cation values of the samples were determined in the laboratory by

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sedat TÜRKMEN, sturkmen@cu.edu.tr

using ICP-MS, spectrophotometer, ion chromatography and titration methods. The results obtained were evaluated using graphical methods and Geographic Information Systems. Trace element concentration analyses made in the river samples showed concentrations vary throughout the basin through which the river flows. Analysed concentration changes in the source part of the river were relatively lower compared to urbanized and agricultural lands. In general, the density of trace elements such as Pb, As, and Cd increases from the source part towards the discharge point, the Mediterranean Sea. This increase is attributed to the various chemicals used in agriculture, anthropogenic wastes, domestic and industrial wastes and petroleum derivatives used as fuel in agriculture and transportation.

Keywords: Seyhan Basin, Trace element, Anthropogenic pollution, Hydrogeochemistry

1. GİRİŞ

Artan ülke nüfusu, çeşitlenen endüstriyel üretim tesisleri ve hızlı kentleşmeye bağlı olarak nehirler, göller, akarsular şehirlerin içinde kalmaktadır. Bu durum tatlı su kaynaklarını birçok yönden etkilemektedir. Özellikle temiz ve insan sağlığı için risk içermeyen içme-kullanma suyunu olumsuz etkilemektedir. Ayrıca sulama suyu kaynaklarının tarımsal üretim amaçlı kullanılan kimyasallarla, kontrolsüz atık suyu deşarjından etkilenmesi de besin zinciri yolu ile insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu etkileşimler zamanla su kaynaklarının kalitesini etkileyerek doğal döngülerde aksaklıklara neden olmaktadır. Antropojenik (endüstriyel, tarımsal vb.) etkilerden dolayı iz element ve çeşitli zararlı kimyasallar doğada su-toprak ara yüzü ve su-atmosfer ara yüzlerinde yığılarak birikmekte ve çeşitli taşıyıcılarla taşınarak tatlı su kaynaklarını olumsuz etkilemektedir. Su kaynaklarındaki iz element kirliliğinin temel kaynağını antropojenik faaliyetler ve hidrojeokimyasal süreçler oluşturmaktadır.

Yüksek yoğunluğa sahip ve daha çok zararlı olan elementler olarak da tanımlanan iz element genel olarak arsenik, bakır, demir, kurşun, cıva, çinko, kadmiyum ve kromdan oluşmaktadır. İz elementler biyoakümülyasyon özelliğinin yanı sıra çevresel dayanıklılığa sahiptirler.

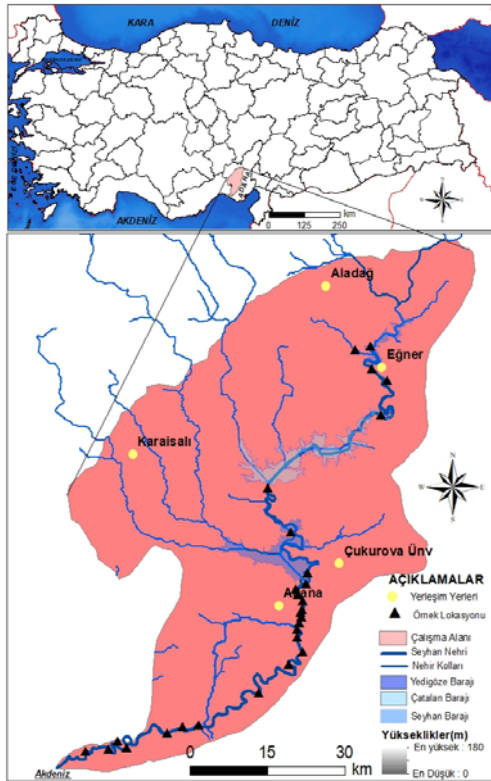
İz elementler, hidrojeolojik, jeokimyasal, atmosferik etkileşim sonucu yüzey ve yeraltı suyuna karışarak su ekosisteminin kalitesini düşürmekle birlikte insan sağlığını da tehdit etmektedir [1]. İz elementler, kayalarda bolluk derecesi % 0.1'den az olan elementlerdir. Çok uzun zaman dilimlerinde bile bu iz elementler

bozunmazlar ve sürekli birikerek yüksek konsantrasyonlara erişebilirler. Göstermiş oldukları bu özelliklerinden dolayı oldukça zararlı etkileşimler gerçekleştirmektedirler. Bu iz elementler ekolojik döngüye; hava yoluyla, içilebilir su yoluyla, tarımsal faaliyetlerle, insan yapımı çok sayıda kimyasal ve ürün yoluyla veya doğal etkileşim yolu ile girerler. Evsel, tarımsal, endüstriyel vb. atıkların güvenli bir şekilde dönüştürülmemesi, depolanmaması durumunda, tatlı su kaynakları hızla kirlenmekte, tatlı su rezervleri geri dönüşü mümkün olmayan zararlar görmektedir [2,3]. Jeolojik kaynaklı çeşitli doğal etkenler de yeraltı ve yüzey sularının kimyasını etkileyerek zaman zaman kirlilik yaratabilmektedir [4,5].

Tatlı su kaynaklarının kalitesinin yanı sıra kaynak rezervleri de oldukça önemlidir. Küresel ölçekte artan sıcaklığa bağlı meydana gelen iklim değişikliğinin etkisi, aşırı yeraltı suyu çekimi, yeraltı suyu akım sistemlerinin düzensiz yapılaşma nedeniyle tahrip edilmesi, maden kazılarında bağlı akifer özelliği taşıyan hazne kayaçların etkilenmesi gibi nedenler tatlı su miktarlarında azalmasına neden olmaktadır. Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin önemini ortaya koymaktadır. Bu amaçla, tatlı su kalitesi, miktarı ve korunmasına yönelik çalışmalar giderek artmaktadır [6,7].

Türkiye'nin en büyük havzalarından biri olan Seyhan Havzası, Doğu Akdeniz Havzası içerisinde yer almakta ve yaklaşık 20.600 km²'lik bir alan kaplamaktadır. Seyhan Havzası 37° 51' 59" kuzey enlemi, 36° 03' 32" doğu boylamı koordinatlarında yer almaktadır. Drenaj alanı 22,035 km² olan kuzey-güney uzanımlı Seyhan Havzası'nda, deniz seviyesinden başlayan topoğrafik yükseklikler, Orta

Toros Dağları'nda 3275 m'ye kadar (Demirkazık Tepe) ulaşmaktadır (Şekil 1). Havzanın kuzey/kuzeybatısında Kayseri, batısında Niğde, güneybatısında Mersin, kuzeydoğusunda Kahramanmaraş illeri bulunurken doğusunda ise Ceyhan ilçesi bulunmaktadır. Uzunluğu 560 km olan Seyhan Nehri, kaynağını Orta Torosların eteklerinden alarak Adana il merkezinden geçerek Tuz gölü Lagünü olarak adlandırılan bölgede Akdeniz'e dökülmektedir [8]. Seyhan Nehrinin ana kolları Göksu ve Zamantı ırmaklarıdır. Kozan ilçesinin kuzeyinde Göksu Irmağı ve Zamantı Irmağı birleştikten sonra bu akarsu Seyhan Nehri adını alır. Seyhan Nehri güney yönünde akışını devam ederken sağ sahilinden Aladağ ilçesi doğusunda Doğan Çay, güneyde Karaisalı ilçesi civarında ise Eğlence, Körkün ve Çakıt dereleri birleşir. Seyhan barajından itibaren Adana kenti içerisinden geçerek Tuzla (Karataş) civarında Akdeniz'e boşalır.



Şekil 1. Çalışma alanının (Seyhan Havzası) yer bulduru haritası

İnceleme Alanı ve Çevresinin Jeolojisi

Seyhan havzası, batıda Ecemiş, doğuda Ceyhan havzası ise sınırlanmaktadır. Havza, Orta Toros Kuşağı içerisinde bulunmaktadır [9]. Bu sınırlar içerisinde bulunan Seyhan Nehri'nin üzerinden aktığı stratigrafik yapı ve litoloji birçok özelliğinden dolayı oldukça farklılık göstermektedir. Bu yapılar, farklı tektonostratigrafik birlikleri kapsamaktadır (Şekil 2).

Bu birlikler incelendiğinde Olistostromal özellik taşıyan Bolkar Dağı birliği, Devoniyen-Alt Tersiyer aralığında çökelmiş karbonat ve kırıntılı kayalardan oluşmaktadır [9,10]. Triyas-Senoniyen döneminde çökelmiş Bozkır birliği, şelf tipi kayalardan, kıta yamacı ve okyanus tipi kayalara kadar değişebilen farklı fasiyesleri temsil eden istiflerle asidik tüf, bazik ve ultrabazik kayaları ve serpantinlerden oluşmaktadır. Devoniyen-Kretase yaşlı Aladağ birliği şelf tipi karbonat ve kırıntılı birimlerden oluşmaktadır. Kambriyen-Erken Tersiyer yaşlı Geyik Dağı birliği, karbonat ve kırıntılı birimleri içermektedir [9].

Seyhan Nehri ve kollarının büyük bir bölümünün içerisinden aktığı Örtü birimleri ise Tersiyer-Kuvaterner yaşlı olup sığ deniz çökeller ile pelajik (derin deniz) çökellerden oluşmaktadır [10].

Örtü Birimleri

Adana Havzası içerisinde geniş yayılım gösteren Tersiyer örtü birimleri, batıda Ecemiş fay zone, kuzeyde Aladağ, güneyde Adana ve batıda Kozan ilçesine kadar gözlenmektedir (Şekil 2).

Senozoyik

Çukurova'nın oluşumunda etkili olan Seyhan Nehri, taşımış olduğu akarsu çökellerini Adana Havzası'nda bulunan Tersiyer'e ait Gildirli formasyonu, Karsantı formasyonu, Kaplankaya formasyonu, Karaisalı formasyonu, Cingöz formasyonu, Güvenç formasyonu, Kuzgun formasyonu, Handere formasyonu ve Kuvaterner yaşlı taraça, kaliçi, eski-yeni alüvyon çökellerinden almaktadır. Bu formasyonlar:

Gildirli formasyonu; Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı birimler üzerinde uyumsuz olarak gelen Oligosen-Erken Miyosen yaşlı Gildirli formasyonu, yaklaşık 400 m kalınlıkta kızılımsı renkli çapraz katmanlı çakıltaşı, çakıllı kumtaşı, kumtaşı ve çamurtaşından oluşu [10]. Bu birimin üzerine Kaplankaya formasyonu ve Karaisalı formasyonu gelir.

Karsanti formasyonu; Kalınlığı 880-1500 m arasında değişen Oligosen yaşlı olduğu düşünülen birim, açık gri renkli, ince-orta ve kalın katmanlı marn, çamurtaşı ile daha az olarak da çakıllı kumtaşından oluşmaktadır [10,11].

Kaplankaya formasyonu; bazı bölgelerde Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı birimler üzerine aşıl uyumsuzlukla gelen, Erken Miyosen yaşlı olan ve kalınlığı 35-60 m arasında değişen bu birim, genel olarak boz renkli çakıllı kumtaşı, kumtaşı, kumlu-killi kireçtaşı-marndan oluşmaktadır. Formasyon tabanda Gildirli formasyonu, tavanda ise Karaisalı formasyonu ile geçişlidir. Üstte Karaisalı formasyonu, Güvenç formasyonu ile yanal ve düşey geçişler sunmaktadır [10,11].

Karaisalı formasyonu; kalınlığı 0-600 m arasında değişen orta Miyosen yaşlı bu birim gri, açık gri, bej renkli, kalın-çok kalın tabakalı resifal kireçtaşlarından oluşmaktadır [10,11]. Formasyon Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı birimler üzerine aşıl uyumsuzlukla gelmektedir. Bu birim üzerine ise yanal ve düşey geçişli olarak Güvenç formasyonu ve Cingöz formasyonu gelmektedir [10,11].

Cingöz formasyonu; Erken-Orta Miyosen yaşlı olan birimin tabanında gri renkli çakıltaşı, çakıllı kumtaşı ve kumtaşı bulunmaktadır [10,11]. Üst kesimlerde ise daha çok kumtaşı-şeyl ardalanması yer almaktadır. Birimin kalınlığı yaklaşık olarak 3500 m'dir. Birim Gildirli formasyonu, Kaplankaya formasyonu, Karaisalı formasyonu ve Güvenç formasyonu ile geçişlidir [11].

Güvenç formasyonu; kalınlığı 20-3230 m arasında değişen Orta Miyosen yaşlı bu birim çoğunlukla koyu gri, yeşilimsi gri renkli şeylden oluşmaktadır [11]. Birim içerisinde ince kumtaşı-silttaşı-killi kireçtaşı ve yer yer karbonlu şeyl düzeyleri

bulunur [11]. Birimin Formasyon tabanda Karaisalı formasyonu ve Kaplankaya formasyonu ile tavanda ise Kuzgun formasyonu ile yanal ve düşey geçişlidir [11].

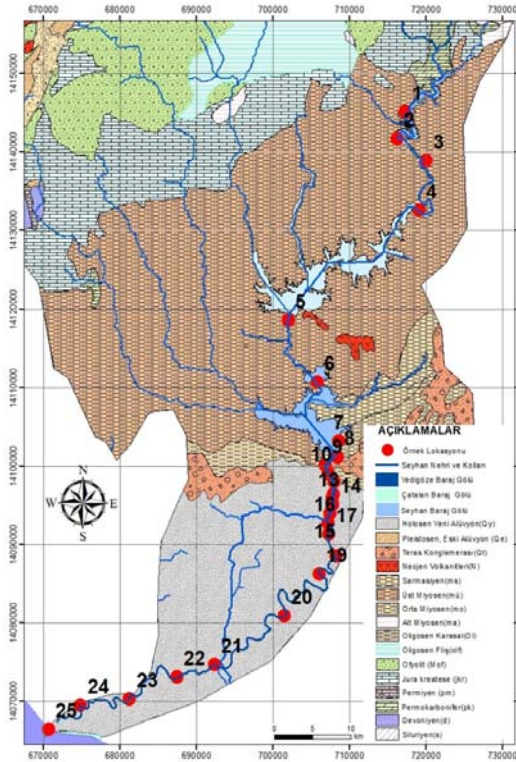
Kuzgun formasyonu; formasyonun tabanında sığ denizel-karasal nitelikli asfasiyelerden oluşan Kuzgun üyesi bulunup üzerinde ise Salbaş tüfit üyesi ile Memişli üyesi yer almaktadır [13,14]. Kuzgun üyesi çakıltaşı, çakıllı kumtaşı, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanımından oluşmaktadır [13,14]. Tortoniyen yaşlı Salbaş tüfit üyesi tabanda açık gri renkli volkanoklastik kumtaşı-çakıltaşı ile başlamaktadır. Ana tüfit kütlesi açık gri-kirli beyaz renkli, kil ve mil içeren yer yer biyotit ve kıt mafik mineralli tüfit veya volkanoklastik miltaşından oluşmaktadır [10,11]. Memişli üyesi akarsu, göl sığ deniz çökellerinden oluşmaktadır. Kalınlığı yaklaşık 850m olan birim, alacalı renkli, çapraz katmanlı çakıllı kumtaşı ve kaba kumtaşı ile alacalı renkli silttaşı-çamurtaşından oluşmaktadır.

Handere formasyonu; Kalınlığı 120-700 m arasında değişen Messiniyen-Pliyosen yaşlı birim genel olarak boz renkli çakıltaşı, çakıllı kumtaşı, kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı, marn'dan oluşmaktadır. Birim altta Kuzgun formasyonu üzerinde geçişlidir. Üstte Adana havzasının yaygın taraça oluşumları ve genç alüvyon örtüleri ile örtülmektedir [10].

Taraça; Adana Havzası'nda genel olarak iki tür taraça malzemesi bulunmaktadır. İlki Handere formasyonunun topografik yüksekliklerinde yüzeyleyen eski ve yeni alüvyonla örtülü olan taraçadır. İkincisi ise taraça oluşumu ise Çakıt çayı, Körkün ve Eğlence suyu ile Seyhan Nehri yatağına yaklaşık olarak paralel uzanan farklı genişlik ve uzunlukta olanıdır. Tabanda çakıltaşı, çakıllı kumtaşı ile başlayıp gri renkli, çapraz katmanlanmalı çakıllı kaba kumtaşı ile devam eden birimin üst kesiminde bloklu çakıltaşı yer almaktadır [10,11].

Kaliçi; taraça malzemesi içerisinde yeraltı sularının yüzeye doğru yükselirken buharlaşarak içindeki karbonatın çökmesi ile kaliçi meydana gelmektedir. Tepe üzerlerinde ve yamaçlara uygun olarak oluşan kaliçilerin kalınlığı 3-5 m arasında değişmektedir.

Alüvyon; Adana Havzası'nda, Adana Ovası'nı oluşturan eski ve yeni alüvyonlar olmak üzere iki türdür. Eski alüvyonları delta oluşumları olarak kabul edilmektedir. Genellikle Seyhan ve Ceyhan nehrinin denize döküldüğü yerlerde çökelmişlerdir. Günümüzde üzerlerine tarım yapılan organik toprak örtüsünün bulunduğu bu birim Çukurova'yı meydana getirmiştir. Genç alüvyonlar ise akarsu dere boylarınca gelişmiş olup genelde kötü boylanmış, tutturulmamış çakıl, kum ve mil malzemesinden oluşmaktadır. Genel olarak genç alüvyonlar ofiyolit, farklı kireçtaşı türleri, radyolarit, çört, kuvarsit vb.'den aşınarak oluşmuşlardır [13,14].



Şekil 2. Çalışma alanına ait jeoloji haritası ([12]'den değiştirilmiştir) ve örnekleme noktaları

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında, Seyhan Nehri'nin kaynağından başlayarak Tuz gölü lagünü

bölgesinden Akdeniz'e boşaldığı ağız kısmına kadar 2023 yılı Mart ayı içerisinde Seyhan Nehri'nin yatağı boyunca, bölgenin litolojisi, nehrin debisi, yan kol bağlantı noktaları, yerleşim yerlerinin yoğunluğu, tarım arazileri ve tesislerinin yoğunluğuna göre belirlenen 28 farklı noktadan örnekleme yapılmıştır. Suların fiziksel özellikleri Hanna HI 8334 marka pH metre, sıcaklık ölçer ve Antech PC Tester 35 Eutech marka EC/TDS ölçer yardımıyla yerinde belirlenmiştir (Şekil 3). Su örneklerinin hidrojeokimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar analizleri için, 250 mL'lik yüksek yoğunluklu polietilen özellikli (HDPE) plastik şişeler kullanılarak her noktadan 2 adet su örneği alınmıştır. Örnek kapları, alınan suyun özelliklerini tam olarak yansıtması için aynı akarsu ile üç kez yıkanmış ve akarsu içerisinde olabildiğince en derine aldırılarak hava boşluğu kalmayacak şekilde doldurulmuştur.

Yapılan analizler sonucunda elde edilen verilerin güvenilirliğini ve doğruluğunu tespit etmek amacıyla iyon denge hesaplamaları yapılarak (anyon-kasyon yük dengesi) analiz hata yüzdesi hesaplanmıştır [13]. Analiz sonuçları, Dünya Sağlık Örgütü [1] ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde [14] belirtilen içme-kullanma suyu standartlarına göre değerlendirilmiştir.

Piper diyagramı [15] kullanılarak nehir suyunun hidrojeokimyasal fasiyesi belirlenmiştir. ABD Tuzluluk Laboratuvarı [16] ve Wilcox diyagramları [17] kullanılarak suların tarımsal sulama amaçlı kullanılabilirlikleri açısından değerlendirilmiştir.

İz element konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla kullanılacak örneklerin kaplarına pH<2 olacak şekilde % 65'lik HNO₃ ilave edilmiştir. Soğuk zincir ile laboratuvara taşınan örneklerin majör anyon/kasyon analizleri iyon kromatografisi ve spektrofotometre ile, iz element analizleri ICP-MS cihazı ile, bikarbonat/karbonat analizleri ise titrasyon yöntemleriyle Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarı ve Çukurova Üniversitesi, Merkezi Araştırma laboratuvarlarında (ÇÜMERLAB) yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Seyhan Nehri boyunca yapılan örnekleme çalışması ile alınan 28 su örneğinin fiziksel ve kimyasal analizleri yapılarak sonuçları Çizelge 1, 2 ve 3'de verilmiştir. Yapılan analizlere ait iyon denge yüzdeleri %5'in altında çıkmıştır. Denge değişim aralığı -0.26 ile -0,3 arasında değişmektedir. Su örneklerinin pH değerleri 7.74 ile 9.54 arasında değişmektedir (Çizelge 1). Şahinci'nin [18] pH sınıflamasına standartlarına göre bütün su örnekleri bazik karakterdedir. Seyhan Nehri'nin aktığı havza boyunca özellikle kaynak kesimlerinde yüzeylenen farklı dönemlerde oluşmuş kireçtaşlarının varlığı (Şekil 2) nehir suyunun yüksek pH değerlerine sahip olmasını sağlamıştır. Seyhan Nehri'nin ve kollarının kaynağından itibaren akış yolu boyunca 1 nolu örnek lokasyonundan 6 nolu istasyona kadar Miyosen yaşlı karbonatlı kayaçların üzerinde akmakta, ana nehre bağlanan kolların aktığı litolojilere göre farklılık göstermemekte, pH değerlerinde önemli değişim olmamaktadır. Yerleşim yeri ve yakın çevresi içerisinde tarımsal, antropojenik, endüstriyel vb. etkilere bağlı olarak artan pH değeri deniz suyu ve lagün etkisi ile maksimum pH değerine ulaşarak denize dökülmektedir (Çizelge 1).

Nehir suyu örnekleri ile yapılan ölçümlerle Eh değerleri -20 ile -112 mV arasında değişmekte olduğu görülmektedir. En düşük Eh değeri şehir merkezinde bulunan 14 nolu noktada tespit edilirken, en yüksek Eh değeri ise dipsiz lagün olarak adlandırılan nehrin ağız kısmında bulunan 28 nolu noktada tespit edilmiştir. Eh değerleri nehrin kaynaktan ağız kısmına doğru gittikçe bir düzen göstermemekte, yerleşim yerleri, tarım arazileri gibi deşarjlara bağlı olarak farklılık göstermektedir (Çizelge 1). Nehir boyunca toplam çözülmüş madde miktarı (TDS) genel olarak artış göstermekte, fakat baraj rezervuar alanlarında çökelmeye bağlı olarak azaldığı görülmektedir (Çizelge 1). Nehir sularının elektriksel iletkenlik değerleri 413 ile 3490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir. En düşük EC değerine 12 nolu ölçüm noktada iken en yüksek EC değeri ise 26 nolu ölçüm noktasındadır (Çizelge 1). Genel olarak elektriksel iletkenlik değerleri nehrin kaynak

kısından boşalım kısmına gidildikçe artış göstermektedir. Endüstriyel üretim, evsel atıklar ve tarımsal üretime bağlı faaliyetler sonucu oluşan atıkların nehre karışması sonucu, akarsudaki iyon yükü değişme uğramakta bu nedenle elektriksel iletkenlik değerlerinde değişim meydana gelmekte ve çoğunlukla artış gözlenmektedir.

Nehir suyu örneklerinin kalsiyum (Ca^{+2}) değerleri 36.96 ile 100.17 mg/L arasında değişkenlik göstermektedir. Genel olarak yüksek olan kalsiyum değerleri nehrin kaynak kısmında, nehir üzerinde inşa edilen baraj çıkışlarında ve ağız kısmında yüksek konsantrasyonlara ulaşırken şehir merkezi ve tarımsal üretimin yoğun olarak yapıldığı ova içerisinde nispeten daha düşük konsantrasyonlara sahiptir (Çizelge 2). Kalsiyumun akarsulardaki konsantrasyonları genel olarak akarsuyun üzerinden aktığı kayaçların mineralojik/ kimyasal bileşimine ve bölgenin aktif fay sistemine bağlı olarak gelişen jeotermal sularla etkileşime girerek değişmektedir. Seyhan nehrinin havzasının içerisinde özellikle nehrin kaynak kısmı olan kuzey/kuzeybatı kısmında çökelmiş olan Miyosen, Jura-Kretase ve Permien, Permokarbonifer yaşlı karbonat kökenli kayaçları gözlenmektedir [15] (Şekil 2). Nehir suyunun karbonat kökenli bu litolojik birimler ile etkileşme girmesi nehir suyunun Ca^{+2} açısından zenginleşmesine neden olmuştur. Adana Havzası ve nehrin kaynak kesimin kuzeybatısında magnezyum (Mg^{+2}) içeriği yüksek olan ofiyolitik kayaçlar yayılım göstermektedir [15]. Bu litolojilerle etkileşimde olan nehir kollarına rağmen magnezyum (Mg^{+2}) konsantrasyonları şehir merkezi ve tarım arazilerinde daha yüksektir (Şekil 6b). Havza genelinde 47,38 ile 82,25mg/L arasında değişen magnezyum (Mg^{+2}) değerlerinin şehir merkezinde yüksek konsantrasyonlara ulaşmasının en önemli nedeni evsel ve endüstriyel atıkların nehir suyuna kontrolsüz deşarjı iken ova içi düzlüklerde ise tarımsal amaçlı kullanılan kimyasallardır.

Nehir suyu örneklerinin Sodyum (Na^{+}) klor (Cl^{-}) değerleri genel olarak nehir ağız kısmına yakın, nehrin menderesler çizdiği ve zamanla nehirden

ayrılarak oluşturduğu kulak yapılarında en yüksek konsantrasyona ulaşmaktadır. Klor (Cl⁻) iyonlarının değerleri nehrin kaynak kısmına yakın bölgelerde litolojik etkileşimden dolayı artış gösterirken şehirleşmenin yoğun olduğu alanlarda ise temizlik ürünlerinde bulunan kimyasallara bağlı artış göstermektedir (Şekil 6c ve Şekil 7a). Sodyum ve klor iyonlarının değerlerinin, Seyhan Nehri'nin denize ulaştığı veya yakın bölgelerinde artış

göstermesi deniz suyu girişiminin yanı sıra, sodyumca zengin magmatik kayalar, evaporitler, tarımda kullanılan gübreler, evsel ve endüstriyel atıklardan kaynaklanmaktadır [13]. Ayrıca Akdeniz'den gaz fazı içerisinde katı partikül şeklinde bulunan tuzun rüzgârlarla taşınması ve zamanla yoğunlaşarak nehir ortamına karışması sodyum (Na⁺) klor (Cl⁻) konsantrasyonunu artırmaktadır.

Çizelge 1. Akarsu örneklerinde yerinde ölçülen fiziksel parametre değerleri

Örnek No	pH (°F)	Eh (mV)	TDS (mg/L)	Elektriksel iletkenlik (µS/cm)
1	8,35	-0,53	334.75	515
2	8,8	-0,72	334.75	515
3	8,2	-0,52	332.8	512
4	8,75	-0,72	332.15	511
5	8,25	-0,58	282.1	434
6	8,41	-0,62	291.2	448
7	8,63	-0,71	276.9	426
8	8,7	-0,72	585.13	900.2
9	8,6	-0,69	278.2	428
10	8,65	-0,69	270.4	416
11	8,75	-0,7	276.9	426
12	8,9	-0,74	268.45	413
13	8,06	-0,83	335.4	516
14	8,55	-0,2	274.3	422
15	8,85	-0,69	275.6	424
16	8,33	-0,79	269.1	414
17	8,16	-0,56	295.1	454
18	7,81	-0,45	465.4	716
19	7,83	-0,29	399.75	615
20	7,86	-0,34	372.45	573
21	8,05	-0,32	333.45	513
22	7,94	-0,45	339.3	522
23	7,74	-0,37	264.55	407
24	7,83	-0,34	737.75	1135
25	9,4	-0,35	2242.5	3450
26	8	-0,85	2268.5	3490
27	8,6	-112	1055.6	1624
28	9,54	-107	1139.45	1753
WHO (2011) Sınır değerler	6.5-8.5	*	*	*
SKKY (2011) Sınır değer	6.5-8.5** 6.5-9.0*****	*	*	250-750*** 750-2000****

* Sınır değer belirtilmemiştir. ** 1. Sınıf (Çok İyi) sular; *** 2. Sınıf (İyi) sular; **** 3. Sınıf (Kullanılabilir) sular; ***** 4. Sınıf (İhtiyatlı kullanılmalı) sular.

Nehir suyunun 10,62 ile 23 mg/L arasında değişkenlik gösterdiği potasyum değerleri, tarımsal faaliyetlerin yoğun olarak yapıldığı nehir suyunun kaynak kısmına göre daha yavaş aktığı alanlarda daha yüksektir. Bu alanlarda yüksek konsantrasyonlarda potasyum gözlenmesi tarımsal üretimde kullanılan gübrelerin, yağmur suları ile yıkılarak nehre karışması, ilaçlamada kullanılan suların nehirden alınırken süzülerek nehre sızması veya bilinçsizce yapılan deşarjlardan kaynaklanabilmektedir [13].

Seyhan Nehri'nin bikarbonat değerleri, 257,10 ile 514 mg/L arasında değişirken, karbonat değerleri ise 0 ile 230 mg/L arasında değişmektedir. Havzanın kuzey ve kuzeydoğu kısmında yaygın olarak gözlenen karbonatlı kayalar içerisinde akış gösteren nehir suyu örneklerinde bikarbonat derişimleri yüksek iken, havzanın kuzeybatısı ve orta kesimlerinde yayılım gösteren ofiyolitik kayalar ile etkileşime geçen nehir sularında ise bikarbonat derişimleri düşüktür. Genel olarak karbonat derişimleri havza boyunca çok düşük değerlerde olmasına rağmen Seyhan Nehri'nin boşalım kesiminde, 26, 27 ve 28 nolu su örneklerinde yüksek derişimlere ulaşmaktadır (Çizelge 2). Seyhan Nehri havzası boyunca sülfat ve nitrat derişimleri artış göstermekte özellikle tarım arazileri ve yerleşim yerleri içerisinde bulunan veya yakın çevresinde yapılan örneklemeelerde yüksek konsantrasyonlarda sülfat ve nitrat belirlenmiştir (Çizelge 2). Analiz sonuçları Dünya Sağlık Örgütü'nün [1] içme suyu standartlarına göre değerlendirildiğinde; nitratin bir çok örnekte sınır değeri aştığı görülmektedir. Nitrit ise 3,10, 12,14, 15, 16, 17 ve 22 nolu örneklerde sınır değeri aşmıştır (sınır değeri 0-0.2 mg/L, WHO (162011)). Tespit edilen en yüksek nitrit konsantrasyonu 14 nolu su örneğinde 14,89 mg/L'dir. Bu parametreler dışında kalan iyon değerleri ise Dünya Sağlık Örgütü [1] tarafından belirlenen içme suyu standart değerlerinin altında olduğu görülmüştür. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği'nde [18] belirtilen sulama suyu sınıflandırmalarına göre; tüm örneklerin pH, klor ve sülfat bakımından I. Sınıf sular (Çok iyi) olduğu görülmektedir. Elektriksel

iletkenlik bakımından ise tüm örneklerin II. Sınıf (İyi) sular oldukları görülmektedir. Nitrat bakımından ise tüm örneklerin III. Sınıf (Kullanılabilir) suları temsil ettiği görülmüştür. Diğer parametreler açısından bütün örnekler SKKY'ya [17] göre kullanılabilir niteliktedir.

3.1. Nehir Suyu İz Element Konsantrasyonları ve Köken İlişkisi

Seyhan nehri boyunca alınan 28 su örneği ile yapılan As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn analiz sonuçları Çizelge 3'de, dağılım haritası Şekil 3'de gösterilmiştir. Genel olarak doğal su kaynaklarında iz element içeriklerini etkileyen en önemli fiziksel parametre pH olup asidik sulara iz element içerikleri daha yüksek olmaktadır. Seyhan Nehri'nin pH değerleri 7.81 ile 9.54 arasında değişmektedir. Bu pH değerlerine göre nehrin suyu bazik karakterlidir. Seyhan Nehri'nin iz element derişimleri genel olarak düşüktür. Nehrin kaynak kısmından boşalım kısmına doğru gidildikçe iz element derişimleri litolojik farklılıklar, yerleşim yerlerindeki atıklar, tarımsal üretim atıkları, endüstriyel atıklar vb. sebeplerden dolayı artış göstermektedir (Çizelge 3). Fe, Mn ve Ni elementlerinin analiz sonuçları incelendiğinde Seyhan Nehri'nin yerleşim yeri içinde kalan bölümleri ve denize boşaldığı bölümlerde bu iz elementlerin artış gösterdiği görülmektedir. Yüksek Fe, Mn, Ni ve Cd içeriklerinin bölgedeki yoğun trafik ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek Zn değerlerinin ise tarımda kullanılan verim artırıcı kimyasal gübreler ile endüstriyel faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kurşun elementinin değerleri incelendiğinde, kurşun derişimlerinin yerleşim yerleri ve ulaşım hatlarına yakın bölgelere yoğunlaştığı görülmektedir. Kurşun değerlerindeki bu artışın motorlu araç yakıtlarından ileri geldiği düşünülmektedir. Seyhan Nehri havzasında yapılan bu çalışmada genel olarak, havza boyunca; As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn iz element derişimindeki artışlar bu bölgedeki tarımsal üretim, endüstriyel aktiviteler motorlu taşıtlar ve yerleşim yerlerinin yoğunluğuna bağlı meydana gelen antropojenik atıklarla açıklanabilir.

Çizelge 2. Akarsu örneklerine ait majör katyon ve majör anyon analiz sonuçları (tüm değerler mg/L)

Örnek No	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻²	CO ₃ ⁻²	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻
1	58.77	20.53	26.66	3.25	32.35	285.32	0	4.00	50.67	0.00	2.68
2	60.65	20.76	24.75	2.42	17.97	332.35	0	5.00	83.77	0.00	2.73
3	57.14	18.12	26.27	4.13	10.78	363.71	48	7.00	76.53	0.29	5.39
4	54.11	17.39	24.80	3.07	25.16	294.73	36	7.00	104.57	0.00	2.81
5	40.37	18.24	15.55	2.26	26.96	269.64	12	4.00	52.40	0.14	1.21
6	46.10	18.42	19.36	3.51	17.97	275.92	0	3.00	56.82	0.00	1.94
7	39.74	18.74	14.86	2.13	14.38	257.10	0	7.00	35.66	0.16	2.11
8	100.17	41.05	31.53	3.39	14.38	514.21	72	85.00	14.50	0.00	0.99
9	41.37	20.69	19.61	3.71	14.38	257.10	0	2.00	96.43	0.00	9.34
10	50.78	24.93	20.13	2.90	14.38	275.92	12	45.00	34.34	0.24	2.49
11	43.05	20.94	17.93	2.73	21.57	244.56	24	28.00	55.76	0.43	1.38
12	45.54	23.18	20.06	2.76	26.96	257.10	24	86.00	33.31	0.29	1.35
13	43.16	21.20	28.71	5.06	17.97	275.92	24	17.00	144.00	0.00	4.72
14	43.91	22.83	25.33	4.76	21.57	263.37	24	5.00	11.94	14.89	3.59
15	40.29	20.25	21.19	3.56	30.55	244.56	0	14.00	124.54	2.98	2.08
16	44.69	21.93	20.85	2.97	14.38	263.37	0	60.00	44.71	0.81	3.59
17	36.96	18.63	21.51	3.44	37.74	269.64	0	107.00	11.55	3.88	1.02
18	43.37	22.28	59.15	21.50	23.37	432.69	0	89.00	11.27	0.00	0.81
19	49.10	22.92	47.97	14.82	12.58	344.89	0	79.00	10.98	0.00	0.80
20	42.36	21.05	40.66	10.62	25.16	313.54	0	3,5	10.70	0.00	11.00
21	41.36	21.42	32.83	6.71	28.76	332.35	0	35.00	10.41	0.00	10.27
22	43.19	27.30	41.97	9.45	71.89	257.10	0	81.00	66.86	0.73	1.87
23	43.94	22.26	19.72	2.66	21.57	250.83	0	78.00	38.12	0.00	2.32
24	48.85	30.36	91.11	23.00	50.32	445.23	60	210.00	10.97	0.00	1.03
25	45.57	82.25	198.00	17.11	57.51	438.96	120	200.00	16.17	0.00	17.05
26	46.38	82.05	187.50	17.40	7.19	457.77	120	250.00	31.63	0.00	12.51
27	42.44	46.55	218.80	15.16	28.76	351.16	236	317,94	66.35	0.00	6.11
28	65.88	47.38	212.20	9.68	2.40	420.14	230	397,89	148.36	0.00	3.30
WHO (162011)	*	*	*	0-200		0-250	*	0-500	0-50	0-0,2	0-1,5
SKK17Y (201118)	*	*	*	*	*	0-142**	*	0-192**	5-10*** 10-30****	*	0-1

* Sınır değer belirtilmemiştir. ** 1. Sınıf (Çok İyi) sular; *** 2. Sınıf (İyi) sular; **** 3. Sınıf (Kullanılabilir) sular.

Özellikle, Seyhan Nehri'nin taşıdığı olduğu alüvyonlarla beslediği havza ağzındaki verimli düzlüklerde yapılan tarımsal üretim ve buna bağlı kurulan, tarımsal tesisler, gübre fabrikaları ve ana ulaşım arterlerinden kaynaklanan araç trafiği bölge sularının kimyasını ve kalitesini etkilemektedir.

İz element analiz sonuçları Dünya Sağlık Örgütü'nün [1] içme suyu standartlarına göre değerlendirildiğinde; kurşunun 6, 10, 13, 15, 17, 18, 20 ve 21 nolu örneklerde, arseniğin 25, 26 nolu örneklerde, kadmiyumun 20 ve 21 nolu örneklerde sınır değerleri aştığı görülmektedir. Analiz yapılan

diğer iz elementlerin değerleri ise Dünya Sağlık Örgütü [1] tarafından belirlenen içme suyu standart değerlerinin altında olduğu belirlenmiştir. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği'nde [14] belirtilen sulama suyu sınıflandırmalarına göre; kurşunun 10 nolu örnekte, arseniğin 25 ve 26 nolu örneklerde sınır değerleri aştığı görülmektedir. Analiz yapılan diğer iz elementlerin değerleri ise belirtilen sulama suyu sınıflandırmalarına [18] göre uygun özelliktedir.

3.2. Suların Hidrokimyasal Sınıflandırılması

Seyhan Nehri'nin akış güzergahı boyunca 28 noktadan alınan su örnekleri Piper diyagramına [15] yerleştirildiğinde; örneklerin tamamı katyon

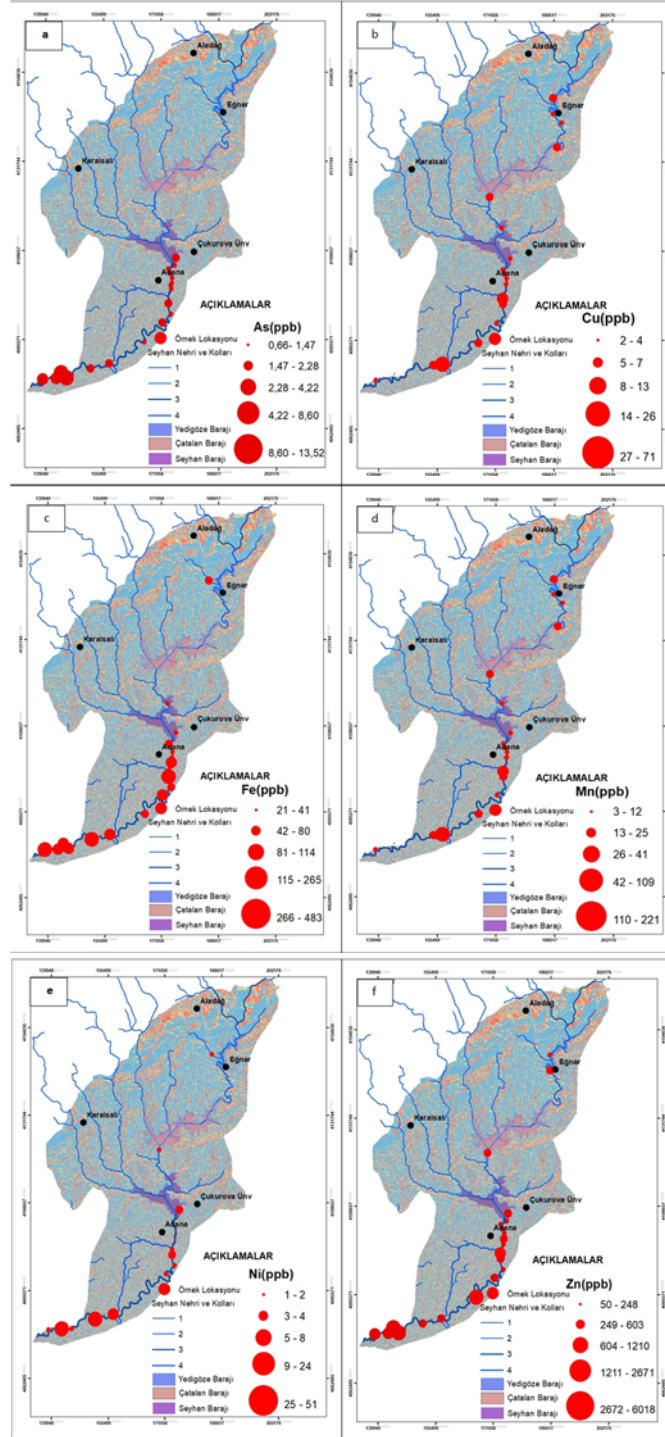
üçgeninin A bölgesindeki kalsiyum köşesine yakın kesimlerde yer almakta ve "Kalsiyum tipi suları" temsil ettiği görülmektedir. Anyon üçgeninde ise E bölgesinde yer aldığı ve "Bikarbonat+Karbonat tipi suları" temsil ettiği görülmektedir. Eşkenar dörtgen üzerinde ise 1. bölgedeki Alkali toprak elementler (Ca+Mg) > Alkali elementler (Na+K), "Kalsiyum-Magnezyum-Bikarbonat tipi suları" temsil ettiği görülmektedir (Şekil 4).

ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramına [16] göre (Şekil 10), 19, 20, 25, 26 ve 28 nolu örnekler C3-S1 sınıfında (yüksek derecede tuzlu sular), diğer örneklerin tamamı ise C2-S1, orta derecede tuzlu sular sınıfındadır (Şekil 5).

Çizelge 3. Akarsu örneklerine ait iz element analiz sonuçları (tüm değerler ppb cinsindedir)

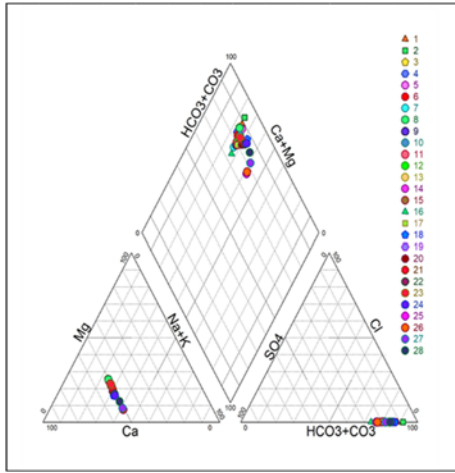
Örnek No	As	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
1	0.76	0.36	10	29	5	2	6.48	413
2	0.66	0.38	3	98	15	3	3.06	50
3	1.26	0.34	7	28	3	2	5.81	1059
4	1.19	0.37	7	36	4	2	4.38	109
5	1.14	0.32	9	21	4	2	5.62	102
6	1.20	1.38	9	24	3	3	21.87	747
7	1.47	0.89	6	49	5	2	8.30	212
8	2.65	0.43	5	57	22	8	6.52	603
9	1.57	0.35	4	41	4	1	5.42	107
10	1.61	1.82	6	114	5	2	89.18	411
11	1.73	0.60	6	34	4	2	7.08	246
12	1.97	0.75	5	80	9	2	6.92	451
13	1.94	1.30	5	59	12	1	15.61	1210
14	1.99	1.07	4	59	7	2	8.31	62
15	2.28	1.55	4	153	25	2	10.01	248
16	1.08	0.40	3	70	18	1	7.33	75
17	1.28	1.98	26	71	20	3	24.38	2671
18	4.22	2.49	13	483	37	6	25.61	149
19	2.00	0.41	3	97	35	3	3.06	197
20	2.71	4.60	5	164	41	3	36.70	175
21	2.14	4.98	10	99	23	2	44.80	6018
22	3.52	0.93	71	171	76	24	6.70	98
23	1.33	0.53	8	26	4	2	3.26	66
24	3.39	0.90	2	357	106	50	5.25	757
25	13.45	0.47	4	169	99	4	3.02	53
26	13.52	0.87	4	206	109	1	4.65	73
27	7.47	0.86	4	265	77	51	19.08	744
28	8.60	1.16	5	407	221	4	8.07	98
WHO (2011)	10.00	3	200	300	500	70	10	*
SKKY(2011) standartları	10.00	10	2000	5000	3000	200	50	2000

* Sınır değer belirtilmemiştir.

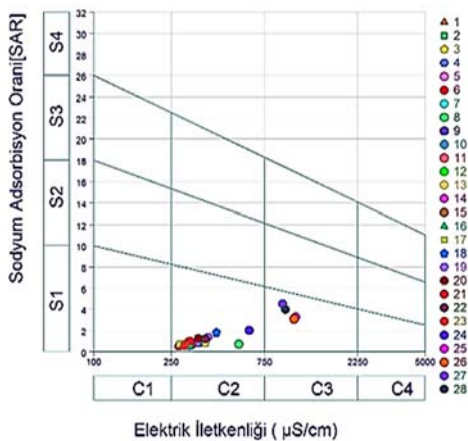


Şekil 3. Akış yolu boyunca akarsu iz element derişimlerinin değişimi

Yüksek derecede tuzlu sular sınıfında çıkan suların tuzluluk nedenleri örnekleme yapıldığı bölgenin Akdeniz'e yakın olması, deniz suyu girişi ve hava yolu ile sodyum iyonlarının taşınması olduğu düşünülmektedir (Çizelge 2). Diyagram verilerine göre nehrin orta ve üst kısımlarındaki sular, orta derecede tuza ihtiyacı olan bitkilerde sulama suyu olarak kullanılabilir özelliktedir. Nehir suyu yüzdesel sodyum değerleri açısından incelendiğinde; 25, 26, 27 ve 28 nolu örnekler "iyi", geri kalan örneklerin tamamı ise "çok iyi" sular niteliğindedir [17].

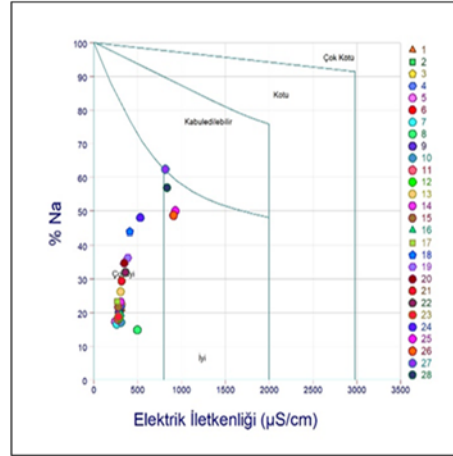


Şekil 4. Akarsu örneklerinin Piper diyagramındaki dağılımı



Şekil 5. Akarsu örneklerinin ABD Tuzluluk diyagramındaki konumları

Nehir suyu örneklerin tamamına yakınında sodyumun düşük olması suların sodyuma karşı hassas bitkiler haricinde, diğer tarımsal faaliyetlerde kullanılabilir özellikte olmasını sağlamıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Akarsu örneklerinin Wilcox diyagramındaki konumları

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında; kaynağını Adana ilinin kuzeyinden alıp Tuz gölü lagünü bölgesinden Akdeniz'e boşalan Seyhan Nehri'nin 28 farklı noktasında suların fiziksel özellikleri yerinde ölçülerek, majör anyon-kasyon ve iz element analizleri yapılmıştır. Ölçüm ve analiz sonuçları çeşitli diyagramlara yerleştirilmiş ve dağılım haritaları oluşturulmuştur.

Yapılan pH sınıflamasına göre; nehir suyunun bazik karakterde olduğu, bu özelliğini havzada mevcut jeolojik birimlerden (kireçtaşı/dolomitik kireçtaşı ve ofiyolitik kayalar) kazandığı şeklinde yorumlanmıştır. Nehir sularının hidrokimyasal fasiyes tipinin de nehrin aktığı havzanın jeolojisinin etkisiyle Ca-HCO₃ olduğu belirlenmiştir. Majör element olarak kalsiyum elementinin en önemli kaynağı akarsu havzasının kaynak kesiminde konumlanmış, geniş alanlar kaplayan karbonat kayaları olduğu belirlenmiştir.

Analiz sonuçları Dünya Sağlık Örgütü'nün içme suyu standartlarına göre değerlendirildiğinde;

nitratın birçok örnekte sınır değerleri aştığı görülmektedir. Nitrit ise 3,10,12 14, 15, 16, 17 ve 22 nolu örneklerde sınır değerleri aşmıştır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği'nde belirtilen sulama suyu sınıflandırmalarına göre; tüm örneklerin pH, klor ve sülfat bakımından I. Sınıf sular (Çok iyi) olduğu belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlik bakımından ise tüm örnekler II. Sınıf (İyi) oldukları görülmektedir. Nitrat bakımından ise tüm örneklerin III. Sınıf (Kullanılabilir) suları temsil ettiği görülmüştür.

Piper diyagramına göre örneklerin tamamında hakim kationun kalsiyum "Kalsiyum tipi sular" olduğu, hakim anyonun ise bikarbonat (HCO_3) "Bikarbonat+Karbonat tipi suları" olduğu, genel olarak ise nehir suyunun "Kalsiyum - Bikarbonat tipi suları" temsil ettiği belirlenmiştir.

Nehir Suyu örneklerinin ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramına göre 19, 20, 25, 26 ve 28 nolu örneklerin C3-S1 sınıfında olduğu ve yüksek derecede tuzlu sular sınıfında iken diğer örneklerin tamamı C2-S1 sınıfında olduğu ve tuzluluk açısından orta derecede tuzlu sular sınıfında olduğu belirlenmiştir. Wilcox diyagramlarına göre 25, 26, 27 ve 28 nolu örnekler "iyi" kullanılabilir nitelikte, geri kalan örneklerin tamamı ise "çok iyi" kullanılabilir nitelikte olduğu ve suların sodyuma karşı hassas bitkiler haricinde, diğer tarımsal faaliyetlerde kullanılabilir özellikte olduğu belirlenmiştir.

Fe, Mn, Ni ve Cd elementlerinin derişimleri nehrin yerleşim yerleri içinde geçen bölümlerinde ve boşalım bölgesinde yüksek olup bu yüksek derişimlerin yoğun trafik ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek Zn değerlerinin ise tarımda kullanılan verim artırıcı kimyasal gübreler ile endüstriyel faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Pb derişimi incelendiğinde kurşun değerlerinin yerleşim yerleri ve ulaşım hatlarına yakın bölgelere yoğunlaştığı görülmektedir. Kurşun değerlerindeki bu artışın motorlu araç yakıtlarından ileri geldiği düşünülmektedir.

İz element analiz sonuçları Dünya Sağlık Örgütü'nün içme suyu standartlarına göre

değerlendirildiğinde; kurşunun Dünya Sağlık Örgütü'nün sınır değeri olan 0.01 mg/L 6, 10, 13, 15, 17, 18, 20, 21 ve 27 nolu örneklerde, arseniğin 0.01 mg/L olan sınır değeri 25 ve 26 nolu örneklerde, kadmiyumun 0.003 mg/L olan sınır değeri 20 ve 21 nolu örneklerde aşıldığı görülmektedir. Analiz yapılan diğer iz elementlerin değerleri ise Dünya Sağlık Örgütü tarafından belirlenen içme suyu standart değerlerinin altında olduğu belirlenmiştir.

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği'nde belirtilen sulama suyu sınıflandırmalarına göre; kurşunun 0.05 mg/L sınır değeri 10 nolu örnekte, arseniğin 0.01 mg/L olan sınır değeri 25 ve 26 nolu örneklerde aştığı görülmektedir.

Seyhan Nehri havzasında yapılan bu çalışmada genel olarak, havza boyunca; As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn iz elementleri derişimlerindeki artışlar bu bölgedeki tarımsal üretim, endüstriyel aktiviteler motorlu taşıtlar ve yerleşim yerlerinin yoğunluğuna bağlı meydana gelen antropojenik atıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle, Seyhan Nehri'nin taşımış olduğu alüvyonlarla beslediği havza ağzındaki verimli düzlüklerde yapılan tarımsal üretim ve buna bağlı kurulan tarımsal tesisler ve ana ulaşım arterlerinden kaynaklanan araç trafiği bölge sularının kimyasını ve kalitesini etkilemekte iz element konsantrasyonlarının yükselmesine neden olmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada katkılarından dolayı Mersin Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Mehmet Ali KURT'a ve Çukurova Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Öğretim Görevlisi Uğur ÇALYAN'a ayrı ayrı teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. World Health Organization (WHO), 2011. Guidelines for Drinking Water Quality, 4th ed.: WHO Publications, Geneva, 631.

2. Toroğlu, E., Toroğlu, S., Alaeddinoğlu, F., 2006. Aksu ayı'nda (Kahramanmaraş) Akarsu Kirliliği. Coğrafi Bilimler Dergisi, 4(1), 93-103.
3. Hernes, P.J., Spencer, R.G.M., Dyda, R.Y., Pellerin, B.A., Bachand, P.A.M., Bergamaschi, B.A., 2008. The Role of Hydrologic Regimes on Dissolved Organic Carbon Composition in an Agricultural Watershed. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(21), 5266–5277.
4. Yıldırım, Ü., Güler, C., Kurt, M.A., Güven, O., 2020. Kaynağından Akdeniz'e Deliay'ın (Mersin) Debisi ve Su Kalitesinin Değerlendirilmesi. *GÜFBED/GUSTIJ*, 10(4) 1121-1135.
5. Anderson, S.P., Longacre, S.A., Kraal, E.R., 2003. Patterns of Water Chemistry and Discharge in the Glacier-fed Kennicott River, Alaska: Evidence for Subglacial Water Storage Cycles. *Chemical Geology*, 202, 297-312.
6. Bulut, V.N., Bayram, A., Gundogdu, A., Soylak, M., Tufekci, M., 2010. Assessment of Water Quality Parameters in the Stream Galyan, Trabzon, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 165, 1-13.
7. Kroon, F.J., Kuhnert, P.M., Henderson, B.L., Wilkinson, S.N., Henderson, A.K., Abbott, B., Brodie, J.E., Turner, R.D.R., 2012. River Loads of Suspended Solids, Nitrogen, Phosphorus and Herbicides Delivered to the Great Barrier Reef Lagoon. *Marine Pollution Bulletin*, 65, 167-181.
8. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2020. Seyhan Havzası Taşkın Yönetim Planı Ankara. www.taskinyonetimi.tarimorman.gov.tr
9. Özgül, N., Kozlu, H., 2002. Kozan-Feke (Doğu Toroslar) Yöresinin Stratigrafisi ve Yapısal Konumu İle İlgili Bulgular. *TPJD Bülteni*, 14(1), 1-36.
10. Schmidt, G.C., 1961. Stratigraphic Nomenclature for the Adana Region Petroleum District. *Petroleum Administration Bull*, 6, 47-63.
11. Yetiş, C., Demirkol, C., 1986. Adana Baseni Batı Kesiminin Detay Jeolojisi Etüdü. M.T.A. Rap., 8037, Ankara.
12. Şenol, M., Şahin, Ş., Duman, T.Y., 1998. Adana- Mersin Dolayının Jeoloji Etüdü Raporu. M.T.A., Ankara.
13. Hem, J.D., 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2254, U.S. Geological Survey, Alexandria, Virginia.
14. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği (SKKY), 2011. Türk Standartları, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği, (4 Eylül 1988, Sayı: 19919), Resmi Gazete, Ankara.
15. Piper, A.M., 1944. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses. *Transactions of American Geophysical Union*, 25, 914-923.
16. United States Salinity Laboratory Staff (USSLS), 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, United States Department of Agriculture Handbook, 60, US Government Printing Office, Washington, DC.
17. Wilcox, L.V., 1948. The Quality of Water for Irrigation Use. U.S. Department of Agriculture Technology Bulletin, 962, 40.
18. Şahinci, A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası. *Reform Matbaası, İzmir*, 548.

Tencel Kumaşa Uygulanan Farklı Boyama Yöntemlerinin Seçilmiş Kumaş Performans Özelliklerine Etkisinin Değerlendirilmesi

Mehmet AKBULUT¹ ORCID 0009-0000-8660-7513

Füsün DOBA KADEM² ORCID 0000-0002-7764-5910

R. Tuğrul OĞULATA^{*2} ORCID 0000-0003-2783-5246

¹Oğuz Tekstil A.Ş., Adana

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 10.08.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/How to cite: AKBULUT, M., DOBA KADEM, F., OĞULATA, R.T., (2023). Tencel Kumaşa Uygulanan Farklı Boyama Yöntemlerinin Seçilmiş Kumaş Performans Özelliklerine Etkisinin Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 1107-1115.

Öz

Tencel kumaşlar genellikle dış giyimde, ev tekstili ve dekorasyon ürünlerinde kullanılmakta, çevre dostu bir lif olması nedeniyle son yıllarda önemi gittikçe artmaktadır. Literatürde farklı boyama yöntemleri ile boyanan tencel kumaşlarda yapılan araştırmalar incelendiğinde farklı performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada, %100 Tencel™ Lyocell hammaddesinden üretilen kumaş, işletme şartlarında dokunmuş ve jet boyama, e-kontrol boyama ve ön terbiye sonrası pad kesikli boyama olmak üzere 3 farklı yöntemle boyanmıştır. İşlem sonrasında boyalı kumaşların tuşesi Airo 24 makinesinde iyileştirilmiştir. Boyama sonrası kumaşlarda boncuklanma, yıkamadan sonrası boyut değişimi, pH tayini, yıkama haslığı, kopma ve yırtılma mukavemeti, kumaş sertliği gibi testler standartlara uygun olarak uygulanarak spektrofotometre ile renk değerlendirmesi yapılmıştır. Bu çalışma ile e-control boyamanın kumaş performansı açısından uygulanmasının daha doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tencel kumaş, Sürdürülebilir lif, Boncuklanma, Haslık

Different Dyeing Methods Applied to Tencel Fabric Evaluation of the Effect on Selected Fabric Performance Characteristics

Abstract

Tencel fabrics are generally used in outerwear, home textiles and decoration products, and their importance has been increasing in recent years due to being an environmentally friendly fiber. When the studies conducted in the literature on tencel fabrics dyed with different dyeing methods were examined, it was determined that they showed different performances. In this study, the fabric produced from 100% Tencel™ Lyocell raw material was woven under operating conditions and dyed with 3 different methods: jet dyeing, e-control dyeing and pad batch dyeing after pre-treatment. After the process, the touch of the dyed fabrics

*Sorumlu yazar (Corresponding author): R. Tuğrul OĞULATA, ogulata@gmail.com

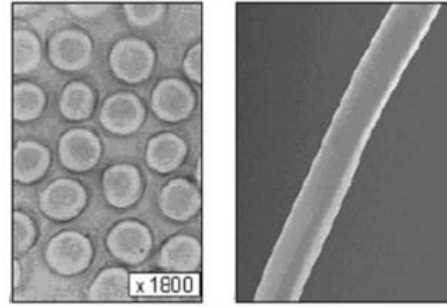
was improved on the Airo 24 machine. Tests such as pilling on fabrics after dyeing, size change after washing, pH determination, washing fastness, tensile and tear strength, fabric hardness were applied in accordance with standards and color evaluation was made with a spectrophotometer. With this study, it was concluded that the application of e-contol dyeing is more accurate in terms of fabric performance.

Keywords: Tencel fabric, Sustainable fibre, Pilling, Fastness

1. GİRİŞ

Tencel™ Lyocell son yıllarda kullanım alanı olarak geniş yelpazede yer alan rejenere selülozik bir elyafıdır. Tencel™ Lyocell lifi değişik özelliklerinden dolayı giysi, ev tekstili, teknik tekstiller gibi geniş bir alanda rahatlıkla kullanılmakta olup %100'e varan geri dönüşüm oranına sahip olması diğer tekstil hammaddelerine nazaran tercih edilebilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle de ekolojik bir alternatif oluşturmaktadır. Tencel™ Lyocell'in hammaddesi selüloz, biyolojik olarak çözülebilir, karbondioksitten nötralize olmuş, neredeyse sınırsız oranlarda temin edilebilir bir maddedir. Bu madde muhtelif ağaçlardan olduğu kadar bir yıllık bitkilerden de elde edilmektedir [1].

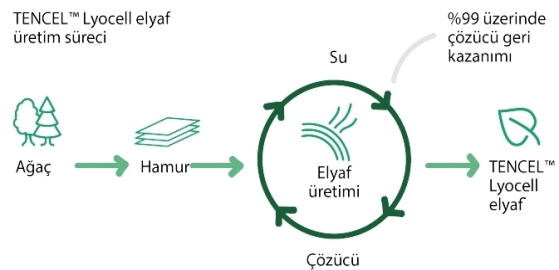
Rejenere selülozik esaslı bir elyaf türü olan tencel, yoğun mekanik işlemlere karşı yüksek bir dayanıma sahiptir. Yüksek yaş dayanımı ve modülü, kumaşlarda boyutsal dengeyi sağlamaktadır. Nefes alabilir özelliğe sahiptir, nemi çok iyi transfer eder ve vücudun terlemesi durumunda rahatsızlık hissi vermez. Birçok yıkamadan sonra bile parlaklığını ve rengini muhafaza eder dolayısıyla yüksek renk haslığına sahiptir. Tencel™ lyocell'in emicilik özelliği de oldukça yüksektir. Bu özellikten faydalanılarak yaş terbiye işlemleri boyunca lifin mükemmel bir şekilde şişmesi sağlanır. Böylece mamul kumaşta, yumuşak ve esnek bir tuşe elde edilir. Tencel™ lyocell iplikten kumaş konstrüksiyonu geliştirilirken lif şişmesi ve modülü göz önünde bulundurulmalıdır. Yüksek modul ve sağlamlık, kumaş içinde Tencel™ lyocell lifinin kolayca deforme olmayacağı ve daha kolay bir şekilde orijinal şeklini ve konumunu yeniden alacağı anlamına gelmektedir [2]. Şekil 1'de Tencel™ lyocell lifi enine kesiti ve boyuna görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 1. Tencel™ Lyocell lifi enine kesiti ve boyuna görüntüsü [1]

Tencel™ Lyocell liften ürünler, günlük giysilerden resmi giysilere kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Erkek, bayan ve çocuk giysileri, havlu ve bornozlar, çarşafklar, sportif giysiler, çoraplar, iç çamaşırları kullanım alanlarından bazılarıdır.

Tencel™ lyocell lifi, ağacın odun hamurundan çıkarılan selüloz hammaddesinin, tamamen geri kazanılabilen NMMO (N-metil morfolin – N-oksit) monohidrat çözeltisinin bir çözücü madde olarak kullanıldığı kuru ve ıslak eğirme sistemi kullanılarak üretilmektedir [3]. Tencel™ Lyocell lifleri, diğer rejenere selüloz liflerine kıyasla daha ekolojik bir üretim yöntemine sahiptir ve biyolojik olarak tamamen parçalanabilmektedir. Şekil 2'de üretim döngüsü verilmektedir.



Şekil 2. Tencel kumaşın elde edilme aşamaları [4]

Rejenere bir lif olan Tencel™ lyocell lifinin üretimi aşağıda belirtildiği üzere 4 aşamada gerçekleşmektedir.

1. Ağaç hamurundan selüloz çıkarılarak odun hamuru elde edilir.
2. Çözelti oluşturulur,
3. Çözeltiden lif çekimi sağlanır,
4. Çözücüyü uzaklaştırmak için lif yıkanır ve kurutulur.



Şekil 3. Tencel™ lyocell liften kumaşın elde edilmiş aşamaları [4]

Şekil 3'te ağaç hamurundan elyaf-iplik ve kumaş elde edilme aşamalarının görseli yer almaktadır.

Tencel™ lyocell hammaddeden lif, iplik ve kumaşların boyanması konusu özellikle son yıllarda çevre dostu liflere verilen önemin artması ile farklı bir boyut kazanmıştır. Bu kapsamda literatüre katkı yapabilecek çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir.

Onur, Tencel™ lyocell liften kumaşların dikiş mukavemetini değerlendirdiği çalışmada, atkı, çözgü ve verev dikişlerde en uygun dikiş parametrelerinin belirlenmesi ve en uygun dikiş ipliği seçiminin yapılabilmesini hedeflemiştir. Bu amaçla farklı gramajlarda ve farklı doku türlerinde 4 farklı kumaş ve 6 farklı dikiş ipliği kullanılmıştır. Belirli uzunluklarda atkı, çözgü ve verev yönlerde hazırlanan kumaşlara 2 farklı dikiş sıklığında dikiş denemeleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda kullanılan kumaşlar, mukavemet ve uzamada belirgin bir farklılık göstermiş, bez ayağı örgü yapısında en yüksek dikiş mukavemeti değerleri elde edilmiştir [1]. Dikiş ipliklerinin kalınlaşmasıyla, atkı, çözgü ve verev yönlerde dikiş mukavemet değerlerinin arttığı, dikiş ipliklerinin

incelmesiyle dikiş mukavemetinin azaldığı, verev yönde en yüksek mukavemet, çözgü yönünde en düşük mukavemet, ayrıca dikiş sıklığı artımının mukavemet ve uzamayı arttırdığı tespit edilmiştir. [5].

Alp, Tencel™ lyocell liften kumaşların farklı dikiş tiplerinde yıkama öncesi ve yıkama sonrası dikiş büzgülerinin oluşumunu incelediği bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada Tencel™ lyocell denim kumaş 8 farklı özellikte aynı incelikte dikiş ipliği ile atkı, çözgü ve verev yönde dikilmiş, üzerine çırma ve gaze süsleme dikişleri 2 farklı dikiş sıklığında uygulanmıştır. Denim kumaşların dikiş büzgüleri gözlemlenmiş, kot yıkama yapılarak yıkamadan sonraki dikiş büzgüleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Tencel™ lyocell denim kumaşların poliester (spun veya corespun) ipliklerle dikilmesinin daha uygun olduğu, pamuk dikiş ipliğinin uygun olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca denim kumaşların dikiminde dikiş sıklığının 4 batış/cm ve daha az olmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır [6].

Bilir çalışmasında, %25 Tencel™ lyocell-%75 pamuk, %50 Tencel™ Lyocell -%50 pamuk, %75 Tencel™ Lyocell -%25 pamuk, %100 Tencel™ Lyocell, %100 pamuk iplikleri, atkı ipliği olarak kullanarak 5 farklı karışım oranında dokuma kumaşlar elde etmiştir. Çalışmada, kumaş kompozisyonundaki Tencel™ lyocell oranının ipliklerin ve kumaşların özelliklerine etkilerinin istatistiksel olarak sonuçları değerlendirilmiş ve karışımdaki tencel oranı artıkça iplik kopma mukavemeti değerinin azaldığı görülmüştür. Karışımdaki Tencel™ lyocell oranının artmasının kumaşların yırtılma mukavemeti ve hava geçirgenliği değerlerinin artmasına neden olduğu görülmüştür [7].

Farklı oranlarda üretilen Tencel™ lyocell pamuk karışımı ipliklerin performans özelliklerinin incelenmesi amacı ile %25-%75, %50-%50, %75-%25 Tencel™ lyocell -pamuk, %100 Tencel™ lyocell ve % 100 penye pamuk olmak üzere aynı büküm ve doğrusal yoğunluğa sahip iplikler aynı üretim hattında üretilmişlerdir. Üretilen ipliklerin mukavemet özellikleri (kopma kuvveti, kopma mukavemeti, kopma uzaması, kopma işi),

düzensizlik, tüylülük, ince-kalın yer, büküm canlılığı ve bobin sertliği değerleri standartlara uygun bir şekilde ölçülmüştür. Çalışma sonucunda karışımdaki Tencel™ lyocell lif oranının ipliklerin mukavemet özelliklerine ve düzensizlik özelliklerine etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ve karışımdaki Tencel™ lyocell oranı arttıkça ipliklerin kopma yükü, kopma uzaması, kopma mukavemeti, kopma işi değerlerinin arttığı; % Um, % Cvm, ince-kalın yer sayısının ve neps değerlerinin ise azaldığı görülmüştür [8].

Özen ve Erdem İşmal'in çalışmasında çevre dostu, yapay ve selüloz esaslı rejenere bir lif olan Tencel™ Lyocell üzerine doğal boyama ve bitkileri şablon gibi kullanarak baskı uygulamaları yapılmıştır. Soğan kabuğu, zerdeçal, kök boya, nar kabuğu, endüstriyel bir yan ürün olan prina gibi doğal boyar madde kaynakları, potasyum alüminyum sülfat (şap), demir II sülfat, bakır II sülfat, kalay klorür gibi mordan maddeleri ile birlikte kullanılmıştır. Sistematik bir yaklaşımla en iyi uygulama koşulları ve sonuçlar belirlendikten sonra bitkilerle birlikte mümkün olan en düşük miktarlarda mordan maddeleri kullanılarak canlı, keskin kenarlı ve etkileyici görsel efektler elde edilmiştir. Birbirinden tamamen farklı, özgün ve tekrar edilemeyen bu desenler giysi tasarımları şeklinde sunulmuştur. Tasarımlarda kullanılan giysi modellerinin bol ve deseni gösterecek şekilde olmasına dikkat edilmiştir. Giysilerde farklı model ve ölçüler kullanılmış, doğal boyama ve eko baskı tekniği uygulanarak renklendirmenin yanı sıra çeşitli bitkilerin izleri de net bir şekilde kumaş yüzeyinde elde edilerek desenlendirme yoluyla özgün tasarımlar yapılmıştır [9].

Özen ve Erdem İşmal'in başka bir çalışmasında, Tencel™ lyocell kumaşın renklendirilmesi için, çeşitli bitkiler ve bitkisel atıklardan elde edilen doğal boyar maddeler ile birlikte düşük miktarlarda mordan maddeleri kullanılarak doğal boyama uygulamaları yapılmış ve renklendirme özellikleri incelenmiştir. Bademin dış yeşil kabuğu, pirina, ceviz kabuğu, soğan kabuğu, nar kabuğu, zerdeçal, kök boya, biberiye ve tarçın gibi doğal boyar madde kaynakları, özütleme yöntemiyle, potasyum alüminyum sülfat (şap), demir II sülfat, bakır II sülfat mordan maddelerini kullanarak ön

mordanlama yöntemine göre doğal boyamada kullanılmışlardır. Mümkün olan en az mordan ve boyar madde miktarları kullanılarak elde edilen doğal boyamaların renkleri incelenmiş, görsel kıyaslamaların yanı sıra renk ölçümleri ve yıkama haslığı özellikleri değerlendirilmiştir. Numunelerin yıkama haslık değerleri 4-5 olarak belirlenmiştir [10].

Özdemir ve Doba Kadem'in çalışmasında, pamuk ve Tencel™ lyocell liflerinden üretilen iplikler ile yuvarlak örme makinesinde süprem örme kumaş yüzeyleri oluşturulmuş ve elde edilen kumaşlar dijital baskı yöntemiyle renklendirilmiştir. Tencel™ lyocell ve pamuklu kumaşların, dijital baskı işlemi öncesinde ve sonrasında kuruma davranışının nasıl etkilendiğini tespit edebilmek için kuruma davranışı ve transfer kılcal ıslanma kabiliyeti deneysel olarak tespit edilerek numunelerin su ile olan etkileşimi değerlendirilmiştir. Kurumanın zamana bağlı hızının dolayısıyla kütle değişiminin ve transfer kılcal ıslanma kabiliyetinin literatürde var olan sonuçlarla uyumlu olduğu gözlenmiştir [11].

Bu çalışmada %100 Tencel™ lyocell dokuma kumaşa, ön terbiye işlemi yapılarak 3 farklı boyama yöntemi uygulanmıştır. Boya sonrası kumaşlara boncuklama, yıkamadan sonra boyut değişimi, pH tayini, yıkama haslığı, kopma ve yırtılma mukavemeti, kumaş sertliği gibi testler standartlara göre uygulanmış, spektrofotometre ile renk değerlendirmesi yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan %100 Tencel™ lyocell hammaddeden kumaş, işletme şartlarında dokunmuş ve ön terbiye sonrası 3 farklı yöntemle boyanmış mamul hale getirilmiştir. %100 Tencel™ lyocell dokuma kumaşın çözümlü ve atkı ipliği aynı hammaddeden Ne 24/1 iplik numarasında, çözümlü sıklığı 45 tel/cm, atkı sıklığı 26 tel/cm, örgüsü ise 2/1 S dimi olarak üretilmiştir. %100 Tencel kumaş, seçilmiş bir tekstil terbiye işletmesinde bir grup ön terbiye işlem adımlarından geçilerek boyalı kumaşların seçilmiş performans özellikleri

değerlendirilmiştir. Çalışmada, jet boyama işleminden geçen kumaş A, e-control (pad dry benzeri bir yöntem olup soğuk şekilde emdirme uygulamasıdır ve 1 saat gibi kısa bir sürede 25-30 bin metrenin boyanabilmesi sağlanmaktadır) boyamadan geçen kumaş B, emdirme yöntemi olan pad batch boyamadan geçen kumaş ise C kodu ile ifade edilmiştir.

Çizelge 1. Dokuma kumaş üretim şartları

Toplam çözgü tel sayısı	6602	
Tarak no (diş/tel)	135\3	
Tarak eni (cm)	163	
Atkı sıklığı (tel/cm)	Ham	25
	Mamul	26

Çalışmada kullanılan kumaşın haşıl yıkama işlemi 25 m/dk 95°C sıcaklıkta yapılmış, ramöz makinesinde 20 m/dk hızla 150°C'de kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Yakma işlemi 80°C'de çift yüz olarak uygulanmıştır [12]. Söz konusu işlemlerin devamında;

Jet boyamada %100 Tencel™ lyocell kumaş (A kumaşı) 8 saat halat halinde jet makinasında reaktif boyar madde ile boyanmıştır [12]. Kumaş, jet boyama makinesinde 8 saat yardımcı kimyasalla işlem görmüş jetten çıkan kumaşa 20 m/dk 150°C'de ramöz makinesinde kurutma yapılmıştır. Airo 24 isimli makinede apre işlemi yapılmış, kumaş tutumu iyileştirilmiştir.

Jet boyamada boyarmadde, sodyum sülfat, soda, iyon tutucu, kırık önleyici, stabilizatör kullanılmış ve nötrale ile işlem tamamlanmıştır.

E-control boyamada %100 Tencel™ lyocell kumaş (B kumaşı), soğuk şekilde emdirme yöntemi ile 30 m/dk 200°C sıcaklıkta açık ende reaktif boyar madde ile boyanmış ve sonrasında 80°C'de açık en yıkanmış, 20 m/dk 150°C'de ramöz makinesinde kurutma yapılmıştır [12]. Airo 24 isimli makinede apre işlemi yapılmıştır.

E-control boyamada, boyarmadde, boya bağlayıcı, ıslatıcı, kırık önleyici, soda bağlayıcı kullanılmıştır.

Pad batch boyamada ise, %100 Tencel™ lyocell kumaş soğuk boyama emdirme yöntemi ile 20 m/dk açık ende reaktif boyarmadde ile boyanmış (C kumaşı) ve 24 saat dönmeye bırakılmıştır. 80°C'de açık en yıkanmış, 20 m/dk 150°C'de ramöz makinesinde kurutma yapılmıştır [12]. Airo 24 isimli makinede apre işlemi yapılmış, kumaş tutumu iyileştirilmiştir.

Pad batch boyamada boyarmadde, ıslatıcı, silikat boya bağlayıcı ve kostik boya bağlayıcı kullanılmıştır.

Airo 24 makinesinde, üç kumaşa da 15 m/dk ile 150°C'de fulardda apre kimyasalı verilerek son tuşe elde edilmiştir [12].

%100 Tencel™ lyocell kumaşın farklı boyama yöntemleri sonrası standartlara göre seçilmiş performans testleri yapılmıştır. Empa Standart Sn 198525'a göre boncuklanma (pilling testi), TS EN ISO 5077'ye göre yıkamadan sonra boyut değişimi, ASTM D 4032-94 standardına göre kumaş sertliği (stiffness), TS EN ISO 3071 standardına göre pH ölçümü, TS EN ISO 105-C06 standardına göre yıkama haslığı, TS EN ISO 13934-1 standardına göre kumaş kopma mukavemeti, ASTM D1424 standardına göre de kumaş yırtılma mukavemeti testi yapılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

%100 Tencel™ lyocell hammaddeden kumaşın, ön terbiye sonrası farklı yöntemle boyanmış kumaşlarına uygulanan performans testleri sonucu, elde edilen veriler Çizelge 2-7'de verilmiştir.

Çizelge 2. Boncuklanma (pilling) testi sonuçları [12]

Numune	A Kumaşı	B Kumaşı	C Kumaşı
1	4/5	4/5	4/5
2	4/5	4/5	4/5
3	4/5	4/5	4/5
4	4/5	4/5	4/5
5	4/5	4/5	4/5
Ortalama	4/5	4/5	4/5

Çizelge 2'den boncuklanma değerinin üç boyama yöntemi sonucunda da 4/5 olarak iyi olduğu görülmektedir.

Tencel™ lyocell lifinin fibrillenme eğilimi diğer selülozik liflere göre daha yüksektir. Tencel, yüksek kristalli yapısı ve kristalitler arasındaki bağlar nedeni ile lifler, esas olarak ıslak aşınma koşulları altında, fibrilasyon olarak bilinen yüzeyde lifli elementlerin lokalize olarak ayrılmasına maruz kalır. Bu fibrilasyon önlenmezse, birbirlerine geçerek tüylenmeye sebep olur. Tencel liflerinin fibrilasyon eğilimi şişme durumu ile ilişkilidir. Reaktif boyar maddeler tencel lifinin fibrilasyon davranışı üzerinde olumlu etkiye sahiptir. Reaktif boyar maddeler selüloz zincirleriyle çapraz bağlanarak, ıslak işleme sırasında fibrilasyonu azaltmaktadır [3]. Boncuklanma değerinin iyi olması da bu durumla açıklanabilir.

Çizelge 3'te çalışmada kullanılan kumaşların yıkamadan sonra boyut değişimi değerleri yer almakta olup, bu değerler kumaş çekme değerleridir.

Çizelge 3. Yıkamadan sonra boyut değişimi sonuçları (%) [12]

Numune No	A Kumaşı		B Kumaşı		C Kumaşı	
	Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı
1	4,5	1	4	2	3	1
2	4,5	1	4	2,5	3,5	0,5
3	5	2	5	1,5	3,5	1
Ortalama	4,6	1,3	4,3	2,0	3,3	0,8
Standart Sapma	0,29	0,58	0,58	0,50	0,12	0,29

Çalışmanın yürütüldüğü işletmede çözgü ve atkı doğrultusunda kabul edilen yıkamadan sonra boyut değişimi (çekme veya uzama) maksimum %3.5 olarak dikkate alınmaktadır. Uygulamalardan sadece Pad Batch boyamada C kumaşında istenilen değere ulaşılabilmektedir.

İşletme şartlarında yapılan üç boyama uygulaması sonucu kumaşların pH ölçüm değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. pH Tayini Sonuçları [12]

Numune No	A Kumaşı	B Kumaşı	C Kumaşı
1	7,27	7,28	7,57
2	7,10	7,14	7,35
3	7,05	7,21	7,41
Ortalama	7,14	7,21	7,44
Standart Sapma	0,12	0,07	0,11

Çizelge 4'ten boyama işlemi yapılmış mamul kumaşın üçünün de işletme şartlarında istenen pH değerini (6-8 aralığı) sağladığı görülmektedir.

Çizelge 5. Yıkama haslığı test sonuçları [12]

Numune No	A Kumaşı	B Kumaşı	C Kumaşı
1	3-4	4-5	4-5
2	3-4	4-5	4-5
3	3-4	4-5	4-5
Ortalama	3-4	4-5	4-5

Çizelge 5'te yıkama haslığı değerleri incelendiğinde, B ve C kumaşlarının oldukça iyi haslık değerini sağladığı ancak halat halinde boyamanın yapıldığı A kumaşında orta düzeyde bir değer elde edildiği görülmektedir. Jet boyama işleminden geçen A kumaşının halat boyama sonrası halat açma yapıp açık en halinde rolıklere sarılıp sonrasında gördüğü işlem adımlarından da rengin istenilen verimlilikte tutmadığı düşünülmektedir.

Çizelge 6'da ise kumaşların spektrofotometrik renk analizleri gösterilmektedir. Minolta marka CM 3600 model spektrofotometre cihazı ile gözlemci açısı 10° olacak şekilde, D65 gün ışığı altında ölçümler yapılmıştır.

L*: Açıklık/ koyuluk değeri (100: beyaz, 0: siyah)
a*: Kırmızılık/ yeşillik değeri (+ daha kırmızı, - daha yeşil)

b*: Sarılık/ mavilik değeri (+ daha sarı, - daha mavi)

C: Doğunluk

h: Renk cinsi [9]

Bir rengin a (Kırmızılık/ yeşillik) değeri arttığında daha kırmızı nüanslı olduğu, azaldığında ise daha yeşil nüansa kaydığı anlaşılmaktadır. Bir rengin b (Sarılık/mavilik) değeri arttığında ise renk daha

fazla sarı nüansa sahip olup, azalması durumunda mavi nüansa doğru kaymaktadır [10].

Çizelge 6. Spektrofotometre ölçüm tablosu [12]

	A Kumaşı		B Kumaşı		C Kumaşı	
	Yıkama öncesi	Yıkama sonrası	Yıkama öncesi	Yıkama sonrası	Yıkama öncesi	Yıkama sonrası
L*	28,17	25,57	72,66	71,63	43,31	42,56
a*	12,89	13,06	7,47	7,44	10,14	10,07
b*	1,23	1,09	8,48	7,84	18,39	18,42
c	12,95	13,1	11,3	10,81	21,0	21,0
h	185,46	184,77	48,63	46,5	63,12	61,33

Çizelge 6 incelendiğinde, üç kumaşta da yıkama sonrasında rengin daha açık olduğu, yıkama sonrası A kumaşının daha kırmızı nüanslı olduğu, B ve C kumaşlarının daha yeşil nüansa kaydığı anlaşılmaktadır.

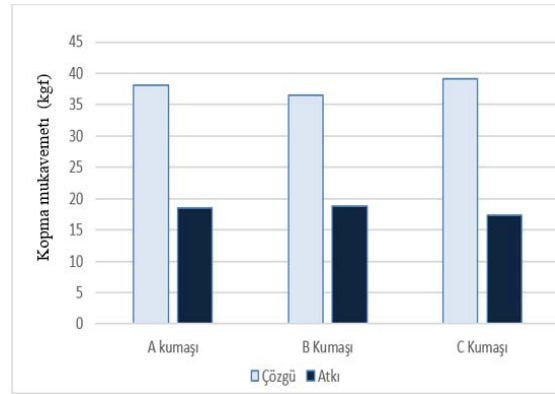
Çizelge 7. Kumaş sertliği (stiffness) test sonuçları

Numune No	A Kumaşı	B Kumaşı	C Kumaşı
1	77	91	67
2	78	67	81
3	60	88	67
4	65	73	58
5	58	96	70
Ortalama (gf)	67,6	83	68,6
Standart Sapma	9.40	12.39	8.26

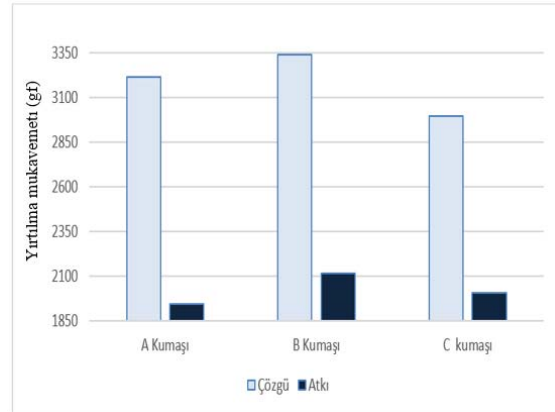
Çizelge 7’de kumaş sertlik değerleri verilmiş olup bu değer yüksek olması kumaşın sertliğinin arttığı (daha rijit olduğu) anlamına gelmektedir. Çalışmada, jet boyama işleminden geçen kumaş A ve pad batch boyamadan geçen kumaş C daha yumuşak, E-control boyamadan geçen kumaş B ise 83 gf değeri ile daha rijit bir kumaş özelliği göstermiştir. E-control boyama işleminin diğer iki yöntemle kıyaslandığında kurutma ve Airo 24 adımları aynı olsa da, söz konusu kumaşın çok kısa sürede bir seferde uzun metrajlarda işlem gördüğü dikkate alındığında, emdirme uygulamasında daha fazla kimyasalı bünyesine alması nedeniyle tuşenin daha sert olduğu kanaati oluşmuştur. Jet boyama işleminde kumaşın daha fazla işleme maruz kalması, dolayısıyla kumaşın daha fazla yorulması, uygulanan işlem adımlarının kumaş tutumun daha

yumuşak olmasını sağladığı şeklinde yorumlanabilir.

Şekil 4’te kumaşların kopma mukavemeti grafiği incelendiğinde değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Kumaş kopma mukavemetinin, boyama yöntemi olarak, farklı boyama uygulamalarından fazla etkilenmediği şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4. Kumaş kopma mukavemeti sonuçları [12]



Şekil 5. Kumaş yırtılma mukavemeti sonuçları [12]

Şekil 5’te yırtılma mukavemeti grafiği incelendiğinde özellikle atkı yırtılma mukavemetinde sonuçlar birbirinden oldukça farklı bulunmuştur. Jet boyama işlemi görmüş A kumaşının makinede kalma süresinin daha fazla olması, halat halinde işlem görmesi ve halat açma işlemi ve devamında kumaşın gördüğü muameleler, yırtılma mukavemeti gibi terbiyenin her

aşamasından etkilenebilen bir performans özelliğini olumsuz anlamda etkilemiştir. Açık en halinde işlem gören B kumaşında boyama işleminin daha kısa sürede gerçekleşmesi C kumaşının yırtılma mukavemetinden daha yüksek atkı yırtılma mukavemeti göstermiştir. B kumaşının boyama işleminde fazla yıpranmadığı (işlem süresinin diğerlerine göre daha kısa olması nedeniyle) düşünüldüğünde, hem atkı hem çözgü yırtılma mukavemetinin daha yüksek çıkması beklenen bir durum olarak değerlendirilebilir.

Yırtılma mukavemetinin lif özellikleri, iplik özellikleri, kumaş özellikleri ve kumaşa uygulanan terbiye işlemleri gibi farklı faktörlere bağlı olması nedeniyle kontrol edilebilmesi zor olduğu düşünülmektedir. Kumaşların kullanım yerine uygun olarak hammadde seçimi, kullanılacak atkı-çözgü sıklıklarının, doku türünün, kumaşa uygulanacak terbiye işlemlerinin, istenilen yırtılma mukavemetine göre seçilmesi önerilir [13].

4. SONUÇ

Özellikle son zamanlarda çevre dostu olarak tekrar geri dönüştürülebildiğinden, Tencel™ lyocell lifi konusunda araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Kendine has yumuşak bir tutumu olan, pamuğun yapısına benzerlik gösteren Tencel™ lyocell lifi, boyanabilmesi, baskı ile renklendirilebilmesi, konfor özelliklerinin tercih edilebilmesi ile kumaş performansı açısından daha fazla kullanım alanı bulmakta olan bir tekstil ham maddesidir.

Çalışmada kullanılan %100 Tencel™ lyocell hammaddeden kumaş, işletme şartlarında dokunmuş ve ön terbiye sonrası jet boyama, e-control boyama ve pad batch boyama olmak 3 farklı yöntemle boyanmış mamul hale getirilmiştir. İşlem sonrasında boyanan üç kumaşın Airo 24 isimli makinede tuşesi iyileştirilmiştir. Boyama sonrası kumaşlara boncuklanma, yıkamadan sonra boyut değişimi, pH tayini, yıkama haslığı, kopma ve yırtılma mukavemeti, kumaş sertliği gibi testler standartlara göre uygulanmış, spektrofotometre ile renk değerlendirmesi yapılmıştır.

Boncuklanma değerinin üç boyama yöntemi sonucunda da 4/5 olarak iyi olduğu görülmektedir.

Bunun sebebinin kullanılan reaktif boyar maddenin lifin fibrilasyon davranışı üzerinde olumlu etki yaratmış olduğu ile açıklanabilir.

Boyama işlemi yapılmış kumaşların üçünün de işletme şartlarında istenen pH değerini (6-8 aralığı) sağladığı görülmüştür.

Yıkama haslığı test sonuçları değerlendirildiğinde, sadece jet boyama işleminden geçen kumaşın haslık değeri düşük bulunmuştur. Halat boyama sonrası halat açma yapılıp açık en halinde rolilere sarılıp sonrasında gördüğü işlem adımlarından dolayı rengin istenilen verimlilikte tutmadığı düşünülmektedir.

Spektrofotometrede yapılan analiz sonucunda L*, a*, b*, c, h değerleri olarak üç kumaşın da yıkama sonrasında renk değişimi olduğu, rengin açıldığı görülmektedir.

Kumaşların kopma mukavemeti ölçümlerinde birbirine yakın sonuçlar elde edilirken, yırtılma mukavemeti değerlerinde özellikle e-control boyama yapılan kumaşın hem atkı hem çözgü yırtılma mukavemetinin daha yüksek çıkmasının, diğer yöntemlere göre boyama işleminde kumaşın fazla yıpranmadığı durumu düşünülerek değerlendirilebilir.

Kumaşların boyama sonrasında aynı tuşe işlemine tabi tutulduğu dikkate alındığında, üç yöntemden sadece e-control boyamadan çıkan kumaşın daha sert tutumda bulunduğu görülmüştür. Emdirme uygulamasında kumaşın daha fazla kimyasalı bünyesine alması nedeniyle daha sert tuşeye sebep olduğu kanaati oluşmuştur.

5. TEŞEKKÜR

Yazarlar olarak, OĞUZ TEKSTİL. AŞ (Adana) ve BOSSA A.Ş. ye (Adana) desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Onur, N., 2009. Tencel Kumaşlarda Dikiş Parametrelerinin Dikiş Mukavemetine Etkilerinin İncelenmesi.Yüksek Lisans Tezi,

- Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Eğitimi Anabilim Dalı, 102.
2. Tencel, <https://karsu.com.tr/urunler/modaipleklerle/tencel/>. Erişim tarihi: 05.08.2023
 3. Ögüt, T., Kaya Nacarkahya, T., Özden, K., Çelikten, E., 2022. Farklı Derişimlerdeki NaOH Çözeltisi ile Muamele Edilmiş Ecocell® (Lyocell) Öorme Kumaşların Doğal Boyama Efektinin İncelenmesi. Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi-UÇTEK 2022 Bildiri Kitabı, 353-359, Adana, Türkiye
 4. Tencel Kumaş Özellikleri, <https://tekstilbilgi.net/tencel-nedir.html>. Erişim tarihi: 10.08.2023.
 5. Çitoğlu, F., Onur, N., 2010. Tencel Kumaşlarda Dikiş Parametrelerinin Dikiş Mukavemetine Etkilerinin İncelenmesi. Tekstil ve Konfeksiyon, 20(4), 359-365.
 6. Alp, E., 2010. Tencel Kumaşlarda Farklı Parametrelerde Dikiş Büzgülerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Eğitimi Anabilim Dalı, 72.
 7. Bilir, T.B., 2016. İplik Kompozisyonundaki Tencel Oranının İplik ve Kumaş Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, 120.
 8. Bilir, T.B., Şardağ, S., 2017. Tencel ve Pamuk Karışımli İpliklerin Performans Özelliklerinin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 22(1), 13-27.
 9. Özen, Ö., Erdem İşmal, Ö., 2021. Tekstil Tasarımına Ekolojik Bir Yaklaşım: Lyocell Üzerine Doğal Boyama ve Eko Baskı. Yedi: Sanat, Tasarım ve Bilim Dergisi, 26, 109-130.
 10. Özen, Ö., Erdem İşmal, Ö., 2023. Doğadan İlham Alan Çevre Dostu Tasarımlar İçin Bir Potansiyel Olarak Lyocell Lifleri ve Doğal Boyalar. Sanat&Tasarım Dergisi, 13(1), 201-213.
 11. Özdemir, Ş., Doba Kadem, F., 2019. An Experimental Study on Drying Behavior in Digital Printed Fabrics. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi (DEU FMD), 21(63), 927-932.
 12. Akbulut, M., 2022. Tencel Kumaşa Uygulanan Farklı Boyama Yöntemlerinin Kumaş Performansına Olan Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, 73.
 13. Doba Kadem, F., Oğulata, R.T., 2009. Boyalı İpliklerden Üretilen Farklı Konstrüksiyonlardaki Pamuklu Kumaşlarda Kumaş Yırtılma Mukavemetinin Regresyon Analizi. Tekstil ve Konfeksiyon, 19(2), 97-101.

Investigation of the Effect of Different Parameters of Phase Change Materials on Heat Exchanger Performance

Turan GÜNEŞ¹ ORCID 0009-0000-2263-3421
Mahir ŞAHİN^{*1} ORCID 0000-0002-9565-9160
Mustafa KILIÇ¹ ORCID 0000-0002-8006-149X

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 01.08.2023 Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: GÜNEŞ, T., ŞAHİN, M., KILIÇ, M., (2023). Investigation of the Effect of Different Parameters of Phase Change Materials on Heat Exchanger Performance. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 1117-1128.

Abstract

Technological improvements and increasing energy demand necessitate energy efficient designs for heat transfer systems. The storage and reuse of heat energy plays an important role in the development of energy-efficient systems. Phase change materials (PCMs) are crucial components which increase energy efficiency in heat exchangers as can be applied to many systems. In this study, the heat transfer performance of different types of phase change materials in a regenerative heat exchanger was investigated according to different parameters. Reynolds number depending on the hot fluid velocity ($Re=400, 800, 1200, 1600$), hot fluid inlet temperature ($T_{sıcak,giriş}=40, 60, 70, 80^{\circ}C$), and different types of phase change materials (RT60, RT100, and SP70) are the parameters used in this study. ANSYS Fluent software was used for computational fluid dynamics analysis. As a result, it has been determined that when the Reynolds number of the hot fluid in the heat exchanger was increased in the range of $Re=400-1600$, the heat transfer effectiveness increase of 17%; when the hot fluid inlet temperature was increased in the range of $T_{hot,inlet}=40-80^{\circ}C$, the heat transfer effectiveness increase of 21%. As regards the effect of different types of phase change materials, the heat transfer effectiveness was 81% for RT60, 79% for SP70 and 76% for RT100. It has been evaluated that, with the results obtained from this study, heat exchangers with higher heat transfer effectiveness and higher energy storage capacity can be designed.

Keywords: Phase change material, heat exchanger, heat transfer effectiveness, Reynolds number

Faz Değiştiren Malzemelerin Isı Değiştiricisi Performansına Etkisinin, Farklı Parametreler İçin İncelenmesi

Öz

Teknolojik ilerlemeler ve artan enerji talebi, ısı transfer sistemlerinde enerji tasarruflu tasarımları gerekli kılmaktadır. Enerji tasarruflu sistemlerin geliştirilmesinde, ısı enerjisinin depolanması ve tekrar kullanılabilmesi önemli bir rol oynamaktadır. Faz değiştiren malzemeler (FDM), birçok sisteme

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Mahir ŞAHİN, msahin@atu.edu.tr

uygulanabildiği gibi ısı değiştiricilerinde de sistemin enerji veriminde önemli artış sağlayan bir bileşendir. Bu çalışmada, rejeneratif bir ısı değiştiricisinde farklı tipteki faz değiştiren malzemelerin ısı transfer performansını farklı parametrelere göre incelenmiştir. Çalışmada kullanılan parametreler; sıcak akışkan hızına bağlı Reynolds sayısı ($Re=400, 800, 1200, 1600$), sıcak akışkan giriş sıcaklığı ($T_{sıcak,giriş}=40, 60, 70, 80^{\circ}C$) ve farklı tipteki faz değiştiren malzemelerdir (RT60, RT100 ve SP70). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi için ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Sonuç olarak, ısı değiştiricisinde sıcak akışkanın Reynolds sayısı $Re=400-1600$ aralığında arttırıldığında ısı transfer etkinliğinde %17 artış; sıcak akışkan giriş sıcaklığı $T_{sıcak,giriş}=40-80^{\circ}C$ aralığında arttırıldığında ısı transfer etkinliğinde %21 artış tespit edilmiştir. Farklı tipteki faz değiştiren malzemelerin etkisi incelendiğinde ise; RT60 için ısı transfer etkinliği %81, SP70 için ısı transfer etkinliği %79 ve RT100 için ise ısı transfer etkinliği %76 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla, ısı transfer etkinliği ve enerji depolama kapasitesi daha yüksek ısı değiştiricilerin tasarlanabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzemeler, ısı değiştiricisi, ısı transfer etkinliği, Reynolds sayısı

1. INTRODUCTION

Thermal energy storage (TES) systems have always played a critical role in industrial and domestic purposes in order to achieve cost effective and energy efficient systems. Heat exchangers are main components for heat transfer systems and thermal energy storage or energy transfer systems. There are many active and passive methods to improve the effectiveness of heat exchangers. Surface modifications, vortex generators, different types of baffles, various geometrical structures, nanofluids are some of passive methods [1]. Passive methods gain more importance than active methods due to their energy saving manners. As another passive method in heat exchangers, phase change materials are substances based on melting or solidification caused by the temperature difference of one or more materials, allowing energy to be stored and reused [2]. Phase-change materials (PCMs) have an important factor in the design of thermal systems due to their thermal energy control capability, chemical stability, high thermal energy storage capacity, sensitivity to small temperature changes [3].

Regenerative heat exchangers are used in many fields where required to be stored and reuse thermal energy. Different types of PCMs are used in regenerative heat exchangers as thermal energy storage and release medium. Phase change regenerative heat exchangers are used in many fields such as electronic devices [4-6], solar energy applications [7,8], waste heat recovery [9-11],

thermal management systems [12], smart buildings [13-15]. In order to figure out the issue between energy demand and supply and improve the energy efficient systems, latent heat thermal energy storage (LHTES) systems based on PCMs offer a large variety of commercial and residential applications. The ability of absorbing heat, adjusting melting range and transferring stored heat of phase change materials make them applicable in many fields of heat transfer systems.

In the literature, Fragnito et. al. [16] examined the effect of using fractal fin structures in a latent heat exchanger on the weak thermal conductivity of phase change materials (PCMs). In the simulations, it was observed that the fractal fin heat exchanger reduced the melting time of PCM by 27.3% compared to a rectangular fin heat exchanger. Furthermore, the simulations showed that the optimized fractal fins resulted in a 35.6% decrease in melting time. The investigations concluded that the use of fractal-type fins with low thermal conductivity PCM in heat exchangers can reduce melting time and improve system efficiency. Faraj et. al. [17] conducted a literature study demonstrating the feasibility of thermal energy storage systems in buildings. The aim of the study was to show that in buildings with significant environmental impact, thermal comfort can be achieved by preserving the existing energy of heating and cooling systems. As a result of their research, it was noticed that using suitable structure and geometry, PCMs can be employed to prevent temperature fluctuations inside buildings under

cooling conditions, leading to energy savings. Hathal et. al. [18] conducted a numerical and experimental research to demonstrate the effect of using phase change materials (PCMs) in thermal energy storage technologies. They added PCM types such as paraffin, salt hydrate, and a mixture of salt hydrates to thermal energy storage tanks. The composite PCMs used in the experiments provided greater contributions to energy storage. PCM materials can be used as an alternative for a sustainable energy system. In conclusion, the experiments showed that PCMs can play an active role in thermal energy systems. Konuklu et. al. [19] carried out an experimental study to increase energy efficiency and reduce waste heat. In the experimental study, the changes in ambient temperature were compared by insulating a container with phase change materials. As a result, it has been observed that it provides 5–10 % energy savings in cooling in summer and 10–20 % in winter compared to an uninsulated environment. Koukou et. al. [20] examined a latent heat thermal energy storage (LHTES) unit used in a cascaded heat exchanger, employing different phase change materials (PCMs) at low temperatures. All the organic PCMs used in the study exhibited a super-cooling effect directly affecting the heat dissipation of the LHTES unit. Koşan et. al. [21] analyzed the thermal behavior of the melting temperature, which is the latent heat storage limit of the phase change materials. The materials are the inner element of the heat exchanger, which is used effectively in thermal energy storage systems, at variable geometry and system inlet temperature. The analysis was carried out with the computer using ANSYS Fluent program. As a result, it was observed that the melting time of the phase change material decreased as the variable system inlet temperature increased (50°C, 60°C and 70°C). The same result was observed as the number of fins (6, 9, 12 and 15), which is another parameter. Ljungdahl et. al. [22] investigated the potential of using phase change materials (PCMs) to support waste heat recovery in information systems and high-performance computing clusters. The cooling of data centers (DC) and high-performance computing (HPC) systems involves significant energy consumption. A study conducted in Denmark showed that PCM usage reduced electricity consumption by

approximately 8.14% to 10.8%. However, the efficiency of latent heat storage varies seasonally depending on the temperature difference between the system and the environment. Despite these variations, it has been determined that PCM applications need for improvement and their current state is not efficient for use in advanced systems. Mat et. al. [23] conducted an analysis of the performance of a heat exchanger using phase change material as an alternative to improve the efficiency of solar energy systems. The analysis was carried out using a computer fluent software. The PCMs in the heat exchanger was analyzed with fins on the inside, outside, and on both sides. The analysis revealed that in the heat exchanger with internal and external finned triple pipes, the melting time was observed to decrease by 43%. Rana et. al. [24] examined the effect of heat transfer performance of increasing number of fins in a heat exchanger coated with phase change material. The study was conducted using two-dimensional computational fluid dynamics (CFD) simulations. CFD simulations were used to investigate the design of the heat exchanger. It was observed that the heat transfer performance increased when PCM was used at temperatures of 50°C and 60°C. The use of phase change materials in the system also reduced the melting time. Tomizawa et al. [25] conducted an experiment to investigate the reduction of generated heat for mobile phones using phase change materials (PCMs). The generated heat by mobile phones is typically dissipated through passive cooling methods. Due to the latent heat property of PCMs, they can reduce the rate of temperature increase. As a result, the encapsulated PCMs applied to mobile phones were found to decrease the rate of heat accumulation and achieve higher performance. Youssef et. al. [26] aimed to improve the thermal conductivity of various phase change materials (PCMs) for effective utilization in heat exchangers in their study. One of the factors influencing the preference for phase change materials in latent heat storage applications is its low thermal conductivity. In the analysis, heat exchangers with spiral wire tubes were designed and an indirectly solar-assisted heat pump was integrated. In order to validate the findings, a 3D CFD model of the PCM heat exchanger was created and compared with measurement results.

Osterman et. al. [27] examined the performance of heating and cooling systems in large energy-consuming buildings by storing thermal energy using phase change materials in order to reduce energy consumption. They selected the paraffin RT22HC material for the investigation. They built an office using plates filled with RT22HC as the experimental chamber. The heating and cooling performance of the office was observed throughout the year. Initially, the structure was analyzed as numerical model. Subsequently, an experimental setup was created. It was observed that using PCM resulted in an annual energy saving of approximately 142 kWh. Nithyanandam et. al. [28] examined the optimization of encapsulated phase change materials in thermal energy storage in their research. In the study, the capsule parameters were varied to achieve a targeted storage cost of less than \$15/kWh and a storage charging time of less than 6 hours. The charging and discharging times of different PCM types were also examined in the study. Through numerical analysis, optimization was achieved by adjusting capsule dimensions, PCM quantities, PCM types, and flow types. The initially targeted optimal cost and charging time were obtained from a cylinder with a diameter of 15 mm, a height of 15 m, and a diameter of 11.25 m (\$7.55/kWh and 7.42 hours). This study provided a model-based optimization for encapsulated thermal energy storage. Wang et al. [29] proposed a novel rotary regenerative heat exchanger filled with PCM capsules and examined it numerically with traditional one. The effects of using PCM capsules have lead better temperature distribution in the heat exchanger. Rajagopal and Velraj [30] investigated a PCM based a flat plate heat exchanger numerically and experimentally for cooling applications. It has been evaluated that decreasing inlet temperature of air in the heat exchanger cause a reduce in solidification time of PCM. Zhou and Zhao [31] investigated heat transfer properties of paraffin wax RT27 and calcium chloride embedded in graphite and open-cell metal foam experimentally. The results indicate that porous structure enhanced heat transfer rate of PCM medium. Jaworski [32] presented an experimental report on thermal performance of structure formed with PCM integrated with ventilation system in buildings. The set-up showed that warm air in day time can melt

PCM and melted PCM can warm cool air by solidifying in night time. Kaizawa et. al. [33] investigated thermophysical characteristics of different sugar and sodium acetate trihydrate as PCMs. According to results, erythritol as a PCM showed the best performance among others due to good chemical stability and high decomposition point. Palmer et. al. [34] studied a structured fin configuration which reduce PCM melting time by enhancing flow dynamic in a triple tube heat exchanger. Findings showed that optimized fin structure in the triple tube heat exchanger can reduce melting time up to 57.4% and can improve heat energy storage capacity. The study also indicated that upper fins in the heat exchanger can provide better heat transfer performance that lower fins. Wang et. al. [35] studied the effects of melting time, storage capacity and heat transfer characteristics of PCMs integrated as copper metal foam composites. The experimental study showed that increasing copper proportion in the composite from 0% to 2.13% has decreased melting time of PCMs and has increased storage capacity and heat transfer rate of the system. The study also indicates that the best heat storage capacity for the copper metal foam composite was obtained at 2.13% proportion. Kittusamy et. al. [36] investigated to enhance thermal conductivity of phase change material (OM65) numerically and experimentally. In the study, three different models were composed with different nanographene particle proportions. The results indicated that reduction in melting time up to 37.5% for PCM models with nanographene was indicated when compared to base PCM model. Xu et. al. [37] conducted a numerical study to examine the effect of magnetic field on thermal storage capacity of nano enhanced phase change material formed with metal foam. Increasing volume fraction of nanoparticles in the composite material could improve melting time but has no remarkable effect on heat transfer. Sudhakaran et. al. [38] conducted a numerical study to evaluate the effects of material and thickness on thermal management performance for batteries. Among others, RT35 phase change material showed a promising performance. Soliman et. al. [39] evaluated heat transfer and energy storage performance of different PCMs for a PV system experimentally. The results ensured that RT44

material achieved the highest energy storage while RT25 showed the lowest temperature for PV system.

Different from the literature, this study numerically investigates heat transfer effectiveness and thermal energy storage capacity of different types of PCMs (RT 60, RT 100 and SP 70) as regards to Reynolds number and inlet temperature of hot fluid under laminar flow condition. Obtained results compared with experimental data which was performed with pure water in a heat exchanger.

2. MATERIAL AND METHOD

The RT category of PCMs manufactured by RUBITHERM consists of organic substances. These PCMs employ phase transition mechanisms, specifically the melting and solidification processes, to efficiently store and release substantial quantities of heat energy within consistent temperature range. Depending on their melting points, these PCMs can be employed for diverse heat storage applications for varying temperature ranges. PCMs demonstrate a noteworthy latent heat capacity within narrow temperature intervals, owing to their exceptional purity and specific compositions. Additionally, they possess chemical inertness and an unlimited lifespan. Physical properties of RT60 and RT100 products are presented in Table 1 and Table 2, respectively [40].

Table 1. Properties of RT60 material [40].

Properties	Values	Unit
Melting range	55-61	°C
Congeaing range	61-55	°C
Heat energy storage capacity $\pm 7,5\%$ (Combination of sensible and latent heat in temperature range of 90°C to 105°C.)	160 40	kJ/kg Wh/kg
Specific heat	2	kJ/kg·K
Density (solid)	0.88	kg/L
Density (liquid)	0.77	kg/L
Thermal conductivity (for both phases)	0.2	W/(m·K)
Volume expansion	12.5	%
Flash point	>200	°C
Operation temperature (max.)	80	°C

Table 2. Properties of RT100 material [40].

Properties	Values	Unit
Melting range	90-112	°C
Congeaing range	108-86	°C
Heat energy storage capacity $\pm 7,5\%$ (Combination of latent and sensible heat in temperature range of 90°C to 105°C.)	124 34	kJ/kg Wh/kg
Specific heat	2	kJ/kg·K
Density (solid)	0.88	kg/L
Density (liquid)	0.77	kg/L
Thermal conductivity (for both phases)	0.2	W/(m·K)
Volume expansion	12.5	%
Flash point	312	°C
Operation temperature (max.)	120	°C

Rubitherm SP products as PCMs utilizing combinations of saltwater mixtures and additives, which act as latent heat storage media. These PCMs undergo phase transitions between solid and liquid phases, enabling release and storage of significant thermal energy. The melting temperatures of SP materials may differ slightly from RT materials. Physical properties of SP70 are presented in Table 3.

Table 3. Properties of SP70 material [40].

Properties	Values	Unit
Melting range	69-73	°C
Congeaing range	68-66	°C
Heat energy storage capacity $\pm 7,5\%$ (Combination of latent and sensible heat in a temperature range of 90°C to 105°C.)	150 42	kJ/kg Wh/kg
Specific heat capacity	2	kJ/kg·K
Density (solid)	1.5	kg/L
Density (liquid)	1.3	kg/L
Thermal conductivity range (for both phases)	0.6	W/(m·K)
Volume expansion	3-4	%
Flash point	0.6	°C
Operation temperature (max.)	90	°C

CFD analysis were performed using ANSYS-Fluent software. Dimensions of model geometry of the regenerative heat exchanger was determined that 50 mm, 70 mm, and 100 mm as diameter of the tubes and 1000 mm as the length of the tubes. Schematic view of the model is shown in Figure 1 as two-dimensionally.

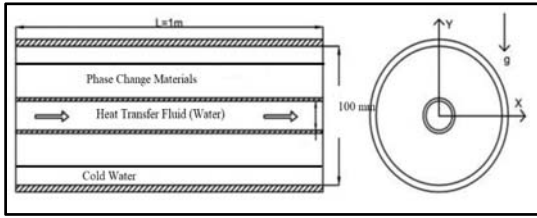


Figure 1. 2D schematic view of the regenerative heat exchanger

2.1. Mesh Independence Study

Number of cells of the numerical model was increased solid-liquid interface boundary layers. For the independence study of the numerical model, five different mesh model has been created and the models were analyzed according to average temperature of the hot fluid in the regenerative heat exchanger. The number of cells was increased, and numerical data examined for five different mesh model. It was determined that the average temperature value did not change significantly after 800000 cells. Variation of average temperature with respect to the number of cells is presented in Figure 2.

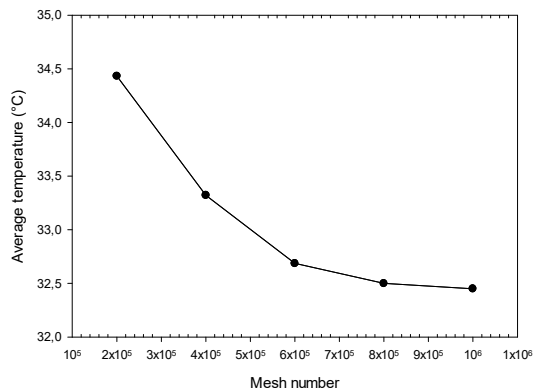


Figure 2. Variation of average temperature with respect to the number of cells

2.2. Validation of the Numerical Model

In order to verify the numerical model, the data obtained from the experimental study [41] in which pure water was used as hot and cold fluid in the heat exchanger were compared with the numerical model data. The maximum error between

experimental and numerical data was determined as 11%. Therefore, it was determined that the numerical model good agree with the experimental study. Comparison of numerical data with experimental data is presented in Figure 3.

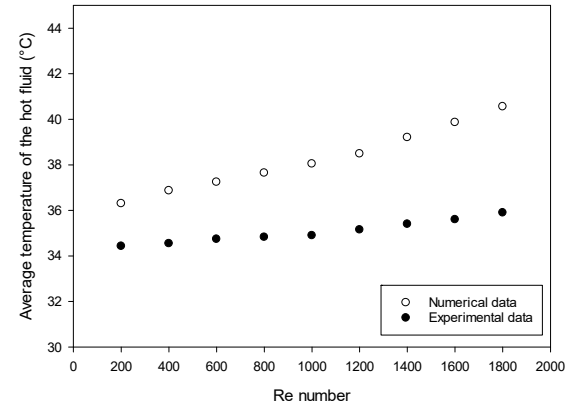


Figure 3. Numerical and experimental data

Mesh structure of the numerical model is shown in Figure 4.

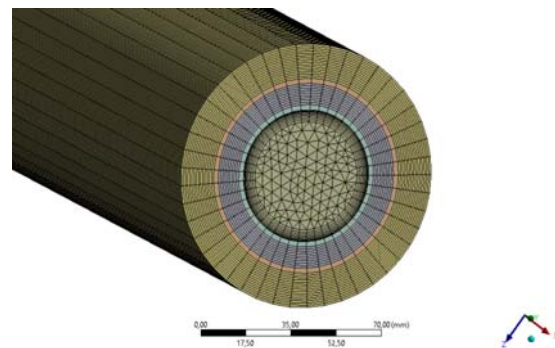


Figure 4. Mesh structure of the numerical model

2.3. Mathematical Formulations and Boundary Conditions

In order to determine heat transfer effectiveness of the numerical model, continuity, momentum, and energy equations are given below.

Continuity equation:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(u_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(u_z)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

Momentum equation:
In the r-direction:

$$p \left(\frac{\partial(u_r)}{\partial t} + u_r \frac{\partial(u_r)}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial(u_r)}{\partial \theta} - u_\theta^2 + u_z \frac{\partial(u_r)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + p g_r + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

In the θ -direction:

$$p \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_\theta u_r}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + p g_\theta + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

In the z-direction:

$$p \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + p g_z + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

Energy equation:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\dot{q}_g}{c_p} + \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\varphi}{pc_p} \quad (5)$$

The boundary conditions of the numerical model presented in Table 1.

Table 1. The boundary conditions of the numerical model

	U(m/s)	V(m/s)	W(m/s)	T (K)
Hot Fluid Inlet	U=U _{inlet}	V=0	W=0	T=T _{hot,in}
Cold Fluid Inlet	U=0	V=V _{in}	W=0	T=T _{cold,in}
Hot Fluid Outlet	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial W}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$
Cold Fluid Outlet	$\frac{\partial U}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial W}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
Body	U=0	V=0	W=0	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

Heat transfer rate in the regenerative heat exchanger is determined as;

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{lm} \quad (6)$$

Logarithmic mean temperature difference:

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= T_{h,in} - T_{c,out} \\ \Delta T_2 &= T_{h,out} - T_{c,in} \\ \Delta T_{lm} &= \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \end{aligned} \quad (7)$$

A_s is the heat transfer surface area and U is the overall heat transfer coefficient. Heat transfer effectiveness (ϵ) is defined as the ratio of the actual heat transfer rate to the maximum possible heat transfer rate.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The analysis was performed in the heat exchanger as counter-flow arrangement. Pure water as hot fluid in the inner tube and cold water in the outer tube were arranged with PCMs in the annular tube. Different Reynolds numbers (Re=400, 800, 1200, 1600), different inlet temperatures (T_{hot,in}=40, 60, 70, 80°C) and different PCMs (RT60, RT100, SP70) were determined as parameters.

3.1. The Effects of Reynolds Number

In order to investigate the effects of different Reynolds number on heat transfer performance, the PCM in the regenerative heat exchanger was determined as RT60; and inlet temperature of the hot fluid was determined as 60°C under laminar flow condition. The Reynolds number is varied as 400, 800, 1200, and 1600 for the examination due to investigate the effect of flow characteristics under laminar flow conditions to achieve maximum energy storage and energy transfer. Heat transfer effectiveness was calculated as 64.02% for Re=400, 73.9% for Re=800, 78.5% for Re=1200, and 81.19% for Re=1600. Energy storage capacity of the PCM were determined as $\dot{Q}=135.23$ W for Re=400, $\dot{Q}=223.73$ W for Re=800, $\dot{Q}=292.02$ W for Re=1200, and $\dot{Q}=348.15$ W for Re=1600.

The temperature contours and velocity vectors for the RT60 material at 60°C for different Reynolds

number are shown in Figure 5 and Figure 6, respectively.

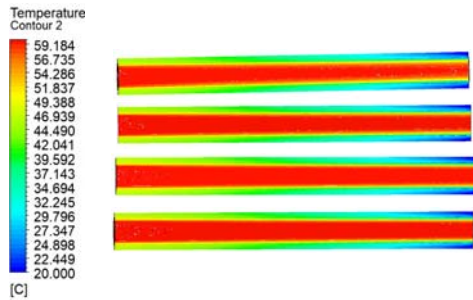


Figure 5. The temperature contours of the RT60 material for different Reynolds numbers (From top to bottom, $Re=400, 800, 1200, 1600$)

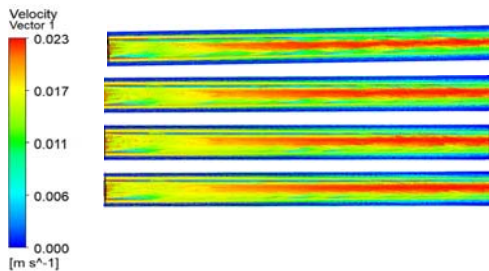


Figure 6. The velocity vectors of the RT60 material for different Reynolds numbers (From top to bottom, $Re=400, 800, 1200, 1600$)

Increasing Reynolds number in range of $Re=400-1600$ yields an increase of 17% in heat transfer effectiveness. Effect of Reynolds number on heat transfer effectiveness is presented in Figure 7 graphically.

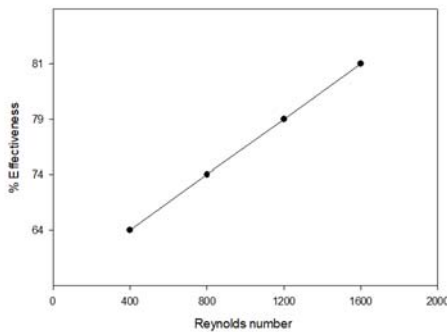


Figure 7. Effect of Reynolds number on heat transfer effectiveness

3.2. The Effects of Inlet Temperature

The effect of different inlet temperatures ($T_{hot,in}=40, 60, 70, \text{ and } 80^\circ\text{C}$) of the hot fluid on heat transfer performance was investigated for RT 60 material and constant Reynolds number ($Re=1200$). The hot fluid inlet temperature in the heat exchanger is determined in the range of $40-80^\circ\text{C}$ for waste heat recovery systems which is operated for low temperature conditions. Heat transfer effectiveness of the heat exchanger was determined 76.97% for $T_{hot,in}=40^\circ\text{C}$; 78.59% for $T_{hot,in}=60^\circ\text{C}$; 81.7% for $T_{hot,in}=70^\circ\text{C}$ and 97.54% for $T_{hot,in}=80^\circ\text{C}$. Increasing inlet temperature of the hot fluid leads an increase in heat transfer effectiveness.

The temperature contours and velocity vectors for the RT60 material at $Re=1200$ for different inlet temperatures are shown in Figure 8 and Figure 9, respectively.



Figure 8. The temperature contours of the RT60 material for different inlet temperatures (From top to bottom, $T_{hot,in}=40, 60, 70, 80^\circ\text{C}$)

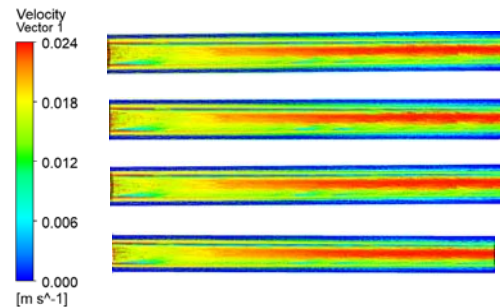


Figure 9. The velocity vectors of the RT60 material for different inlet temperatures (From top to bottom, $T_{hot,in}=40, 60, 70, 80^\circ\text{C}$)

It was determined that increasing inlet temperature from 40°C to 80°C leads an increase in heat transfer effectiveness by 20%. It is obtained that the reason for the sudden increase in efficiency after 70°C is due to the phase-changing material used reaching its maximum operating temperature of 80 °C, and the transition of RT60 into a completely liquid state. The effect of inlet temperature of the hot fluid on heat transfer effectiveness is presented in Figure 10.

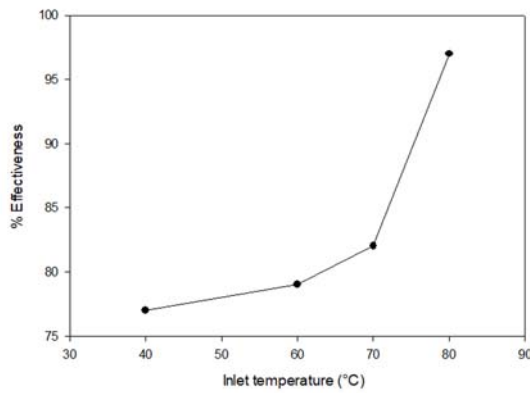


Figure 10. The effect of inlet temperature of the hot fluid on heat transfer effectiveness

3.3. The Effects of Different PCMs

Different PCM types as RT100, SP70 and RT60 were used in the heat exchanger at 60°C and Re=1200. The selected phase-changing materials were chosen within appropriate operating temperature ranges for the system. SP70, RT100, and RT60 types of materials were chosen to observe the working outcomes of organic and inorganic materials. Heat transfer effectiveness of the PCMs were determined as 75.78% for RT100, 78.59% for SP70 and 81.3% for RT60. Energy storage capacities of the PCMs were determined as $\dot{Q}=292.26$ W for RT60, $\dot{Q}=312.83$ W for RT100, and $\dot{Q}=456.19$ W for SP70. The temperature contours and velocity vectors for the PCMs are shown in Figure 11 and Figure 12, respectively.

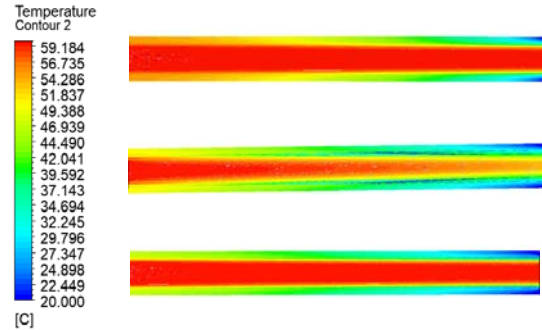


Figure 11. The temperature contours of the PCMs (From top to bottom, RT100, SP70, RT60)

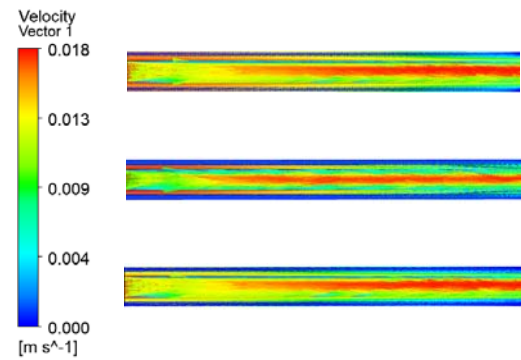


Figure 12. The velocity vectors of the PCMs (From top to bottom, RT100, SP70, RT60)

Heat transfer effectiveness of the heat exchanger for different PCM types is presented in Figure 13.

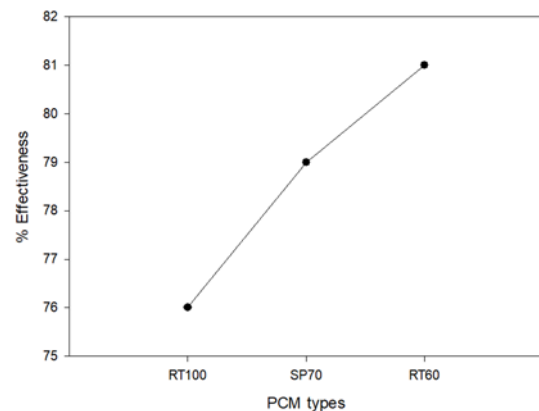


Figure 13. Heat transfer effectiveness of different PCMs

4. CONCLUSION

In this study, different types of PCMs were investigated numerically in a regenerative heat exchanger with different Reynolds number and different inlet temperatures. As a result;

- a. Increasing Reynolds number of hot fluid in range of $Re=400-1600$ yields an increase in heat transfer effectiveness by 17%. Increasing the Reynolds number caused an increase in the hydrodynamic boundary layer and a decrease in the thermal boundary layer.
- b. Increasing Reynolds number in laminar flow as $Re=400-1600$ yields an increase in energy storage capacity of regenerative heat exchanger.
- c. Increasing the inlet temperature of the hot fluid from 40°C to 80°C shows an incremental increase in heat transfer effectiveness, resulting in an overall increase of 20%.
- d. For constant inlet temperature and Reynolds number, RT 60 shows the best heat transfer performance among others. However, SP 70 shows the best energy storage capacity among others.
- e. It has been determined that obtained data from this study, regenerative heat exchangers which have better heat transfer performance and higher energy storage capacity can be designed with lesser cost.

Abbreviations

TES	: Thermal energy storage
PCM	: Phase change material
LHS	: Latent heat storage
CFD	: Computational fluid dynamics
LHTES	: Latent heat thermal energy storage
$T_{hot,in}$: Hot fluid inlet temperature
$T_{cold,in}$: Cold fluid inlet temperature
$T_{hot,out}$: Hot fluid outlet temperature
$T_{cold,out}$: Cold fluid outlet temperature
T_m	: Melting temperature
c_p	: Specific heat
ΔT_{lm}	: Logarithmic mean temperature difference
A_s	: Surface of the area
\dot{Q}_{act}	: Actual heat transfer rate
\dot{Q}_{max}	: Maximum heat transfer rate

Subscripts

f	: fluid
p	: particle
nf	: nanofluid
fr	: freezing point
m	: mass

5. REFERENCES

1. Diaconu, B.M., Cruceru, M., Anghelescu, L. 2023. A Critical Review on Heat Transfer Enhancement Techniques in Latent Heat Storage Systems Based on Phase Change Materials. Passive and Active Techniques, System Designs and Optimization. Journal of Energy Storage, 61, 106830.
2. Rogowski, M., Andrzejczyk, R. 2023. Recent Advances of Selected Passive Heat Transfer Intensification Methods for Phase Change Material-Based Latent Heat Energy Storage Units: A Review. International Communications in Heat and Mass Transfer, 144, 106795.
3. Afaynou, I., Faraji, H., Choukairy, K., Arshad, A., Arıcı, M. 2023. Heat Transfer Enhancement of Phase-Change Materials (PCMs) Based Thermal Management Systems for Electronic Components: A Review of Recent Advances. International Communications in Heat and Mass Transfer, 143, 106690.
4. Kandasamy, R., Wang, X.Q., Mujumdar, A.S., 2007. Application of Phase Change Materials in Thermal Management of Electronics. Applied Thermal Engineering, 27(17-18), 2822-2832.
5. Tan, F.L., Tso, C.P., 2004. Cooling of Mobile Electronic Devices Using Phase Change Materials. Applied Thermal Engineering, 24(2-3), 159-169.
6. Afaynou, I., Faraji, H., Choukairy, K., Arshad, A., Arıcı, M., 2023. Heat Transfer Enhancement of Phase-Change Materials (PCMs) Based Thermal Management Systems for Electronic Components: A Review of Recent Advances. International Communications in Heat and Mass Transfer, 143, 106690.
7. Kenisarin, M., Mahkamov, K., 2007. Solar Energy Storage Using Phase Change Materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(9), 1913-1965.

8. Xiao, X., Zhang, P., Li, M., 2013. Thermal Characterization of Nitrates and Nitrates/Expanded Graphite Mixture Phase Change Materials for Solar Energy Storage. *Energy Conversion and Management*, 73, 86-94.
9. Shon, J., Kim, H., Lee, K., 2014. Improved Heat Storage Rate for an Automobile Coolant Waste Heat Recovery System Using Phase-Change Material in a Fin-Tube Heat Exchanger. *Applied Energy*, 113, 680-689.
10. Pandiyarajan, V., Chinnappandian, M., Raghavan, V., Velraj, R., 2011. Second Law Analysis of a Diesel Engine Waste Heat Recovery with a Combined Sensible and Latent Heat Storage System. *Energy Policy*, 39(10), 6011-6020.
11. Soni, V., Kumar, A., Jain, V.K., 2018. Performance Evaluation of Nano-Enhanced Phase Change Materials During Discharge Stage in Waste Heat Recovery. *Renewable Energy*, 127, 587-601.
12. Kandasamy, R., Wang, X.Q., Mujumdar, A.S., 2007. Application of Phase Change Materials in Thermal Management of Electronics. *Applied Thermal Engineering*, 27(17-18), 2822-2832.
13. Sayyar, M., Weerasiri, R.R., Soroushian, P., Lu, J., 2014. Experimental and Numerical Study of Shape-Stable Phase-Change Nanocomposite Toward Energy-Efficient Building Constructions. *Energy and Buildings*, 75, 249-255.
14. Pomianowski, M., Heiselberg, P., Zhang, Y., 2013. Review of Thermal Energy Storage Technologies Based on PCM Application in Buildings. *Energy and Buildings*, 67, 56-69.
15. Khudhair, A.M., Farid, M.M., 2004. A Review on Energy Conservation in Building Applications with Thermal Storage by Latent Heat Using Phase Change Materials. *Energy Conversion and Management*, 45(2), 263-275.
16. Fragnito, A., Bianco, N., Iasiello, M., Mauro, G. M., Mongibello, L., 2022. Experimental and Numerical Analysis of a Phase Change Material-Based Shell-and-Tube Heat Exchanger for Cold Thermal Energy Storage. *Journal of Energy Storage*, 56, 105975.
17. Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., 2020. Phase Change Material Thermal Energy Storage Systems for Cooling Applications in Buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109579.
18. Hathal, M.M., Al-Jadir, T., Al-Sheikh, F., Edan, M.S., Haider, M.J., Rsool, R.A., Badawy, T., 2023. Thermal Performance Characterization of a Thermal Energy Storage Tank with Various Phase Change Materials. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100322.
19. Konuklu, Y., Paksoy, H.Ö., 2011. Faz Değiştiren Maddeler ile Binalarda Enerji Verimliliği. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
20. Koukou, M.K., Vrachopoulos, M.G., Tachos, N.S., Dogkas, G., Lympiris, K., Stathopoulos, V., 2018. Experimental and Computational Investigation of a Latent Heat Energy Storage System with a Staggered Heat Exchanger for Various Phase Change Materials. *Thermal Science and Engineering Progress*, 7, 87-98.
21. Koşan, M., Aktaş, M., 2018. Faz Değiştiren Malzemelerle Termal Enerji Depolayan Bir Isı Değiştiricisinin Sayısal Analizi. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 403-409.
22. Ljungdahl, V., Jradi, M., Veje, C., 2022. A Decision Support Model for Waste Heat Recovery Systems Design in Data Center and High-Performance Computing Clusters Utilizing Liquid Cooling and Phase Change Materials. *Applied Thermal Engineering*, 201, 117671.
23. Mat, S., Al-Abidi, A.A., Sopian, K., Sulaiman, M.Y., Mohammad, A.T., 2013. Enhance Heat Transfer for PCM Melting in Triplex Tube with Internal-External Fins. *Energy Conversion and Management*, 74, 223-236.
24. Rana, S., Zunaid, M., Kumar, R., 2022. CFD Approach for The Enhancement of Thermal Energy Storage in Phase Change Material Charged Heat Exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, 101921.
25. Tomizawa, Y., Sasaki, K., Kuroda, A., Takeda, R., Kaito, Y., 2016. Experimental and Numerical Study on Phase Change Material (PCM) for Thermal Management of Mobile Devices. *Applied Thermal Engineering*, 98, 320-329.
26. Youssef, W., Ge, Y.T., Tassou, S.A., 2018. CFD Modelling Development and Experimental

- Validation of a Phase Change Material (PCM) Heat Exchanger with Spiral-Wired Tubes. *Energy Conversion and Management*, 157, 498-510.
27. Osterman, E., Butala, V., Stritih, U., 2015. PCM Thermal Storage System for 'Free' Heating and Cooling of Buildings. *Energy and Buildings*, 106, 125-133.
28. Nithyanandam, K., Pitchumani, R., 2014. Optimization of an Encapsulated Phase Change Material Thermal Energy Storage System. *Solar Energy*, 107, 770-788.
29. Wang, L., Wang, C., Guo, Y., Wu, Y., Bai, W., Che, D., 2021. Novel Rotary Regenerative Heat Exchanger Using Cascaded Phase Change Material Capsules. *Applied Thermal Engineering*, 188, 116619.
30. Rajagopal, M., Velraj, R., 2016. Experimental Investigation on The Phase Change Material-Based Modular Heat Exchanger for Thermal Management of a Building. *International Journal of Green Energy*, 13(11), 1109-1119.
31. Zhou, D., Zhao, C.Y., 2011. Experimental Investigations on Heat Transfer in Phase Change Materials (PCMs) Embedded in Porous Materials. *Applied Thermal Engineering*, 31(5), 970-977.
32. Jaworski, M., 2014. Thermal Performance of Building Element Containing Phase Change Material (PCM) Integrated with Ventilation System—An Experimental Study. *Applied Thermal Engineering*, 70(1), 665-674.
33. Kaizawa, A., Maruoka, N., Kawai, A., Kamano, H., Jozuka, T., Senda, T., Akiyama, T., 2008. Thermophysical and Heat Transfer Properties of Phase Change Material Candidate for Waste Heat Transportation System. *Heat and Mass Transfer*, 44, 763-769.
34. Palmer, B., Arshad, A., Yang, Y., Wen, C., 2023. Energy Storage Performance Improvement of Phase Change Materials-Based Triplex-Tube Heat Exchanger (TTHX) Using Liquid-Solid Interface-Informed Fin Configurations. *Applied Energy*, 333, 120576.
35. Wang, Z., Zhang, H., Dou, B., Zhang, G., Wu, W., Zhou, X., 2022. Effect of Copper Metal Foam Proportion on Heat Transfer Enhancement in the Melting Process of Phase Change Materials. *Applied Thermal Engineering*, 201, 117778.
36. Kittusamy, R.K., Rajagopal, V., Felix, P.G., 2023. Numerical and Experimental Investigation on the Melting Heat Transfer of Nanographene-Enhanced Phase Change Material Composites for Thermal Energy Storage Applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 206, 123940.
37. Xu, W., Huang, T., Huang, S.M., Zhuang, Y., 2023. Regulation Mechanism of Magnetic Field on Non-Newtonian Melting and Energy Storage Performance of Metal Foam Composite Nano-Enhanced Phase Change Materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 200, 123501.
38. Sudhakaran, S., Terese, M., Mohan, Y., Thampi, A.D., Rani, S., 2023. Influence of Various Parameters on the Cooling Performance of Battery Thermal Management Systems Based on Phase Change Materials. *Applied Thermal Engineering*, 222, 119936.
39. Soliman, A.M., Yousef, M.S., Ookawara, S., Hassan, H., 2023. Experimental Study of Using System of Flat Heat Pipe-Phase Change Material Inclusion Heat Sink for Thermal Regulation of Simulated PV. *Experimental Heat Transfer*, 36(5), 648-664.
40. Rubitherm Technologies GmbH, PCM-Products, www.rubitherm.com, Access date: 31.10.2022.
41. Kilic, M., Sahin, M., 2022. Experimental Investigation of the Effect of Different Parameters on Heat Transfer Performance in a Double Pipe Heat Exchanger. 3th International Dicle Scientific Research and Innovation Congress, Diyarbakir, 48-58.

Enhancing Early Strength Development of Alkali-Activated Slag through Preheating of Materials

Cemal KARAASLAN*¹ ORCID 0000-0002-8993-7566

¹Iğdir University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Iğdir, Türkiye

Geliş tarihi: 22.06.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atf şekli/ How to cite: KARAASLAN, C., (2023). Enhancing Early Strength Development of Alkali-Activated Slag through Preheating of Materials. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 1129-1138.

Abstract

Alkali-activated cements have gained attention as sustainable alternatives to Portland cement-based concretes. This study aims to enhance the early strength development of alkali-activated slag (AAS) mortars by preheating the alkali activator, ground granulated blast furnace slag, and aggregates to temperatures reaching up to 65°C before their utilization. Preheating at 50°C enhances both early and ultimate strength of AAS, compared to specimens that were not subjected to preheating. Similarly, preheating at 65°C results in a substantial increase in early strength but leads to some strength reduction after three days. SEM and FTIR analyses reveal that preheating at 50°C improves the interfacial transition zone between paste and aggregate, reduces microcracks, and promotes alkali activation. Furthermore, FTIR analysis confirms the occurrence of hydration reactions in AAS upon contact with water.

Keywords: Alkali-activated slag, Preheating of materials, Early age concrete, Heat curing, Water resistance

Malzemelerin Isıtılarak Kullanılması ile Alkali-Aktive Cürüfların Erken-dönem Dayanım Gelişimlerinin İyileştirilmesi

Öz

Alkali ile aktive edilmiş çimentolar, Portland çimentosu esaslı betonlara sürdürülebilir alternatifler olarak dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, alkali aktivatör, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve agreganın 65°C'ye kadar ısıtılması yoluyla alkali ile aktive edilmiş cüruf (AAS) esaslı harçların erken yaştaki dayanım gelişimlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ön ısıtmaya tabi tutulmayan AAS ile kıyaslandığında, 50°C'lik ön ısıtma, AAS'nin hem ilk günlerdeki hem de nihai dayanımını artırırken 65°C'lik ön ısıtma, AAS'nin ilk saatlerdeki dayanımını önemli derecede artırırken 3 günden sonraki dayanımlarda bir miktar düşüşlere sebep olmuştur. 50°C'lik ön ısıtmanın hamur ile agrega arasındaki bağı arttırdığı, mikro çatlakları azaltarak daha yoğun bir matris oluşturduğu ve alkali aktivasyonu ilerlettiği SEM ve FTIR analizlerinden anlaşılmaktadır. Ayrıca FTIR analizleri, suyla temas eden AAS'lerde hidrasyon reaksiyonlarının gerçekleştiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Alkali-aktive cüruf, Malzemelerin ön-ısıtılması, Erken dayanımlı betonlar, Isıl kür, Suya dayanıklılık

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Cemal KARAASLAN, cemal.karaaslan@igdir.edu.tr

1. INTRODUCTION

Concrete, one of the most widely used construction materials, traditionally relies on Portland cement as its primary binder. However, the growing interest in sustainable and environmentally friendly alternatives has paved the way for the development of alkali-activated cements (AACs). In recent years, AACs have gained considerable attention due to their potential to offer enhanced performance and reduced carbon footprint compared to Portland cement-based concretes [1]. This has prompted researchers and engineers to explore and compare the properties and characteristics of AACs with those of conventional concretes. Alkali-activated slag (AAS) is a type of alkali-activated cementitious material that utilizes blast furnace slag as its main precursor. Blast furnace slag is a byproduct of the iron and steel industry and contains a high content of reactive compounds, such as calcium, silicon, and aluminum [2]. When activated with alkaline solutions, typically a combination of sodium hydroxide and sodium silicate, the slag undergoes a chemical reaction that results in the formation of a hardened matrix. This matrix exhibits cementitious properties and provides strength and durability to the AAS. One of the key advantages of AAS is its ability to utilize industrial waste materials, contributing to sustainable construction practices. AAS offers several desirable characteristics, including high early strength, good chemical resistance, and low carbon footprint compared to traditional Portland cement-based materials [3,4].

AAS/geopolymer binders require heat curing to achieve sufficient mechanical properties, typically ranging from a few hours to a few days, with curing temperatures usually falling between 40°C and 90°C [5,6]. Geopolymers produced with high calcium content binders, in other words alkali-activated cements, have been shown to reach acceptable strength levels within reasonable timeframes at room temperatures [7]. However, heat curing has been found to accelerate the strength development and improve the mechanical properties of alkali-activated cements [8]. It is worth noting that in the conventional method, the

heat curing process for alkali-activated cements (slags) is applied after obtaining the samples. This practice limits the possibility of in-situ casting of alkali-activated slag (AAS) and requires additional energy consumption. On the other hand, preheating the materials before mixing is suggested to offer wider application possibilities for AAS concrete and contribute to reduced energy consumption [9].

Souza et. al. [10] demonstrated that heating the mixture in 3D-printed metakaolin-based geopolymers can yield highly fluid mixtures, allowing for the continuous and rapid production of geopolymer mixtures through a systematic heating process, from pumping to printing. Nguyen et. al. [9] found that preheating fly ash and fine aggregate resulted in geopolymer mortars with higher compressive strength when a larger amount of supplied heat energy was provided. Mazumder and Prasad [11] investigated the effect of preheating in self-compacting geopolymer concretes by mixing fly ash and alkali activator at room temperature and then heating the mixture at 85°C for 15, 20, 25, and 30 minutes before combining it with the aggregate. They determined that the preheated self-compacting geopolymer concrete exhibited 31% higher compressive strength than one cured at 60°C for 48 hours and achieved 99% energy savings.

Motivated by these findings and the limited research available on the pre-heating method for the production of alkali-activated slag (AAS) mortars, the present study aims to investigate the effects of pre-heating the alkaline activator, ground granulated blast furnace slag, and fine aggregate to temperatures reaching up to 65°C. The physical and mechanical properties of the mortars will be examined, and the microstructural changes of the alkali-activated slags will be analyzed using FTIR and SEM/EDX techniques.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Ground granulated blast furnace slag, obtained from Iskenderun Iron-Steel Plant, was used as the powder

binder in this study. The chemical composition of the slag is presented in Table 1. Detailed information regarding the particle size distribution,

mineralogical structure, and physical properties of the slag can be found in the study conducted by Danish et. al [12].

Table 1. Chemical composition of slag (wt.%) [12]

Oxides	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
Slag	35.5	34.2	18.3	0.6	9.7	0.1	0.3	0.4	0.3

LOI: Loss on ignition

For the alkaline activation process, NaOH (98% purity) and Na₂SiO₃ (with a SiO₂/Na₂O weight ratio of 2.04 and SiO₂ content of 24.5%) were utilized. Solid NaOH particles were dissolved in pure water to prepare a 10 M NaOH solution. The fine aggregate used was CEN Standard Sand with a maximum particle size of 2 mm, conforming to TS EN 196-1 [13].

2.2. Specimen Production

The proportions of the alkali-activated mortar mixtures are provided in Table 2. The Na₂SiO₃ to NaOH weight ratio was set at 2.5, the alkaline activator to powder binder weight ratio was 0.60, and the fine aggregate to powdered binder weight ratio was 2.5 [14].

Table 2. Mix proportions

Mix ID	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	Slag (g)	Sand (g)	Heating temperature (°C)
PH25	92.6	231.4	540	1350	25
PH50					50
PH65					65

The NaOH solution (10 M) was prepared 24 hours prior to its mixing with the Na₂SiO₃ solution. After the resting period, the NaOH solution was added to the Na₂SiO₃ solution and stirred for 5 minutes. The resulting solution mixture was then placed in a sealed container and placed in a preheated oven at the desired temperature. The standard sand and slag were mixed for 3 minutes, and the mixture was transferred along with the mixing bowl to the oven. After a 2-hour waiting period, the materials were removed from the oven. Subsequently, the alkali activator mixture was added to the solid materials in the mixing bowl and the mixing process continued for 2 minutes. The fresh mixture was immediately cast into 40 mm cube molds. The molds were vibrated 60 times on a vibrating table to eliminate entrapped air voids. Afterward, the surface of the molds was cleaned, and the specimens were left uncovered at the laboratory's room temperature of 25 ± 2°C. Following a 24-hour curing period, the specimens were demolded and left exposed in the laboratory until the testing day. It should be noted that the specimens utilized to determine the 8-hours compressive strength were removed from the mold after 7 hours.

2.3. Experimental Methods

The bulk density and water absorption of the AAS mortar specimens were determined according to the TS EN 12390-7 standard, utilizing the 7-day specimens [15]. It is noteworthy that the properties of AACs can significantly vary with temperature; hence, the specimens were tested without undergoing drying in an oven. The compressive strength of the AAS mortar specimens was evaluated at the 8th hour, as well as on days 1, 3, 7, and 28, using a 20 kN capacity cement compression and flexural testing machine according to the TS EN 196-1 standard [13].

To evaluate the water resistance of preheated AAS mortars, 3-day specimens were submerged in water for 24 hours, followed by a 24-hour period of storage in the laboratory environment. This cycle was repeated once more, and the remaining compressive strengths of the specimens were measured. The change in strength serves as an indicator of the water resistance of AAS mortars. Each data presented in the physical and mechanical test results are the average of four specimens.

The Agilent Cary 630 FTIR (Fourier-Transform Infrared) spectrometer, capable of operating within the wavelength range of 4000-650 cm^{-1} , was employed to observe the molecular bonding structure of AASs. The ZEIS Gemini Sigma 300 scanning electron microscope (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) were utilized to analyze the microstructure and chemical compositions of the hardened mortar specimens.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Physical Properties

The bulk density and water absorption of AAS mortars are presented in Table 3. The bulk densities of AAS mortars ranges from 2312.8 kg/m^3 to 2318.7 kg/m^3 . It can be observed that the bulk density of AAS is not significantly affected by the preheating process, as these values are quite close to each other. Similarly, the water absorption values of these specimens are also in close proximity. Furthermore, the water absorption levels are found to be very low.

Table 3. Physical properties of AAS mortars

Mix ID	Bulk density (kg/m^3)	Water absorption (%)
PH25	2317.5	0.52
PH50	2318.7	0.46
PH65	2312.8	0.47

It is noteworthy that the PH50 specimens exhibit higher bulk density and lower water absorption compared to the others. This could be attributed to the higher material temperatures, resulting in a more fluid mixture and better compaction in the mold. It may also be a consequence of improved slag activation due to the higher material temperature. The absence of such improvement in the mixture at 65°C can be attributed to its rapid solidification and inadequate compaction in the mold due to the high temperature effect. In fact, attempts were made to produce AAS at temperatures above 65°C; however, the high reactivity of the slag and the instant solidification of the material at high temperatures (Figure 1) hindered the investigation of the effects of temperatures above 65°C.



Figure 1. Solidification of the mixture with a preheating temperature of 75°C during the mixing process

3.2. Compressive Strength

The change in compressive strengths over time in AAS mortars with different preheating temperatures is illustrated in Figure 2. All three AAS mortars achieved approximately 60% of their ultimate strength (considering the 28-day strength) within the first three days and approximately 86-88% within the first seven days. From this perspective, it can be observed that preheating does not make a significant difference. However, when examining the strength development in the first three days, it is evident that preheating significantly contributes to the early strength.

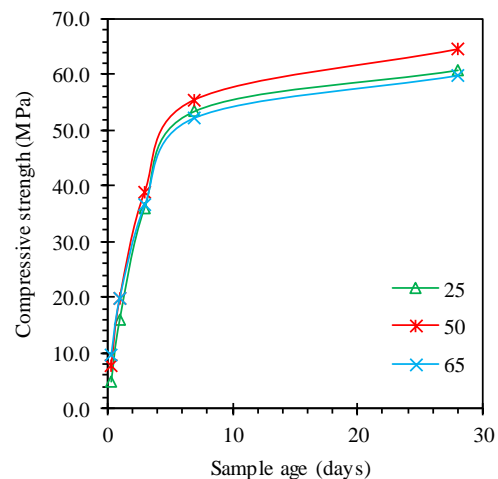


Figure 2. Strength development of AAS mortars

Figure 3 illustrates the strength development of AAS mortars preheated at 50°C and 65°C, along with the relative change in strength compared to the AAS mortar without preheating. It can be observed that preheating at 50°C and 65°C resulted in strength increases of 58.7% and 97.3% in eight hours, and 24.4% and 24.3% in one day, respectively. However, after three days, the influence of preheating on strength diminishes significantly. In terms of contribution to strength, preheating at 65°C is more effective in the initial hours but loses its effect after three days. Indeed, the compressive strengths of this specimen at 7 and 28

days were 2.0% and 1.3% lower, respectively, than the compressive strengths of the specimen not subjected to preheating. In Figure 1, it is evident that the mixture preheated at 75°C solidified before placement. Similarly, as shown in the image provided in Figure 4, the effect of preheating at 65°C led to incomplete consolidation due to rapid solidification during placement. The acceleration of alkali activation and the significant increase in strength in the initial hours can be attributed to the effect of preheating at 65°C, but the inadequate consolidation of samples due to rapid solidification resulted in strength reduction after three days.

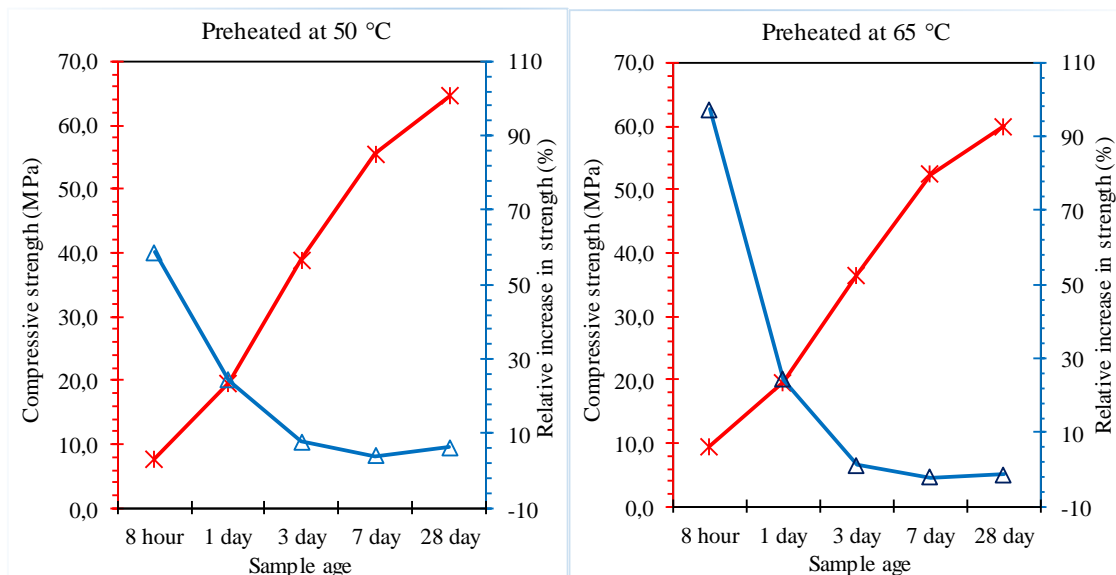


Figure 3. Strength development and the effect of preheating on the strength increase of AAS mortars

On the other hand, preheating at 50°C not only increased the early strength but also resulted in a 6.3% increase in ultimate strength. Considering the contribution to strength, preheating at 50°C provides a significant contribution both in the early stages and at the ultimate strength. The traditional method of thermal curing for AAS/geopolymer concrete requires curing at mild temperatures (40-90°C) for several hours to a few days [16]. This method not only eliminates the possibility of in-situ casting of AAS/geopolymer concrete but also leads to significant energy consumption. The proposed

method will increase the in-situ casting capabilities of AAS/geopolymer concrete by utilizing an asphalt plant commonly used in the construction of hot mix asphalt pavements. This approach will also result in shorter curing times and relatively lower curing temperatures, leading to significant energy savings [11]. Moreover, the utilization of preheated materials in the production of AAS will result in increased early-age strength, enabling early opening to traffic for concrete pavement and providing protection against early frost damage.

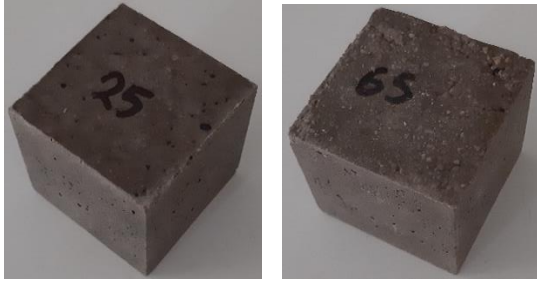


Figure 4. Incomplete consolidation of specimens preheated at 65°C.

The SEM images of AAS mortars with preheating temperatures of 25°C and 50°C were observed on 7-day specimens and presented in Figure 5. As shown in Figure 5a, there is less adhesion between the hardened AAS paste and the aggregate in the AAS mortar with a preheating temperature of 25°C. In contrast, the AAS mortar with a preheating temperature of 50°C exhibits better bonding at the paste-aggregate interface. Moreover, when examining the hardened paste regions at the same scale (Figure 5b), wide cracks are observed in the AAS mortar with a preheating temperature of 25°C, while a denser matrix with fine cracks is present in the AAS mortar with a preheating temperature of 50°C.

At higher magnifications (Figure 5c), it can be observed that the reaction products in the AAS mortar with a preheating temperature of 50°C fill the existing cracks, which are evident in the AAS mortar with a preheating temperature of 25°C. This phenomenon explains the higher strength of AAS mortars with a preheating temperature of 50°C. It is well known that a moderate curing temperature improves the mechanical properties and microstructure of alkali-activated cements and geopolymer binders [1,16].

3.3. Water Resistance

Figure 6 presents the remaining compressive strengths of the alkali-activated slag (AAS) mortars after 2 wetting-drying cycles. It can be observed that the compressive strength of AAS mortars subjected to wetting-drying cycles has increased compared to the compressive strength at 3 days. In fact, the compressive strength of these specimens is

slightly higher than that of the specimens cured in dry conditions for the same duration (7 days). The compressive strength of AAS mortars with preheating temperatures of 25°C, 50°C, and 65°C, exposed to wetting-drying cycles, has increased by approximately 14.9%, 18.9%, and 26.0% respectively in 4 days compared to the specimens kept in dry conditions. The higher increase in compressive strength for the AAS mortar with a preheating temperature of 65°C can be attributed to the faster hardening of the mortar at this temperature, preventing the dissolution of certain precipitates (such as Ca^{2+}) in the slag. These precipitates dissolve and react in the aqueous (alkaline) environment, contributing to the observed strength enhancement. It is important to note that these reactions are primarily hydration reactions, with the main product of hydration being the formation of the C-S-H gel. This gel significantly contributes to the increase in strength observed in the AAS mortar.

Figure 7 presents the FTIR spectra of alkali-activated slag (AAS) specimens with preheating temperatures of 25°C and 50°C, as well as AAS subjected to wetting-drying cycles with a preheating temperature of 50°C. It can be observed that these three samples exhibit highly similar FTIR spectra. However, with a preheating temperature of 50°C, the hump at 965 cm^{-1} , which is a significant fingerprint associated with the asymmetric stretching functional group of Si-O-T (T: Si, Al tetrahedral) in AAS/geopolymer materials, becomes more pronounced. This indicates that the alkali activation of slag further progresses due to the heat provided by the preheated materials.

On the other hand, an interesting observation is that the asymmetric stretching vibration band of Si-O-Si (Al) shifts towards a higher wavenumber, specifically from 965 cm^{-1} to 969 cm^{-1} , indicating an increased wave number for the AAS specimens with a preheating temperature of 50°C in a water environment. This shift is attributed to the increase in Si/Al ratio in the reaction products. The released Ca^{2+} ions from unreacted slag particles undergo a reaction with SiO_4^{4-} ions derived from sodium silicate solution, resulting in the formation of C-S-

H gel products and a densified matrix [17,18]. The densification of the matrix contributes to the

strength enhancement observed in Figure 6.

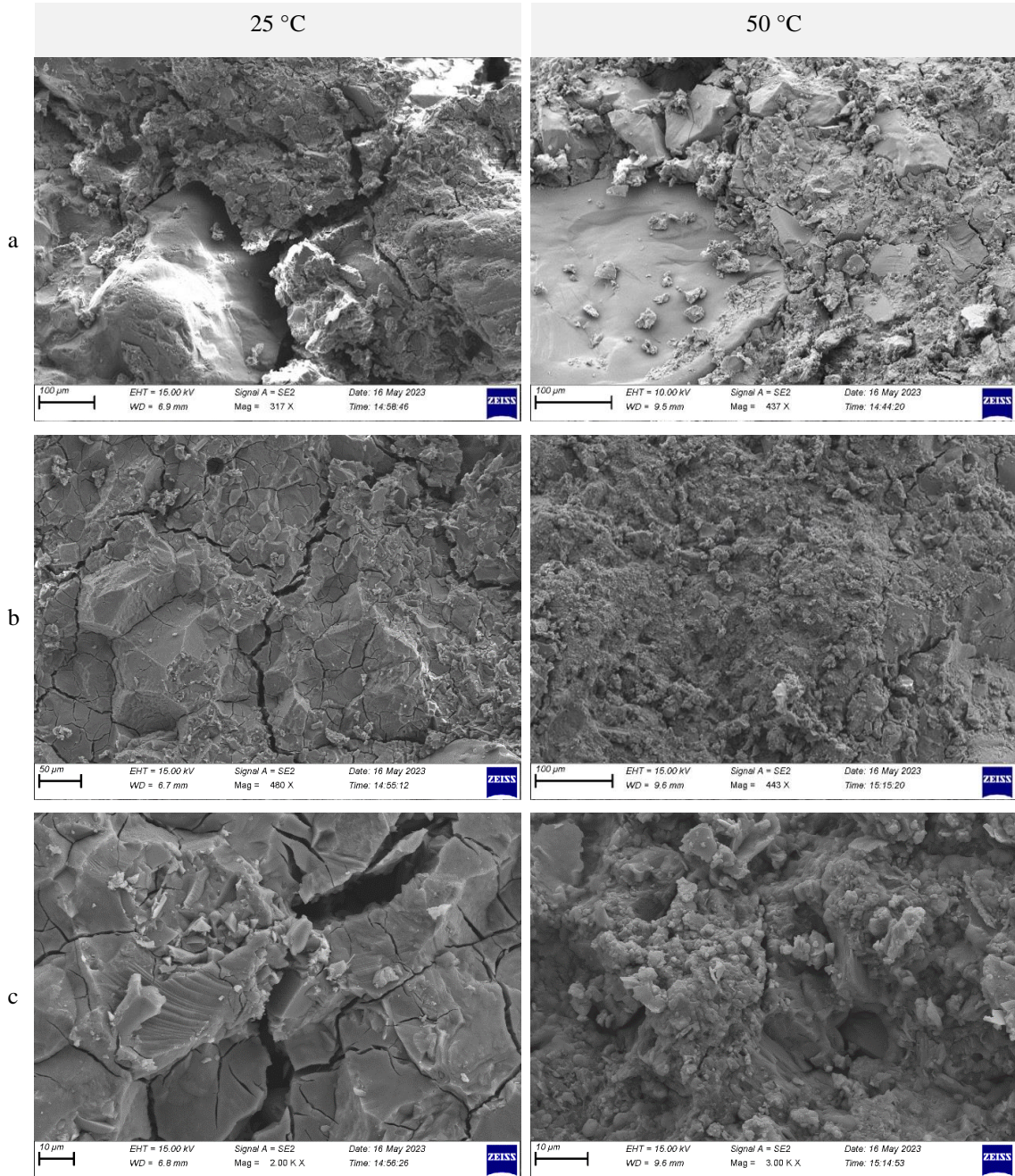


Figure 5. SEM images of AAS mortars with preheating temperatures of 25°C and 50°C

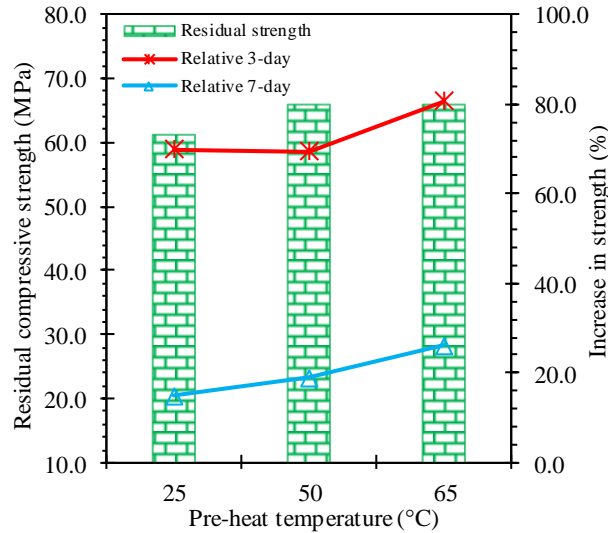


Figure 6. Strength of AAS mortars after wet-dry cycles and the variation of this strength compared to the 3-day and 7-day strengths

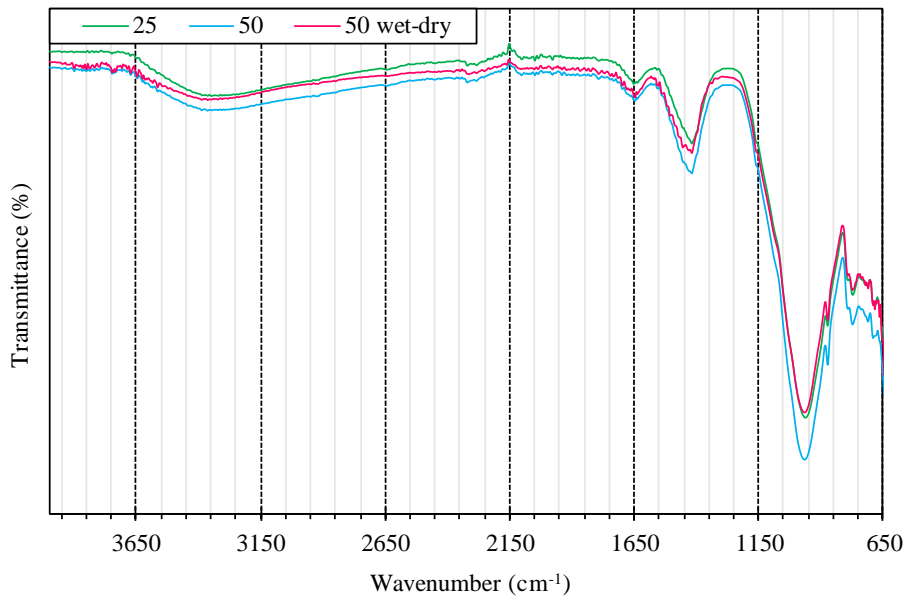


Figure 7. FTIR analysis of AAS specimens with different preheating temperatures and subjected to wetting-drying cycles

The resistance of an alkali-activated cement or geopolymers against water effects is one of the most crucial indicators in determining its suitability as a construction material [19, 20]. The fact that AAS is not negatively affected by water effects highlights its significance as a viable construction material. Its

ability to withstand the detrimental effects of water enhances its potential for structural applications. Additionally, the water resistance of AAS contributes to its long-term durability, making it a promising alternative to traditional cement-based materials in sustainable construction practices.

4. CONCLUSION

In this study, the effects of preheating on the early strength development of alkali-activated slag (AAS) mortars were investigated. The results demonstrated that preheating the materials before mixing significantly influenced the early strength of AAS mortars. Preheating at 50°C resulted in a 58.7% increase in strength within eight hours, and a 6.3% increase in ultimate strength. Preheating at 65°C showed higher early strength in the initial hours but led to strength reduction after three days due to rapid solidification. Microstructural analysis using SEM and FTIR revealed that preheating at 50°C improved the bond between paste and aggregate, reduced microcracks, and promoted enhanced alkali activation, indicating denser matrix formation. Furthermore, FTIR analysis confirmed the occurrence of hydration reactions (resulting in the formation of the C-S-H gel) in AAS mortars upon contact with water.

In conclusion, the utilization of this proposed method not only significantly enhances the early strength development of AAS but also provides better opportunities for in-situ casting of concrete. Additionally, it offers energy savings, making positive contributions to construction practices.

5. REFERENCES

1. Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M.S., Rashad, A., Khalaf, M.A., 2021. A Review on Alkali-Activated Slag Concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1475-1499.
2. Erdoğan, T.Y., 2016. *Beton (Concrete)*. METU Press Publishing Company, 6. ed. Ankara, 757.
3. Provis, J.L., 2018. Alkali-Activated Materials. *Cement Concrete Research*, 114, 40-48.
4. Roy, D.M., 1999. Alkali-Activated Cements Opportunities and Challenges. *Cement Concrete Research*, 29(2), 249-254.
5. Yener, E., Karaaslan, C., 2020. Curing Time and Temperature Effect on the Resistance to Wet-Dry Cycles of Fly Ash Added Pumice Based Geopolymer. *Cement Based Composites*, 1(2), 19-25.
6. Rovnaník, P., 2010. Effect of Curing Temperature on the Development of Hard Structure of Metakaolin-Based Geopolymer. *Construction Building Materials*, 24(7), 1176-1183.
7. Karaaslan, C., Yener, E., Bağatur, T., Polat, R., Gül, R., Alma, M.H., 2022. Synergic Effect of Fly Ash and Calcium Aluminate Cement on the Properties of Pumice-Based Geopolymer Mortar. *Construction and Building Materials*, 345, 128397.
8. Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B., 1999. Effect of Elevated Temperature Curing on Properties of Alkali-Activated Slag Concrete. *Cement Concrete Research*, 29(10), 1619-1625.
9. Nguyen, K.T., Le, T.A., Lee, J., Lee, D., Lee, K., 2017. Investigation on Properties of Geopolymer Mortar Using Preheated Materials and Thermogenetic Admixtures. *Construction Building Materials*, 130, 146-155.
10. Souza, M.T., Simão, L., Moraes E.G., Senff, L., Pessôa, J.R.C., Ribeiro, M.J., Oliveira, A.P.N., 2021. Role of Temperature in 3D Printed Geopolymers: Evaluating Rheology and Buildability. *Materials Letters*, 293, 129680.
11. Mazumder, E.A., Prasad, L.M., 2023. Performance Enhancement of Fly Ash-Based Self Compacting Geopolymer Concrete Using Pre-heating Technique, *Iranian Journal of Science Technology. Transactions of Civil Engineering*, 1-13.
12. Danish, A., Öz, A., Bayrak, B., Kaplan, G., Aydın, A.C., Ozbakkaloglu, T., 2023. Performance Evaluation and Cost Analysis of Prepacked Geopolymers Containing Waste Marble Powder Under Different Curing Temperatures for Sustainable Built Environment. *Resources, Conservation Recycling*, 192, 106910.
13. TS EN 196-1, 2016. *Çimento Deneysel Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini (Methods of Testing Cement - Part 1: Determination of Strength)*, Ankara.
14. Yang, K.H., Song, J.K., Lee, K.S., Ashour, A.F., 2009. Flow and Compressive Strength of

- Alkali-Activated Mortars, *ACI Materials Journal*, 106(1), 50-58.
15. TS EN 12390-7, 2010. Beton - Sertleşmiş Beton Deneylemleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini (Testing Hardened Concrete - Part 7: Density of Hardened Concrete), Ankara.
 16. Suwan, T., Fan, M., Braimah, N., 2016. Internal Heat Liberation and Strength Development of Self-Cured Geopolymers in Ambient Curing Conditions. *Construction Building Materials*, 114, 297-306.
 17. Zhang, Z., Zhu, Y., Zhu, H., Zhang, Y., Provis, J.L., Wang, H., 2019. Effect of Drying Procedures on Pore Structure and Phase Evolution of Alkali-Activated Cements. *Cement Concrete Composites*, 96, 194-203.
 18. Cao, R., Zhang, S., Banthia, N., Zhang, Y., Zhang, Z., 2020. Interpreting the Early-Age Reaction Process of Alkali-Activated Slag By Using Combined Embedded Ultrasonic Measurement, Thermal Analysis, XRD, FTIR and SEM. *Composites Part B: Engineering*, 186, 107840.
 19. Tchadjié, L.N, Djobo, J.N.Y., Ranjbar, N., Tchakouté, H.K., Kenne, B.B.D., Elimbi, A., Njopwouo, D., 2016. Potential of Using Granite Waste as Raw Material for Geopolymer Synthesis. *Ceramics International*, 42(2), 3046-3055.
 20. Karaaslan, C., Yener, E., Bağatur, T., Polat, R., 2022. Improving the Durability of Pumice-Fly Ash Based Geopolymer Concrete with Calcium Aluminate Cement. *Journal of Building Engineering*, 59, 105110.

Cilt Kanseri Tanısında Tıbbi Görüntüleri Kıldan Temizlemek İçin Kullanılan İki Yeni Filtre

Bercestte YILMAZ*¹ ORCID 0000-0002-9424-9311

Amira TANDİROVİC GÜRSEL¹ ORCID 0000-0002-9219-3203

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi:05.10.2023

Kabul tarihi:25.12.2023

Atıf şekli/How to cite: YILMAZ, B., TANDİROVİC GÜRSEL, A., (2023). Cilt Kanseri Tanısında Tıbbi Görüntüleri Kıldan Temizlemek İçin Kullanılan İki Yeni Filtre. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 1139-1149.

Öz

Geleneksel dermoskopik cihazların pahalı olması nedeniyle ulaşılabilirliğinin düşük olması ve uzman hekimlerin mesleki deneyimlerinin yeterli olmayışı cilt kanserinin erken teşhisinde en engelleyici faktörlerdir. Ancak bu alanda daha önce yapılan çalışmalar, çekim sırasında daha az uzmanlık gerektirdiğinden daha ekonomik ve pratik olan dijital benzerlerinden ziyade ağırlıklı olarak yüksek kaliteli dermoskopik görüntülere odaklanmıştır. Bununla birlikte, gürültünün yüksek varlığı nedeniyle tanıda bunların kullanımı zordur ve bu da zahmetli bir filtreleme işlemine neden olur. Filtrelemeyle ilgili en büyük zorluklardan biri, renk, şekil ve kalınlıktaki büyük farklılıklar nedeniyle kılın temizlenmesidir. Kıl temizliği, teşhisin kendisini sabote edebileceğinden teşhis için çok önemli olan verilerin sıkı bir şekilde korunmasını dikkate alan kapsamlı bir yaklaşım gerektirir. Makalede bu amaç için tasarlanan iki yeni filtrenin ana hatları verilmekte ve bu alanda yaygın olarak kullanılan iki filtreye göre performansları incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Cilt kanseri, Kıl temizleme, Dijital görüntü, Filtreler

Two Novel Filters for Cleaning Medical Images from Hair in Skin Cancer Diagnosis

Abstract

Low accessibility of traditional dermoscopic devices, since they are still expensive, as well as the lack of professional experience of expertized physicians, are the most obstructive factors in early diagnosis of skin cancer. Nevertheless, previous studies in this field have focused mainly on high-quality dermoscopic images rather than their digital counterparts, which are more economical and practical as they require less expertise during capturing. However, their exploitation in diagnosis is challenging due to the high presence of noise, resulting in an exhausting filtering process. One of the main difficulties regarding filtering is hair cleaning due to the wide variations in colour, shape, and thickness. Hair cleaning requires a comprehensive approach considering stringent data conservation, which is crucial in diagnosis as it may sabotage the

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Bercestte YILMAZ, ylmzberceste@gmail.com

diagnosis itself. The paper outlines two novel filters designed for this purpose and examines their performance with respect to two filters, which are extensively used in this field.

Keywords: Skin cancer, Hair removal, Digital image, Filters

1. GİRİŞ

Kanser; vücudun yapıtaşı olan hücrelerin bir anomali olduğunda veya yaşlandığında ölmeleri yerine hızla bölünmeye devam ederek tümör adı verilen kümeler oluşturması ve/veya komşu organ veya dokulara yayılması sonucu ortaya çıkan ve yaklaşık 200 alt türden oluşan bir hastalık grubudur. Kanser hastalığı dünya çapında önemli bir halk sağlığı sorunudur ve yakın gelecekte bu sorunun artarak devam edeceği konusunda güçlü emareler olduğu bildirilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO)- Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı'nın GLOBACON Aralık 2022 yılında yayınlanan ve Türkiye Cumhuriyeti'ni de kapsayan raporuna göre, en son işlenmiş 2020 yılında yeni yıllık vaka sayısı 19,5 milyona ulaştığını ve bu sayı 2040 yılına gelindiğinde 29,4 milyona ulaşması beklendiği bildirilmektedir [1,2].

Geçmişteki raporlar incelendiğinde; cilt kanseri yakın zamana kadar hem insidans hem de mortalite bakımından diğer kanser türlerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Ancak sıralamada bazı yanlışlıklar olduğu ve bunun başlıca sebeplerinden birinin ise melanoma dışındaki türlerin güvenilir şekilde kaydedilmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bilim insanlarının dikkat çekmeye çalıştıkları başka hususlar ise; kanserin zamanla, çeşitlilik, eğilimler ve örüntü bakımından değişebilirliğini ve küresel bakımdan prevalanstaki varyasyonlar olmasıdır [2-5]. Bu anlamda özellikle; Avustralya, Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada gibi gelişmiş ülkelerdeki cilt kanserlerinin görülme sıklığının artmasına dikkat çekilmektedir. Bu kaygıların yersiz olmadığını gösteren Amerikan Kanser Derneği'nin (ACS) yıllık raporunda Amerika Birleşik Devletleri'nde melanoma tek başına beşinci sıraya yükselirken, tüm türleri birlikte ele alındığında, cilt kanseri birinci sıraya yerleşmektedir [6]. Cilt kanseri ağırlıklı olarak gelişmiş ülkelerde görülse de sağlık hizmetlerine erişimin daha iyi olması nedeni ile ölüm oranları daha düşüktür.

Tüm kanser türlerinde olduğu gibi; erken teşhis, yalnızca daha konforlu tedavinin kapısını açmakla kalmaz; aynı zamanda hastalığın seyrini de önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Hayati öneme sahip olması ve uzun vadede sağlık sistemi için daha tasarruflu olmasına rağmen, bilhassa az gelişmiş ülkelerde zaten zayıf olan sağlık sistemlerine kısa vadede yük bindirmesi nedeniyle periyodik kitlesel tarama programlarının azlığı, araç gereç pahalı oluşu, hekim mesleki deneyiminin azlığının yanı sıra lezyon tiplerinin benzerliği, erken teşhisin önündeki önemli engellerdendir. Lezyon teşhisinin ilk adımı dermatolog tarafından yapılan ve şüpheli durumda dermatoskop adlı mikroskop ile desteklenen görsel incelemesidir. Bu cihaz teşhis sırasında dermatoloğun çıplak göz ile belirlenmesi zor olan yapıları görerek daha doğru bir tespit yapmasını sağlayıp, lezyonların fotoğraflarını çekerek elektronik ortamda depolanmasına da olanak sağlar. Bazı araştırmalar dermatoskop kullanımı melanoma tanısında doğruluk oranının %65'ten %80'a kadar yükselttiğini göstermektedir [7]. Ancak, bu cihazın maliyetli olması ve kullanımının uzmanlık gerektiriyor olması yaygınlaşmasını engelleyip erken teşhis sürecini zorlaştırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı daha ucuz, basit, ulaşılabilir ve hekim hatalarından arınmış erken teşhis sürecine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda son zamanlarda makine öğrenmesi, derin öğrenme ve yapay zekâ gibi bilgisayar destekli uygulamalardaki gelişmeler bütün medikal alanlarda olduğu gibi cilt kanseri görüntülerinin sınıflandırılmasında da büyük katkılar sağlamaktadır [7-9].

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde, cilt kanseri teşhisinde yapılan çalışmaların neredeyse tamamında dermoskopik görüntüler kullanılmıştır. Bunun başlıca nedeni hem sayı hem de çeşitlilik bakımından zengin olmasının yanı sıra veri kalitesi bakımından daha iyi olan dermoskopik veri setlerinin kolay ulaşılabilir olmasıdır. Bir başka hususu ise dijital resimlerin hem daha gürültülü hem de gürültü çeşitliliği bakımından daha zengin

olmasından kaynaklanan filtreleme işleminin daha zor olmasıdır. Bu anlamda; ışık yansımaları, kıl ve hava kabarcığı gibi gürültülerin var oluşu cilt kanser teşhisinde dijital görüntü kullanılması en büyük engellerindendir. Görüntü kullanarak yapılan bilgisayar tabanlı uygulamalarda görüntülerdeki lezyonların özgünlüğü, dokuları ve yapıları korunması amaçlanarak; kıl, hava kabarcığı gibi gürültüleri yok etmek doğru teşhis için önem taşımaktadır. Bu konuda bilinen ilk çalışma Lee ve arkadaşları tarafından 1997'de yapılan Dullrazor adlı algoritmadır. Bu algoritmada kılların lokasyonlarını bulmak için üç farklı yönlendirilmiş yapı elemanı yardımıyla morfolojik kapanım işlemi uygulanmıştır. Görüntüden çıkarılan kıl pikselleri ise bilineer enterpolasyon yöntemi ile doldurulmuştur. Ancak bu algoritma açık renkli ciltteki koyu renkli kılları temizleyebilirken açık renkli kıllarda istenilen başarıya sahip değildir [10].

Yaklaşık on yıl sonra ise ince tüylerin tespitini DullRazor'dan daha iyi gerçekleştiren yeni bir algoritma tanımlandı. Bu çalışmada, gri tonlamalı görüntülerde hem kalın hem de ince kılları tanımlamak için morfolojik kapanım tabanlı top-hat operatörleri kullanılmıştır. Daha sonra bu çalışmada önerilen uzatma fonksiyonu aracılığıyla kıl bölümleri çıkarılmıştır. Son olarak, görüntünün doğrusal geometri özelliğinin daha iyi korunması için kısmi diferansiyel denklem tabanlı iç boyamadan yararlanılmıştır [11]. Huang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada dijital lezyon görüntüleri kullanılmış olup; ince kılları temizlemek için retina damarlarını segmentlere ayırmada kullanılan çok ölçekli uyumlu filtrelerin kullanımı önerildi. Daha sonra, saç rengi piksellerinin kısmi verilerinden saç tıkanmalarının eksik piksel değerleri, doğrusal diskriminant analizi (LDA) ve bölge büyütme algoritmaları ile kurtarılmıştır [12]. Ek olarak VirtualShave, kısmi diferansiyel denklem (PDE) tabanlı iç boyama uygulandıktan sonra kıllar blackhat filtresi aracılığıyla belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, bu çalışmada kıllar etkili bir şekilde yok edilmektedir [13].

Önceki çalışmalardan farklı olarak Attia ve arkadaşları tarafından bir dizi kıl segmentasyon yöntemi uygulanarak elde edilen zayıf etiketli

verilerle eğitilmiş, evrişimli ve tekrarlayan katmanları içeren hibrit bir ağ önerilmiştir. Diğer dijital kıl temizleme yöntemlerinin aksine bu çalışmada kullanılan segmentasyon işleminde tüm renk kanallarından faydalanılmıştır [14]. Ülkemizde ise Akyel ve arkadaşları tarafından 2020 yılında geleneksel görüntü işleme yöntemleriyle özgün maskeler oluşturulmuş ve U-net yapısı bu maskelerle eğitilmiştir. Dullrazor algoritması ile karşılaştırıldığında bu çalışmada daha yüksek başarı oranı elde edilmiştir [15]. Yine aynı araştırmacıların 2022 yılında yaptıkları çalışmada dermoskopik görüntüler $224 \times 224 \times 3$ olarak yeniden boyutlandırılmıştır. Daha sonra sırasıyla adaptif filtre, medyan filtre ve morfolojik operasyonlar sonucu elde edilen maskelerle FCN8 yapısı eğitilmiştir [16].

Bu çalışma; herhangi bir telefon kamerasıyla çekilebilen lezyon fotoğraflarından dijital görüntülerden oluşan yeni veri setinde kıl, hava kabarcığı gibi gürültülerden kurtulmakta kullanılan 2 adet yeni filtre tasarlanmıştır ve tasarlanan filtrelerin performansı çalışmalarda sıkça kullanılan iki filtre ile kıyaslanmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Veri Seti

Çalışmamızda kullandığımız veri setindeki dijital resimler Adana Alparslan Türkeş Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulunun (15.01.2021 tarihli ve 346 kurum sayılı karar) izini ile toplanmıştır. Veri setinde; 57 adet bazal hücreli karsinom, 3 adet skuamöz hücreli karsinom, 39 adet seboreik keratoz, 10 adet dermatofibrom, 290 adet nevüs ve 41 adet melanom lezyonlarından oluşan toplam 440 adet dijital görüntü bulunmaktadır.

2.2. Filtrelemeye Genel Bakış

Görüntü filtreleme görüntünün piksel değerlerinin değiştirilerek yeni bir görüntü elde edilmesidir. Filtreleme görüntülerdeki gürültülerden kurtulmak, kontrastı ayarlamak, istenilen bilgiyi (kenar, doku) çıkarmak gibi işlemler için kullanılmaktadır. Cilt kanseri görüntülerinde insan doğası gereği kıllar lezyonun çeşitli kısımlarında bulunabilmektedir.

Bundan dolayı bu görüntüler işlenirken lezyonun formu tam olarak belirlenememekte ve cilt kanseri teşhis programlarında yanlış teşhis konulmasına neden olabilmektedir.

Kıl temizleme filtreleri ise kılların temizlenip cilt kanseri teşhis programlarında teşhis doğruluğunu arttırmak için kullanılmaktadır. Şekil 1’de orjinal görüntüye kıl temizleme filtre uygulamasının genel bir şeması bulunmaktadır.



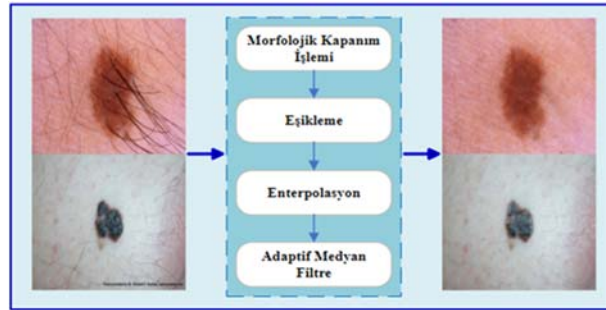
Şekil 1. Kıl temizleme filtrelerinin genel diyagramı

İdeal bir kıl temizleme filtresi; kıl piksellerinin tamamını yok ettikten sonra bu pikselleri lezyonun dokusuna uygun bir biçimde değişimini sağlamalıdır. Literatürde yaygın olarak kullanılan dermoskopik görüntüler olduğu için uygulanan filtreler bu yüksek kaliteli görüntülere uygun şekilde tasarlanmıştır. Ancak dijital kamera ile

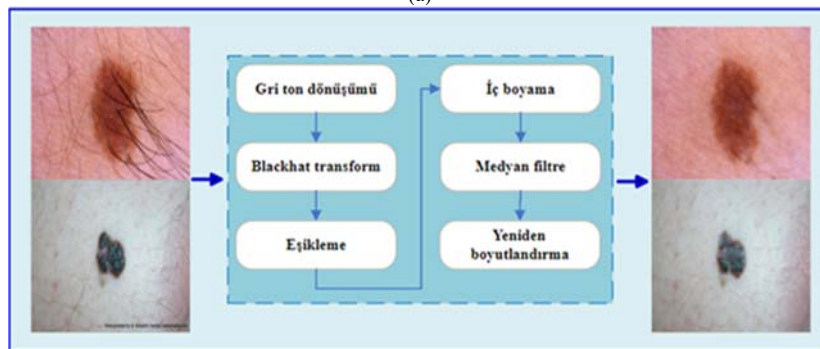
çekilmiş lezyon görüntülerine uygun yeterli bir sayıda filtre çalışması bulunmamaktadır. Bu çalışmada filtreler karşılaştırılırken kullanılan dermoskopik görüntü ISIC 2019 veri setinden [9,17,18], dijital görüntü ise Amerikan Kanser Topluluğu’nun (American Cancer Society) internet sitesinden [19] alınmıştır.

2.2.1. Önceki Çalışmalarda Kullanılan Filtreler

Bu çalışmada sonuçları kıyaslamak için benzer çalışmalarda sıklıkla kullanılan Dullrazor ve evrişimsel sinir ağı tabanlı cilt kanseri teşhis sistemlerinde kullanılan görüntülerin görüntü kalitesinin artırılmasında kullanılan bir ön resim işleme yöntemi kullanmıştır [10,20]. Bu iki filtre daha kolay karşılaştırılabildikleri için seçilmiştir. Görüntüleme öncesinde yapılan jilette kılları temizleme yöntemi ise hem maliyetli hem de zaman kaybı olmasından dolayı 1997 yılında Lee ve arkadaşları tarafından Dullrazor adlı dermoskopik resimlerdeki kılları yok edebilen bir algoritma geliştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2. (a)Dullrazor algoritmasının dermoskopik (yukarıda) ve dijital görüntüye (aşağıda) uygulanması (b)Kullanılan diğer algoritmanın dermoskopik ve dijital görüntüye uygulanması

Sadece koyu renkli kılların yok edilmesini amaçlayan bu algoritma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada amaç koyu renkli kılların yerlerini tespit etmektir. Bunun için 0° , 45° ve 90° lik açılara sahip olan üç farklı yapı elemanı kullanılarak gri ton morfolojik kapanım işlemi uygulanmış, eşikleme işlemi ile ikili görüntü elde edilmiştir. Bir sonraki aşamada ise önceki adımda elde edilen ikili kıl maskesi kullanılarak enterpolasyon metoduyla görüntüdeki kıl piksellerinin yerine kıl olmayan komşu piksellerin değerleri alınarak kılların yok edilmesi amaçlanmıştır. Son olarak ise elde edilen resim adaptif medyan operatörü kullanılarak pürüleştirilmiştir. Ancak bu algoritmanın kıl yoğunluğunun çok fazla olduğu görüntülerde başarı oranı çok düşüktür [10]. Şekil 2'de bu filtrenin yapısı ve filtreden elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Bu algoritma şekilde de görüldüğü üzere dermoskopik resimde daha başarılıken dijital resimde ise lezyonun dokusunu bozmuştur. Bu çalışmada kullanılan ikinci filtre ise tasarlanırken dermoskopik görüntülerdeki kılları yok edip, görüntü kalitesini yükselterek bilgisayar tabanlı cilt kanseri teşhisinde daha iyi bir sonuç almak hedeflenmiştir. Bu filtrede ISIC 2019 yarışması için hazırlanan veri seti kullanılmıştır.

Eski çalışmalarda sıklıkla kullanılan diğer bir filtre olan ikinci filtrede, resimlere blackhat dönüşümü uygulanarak kılların lokasyonları belirlenmiştir. Daha sonra ise eşikleme ile kıl maskesi oluşturulup iç boyama yöntemi ile kıllar görüntülerden temizlenmiştir. En son adımda ise medyan filtre kullanılarak görüntüler gürültülerden arındırılmış ve bilgisayar tabanlı teşhis programı için yeniden boyutlandırılmıştır [20]. Şekil 2'de bu filtrenin adımlarının olduğu diyagram ve uygulandığı görüntülerin sonuçları verilmiş olup, dermoskopik resimde, filtre uygulanan lezyon üzerindeki kılların gözle görülür derecede azalmıştır ancak dijital resimdeki kılların iyi temizlendiği ve lezyon görüntüsünün bulanık olduğu görülmektedir.

2.2.2. Tasarlanan Filtreler

a. Blackhat Tabanlı Kıl Temizleme Filtresi

Bu çalışmada geliştirilen ilk filtre blackhat tabanlı

kıl temizleme filtresidir. Bu filtrede sırasıyla dijital görüntüdeki gürültüyü temizlemek için Wiener filtresi, kılların lokasyonlarını belirleyebilmek için blackhat dönüşümü daha sonrasında kıllar ile görüntü arasındaki kontrastı arttırmak için kontrast sınırlamalı adaptif histogram eşitleme filtresi, kılların maskesini elde etmek için adaptif ortalamalı eşikleme ve son olarak dijital görüntüdeki kıl piksellerinin yerini doldurmak için iç boyama yöntemi kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen blackhat tabanlı filtrelerden farklı olarak bu filtrede blackhat işleminden sonrasında elde edilen görüntü ile Wiener filtresi uygulanan görüntü arasındaki fark alınmaktadır. Bu sayede görüntüdeki kılların belirginliği daha da artmıştır. Ham dijital görüntülerin derin öğrenme tabanlı kanser teşhis algoritmasında daha güvenilir sonuç verebilmesi için öncelikle her iki filtremizin ilk adımı olarak resimler yeniden enterpolasyon yöntemi ile boyutlandırılıp daha sonrasında ise Wiener filtresi kullanılmıştır.

Wiener filtresi istatistiksel bir yaklaşıma sahip bir filtredir. İstenen frekans tepkisi için tasarlanan geleneksel filtreler aksine Wiener filtresi uygulanırken; orijinal sinyalin ve gürültünün spektral özellikleri hakkında bilgi sahibi olduğu varsayılmaktadır. Bu filtreyle, filtrelenmiş sinyalin orijinal sinyale mümkün olduğunca yakın olması; aralarındaki ortalama kare hatasının minimum düzeyde olması istenmektedir [21]. Bu hatanın ölçümü ise Eşitlik 1 ile ölçülmektedir.

$$e^2 = E \left\{ (f - \hat{f})^2 \right\} \quad (1)$$

Bu eşitlikte $E\{\cdot\}$ argümanın beklenen değerini temsil ederken, f bozulmamış görüntüyü ve \hat{f} filtrelenmiş görüntüyü temsil etmektedir. Görüntü ile gürültünün birbirlerinden bağımsız olduğu, her ikisinden birinin sıfır ortalamasının olduğu ve filtrelenmiş görüntüdeki gri düzeylerin bozulmuş görüntüdeki düzeylerin lineer fonksiyonu olduğu varsayımları yapıldığında Eşitlik 2 elde edilmektedir.

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v)} \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + \frac{S_n(u, v)}{S_f(u, v)}} \right] G(u, v) \quad (2)$$

Bu eşitlikte $H(u, v)$ bozulma fonksiyonu, $|H(u, v)|^2$ bozulma fonksiyonun konjugesi ile çarpımını, $S_n(u, v)$ gürültünün güç spektrumunu ve $S_f(u, v)$ bozulmamış görüntünün güç spektrumunu temsil etmektedir [22]. Bu çalışmada ise alternatif olarak görüntünün arka koşullu yasaının, gürültü gücünün ve görüntü frekans gücünün örneklerini çeken yinelemeli bir Gibbs örnekleyicisine dayanan gözetimsiz Wiener algoritması kullanılmıştır [23]. Daha sonrasında ise gürültüden arındırılan dijital lezyon görüntülerine blackhat dönüşümü uygulanarak kılların yerleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bir görüntünün morfolojik kapanımı ile bu görüntünün orjinal hali arasındaki farkından oluşan görüntü orjinal görüntünün blackhat dönüşümüdür. Eşitlik 3'te matematiksel olarak denklemi verilmiştir.

$$T_b(f) = f \circ b - f \quad (3)$$

Bu eşitlikte f orijinal görüntüyü, b yapı elemanını ve " \circ " morfolojik kapanım operatörünü temsil etmektedir. Blackhat dönüşümünde yapı elemanın yapısal özellikleri tespit edilmek istenen objeye göre seçilmektedir. Dönüşüm sonucu görüntüde ise yapı elemanından daha küçük ve çevresinden daha koyu objeler ortaya çıkmaktadır. Resim işlemede; göz damarlarını, cilt lezyonunu ve kanserli meme dokusunu tespit etmek gibi birçok kullanımı bulunmaktadır [24]. Resimdeki kılların daha da belirginleşmesi için gri tonlu görüntüden blackhat dönüşümü sonucu elde edilen resim çıkarılıp; kontrast sınırlı adaptif histogram eşitleme (CLAHE) tekniği uygulanmıştır. Medikal birçok alanda kullanılan bu görüntü iyileştirme tekniğinde; görüntü homojen ve kesişmeyen alt bölgelere ayrılır ve bu bölgelerin histogramları hesaplanıp, alt bölgelerin sınırlarındaki düzensizliği yok etmek için enterpolasyon uygulanmaktadır.

Histogramları kırmak için; kontrast genişlemesi amacıyla istenen sınıra dayalı olarak, bir kırpma limiti elde edilir. Daha sonra elde edilen histogramlar istenilen kırpma limit değerini geçmeyecek şekilde yeniden pay edilir ve gri tonlamalı haritalama için kontrastla sınırlı histogramlar için kümülatif dağılım fonksiyonları (CDF) uygulanır [25]. Görüntü kontrastını

arttırmak amacıyla meme mamografilerinde, hücre segmentasyonunda, kemik kırığı tespiti gibi medikal uygulamalarının yanı sıra tarım sistemlerinde, meyve segmentasyonunda ve sürüş sistemlerinde yaya veya araç tespitinde kullanılmaktadır [26-29]. Görüntü işleme yöntemlerinden biri olan eşikleme resimdeki istenen nesnenin maskesinin oluşumunu; belirlenen sabit piksel eşik değerinin altındaki piksel değerleri siyah, üstündeki piksel değerleri ise beyaz piksel olarak değiştirilerek sağlamaktadır.

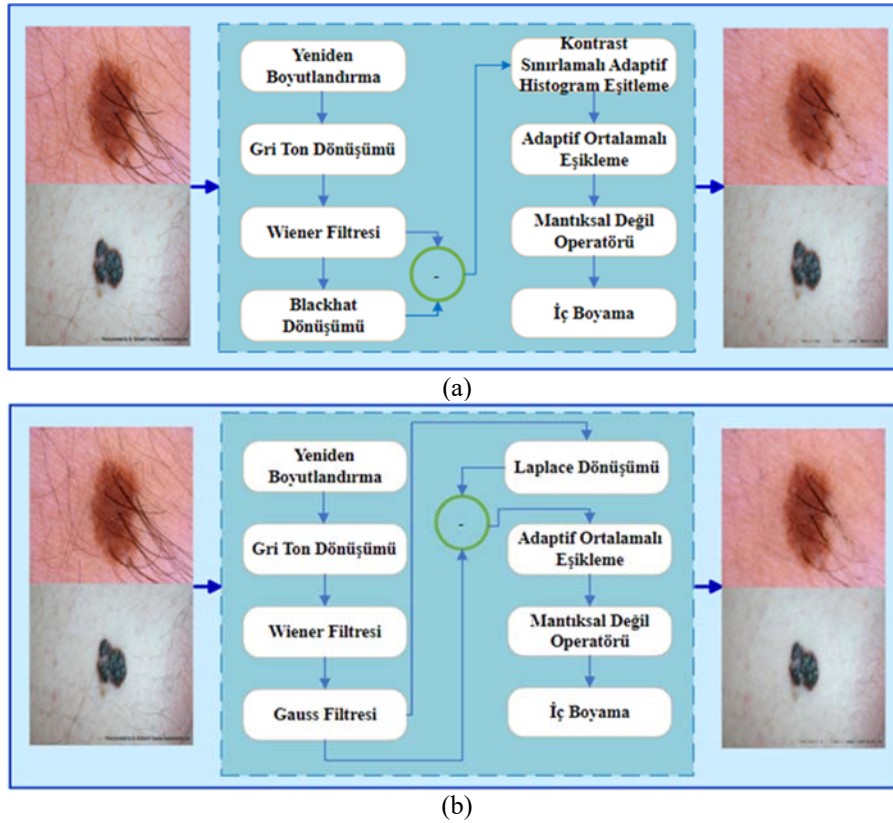
Bu çalışmada ikili kıl maskesini elde etmek için küresel eşikleme yönteminin yetersiz olduğu düzensiz arka plan aydınlatması olan görüntülerde kullanılan adaptif eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Küresel eşikleme yöntemlerinde, seçilen eşik değeri tüm resme uygulanırken; adaptif eşikleme yöntemlerinde her pikselin komşusu olan piksellerin bir veya daha fazla belirlenmiş özelliğine dayalı olarak görüntüdeki her noktada bir eşik değeri hesaplanır. Bu çalışmadaki eşikleme yönteminde ise, komşu piksellerinin alan değerlerinin ortalamasından sabit bir değer çıkarılmasıyla elde edilmektedir [30].

Kıl temizlemede en sık kullanılan bir diğer yöntem ise iç boyamadır. Bu yöntem sayesinde görüntülerdeki komşu piksellerden gelen bilgiler kullanarak istenmeyen nesnelere ortadan kaldırılırken aynı zamanda görüntü bütünlüğü yeniden sağlanır. Dijital resimlerden nesne, metin çıkarma, yeniden görüntü oluşturma ve video restorasyonu gibi birçok uygulaması bulunmaktadır. Dermoskopik görüntülerde; kılların temizlenmesi için yapılan çalışmalarda doğrusal enterpolasyon metotların, kısmi diferansiyel denklem (PDE) bazlı difüzyon metotların ve örnek tabanlı yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada diğer bilinen yöntemlerin aksine daha hızlı olduğu için hızlı yürüme temeline dayalı iç boyama tercih edilmiştir.

Görüntü gradyanı boyunca bir görüntü düzgünlüğü tahmin edicisinin yayılmasına dayanan bu teknik; görüntü düzgünlüğünü, iç boyama yapılacak pikselin bilinen bir görüntü komşuluğu üzerinden ağırlıklı ortalama olarak tahmin eder. Eksik bölgeleri seviye kümeleri olarak ele alınır ve

görüntü bilgisini yaymak için hızlı yürüyüş yöntemi (FMM) kullanılır [30,31]. Şekil 3'te hem blackhat tabanlı kıl temizleme filtresinin diyagramı hem de uygulandığı görüntüler verilmiştir. Dermoskopik

görüntüde kılların tamamı temizlenmemiş olsa da lezyon bütünlüğü korunmaktadır; dijital görüntüde ise kıl temizlemede daha başarılı olduğu görülmekte ve ayrıca lezyon yapısını korumaktadır.



Şekil 3. (a) Çalışmada tasarlanan blackhat tabanlı kıl temizleme filtresinin uygulanması. (b) Çalışmada tasarlanan Laplace of Gaussian (LoG) tabanlı kıl temizleme filtresinin uygulanması

b. Laplacian of Gaussian (LoG) Tabanlı Kıl Temizleme Filtresi

Bu çalışmada geliştirilen ikinci filtrede ise ilk geliştirilen filtredaki kılların lokasyonlarını tespit etmek için kullanılan blackhat dönüşümü yerine Laplace operatörü kullanılmıştır. Fakat bu operatörün gürültüye hassas olmasından dolayı öncesinde Gauss filtresi uygulanmaktadır. Kenar tespit yöntemlerinden biri olan Laplace operatörü ikinci türev tabanlı kenar operatörü olup; yalnızca gradyan değerlerinde yerel maksimumlara sahip noktaları kenar noktaları olarak tespit etmektedir. Böylece kenar noktalarında birinci türevde bir tepe

noktası ve ikinci türevde sıfır geçiş elde ederiz. Dolayısıyla ikinci türevin sıfır geçişe sahip olduğu noktalar kenar noktaları olarak kabul edilir. Laplace hesaplamasıyla ikinci türev Eşitlik 4'teki gibi belirlenmektedir [31,32].

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) \quad (4)$$

Yukarıdaki eşitlik tekrar yazılırsa;

$$\nabla^2 f = \nabla_x (f(x+1, y) - f(x, y)) + \nabla_y (f(x, y+1) - f(x, y)) \quad (5)$$

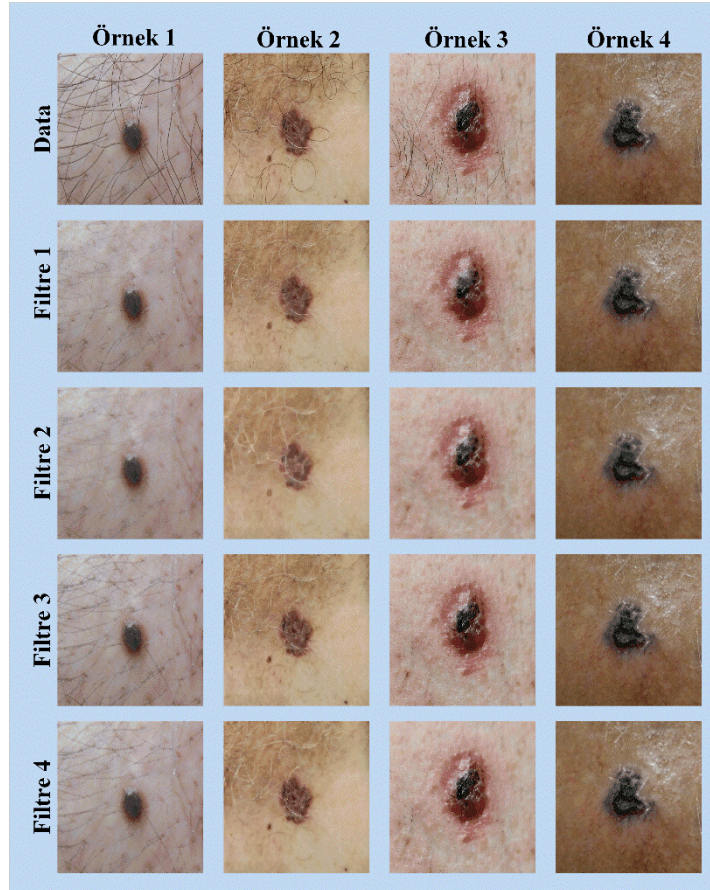
Eşitlik 5 elde edilir. Daha sonrasında ise;

$$\nabla^2 f = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y) \quad (6)$$

Yukarıda gösterilen ifadeye ulaşılmaktadır. Şekil 3'te dermoskopik görüntüye filtre uygulandığında kılların görünümünün azaldığı ancak tam olarak temizlenemediği görülmüştür. Dijital görüntüye uygulandığında ise lezyon yapısının kısmen bozulduğu ancak kılların temizlendiği görülmektedir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Örnek çalışmalar açık veri setlerinde yapıldıktan sonra kullanılan filtreler toplanan dijital görüntülerde denenmiştir. Şekil 4'te veri setindeki dört adet görüntüye bu çalışmadaki filtrelerin uygulama sonuçları verilmektedir. Veri setindeki orijinal görüntüye uygulanan Filtre 1 olarak adlandırılan Dullrazor [10], Filtre 2 olarak adlandırılan blackhat tabanlı filtre [20], Filtre 3 olarak adlandırılan çalışmada tasarlanan blackhat tabanlı kıl temizleme filtresi ve Filtre 4 olarak adlandırılan çalışmada tasarlanan LoG tabanlı kıl temizleme filtrelerinin sonuçlarıdır.



Şekil 4. Toplanan dijital görüntülerden rastgele seçilmiş 4 örnekte Filtre 1 olarak Dullrazor [10], Filtre 2 olarak blackhat tabanlı filtre [20], Filtre 3 olarak çalışmada tasarlanan blackhat tabanlı kıl temizleme filtresi ve Filtre 4 olarak çalışmada tasarlanan LoG tabanlı kıl temizleme filtrelerinin sonuçları

İlk sütundaki görüntülere baktığımızda kılların ilk iki filtre yardımıyla iyi bir şekilde temizlenmiş olduğu ancak lezyon dokusunda bozulmalara yol açtığı gözlemlenmiştir. Çalışmada tasarlanan filtrelerde ise kılların görünümü kısmen azaltılmış olup, ilk iki filtredeki gibi lezyonda bulanıklaşmaya neden olmadığı görülmektedir. İkinci sütunda ise görüntüde hem beyaz hem koyu renkli kılların olduğu görülmektedir. İlk iki filtrenin lezyonların yapısında bozulma yaptığı, beyaz kılların temizlenmesinde de yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Tasarlanan filtrelerde beyaz kılları temizlemede başarılı olmamış ancak lezyon yapısı daha net bir şekilde korunmuştur.

Üçüncü sütundaki dijital lezyon görüntüsünde uygulanan tüm filtreler kılları iyi derecede temizlemiştir. İlk iki filtre lezyondaki kabuğun dokusunu gözle görülür derecede bulanıklaştırmış ancak diğer filtrelerde ise bulanıklaştırma yok denecek kadar azdır. Kılların temizlenmesi ve lezyonun yapısının korunması açısından üçüncü filtre bu görüntüde en iyi sonucu vermiştir. Dördüncü sütundaki orijinal görüntüye uygulanan ilk iki filtre koyu renkli kılların temizlenmesi iyi derecede yapsa da beyaz kıllarda başarılı olamamıştır ek olarak lezyondaki kabuk görüntüsünün de bulanıklaşmasına neden olmuşlardır. Çalışmada geliştirilen iki filtre ise kıllar konusunda ilk iki filtreye yakın performans göstermiştir ancak kabuk yapısını diğer filtreler kadar bulanıklaştırmamıştır. Görüntü bütünlüğünü koruyan ve kılları en iyi temizleyen filtre üçüncü filtre iken diğer filtreler bu hususlarda yeterli olamamışlardır.

4. SONUÇLAR

Cilt kanseri ciddi bir hastalık ama erken evrede yakalandığında hastanın sadece yaşama şansı artmıyor hasta tamamen iyileşebiliyor. Erken teşhisi çok önemli olmasına rağmen bu değerli zaman çeşitli sebeplerle kaçırılabilir. Bu sebeplerden en önemlileri altın standart olarak kabul edilen dermoskopik görüntüleme yöntemin hem pahalı hem de uzmanlık gerektiriyor olup sadece büyük merkezlerde yapılıyor olmasıdır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda çok daha ucuz ve toplanması daha kolay olan dijital görüntünün az

kullanıyor olmasının en büyük sebebi ise görüntü çeşitlerinin fazlalığından kaynaklanan filtreleme işlemi daha zahmetli olmasıdır. Bu anlamda en önemli zorluklardan biri ise veri korunması hayati önemi olan cilt lezyonlarının kıllardan temizlenmesidir. Kıl temizlenmesi problemi oldukça kompleks olduğundan dolayı bir filtre her problemde en iyi çözüm vermemektedir. Bu sebeple adaptif filtreye ihtiyaç vardır. Adaptif filtreler yapı itibarı ile çeşitli filtrelerden oluşmaktadır ve çıkışı bu filtreler arasında en iyi sonuçtur. Bu çalışmada yeni bir adaptif filtre iki adet özgün filtre üretilmiş olup sıkça kullanılan filtreleme algoritmaları ile kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada tasarlanan filtreler ise karşılaştırılan diğer filtrelere göre kılların tamamen yok edilemediği ancak görünürlüklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Dijital lezyon görüntülerinde kabuk içerip içermemesine bakılmaksızın lezyon dokularının korunduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada kullanılan tüm filtrelerin beyaz kılları yok edemediği tespit edilmiştir. Diğer çalışmalarda kullanılan filtrelerin ise kılları iyi temizlediği fakat kabuklu lezyonların yapısını bozduğu görülmüştür. Bu çalışmada tasarlanan filtrelerin ise kıl temizliğinde diğer iki filtreden daha az başarılı olduğu ancak kabuklu lezyonların yapısını koruyabildiği gözlemlenmiştir. Cilt kanser teşhis programları göz önüne alındığında tasarlanan filtrelerin daha iyi bir sonuç vereceği düşünülmektedir.

Bütün filtreler görüntüden görüntüye farklı performans gösterildiği görülmektedir. Bundan dolayı daha sonraki çalışmalarımızda ise tasarlanan filtrelerin geliştirilmesi ve adaptif filtreler üzerine olması planlanmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya tıbbi katkılarından dolayı sayın Prof.Dr. Murat Durdu'ya çok teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. The International Agency for Research on Cancer (IARC), 2020. WHO-All Cancers, The Global Cancer Observatory. <https://gco.iarc.fr>

- [/today/fact-sheets-cancers](#), Erişim tarihi: 01.02.2023, Lyon, France.
2. Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R.L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., Bray, F., 2021. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries, CA: A Cancer Journal for Clinicians, 71(3), 209-249.
 3. Halk Sağlığı Genel Müdürlüğü, 2018 Yılı Türkiye Kanser İstatistikleri, https://hsgm.saglik.gov.tr/depo/birimler/kanserdb/Dokumanlar/Is_tatistikler/Kanser_Rapor_2018.pdf, Erişim tarihi: 12.03.2023, Ankara.
 4. Açıkgöz, A., Çımrın, D., Ergör, G., 2018. Determination of Breast, Prostate, Colorectal and Lung Cancer Environmental Risk Factors and Risk Levels: Case-Control Study. Cukurova Medical Journal, 43(2), 411-421.
 5. Gültop, F., Özkan, S., 2022. The Importance of Health Literacy in Cancer Awareness. Turkish Bulletin of Hygiene and Experimental Biology, 79(3), 579-586.
 6. Siegel, R.L., Miller, K.D., Fuchs, H.E., Jemal, A., 2022. Cancer Statistics 2022, CA: A Cancer Journal for Clinicians, 72(1), 7-33.
 7. Demir, F., 2021. Derin Öğrenme Tabanlı Yaklaşımla Kötü Huylu Deri Kanserinin Dermatoskopik Görüntülerden Saptanması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33(2), 617-624.
 8. Bisla, D., Choromanska, A., Berman, R.S., Stein, J.A., Polsky, D., 2019. Towards Automated Melanoma Detection with Deep Learning: Data Purification and Augmentation. 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Long Beach, 1-11.
 9. Codella, N.C., Gutman, D., Celebi, M.E., Helba, B., Marchetti, M.A., Dusza, S.W., 2018. Skin Lesion Analysis Toward Melanoma Detection: A Challenge at the 2017 International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Hosted by the International Skin Imaging Collaboration (ISIC). 2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI'2018), Washington DC, 168-172.
 10. Lee, T., Ng, V., Gallagher, R., Coldman, A., McLean, D., 1997. Dullrazor®: A Software Approach to Hair Removal from Images, Computers in Biology and Medicine, 27(6), 533-543.
 11. Xie, F.Y., Qin, S.Y., Jiang, Z.G., Meng, R.S., 2009. PDE-Based Unsupervised Repair of Hair-Occluded Information in Dermoscopy Images of Melanoma, Computerized Medical Imaging and Graphics, 33(4), 275-282.
 12. Huang, A., Shun-Yuen, K., Wen-Yu, C., Min-Yin, L., Min-Hsiu, C., Gwo-Shing, C., 2013. A Robust Hair Segmentation and Removal Approach for Clinical Images of Skin Lesions. 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Osaka, 3315-3318.
 13. Fiorese, M., Peserico, E., Silletti, A., 2011. VirtualShave: Automated Hair Removal from Digital Dermatoscopic Images. 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Boston, 5145-5148.
 14. Attia, M., Hossny, M., Zhou, H., Nahavandi, S., Asadi, H., Yazdabadi, A., 2019. Digital Hair Segmentation Using Hybrid Convolutional and Recurrent Neural Networks Architecture. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 177(2019), 17-30.
 15. Akyel, C., Arıcı, N., 2020. Cilt Kanserinde Kıl Temizliği ve Lezyon Bölütlemesinde Yeni Bir Yaklaşım. Politeknik Dergisi, 23(3), 821-828.
 16. Akyel, C., Arıcı, N., 2022. Hair Removal and Lesion Segmentation with FCN8-ResNetC and Image Processing in Images of Skin Cancer. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 15(2), 231-238.
 17. Tschandl, P., Rosendahl, C., Kittler, H., 2018. The HAM10000 Dataset, A Large Collection of Multi-Source Dermatoscopic Images of Common Pigmented Skin Lesions. Scientific Data, 5(1), 1-9.
 18. Combalia, M., Codella, N., Rotemberg, V., Carrera, C., Dusza, S., Gutman, D., Helba, B., Kittler, H., Kurtansky, N.R., Liopyris, K., Marchetti, M.A., Podlipnik, S., Puig, S., Rinner, C., Tschandl, P., Weber, J., Halpern, A., Malvey, J., 2022. Validation of Artificial Intelligence Prediction Models for Skin Cancer Diagnosis Using Dermoscopy Images: the 2019

- International Skin Imaging Collaboration Grand Challenge. The Lancet Digital Health, 4(5), e330-e339.
19. American Cancer Society, Skin Cancer Image Gallery, <https://www.cancer.org/cancer/types/skin-cancer/skin-cancer-image-gallery.html>, Erişim tarihi: 04.06.2023.
 20. Gürsel, A.T., Yalçın, T., 2021. Improving Digital Image Quality for Convolution Neural Network Based Computer-Aided Diagnosis (CNN-CAD) of Skin Cancer. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(4), 1099-1110.
 21. Kumar, S., Kumar, P., Gupta, M., Nagawat, A. K., 2010. Performance Comparison of Median and Wiener Filter in Image De-noising. International Journal of Computer Applications, 12(4), 27-31.
 22. Gonzalez, R., Woods, R., 2002. Digital Image Processing. Prentice Hall, New Jersey, 261-266.
 23. Orioux, F., Giovannelli, J.F., Rodet, T., 2010. Bayesian Estimation of Regularization and Point Spread Function Parameters for Wiener-Hunt Deconvolution. Journal of the Optical Society of America A, 27(7), 1593-1607.
 24. Kushol, R., Kabir, Md. H., Salekin, M.S., Rahman, A.B.M.A., 2017. Contrast Enhancement by Top-Hat and Bottom-Hat Transform with Optimal Structuring Element: Application to Retinal Vessel Segmentation. Image Analysis and Recognition (ICIAR'2017), Montreal, Canada, 533-540.
 25. Zuiderveld, K., 1994. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. Graphics Gems IV. Academic Press Professional, Inc., USA, 474-485.
 26. Pisano, E.D., Zong, S., Hemminger, B.M., DeLuca, M., Johnston, R.E., Muller, K., Braeuning, M.P., Pizer, S.M., 1998. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization Image Processing to Improve the Detection of Simulated Spiculations in Dense Mammograms. Journal of Digital Imaging, 11(4), 193-200.
 27. Parveen, N.R.S., Sathik, M.M., 2009. Enhancement of Bone Fracture Images by Equalization Methods. 2009 International Conference on Computer Technology and Development (ICCTD), Kota Kinabalu, 391-394.
 28. Murillo-Bracamontes, E.A., Martinez-Rosas, M.E., Miranda-Velasco, M.M., Martinez-Reyes, H.L., Martinez-Sandoval, J.R., Cervantes-de-Avila, H., 2012. Implementation of Hough Transform for Fruit Image Segmentation. Procedia Engineering, 35(2012), 230-239.
 29. Kohli, P., Chadha, A., 2019. Enabling Pedestrian Safety Using Computer Vision Techniques: A Case Study of the 2018 Uber Inc. Self-driving Car Crash. Future of Information and Communication Conference (FICC 2019), San Francisco, CA, USA, 261-279.
 30. OpenCV, Image Thresholding, https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html, Erişim Tarihi: 13.09.2023.
 31. Bouganssa, I., Sbihi, M., Zaim, M., 2019. Laplacian Edge Detection Algorithm for Road Signal Images and FPGA Implementation. International Journal of Machine Learning and Computing, 9(1), 57-61.
 32. Dhar, R., Gupta, R., Baishnab, K.L., 2014. An Analysis of CANNY and LAPLACIAN of GAUSSIAN Image Filters in Regard to Evaluating Retinal Image. 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCCE'2014), Coimbatore, 1-6.

The Effects of Several Washings on Some Comfort Features of Denim Fabrics Made of Cotton and Coolmax Weft Yarns with and without Elastane

Md Emdad SARKER¹ ORCID 0000-0002-8058-3730
Serin MEZARCIÖZ*² ORCID 0000-0002-0457-1500

¹Bangladesh University of Textiles, Bangladesh

²Cukurova University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 10.11.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: SARKER, M.E., MEZARCIÖZ, S., (2023). The Effects of Several Washings on Some of the Comfort Features of Denim Fabrics Made of Cotton and Coolmax Weft Yarns with and without Elastane. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(4), 1151-1159.

Abstract

The performance of denim fabric under the influence of repeated home laundering techniques was investigated in this article. All fabrics have been produced from the same warp yarn (100% cotton) and four different weft yarns: 100% cotton (CT), 100% Coolmax (CM), Cotton & Elastane (CTE), and Coolmax & elastane (CME) and then subjected to one, ten, and twenty simulated home laundry cycles. Performance attributes such as air permeability, tearing strength, stiffness, drying performance, and color measurement were assessed. In addition, the significance of the washing effect on the parameters was determined using ANOVA and Tukey HSD multiple comparisons. In conclusion, frequent washing had a detrimental impact on air permeability, tearing strength, and stiffness, but did not affect drying performance. Aside from that, the successive washing has resulted in noticeable color changes.

Keywords: Stretch denim fabric, Coolmax, repeated laundering, air permeability

Çeşitli Yıkamaların Pamuklu ve Coolmax Atkı İpliklerinden Üretilen Denim Kumaşların Bazı Konfor Özelliklerine Etkisi

Öz

Bu çalışmada denim kumaşların tekrarlanan yıkamalar sonrasındaki performansı araştırılmıştır. Tüm kumaşlar aynı çözgü ipliğinden (%100 pamuk) ve %100 pamuk (CT), %100 Coolmax (CM), Pamuk & Elastan (CTE) ve Coolmax & elastan (CME) olmak üzere dört farklı atkı ipliğinden üretilmiştir. Üretilen kumaşlara 1, 10 ve 20 kez tekrarlı ev yıkaması uygulanmış ve sonrasında hava geçirgenliği, yırtılma mukavemeti, sertlik, kuruma performansı ve renk ölçümü gibi performans özellikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca yıkama etkisinin parametreler üzerindeki önemi ANOVA ve Tukey HSD çoklu karşılaştırmaları kullanılarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, tekrarlı yıkamaların kumaşların hava geçirgenliği, yırtılma

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Serin MEZARCIÖZ, smavruz@cu.edu.tr

mukavemeti ve kumaş sertliği üzerinde olumsuz etkisi olduğu ancak kuruma performansını etkilemediği görülmüştür. Bunun dışında tekrarlı yıkamalar gözle görülür renk değişikliklerine neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Streç denim kumaş, coolmax, tekrarlı yıkama, hava geçirgenliği

1. INTRODUCTION

Denim is a twill-woven fabric with indigo-dyed warps and grey or un-dyed wefts, with weft threads passing beneath two or more warp threads. One side of the fabric shows the blue warp threads, while the other side shows the white weft threads due to the warp-faced twill weaving [1]. Denim fabric's popularity is rising because of its versatility, durability, and affordability [2]. Usually, the fabric is rough and harsh when woven at first. Therefore, different washing treatments must be done to the material before being used in the final goods to change the fabric's surface and the look of denim products. So, denim washing is the core of denim finishing related to quality, aesthetic, and value of garments [3,4].

Coolmax is a modified polyester fiber with a tetra channel cross-section of benzene rings and a conjugated aromatic polymer chains system that absorbs UV radiation more effectively [5]. Ertekin observed that coolmax yarn fabrics have improved air permeability, heat resistance, and water vapor permeability indexes [6]. Coolmax's thermoregulation function is based on moisture management, thanks to the multi-channel cross-section of the fibers, which uses capillary theory to collect sweat and moisture from the skin's surface, move it to the fabric surface, and then evaporate it. Coolmax fabric has a decreased air permeability due to its increased thickness and the shape of its fibers [7]. Combining Coolmax fiber with regenerated cellulose fibers increased the wearing comfort and drying speed of sportswear [8]. Coolmax is hydrophobic, unlike hydrophilic cotton, which swells with solution absorption [9]. On the other hand, cotton absorbs and retains 14 times as much moisture as Coolmax [5].

The worldwide market is becoming more interested in apparel comfort with the advancement of civilization. Fabrics used to make summer and sports apparel must have outstanding thermal-wet

performance. Air permeability, moisture management, and heat transfer performance are the major factors that impact comfort characteristics [10]. **Stretch denim fabric** has become increasingly popular due to its ability to perfectly fit the wearer's body [2]. Elastic yarn can be used in the warp or the weft, or both, of a stretch fabric. Usually, stretch denim fabrics are made by employing the core-spun cotton weft yarns incorporating elastane filament (Polyurethane) and cotton fibers. In addition to the elastane's linear density, its count and twist, the fabric weave and structure, and finishing techniques all have an impact on stretch textiles' mechanical properties [11-13]. Fabric weft stretchability is a significant factor in fabric comfort, mechanical and thermal properties, and the fabric's elongation [14]. There is a substantial difference in air and water vapor permeability between denim fabrics with cotton weft yarn and polyester and Lycra weft yarns [15]. On the other hand, elastane may affect the wearer's thermo-physiological comfort [7].

There is a lack of research on the comfort attributes of denim fabrics with various weft yarns, especially when it comes to the impact of regular home laundry. Moreover, no researcher paid attention to the drying performance of the denim fabric made by different weft yarns, specially coolmax and elastane core-spun yarn.

2. MATERIALS AND METHODS

This study produced four denim fabrics from the same & 100% cotton warp yarn and four different weft yarns. Weft yarns are 24 Ne cotton, 24 Ne Coolmax, 24 Ne cotton & elastane, and 24 Ne Coolmax & elastane. The properties of weft yarns have been depicted in Table 1.

The denim fabrics were made with a 3/1 twill weave by the Picanol Rapier weaving machine at the Bossa Denim Factory in Adana Industrial Area, Turkey. The specifications of the denim fabrics are shown

in Table 2. After weaving, the fabric was passed through a singeing machine to burn the projecting fibers on the face side at 70 m/min and 12 mbar. Next, a regular wash was used to remove the ash from the fabric surface. Then, drum contact drying was carried out at a speed of 35 meters per minute

and 110 °C. The softener was 3 g/l, the wetting agent was 1 g/l, and acetic acid was used to keep the pH constant between 4.5 and 5, with the speed of 24 m/min temperature was 140 °C. Finally, Sanforizing was completed at a rate of 30 meters per minute in the end.

Table 1. Properties of yarns from USTER TESTER 5-S800

Parameters	Values			
Count (Ne)	23.77	23.87	23.80	23.67
CV%	0.59	1.18	1.06	0.97
Elongation%	5.21	13.60	7.47	18.77
Single yarn strength, Rkm	17.45	18.47	12.72	22.83
U%	12.38	3.16	12.97	7.73
Thin place (-50%km)	1	0	5	0
Thick place (+50%km)	48	0	523	1
Neps (+200%km)	21	0	324	4
Imperfections (IPI)	70	0	852	5
Hairiness	5.36	5.12	6.12	5.80

Table 2. The specifications of the denim fabrics

Sample code	CT	CM	CTE	CME
Weave	3/1 Z twill	3/1 Z twill	3/1 Z twill	3/1 Z twill
Mass/unit Area (gm/m ²)	215	203	226	202
Width	179 cm	180 cm	157 cm	140 cm
Warp material	Cotton: Indigo dyed	Cotton: Indigo dyed	Cotton: Indigo dyed	Cotton: Indigo dyed
Weft material	100% Cotton	100% Coolmax	92% Cotton, 8% elastane	92% Coolmax, 8% elastane
Warp density (ends/cm)	40	40	48	48
Weft density (picks/cm)	27	27	30	30
Warp linear density (Tex)	29.5 Tex	29.5 Tex	29.5 Tex	29.5 Tex
Weft linear density (Tex)	24.8 Tex	24.8 Tex	24.8 Tex + 78 dTex ela	24.8 Tex + 78 dTex ela

Testing Methods

Tearing strength was determined by ISO 9290:1990 with James H. Heal (Elmatear model) tester, stiffness by ASTM D4032-94 with circular stiffness tester, color by Minolta Spectrophotometer, and air permeability by ISO 9237: 1995 with EP08M ProWhite machine. The washing was done in a

Type-A washing machine (Horizontal axis, Front loading). The detergent was reference detergent-3, and the mass of the washing sample and ballast was 1 kg/ 1 kg, with type-II ballasts consisting of 50% cotton and 50% polyester. The washing procedure was 3N (Temp: 30°C, Liquor level: 100 mm, wash time: 15 minutes, three rinses); the drying procedure was C (open air dry/flat dry).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Before the measurements, the samples were put out on a level surface for a day in a normal atmospheric condition (20±2°C and 65±2% RH).

3.1. Air Permeability

Air permeability has an impact on how comfortable a garment feels. The fabric's ability to allow air to pass through when there is a differential air pressure on each side of the fabric's surface is an essential factor to consider when studying and comparing the breathability characteristic. The number of pores determines porosity, directly related to fabric permeability [6]. The porosity of a textile determines its air permeability. For the same fabric structure, increased filament fiber composition increases air permeability [16]. As the tightness of the fabric grew, the air permeability of the material decreased (Figure 1). The air permeability ratings of elastane-free materials CT & CM are greater than CTE & CME. The repeated washing negatively influences the air permeability values because the frequent washing leads the fabric structure to relax, enhancing its compactness.

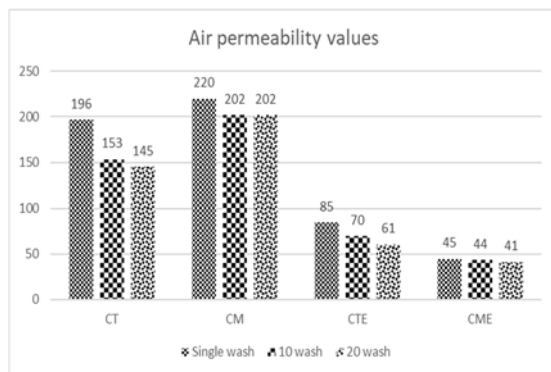


Figure 1. Air permeability values

Analysis of variance (Table 3) was done according to $\alpha=0.05$ significance level to determine the effect of weft types on the air permeability due to repeated washing. The difference between weft types with Tukey HSD multiple comparisons has been depicted in Table 4 and found that the weft types had statistically significant on the air permeability values.

3.2. Drying Performance

The fibers' capillary capacity and moisture absorption determine the fabric's ability to regulate the moisture [15]. It was a simple procedure in which the fabric samples were weighed after being wet for a period, and the moisture loss percentage of the fabric samples was determined. After the washing procedure, the samples' weight was determined. Then, all the pieces were dried in a free environment. After every 1 hour, the samples' mass was measured, and the % of weight loss was determined. The same procedures were repeated until the difference in weight reduction was zero. These numbers have been used to evaluate the samples' fast dry characteristics. The results are presented in the Figure 2.

The formula for calculating the moisture loss

$$\frac{\text{Weight of wet sample} - \text{weight of dry sample}}{\text{Weight of wet sample}} \times 100 \quad (1)$$

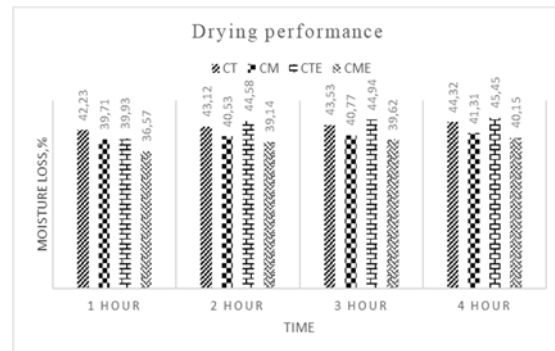


Figure 2. Moisture loss values

Cotton fibers are hydrophilic, which means that fabrics with a high proportion of CT absorb more water than CM fabrics. As a result, CM fabrics contained less water than cotton fabrics after washing. As a result, CM and CME drying performance in weight loss percentage is lower. Analysis of variance (Table 3) was done according to $\alpha=0.05$ significance level to determine the effect of weft types on the drying performance due to repeated washing. The difference in moisture loss between weft types with Tukey HSD multiple comparisons has been depicted in Table 4 and found that the moisture loss percentage data was

unaffected by differences in weft types between the groups.

3.3. Tearing Strength

Under specific conditions, the force necessary to begin or continue to rip a fabric in either the weft or warp direction is defined as tearing strength. It describes the gradual, thread-by-thread fabric rupture along a line, whereas all the yarns are broken during a tensile strength test. As a result, the tensile strength value (in kilograms) is larger than the tearing strength value. The results are presented in the Figure 3-4.

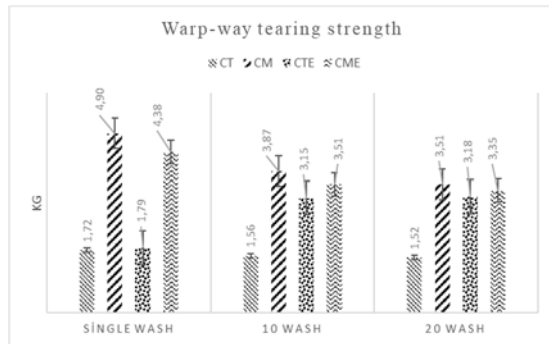


Figure 3. Warp-way tearing strength values

After every wash, the tearing strength of the fabric samples is as follows: CT<CM< CTE< CME. As we tried to find the effect of laundering on the fabric strength, the results demonstrated that the strength has a little decreasing trend from a single wash to 10 wash and 20 wash. The repeated laundry causes the yarns to lose their inter-cohesive force and become weaker.

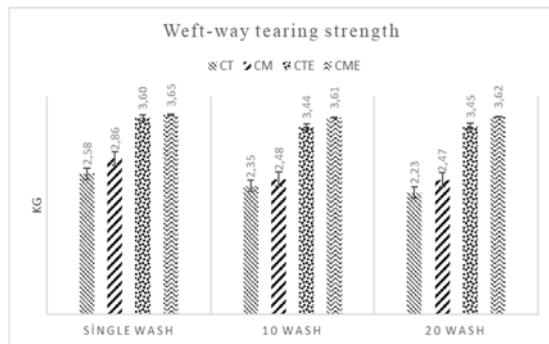


Figure 4. Weft-way tearing strength values

The values of the four denim fabrics differ because the weft threads are different. Because CTE and CME fabrics contain lycra, their strength is more substantial. There is also evidence of a decrease in tearing strength because of washing. To determine the effect of weft types on the tearing strength, analysis of variance (Table 3) was done according to $\alpha=0.05$ significance level; the difference in tearing strength between weft types was examined with Tukey HSD multiple methods tabulated in Table 4 and found that the difference in weft types became significant when tearing strength values except for TS-WA_SW: CT/CTE ($p = 0.362$) and TS-WE_SW: CTE / CME ($p = 0.450$).

3.4. Stiffness

Fabric stiffness can affect the hand feel, draping effect, and comfort sensation while wearing. A fabric's stiffness is unique: the natural inclination to remain upright without any support. Therefore, it is crucial to understand the fabric's handle and drape properties. Laundry cycles progressively make the yarn more flexible, resulting in a decrease in stiffness in the materials. The CTE and CME fabrics have a high stiffness value because the elastanecored yarn caused the fabric to be more compact and rigid. The results are presented in the Figure 5.

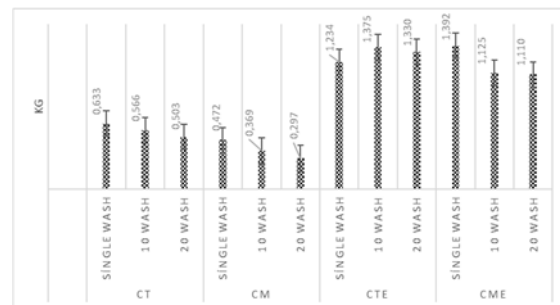


Figure 5. Stiffness values

To determine the effect of weft types on the fabric stiffness, analysis of variance was done (Table 3) according to $\alpha=0.05$ significance level; the difference between weft types was examined with Tukey HSD method tabulated in Table 4 and discovered that the difference between the weft types became meaningful on the stiffness values due to repeated washing.

Table 3. Effect of weft types on different tests for repeated washing (ANOVA results)

Test	Dependent variable	F	Sig.
Air permeability (AP)	AP SW	513.104	0.000
	AP 10W	535.504	0.000
	AP 20W	198.477	0.000
Moisture loss percentage (MLP)	MLP 1H	6.265	0.004
	MLP 2H	6.397	0.003
	MLP 3H	6.538	0.003
	MLP 4H	7.163	0.002
Tearing strength (TS)	TS-WA SW	999.213	0.000
	TS-WE SW	137.794	0.000
	TS-WA 10W	353.998	0.000
	TS-WE 10W	208.211	0.000
	TS-WA 20SW	489.349	0.000
	TS-WE 20W	134.145	0.000
Stiffness (ST)	ST SW	286.199	0.000
	ST 10W	222.127	0.000
	ST 20W	267.134	0.000

SW: single wash, 10W: 10 washes; 20W: 20 washes, WA: Warp, and WE: Weft

Table 4. The results (p values) of multiple comparisons for each test according to weft types

Tests	CT:CM	CT:CTE	CT:CME	CM:CTE	CM:CME	CTE:CME
AP SW	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
AP 10W	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
AP 20W	0.118	0.000	0.000	0.000	0.000	0.215
MLP 1H	0.000	0.096	0.07	0.019	0.027	0.867
MLP 2H	0.009	0.299	0.075	0.001	0.326	0.008
MLP 3H	0.009	0.309	0.055	0.001	0.404	0.006
MLP 4H	0.005	0.400	0.033	0.001	0.390	0.005
TS-WA SW	0.000	0.362	0.000	0.000	0.000	0.000
TS-WE SW	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.450
TS-WA 10W	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TS-WE 10W	0.041	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016
TS-WA 20SW	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.009
TS-WE 20W	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.052
ST SW	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
ST 10W	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ST 20W	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

* The mean difference is significant at the 0.05 level

3.5. Color Measurement

Under the illuminant D65, the color of the fabric samples was measured. The instrument was calibrated initially, and then spectral reflectance values were collected at 10 nm intervals from 400 nm to 700 nm in the visible spectrum. All the color measurements and visual evaluations were

conducted in the same direction. The single, 10, and 20 washed samples' CIELab coordinates (L*, a*, b*, c*, and h), K/S values, and color difference values were measured and compared in Tables 5 and 6. The color yield (K/S) was measured at a wavelength of 560 nm. Because the values of L* are negative, all the fabric samples have become darker. Furthermore, the fabric samples got more reddish

after washing since the a^* values were generally positive.

The negative b^* values show that the samples became increasingly blueish because of continuous washing. The K/S values of elastic-containing fabrics are greater than those of elastic-less fabrics. Color changes were determined compared to single

wash samples, and assessments were done. Any international standard does not define the entire color difference. The manufacturer's quality standards and customer criteria establish this value. The absolute color difference tolerance was believed to be 1.0 in this experiment. As a result, All samples received a fail remark since ΔE is more prominent than 1 (Table 6).

Table 5. Measured CIELab values of denim fabrics

Sample	Process	Color values					
		L*	C	a*	b*	h	K/S
CT	SW	28.7	2.84	0.14	-2.83	272.9	7.96
	10W	21.72	4.92	0.24	-4.91	272.79	14.08
	20W	22.82	5.28	0.07	-5.28	270.73	12.87
CM	SW	26.01	6.2	-0.05	-6.2	269.5	10.11
	10W	21.82	7.09	0.06	-7.09	270.49	14.4
	20W	21.85	7.71	0.06	-7.71	270.43	14.4
CTE	SW	27.61	2.97	0.43	-2.94	278.27	8.66
	10W	19.17	4.71	0.85	-4.64	280.43	17.74
	20W	17.3	5.16	1.02	-5.05	281.38	21.14
CME	SW	24.82	6.25	0.24	-6.24	272.23	11.19
	10W	18.31	6.19	0.71	-6.15	276.63	19.67
	20W	17.56	7.11	0.52	-7.09	274.2	21.33

Table 6. The color difference between SW and 10W & 20W samples

Sample	Process	Color differences						Assessment
		ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	Δh^*	ΔE	
CT	10W	-6.973	0.095	-2.075	2.077	0.007	7.28	Fail (darker, reddish, bluer, brighter)
	20W	-5.877	-0.076	-2.447	2.444	0.146	6.37	Fail (darker, greener, bluer, brighter)
CM	10W	-4.195	0.115	-0.883	0.883	0.115	4.29	Fail (darker, reddish, bluer, brighter)
	20W	-4.163	0.112	-1.51	1.51	0.113	4.43	Fail (darker, reddish, bluer, brighter)
CTE	10W	-8.442	0.425	-1.691	1.738	0.141	8.62	Fail (darker, reddish, bluer, brighter)
	20W	-10.308	0.589	-2.11	2.181	0.213	10.54	Fail (darker, reddish, bluer, brighter)
CME	10W	-6.51	0.471	0.095	-0.059	0.477	6.53	Fail (darker, reddish, yellower, duller)
	20W	-7.258	0.277	-0.847	0.861	0.229	7.31	Fail (darker, reddish, bluer, brighter)

ΔL^* = Difference in lightness or darkness value, Δa^* = Difference in red/green axis, Δb^* =Differences in yellow / blue axis, ΔC^* = Difference in chroma, Δh^* = Difference in hue, ΔE = Color difference value

4. CONCLUSION

The present research focuses on the comparative performances of denim fabrics with the same cotton warp and different weft yarns, typically cotton, coolmax with or without elastane yarn. Frequent washing causes the fabric structure to relax, increasing its compactness. Thus it has a detrimental impact on the air permeability values. There is also evidence of tearing strength being reduced because of washing. Laundry cycles gradually make the yarn more flexible, resulting in a reduction in fabric stiffness. The moisture loss percentage data had a substantial influence when viewed with time. However, the differences in weft types between groups had no noticeable effect on the moisture loss percentage data. The tearing strength dropped marginally as the washes increased from one to ten and twenty. All the fabric samples were found darker, reddish, and blueish due to repeated washing.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors thanks to Serdal Sırlıbaş from Bossa T.A.Ş (Adana/Turkey) for his support in the fabric production, and washing processes.

6. REFERENCES

1. Yu, Y., Yuan, J., Wang, Q., Fan, X., Ni, X., Wang, P., Cui, L., 2013. Cellulase Immobilization onto the Reversibly Soluble Methacrylate Copolymer for Denim Washing. *Carbohydrate Polymers*, 95(2), 675-80.
2. Ak, C., Bansal, S., 2018. Influences of Elastane Content, Aesthetic Finishes and Fabric Weight on Mechanical and Comfort Properties of Denim Fabrics. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology* 4(1), 36-42.
3. Zhao, W.B., 2008. Common Denim Washing Technologies. *Dyeing Finish*, 34(7), 34-36.
4. Zheng, Z.Q. 2009. A Research on Washing Art Effect of Cowboy Lining Shangdong Text. *Econ*, 4, 111-112.
5. Kan, C. W., Yam, L.Y., Ng, S.P., 2013. The Effect of Stretching on Ultraviolet Protection of Cotton and Cotton/Coolmax-Blended Weft Knitted Fabric in a Dry State. *Materials*, 6(11), 4985-99.
6. Ertekin, G., 2017. Analysis of Thermo-Physiological Comfort and Moisture Management Properties of Flat Knitted Spacer Fabrics. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 27(3), 241-250.
7. Onofrei, E., Rocha, A.M., Catarino, A., 2012. Investigating the Effect of Moisture on the Thermal Comfort Properties of Functional Elastic Fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 42(1), 34-51.
8. Li, D., Ni, M., 2009. Moisture Properties of Coolmax Fiber Blended with Regenerated Cellulose Fibers. 2009 2nd International Conference on Information and Computing Science, ICIC 2009, 2, 129-131.
9. Kan, C.W., Yam, L.Y., Ng, S.P., 2014. Effect of Stretching on Ultraviolet Protection of Cotton and Cotton/Coolmax Blended Weft Knitted Fabric in a Wet State. *Materials*, 7(1), 58-74.
10. Yang, Y., Yu, X., Wang, X., Sun, Y., Zhang, P., Liu X., 2020. Effect of Jade Nanoparticle Content and Twist of Cool-Touch Polyester Filaments on Comfort Performance of Knitted Fabrics. *Textile Research Journal*, 90(21-22), 2385-2398.
11. Su, C.I., Maa, M.C., Yang, H.Y., 2004. Structure and Performance of Elastic Core-Spun Yarn. *Textile Research Journal*, 74(7), 607-610.
12. Özdil, N., 2008. Stretch and Bagging Properties of Denim Fabrics Containing Different Rates of Elastane. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 16(1), 63-67.
13. Kan, C.W., Yuen, C.W.M.. 2009. Evaluation of the Performance of Stretch Denim Fabric under the Effect of Repeated Home Laundering Processes. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 2(2-3), 71-79.
14. Rego, J.M., Verdu, P., Nieto, J., Blanes, M., 2010. Comfort Analysis of Woven Cotton/Polyester Fabrics Modified with a New Elastic Fiber, Part 2: Detailed Study of Mechanical, Thermo-Physiological and Skin Sensorial Properties. *Textile Research Journal* 80(3), 206-215.
15. Midha, V., Kumar, S.S., Kumar, M.N., 2017. Investigation on Permeability and Moisture

- Management Properties of Different Denim Fabrics after Repeated Laundering. *Journal of the Textile Institute*, 108(1), 71-77.
- 16.** Onal, L., Yildirim, M., 2012. Comfort Properties of Functional Three-Dimensional Knitted Spacer Fabrics for Home-Textile Applications. *Textile Research Journal*, 82(17), 1751-1764.

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi mühendislik bilimlerindeki güncel bilimsel ve teknik gelişmeleri araştırmacılara ve mühendislere ulaştırmayı hedeflemektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi daha önce başka hiçbir yerde yayımlanmamış, özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları içeren makale ve kısa bildirimleri ile Dergi'de daha önce yayımlanmış makalelerle ilgili tartışmaları kabul etmektedir. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. Makaleler Türkçe veya İngilizce olabilir. Dergi'ye gönderilen yazılar yayınlansın veya yayınlansın iade edilmez. Makaleleri yayınlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildirimler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. **Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract** (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar**,

Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler, Text, Notations** (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

Başlık kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtılabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

Makale ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. makalenin tam başlığı. derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

Kitap ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. kitabın tam adı. cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, son sayfa no.

Bildiri ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. bildirim tam başlığı. konferansın adı, yapıldığı yer.

Elektronik ortamdan alınmış ise: Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanmış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl, bildirim adı. konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir."

Tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., yıl. tezin adı. derecesi, sunulduğu kurum, son sayfa no.

Rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl. raporun adı. türü, numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer.

Web Sitesi ise: Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayımlandığı yıl. yazım başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Kurum/Kuruluşlara ait ise: Kurum adı, varsa yayımlandığı yıl. yazım başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Elektronik kitap/rapor ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, varsa yayımlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.