



Thermodynamic analysis of the coal-fired power plants under various load conditions

Burhanettin Çetin* , Erman Özen 

Department of Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, 34349, Turkey

Highlights:

- Energy and exergy efficiencies of the thermal power plant
- The effects of steam parameters on the performance
- The maximum exergy loss occurs in the thermal power plant

Keywords:

- Energy efficiency
- Exergy efficiency
- Thermodynamic analysis
- Load condition

Article Info:

Research Article
Received: 30.11.2018
Accepted: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.490516

Correspondence:

Author: Burhanettin Çetin
e-mail: cetin@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 2784

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the thermodynamic analysis of the sub-critical and super-critical coal-fired power plants under various load conditions have been investigated.

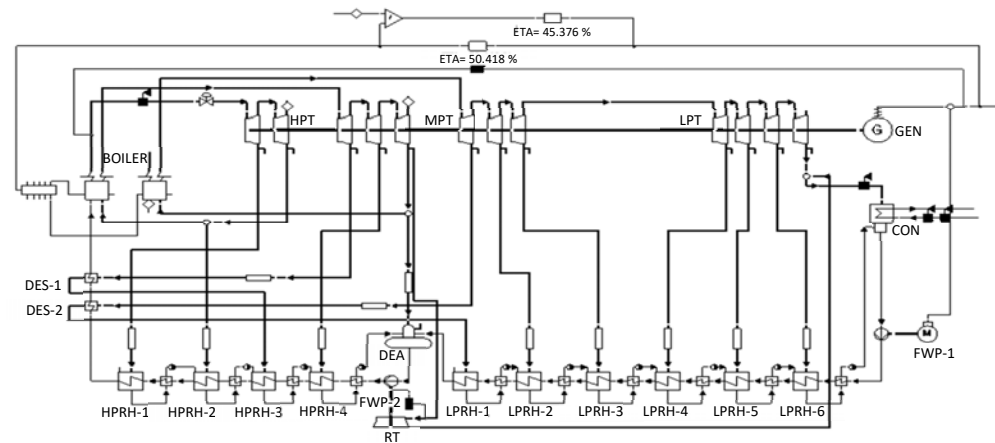


Figure A. Schematic diagram of the optimized coal-fired power plant

Purpose: The aim of this study is to show the effect of live steam parameters on thermal and exergy efficiencies of thermal power plants under various load condition.

Theory and Methods:

Soma Power Plant was taken as a Base Case for this study. Steam parameters were increased from sub-critical level to super-critical level to investigate the effects of the steam parameters on the thermal and exergy efficiencies. Second reheat section, four regenerative heaters, two desuperheaters and regenerative turbine were added to optimize the power plant. Furthermore, the effects of the load condition on the plant's energy and exergy efficiencies are investigated by operating power plants under 50%, 75% and 100% load conditions.

Results:

It has been found that live steam parameters have a huge impact at the efficiencies under various load conditions.

Conclusion:

It is concluded that live steam parameters and load conditions are the most critical parameters to determine the power plants efficiencies. On the other hand, this study only includes performance analysis of the power plant. Thermoeconomic analysis of this study has to be investigated to achieve meaningful results.



Farklı yük şartlarında kömür yakıtlı termik güç santrallerinin termodinamik analizi

Burhanettin Çetin*^{ID}, Erman Özen^{ID}

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34349, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Termik santrallerde enerji ve ekserji analizi
- Buhar şartlarının performans üzerine etkisi
- Termik santrallerdeki maksimum ekserji bozunumu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.11.2018

Kabul: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.490516

Anahtar Kelimeler:

Enerji verimi,
ekserji verimi,
termodinamik analiz,
yükleme şartları

ÖZET

Bu çalışmada, beş farklı termik güç santrali için buhar parametrelerinin (basınç, sıcaklık) farklı yük şartlarında santralin enerji ve ekserji verimine etkileri araştırılmıştır. Kritik-altı şartlarda çalışan tek ara kızdırmalı ve altı adet besleme suyu ön ısıtıcısına sahip olan Soma Termik Santrali referans santral olarak alınmıştır. Referans Santralin buhar basınç ve sıcaklığı sırasıyla 139,2 bar, 540°C ve ara kızdırma sıcaklığı 540°C'dir. Performans açısından en iyi sistem konfigürasyonu Uygulama 4 olarak bulunmuştur. Optimize edilmiş ultra-süperkritik termik güç santralinde (Uygulama 4) çift ara kızdırma kademesi, on adet besleme suyu ön ısıtıcısı, iki adet kızgınlık giderici ve bir adet de rejeneratif türbin bulunmaktadır. Uygulama 4'ün taze buhar şartları sırasıyla 300 bar, 600°C ve ara kızdırma sıcaklığı 620°C alınmıştır. Simülasyonlar Epsilon Professional Programı kullanılarak yapılmıştır ve bulunan analiz sonuçları Referans Santral ile karşılaştırılmıştır. Uygulama 4 ile Referans Santralin enerji ve ekserji verimleri karşılaştırıldığında, %100 yükleme şartları altında enerji verimi %9,24 ve ekserji verimi %8,06 artmıştır. Ayrıca, %100 yükleme şartları altında CO₂ emisyonunda yılda 3.384.916 ton azalma olacaktır. Bu çalışmanın sonucunda, farklı yüklemeler altında taze buhar şartlarının sistemlerin enerji ve ekserji verimleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gösterilmiştir.

Thermodynamic analysis of the coal-fired power plants under various load conditions

H I G H L I G H T S

- Energy and exergy efficiencies of the thermal power plant
- The effects of steam parameters on the performance
- The maximum exergy loss occurs in the thermal power plant

Article Info

Research Article

Received: 30.11.2018

Accepted: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.490516

Keywords:

Energy efficiency,
exergy efficiency,
thermodynamic analysis,
load condition

ABSTRACT

The aim of this study is to show the effect of live steam parameters on thermal and exergy efficiencies of thermal power plants under various load condition. Soma Thermal Power Plant (Base Case) is operated under sub-critical conditions has single reheat stage and six regenerative heaters. Live steam conditions of Base Case are 139,2 bar and 540°C, and the temperature of reheat steam is 540°C. Case 4 is found the best system configuration in terms of performance. Optimized ultra-supercritical thermal power plant (Case 4) consists of double reheat, ten regenerative heaters, two dehsuperheaters and a regenerative turbine. Live steam conditions of this system are taken as 300 bar, 600°C and its reheat steams are heated to 620°C. Simulations are carried out by the Epsilon Professional software. Finally, the results of analysis are compared to that of Base Case. Thermal efficiency and exergy efficiency of ultra-supercritical power plant (Case 4) are increased 9,24% and 8,06% under 100% load condition, respectively. Furthermore, CO₂ emission drops 3.384.916 tonnes/year under 100% load condition. The results of this study show that live steam parameters have a huge impact at efficiencies under various load conditions.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: cetin@yildiz.edu.tr, ermanytu@gmail.com / Tel: +90 212 383 2784

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji tüketimi, ülkelerin gelişmişlik seviyelerini gösteren en önemli göstergelerden biridir. Sanayileşme, teknolojik gelişmeler, nüfus artışı ve şehirleşmeden dolayı enerji tüketimi son yıllarda artmaktadır [1]. Enerji tüketiminin artmasıyla birlikte sera etkisi gibi önemli çevre problemleri meydana gelmektedir. Atmosferde bulunan sera gazı miktarı ile küresel ısınma arasında doğrudan ilişki bulunmaktadır. Bundan dolayı, ülkeler enerji üretim verimlerini arttırmalı ve enerji sektöründe yeniliklere açık olmalıdır [2]. Türkiye 2004 senesinde Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne taraf olmuş ve 2009 yılında Kyoto Protokolünü imzalamıştır. 2015 senesinde düzenlenen Taraflar Konferansı'nda ise, Türkiye 2021-2030 yılları arasında tahmini olağan emisyon senaryosunun %21'ine kadar sera gazı emisyonlarını azaltmayı öngördüğünü belirtmiştir [3].

Türkiye'de 2018 sene sonu itibarı ile termik güç santrallerinin toplam kurulu kapasitedeki oranı %52,3 olmasına rağmen [4], anlık elektrik üretimdeki oranı yaklaşık %57,96'dır. (%18,6 doğal gaz, %37,1 kömür, %2,26 diğer) [5]. Günümüzde, termik santrallerde üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %50'si ithal edilen yakıtlardan karşılanmaktadır. Bu sorunun en iyi çözümlerinden birisi yerli kaynakları verimli bir şekilde kullanmaktır. Kömür, (özellikle linyit) Türkiye'de genellikle elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye'deki linyit kaynakları 17,3 milyar tonu bulmaktadır ve bu linyitlerin ısı değeri oldukça düşüktür. Toplam linyit kaynaklarının %71'i 1500 kcal/kg'ın altında ısı değere, tüm linyit kaynaklarının %90'ı ise 3000 kcal/kg'ın altında bir ısı değere sahiptir. Ayrıca ülkemiz linyitlerinin yarısından fazlası %20'nin üzerinde nem içermektedir. Bu nedenle linyitler, büyük oranda termik santrallerde yakıt olarak kullanılmaktadır. Isıl değeri yüksek olan linyitler ise daha çok konutların ısıtılması ve sanayi için değerlendirilmektedir [3]. Türkiye birçok termik yakıtlı güç santrallerine sahip olmasına rağmen, bu santraller çok düşük enerji (termik) ve ekserji verimlerine sahiptir. Türkiye'deki termik santrallerinin taze buhar şartları 130 bar ve 550°C ve enerji verimleri ise %30-35 civarındadır [6, 7]. Bu sebepten dolayı, Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santrallerin enerji ve ekserji verimlerini arttırmak için yenilikçi çözümler uygulanmalıdır.

Ultra-süperkritik veya gelişmiş kömür yakıtlı güç teknolojileri günümüzde işleyen modern kömür yakıtlı termik santrallere göre birçok avantaja sahiptir. Örneğin; ultra-süperkritik termik santrallerin buhar şartları (yaklaşık 30 MPa ve 600°C mertebelerindedir) ve enerji verimleri (yaklaşık %43 ila %47 arasında) daha yüksektir. Ayrıca bu santraller büyük kapasitelerde daha da verimli hale gelir, çünkü birim güç (1 kW) başına olan özgül yatırım maliyetleri önemli ölçüde düşmektedir [8]. Sistemlere ikinci ara kızdırma basamağı eklenerek endotermik prosesin ortalama sıcaklığı artırılabilir ve ikinci ara kızdırma bölgesi sistemin veriminin %1 ila %2 arasında artmasını sağlar [9]. Bu

sistemlerde güncel kazan verimleri %93 ila %95 arasındadır ve buhar türbinlerinin izentropik verimleri ortalama %90'ın üzerine çıkmaktadır. Yeni tarihli bir çalışmaya göre; Çin'deki Shanghai Waigaoqiao ultra-süperkritik termik santrali enerji verimi %46,5'e ulaşmıştır [10]. Ultra-süperkritik termik santrallerin diğer önemli avantajı ise çevresel yararlarıdır. Birim güç başına daha düşük CO₂, NO_x, SO_x, ağır metal ve eser element emisyonuna sahiptir. Ultra-süperkritik termik santrallerde CO₂ emisyonu ve yakıt tüketimi en iyi ulaşılabilir teknoloji ile karşılaştırıldığında %15 düşer. Bu emisyon düşüşü sadece verimin artırılmasından değil ayrıca emisyon kaynaklarının merkezileştirilmesinden dolayı oluşur. Çünkü, tek bir üniteye emisyon kontrolü daha ileri seviyede ve kolayca yapılabilmektedir. Ultra-süperkritik kömür yakıtlı güç santralleri ayrıca kömür yakıtlı termik santraller için daha düşük yakıt maliyeti sunar. Giderek artan yakıt fiyatları güç üretiminin en önemli parametresi haline gelmiştir. Yakıt tüketimindeki azalış, güç üreticileri için birim güç başına üretilen elektrik fiyatının düşmesini sağlar. Fakat, günümüzde ultra-süperkritik termik santraller yüksek yatırım maliyeti, yüksek basınç ve sıcaklıkta çalışmasından dolayı güvenilirlikleri ve santral ekipmanları için gerekli olan gelişmiş malzeme ihtiyacından dolayı da bazı dezavantajlara sahiptir [8]. Literatürde, kömür yakıtlı termik santrallerinin enerji ve ekserji analizlerinin yapıldığı bir çok çalışma bulunmaktadır. Örnek olarak, Adibhatla S. ve Kaushik S.C. [11], 660 MWe gücündeki kömür yakıtlı süperkritik termik santralinin %100, %80 ve %60 yüklemelerde enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Xu G. vd. [9] 1000 MWe gücündeki çift ara kızdırmalı güç santrali kazanının kısmi olarak yer altında olması durumunda santral verimlerini incelemiştir. Çalışmalarında, bu tür kazan uygulamasının santral verimini arttırmasına rağmen, yatırım masraflarını da yükselttiğini göstermiştir. Espatolero S. vd. [12] kömür yakıtlı süper kritik termik santrallerdeki beslemeye suyu ısıtıcılarının tasarımının santral verimi üzerindeki etkilerini incelemiş ve optimum dizayn şartlarında santral veriminin %0,7 arttığını göstermiştir. Naterer G.F. vd. [13] kritik altı santrallerde ekserji performansını incelemiştir. Kaşka Ö. vd. [14] ekserji yıkımının termik santrallerde çoktan aza sıralanmasının; kazan, türbin, yoğunlaştırıcı ve pompa olarak belirlemiştir. Gonzalez-Salazar M.A. vd. [15] gaz yakıtlı ve kömür yakıtlı güç santrallerinin işletme esnekliği ve emisyon değerleri açısından karşılaştırmasını yapmıştır. Uysal C. vd. [16] Türkiye'de bulunan 160 MW gücündeki kömür yakıtlı bir termik santralin enerji ve ekserji verimlerini hesaplayarak termodinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Erdem H.H. vd. [1] Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santrallerin karşılaştırmalı enerji ve ekserji performans analizlerini yapmışlardır. Liu Y. vd. [17] 1000 MW gücündeki tek ara kızdırmalı ultra-süper kritik santralin performans analizini yapmışlar ve kazandan çıkan duman gazının santral verimini arttırmada etkili olduğunu göstermişlerdir.

Bu çalışmada, farklı yük şartlarında kömür yakıtlı güç santrallerinin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Bu

çalışmanın amacı, termodinamik olarak en verimli ve en az yakıt tüketimine sahip sistemi belirlemektir. Bu yüzden, beş farklı termik güç santrali konfigürasyonu %100, %75 ve %50 yükler altında analiz edilmiştir: (1) tek ara kızdırmalı, altı besleme suyu ön ısıtıcı kritik altı termik santral uygulaması (Soma Termik Santrali); (2) tek ara kızdırmalı, altı besleme suyu ön ısıtıcı süper kritik termik santral uygulaması (Uygulama 1) ; (3) çift ara kızdırmalı, yedi besleme suyu ön ısıtıcı ultra-süper kritik termik santral uygulaması (Uygulama 2); (4) çift ara kızdırmalı, on besleme suyu ön ısıtıcı ultra-süper kritik termik santral uygulaması (Uygulama 3); (5) çift ara kızdırmalı, on besleme suyu ön ısıtıcı ve rejeneratif türbinli (besleme suyu pompası türbini) ultra-süper kritik termik santral uygulaması (Uygulama 4). Sonuç olarak her bir konfigürasyondan elde edilen sonuçlar, referans alınan Soma Termik Santrali ile karşılaştırılmış ve termodinamik açıdan en yüksek enerji ve ekserji verimine sahip olan Uygulama 4 en iyi sistem olarak belirlenmiştir.

2. METOT (METHOD)

Termik santrallerin performansını değerlendirmek için genellikle sistemlerin, enerji ve ekserji verimleri ya da özgül ısı sarfiyatı değerlerine bakılır [18]. Kömür yakıtlı termik santrallerin enerji verimi (η_1), sistemden çıkan net gücün, sisteme verilen toplam enerjiye bölünmesiyle elde edilir. Özgül ısı sarfiyatı (q) ise Eş. 1'deki gibi tanımlanabilir;

$$q = (E_{\text{toplam}} \times 3600) / (P_{\text{top}}) = 3600 / \frac{P_{\text{top}}}{E_{\text{toplam}}} = 3600 / \eta_1 \quad (1)$$

E_{toplam} sisteme verilen toplam enerjiyi temsil eder. Teorik olarak, E_{toplam} kömürün kimyasal enerjisini, havanın enerjisini ve kazan besleme suyunun enerjisini içermektedir. Hesaplamayı basitleştirmek için, E_{toplam} değeri sadece kömürün kimyasal enerjisi olarak düşünülebilir ve bu kömürün alt ısı değerine eşittir. P_{top} net güç çıkışını gösterir. Yakıtın kimyasal ekserjisi, yakıtın bileşenlerine bağlı olarak değişir. Szargut ve Strylska; yakıt ekserjisinin yakıtın ısı değerine oranını ifade eden (φ) değerini geliştirmişlerdir. Yakıtın ekserji oranı (φ) [19]: (Eş. 2)

$$\varphi = Ex_0 / H_u \quad (2)$$

Burada Ex_0 ve H_u sırasıyla yakıtın ekserjisini ve yakıtın alt ısı değerini temsil eder. “ φ ” değeri Eş. 3'deki gibi hesaplanabilir [19]:

$$\varphi = 1,0437 + 0,1882(h/c) + 0,0610(o/c) + 0,0404(n/c) \quad (3)$$

Formül içerisinde bulunan c, h, o ve n sembolleri sırasıyla; kömür içerisindeki karbon, hidrojen, oksijen ve nitrojenin yüzdeleri temsil eder. Katı yakıtların ekserjisi ($Ex_{0,\text{katı}}$) Eş. 4, Eş. 5'deki gibi tanımlanır [19]:

$$Ex_{0,\text{katı}} = \varphi(H_u + w \cdot h_{fg}) \quad (4)$$

$$Ex_g = Ex_{0,\text{katı}} \times m_{\text{kömür}} \quad (5)$$

Termik güç santralinin ekserji verimi (η_{II}): (Eş. 6)

$$\eta_{II} = P_{\text{top}} / Ex_g \quad (6)$$

Buradaki w, h_{fg} , $m_{\text{kömür}}$ ve Ex_g sembolleri sırasıyla yakıt içerisindeki nem oranını, çevre sıcaklığındaki suyun buharlaşma entalpisini, yakıtın kütleli debisini ve katı yakıt tarafından sisteme verilen toplam ekserji miktarını temsil eder. Tablo 1, bu çalışmada kullanılan kömürün element analizini göstermektedir. Kömürün alt ısı değeri bu çalışmada 8350 kJ/kg alınmıştır [20].

Tablo 1. Kömürün element analizi (Elemental analysis of coal)

Tanımlama	Sembol	Değer
Karbon (%)	c	42,75
Hidrojen (%)	h	1,60
Azot (%)	n	0,50
Oksijen (%)	o	22,45
Kül (%)	-	45,00
Nem (%)	w	20,00

Termik santrallerde yakıt tüketimi, santrallerin sera gazı emisyonunu (CO_2) belirlemek amacıyla kullanılacak en önemli göstergelerden bir tanesidir. Santrallerin yıllık olarak yakılan karbon miktarı değişimi (ΔB_y) Eş. 7'deki gibi hesaplanabilir;

$$\Delta B_y = L_f \times H \times \Delta b_y \times \frac{3600}{1000} \text{ ton/yıl} \quad (7)$$

Denklemdaki b_y , L_f ve H sırasıyla yakıt tüketimini (kg/s), santralin yük faktörünü ve santralin yıllık çalışma saatini temsil etmektedir. Yıllık olarak yakılan karbon miktarındaki değişim ($\Delta B_{y,c}$) ise;

$$\Delta B_{y,c} = \Delta B_y \times c \text{ ton/yıl} \quad (8)$$

Eş. 8'deki formül kullanılarak bulunabilir. Buradaki “c” simgesi, kömür içerisindeki karbon yüzdesini göstermektedir. Yıllık tüketilen karbon miktarı bilirse, aşağıdaki denklem kullanılarak yıllık CO_2 emisyonu miktarı bulunabilir; (Eş. 9)



1 kg karbon tam yandığı zaman, 3,66 kg CO_2 gazı açığa çıkar. Tablo 4, farklı yüklemeler altında ve farklı yıllık çalışma saatlerinde, sistemlerin ürettiği yıllık CO_2 miktarlarını gösterir.

3. SİSTEMLERİN TANIMI (SYSTEMS DESCRIPTION)

3.1. Referans Uygulama: Soma Termik Santrali (Base Case: Soma Power Plant)

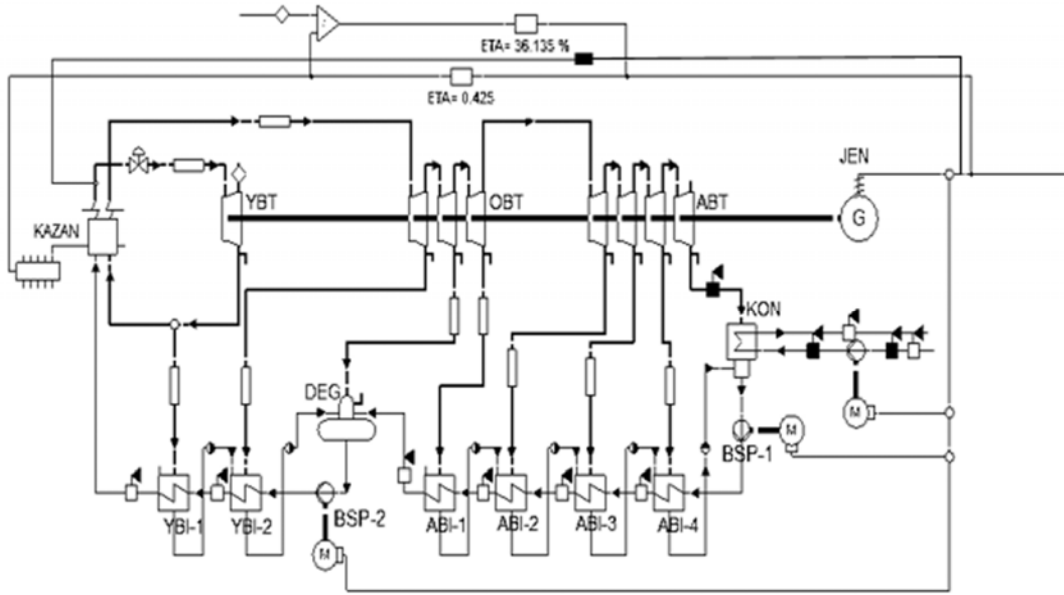
Soma Termik Santrali kritik-altı şartlarda çalışmaktadır ve bu çalışmada referans santral olarak ele alınmıştır. Şekil 1'de sistemin basitleştirilmiş akış şeması gösterilmiştir. Sistemin

net güç çıktısı 165 MW'tır. Sistem; tek ara kızdırma, 2 adet yüksek basınç ısıtıcı (YBI), 4 adet alçak basınç ısıtıcı (ABI) ve bir adet degazöre (DEG) sahiptir. Sistemin taze buhar basınç ve sıcaklığı 139,26 bar ve 540°C'dir. Ara kızdırma basıncı ve sıcaklığı 31,88 bar ve 540°C'dir. Alçak basınç türbini (ABT) egzoz çıkış basıncı ise 7,50 kPa seçilmiştir. Yüksek basınç türbininden (YBT) çıkan buharın bir kısmı yüksek basınç ısıtıcı-1'e (YBI-1), geri kalan kısmı ise ara kızdırma için tekrar kazana gönderilir. Yüksek basınç ısıtıcı-2 (YBI-2), degazör (DEG) ve alçak basınç ısıtıcı-1 (ABI-1) için orta basınç türbininden (OBT), ABI-2, ABI-3 ve ABI-4 için ise alçak basınç türbininden (ABT) ara buhar çekilerek kazan besleme suyunun ön ısıtması yapılmaktadır. Alçak basınç türbininden çıkan buhar kondensere (KON) dökülür. Ayrıca sistemde 2 adet besleme suyu pompası (BSP) bulunmaktadır.

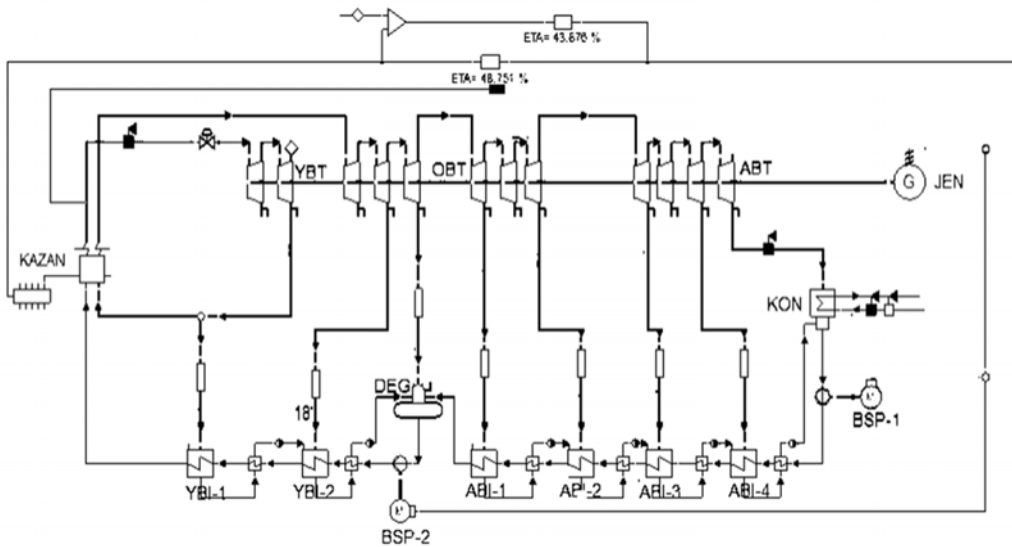
3.2. Uygulama 1: Tek Ara Kızdırmalı Altı Ara Buhar Almalı Süperkritik Termik Santrali (Case 1: Single Reheat System with Six-Stage Extraction Steam)

Bu uygulamada, taze buhar şartları kritik-altı değerlerden kritik-üstü değerlere çıkartılmıştır. Taze buhar basıncı ve sıcaklığı 262,5 bar ve 600°C alınmış olup, santralin net güç çıktısı 1000 MW'tır. Ara kızdırma buhar sıcaklığı 610°C ve basıncı ise taze buhar basıncının %30'u olan 78,60 bar olarak alınmıştır. Ayrıca santraldeki kondenser basıncı 5,75 kPa'a düşürülmüştür. Sistemin basitleştirilmiş akış şeması Şekil 2'de gösterilmiştir.

YBT'nin egzozundan çıkan buharın bir kısmı ara kızdırma için kazana, kalan kısmı ise YBI-1'e gönderilir. Kazanda 610°C'ye kızdırılan buhar güç üretimi için OBT'ne girer.



Şekil 1. Soma Termik Santralinin basitleştirilmiş akış diyagramı (The simplified flow diagram of Soma Power Plant)



Şekil 2. Uygulama 1'in basitleştirilmiş akış diyagramı (The simplified flow diagram of Case 1)

YBI-2, DEG, ABI-1 ve ABI-2 için ara buharlar OBT türbininden, ABI-3 ve ABI-4 için ise ABT'nden çekilmektedir.

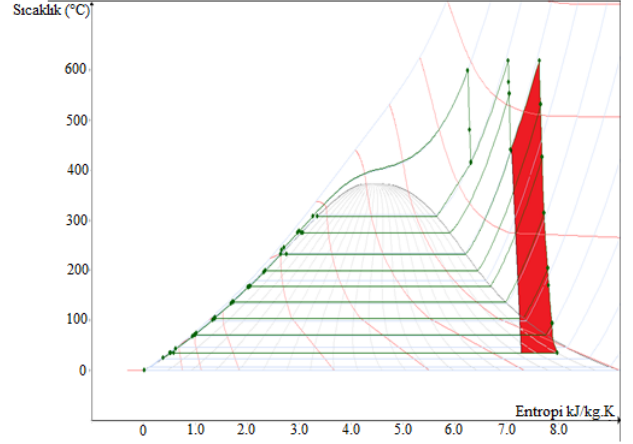
3.3. Uygulama 2: Çift Ara Kızdırmalı Yedi Ara Buhar Almalı Ultra-Süperkritik Termik Santrali (Case 2: Double Reheat System with Seven-Stage Extraction Steam)

Bu sistem oluşturulurken, buhar şartları ultra-süper kritik buhar şartlarına çıkarılmış ve sisteme bir tane daha ara kızdırma eklenmiştir. Ara kızdırmanın eklenmesiyle prosesin endotermik sıcaklığı yükseltilmiş ve santralin enerji veriminin artırılması hedeflenmiştir. Ayrıca sisteme bir adet ABI eklenerek kazan besleme suyunun besleme suyu ısıtıcılarında daha verimli bir şekilde ısıtılması amaçlanmıştır. Kazandan 600°C ve 300 barda çıkan buhar yüksek basınç türbininde genişler. YBT'nden çıkan buharın bir kısmı YBI-1'e, geri kalan kısmı ise ve birinci ara kızdırma için kazana gönderilir. Buhar kazanda 620°C'ye kadar tekrar ısıtılarak OBT-1'e girer. OBT-1'in orta kademelerinden YBI-2 için ara buhar çekilmektedir. OBT-1'in egzoz çıkışındaki buharın bir kısmı degazöre ve kalan kısmı da ikinci ara kızdırma için kazana gönderilir. Kazanda tekrar 620°C'ye kadar ısıtılan buhar, OBT-2'ye gönderilir. Daha sonra buhar OBT-2 ve ABT'nde 5,75 kPa basıncı genişleyerek kondensere dökülür. ABI'ları, OBT-2 ve ABT kademelerine yerleştirilmiştir. Sistemin T-s diyagramı Şekil 3'te ve sistemin basitleştirilmiş akış şeması da Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 3'te gösterilen kırmızı ile boyanmış alan sisteme ikinci ara kızdırma bölgesi eklenmesiyle birlikte sistemden alınan iş çıktısının Uygulama 1'e göre artışı göstermektedir.

3.4. Uygulama 3: Çift Ara Kızdırmalı On Ara Buhar Almalı Ultra-Süperkritik Termik Santrali (Case 3: Double reheat system with ten-stage extraction steam)

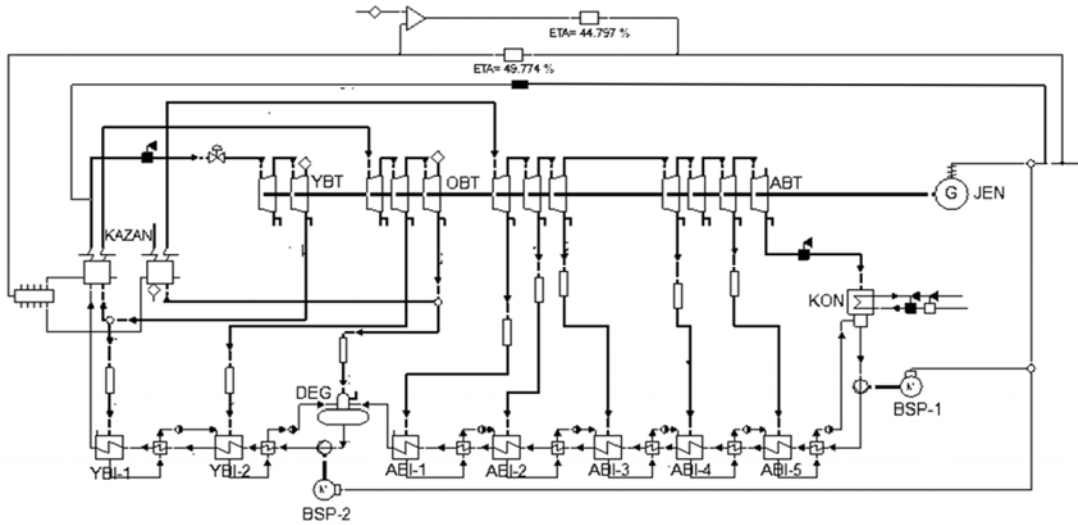
Termik santrallerin verimleri, aynı şartlardaki Carnot verimi referans alınarak iyileştirmeye çalışılmaktadır. Sistemlere

sonsuz sayıda besleme suyu ön ısıtıcısı eklemek, sistemi Carnot verimine yaklaştırır ve bu şekilde yakıt tüketimi azaltılır. Bu sistem oluşturulurken bir önceki sistemden farklı olarak ilave iki adet YBI ve bir adet ABI eklenmiş ve kazana giren besleme suyu sıcaklığının artırılması hedeflenmiştir. Taze buhar ve ara kızdırma şartları ise Uygulama 2'deki ile aynı alınmıştır.



Şekil 3. Uygulama 2'nin T-s diyagramı (T-s diagram of Case 2)

Kazandan 600°C ve 300 barda çıkan buhar YBT'ne gelir. Buharın bir kısmı YBI-1 için çekilir ve geri kalan buhar genişlemeye devam eder. YBT çıkışından alınan buharın bir kısmı YBI-2'e, geri kalan kısmı ise 1. ara kızdırma için kazana gönderilir. Kazanda 620°C'ye kadar ısıtılan buhar OBT-1'e girer. Burada genişleyen buhardan YBI-3 ve YBI-4 için ara buharlar çekilir. OBT-1 çıkışındaki buharın bir kısmı degazöre ve kalan kısmı da 2. ara kızdırma için kazana gönderilir. Kazanda tekrardan 620°C'ye kadar ısıtılan buhar, OBT-2'ye gelir. Buhar OBT-2 ve ABT kademelerinde genişleyerek kondensere akar. Şekil 5'de Uygulama 3'ün basitleştirilmiş akış şeması verilmiştir.

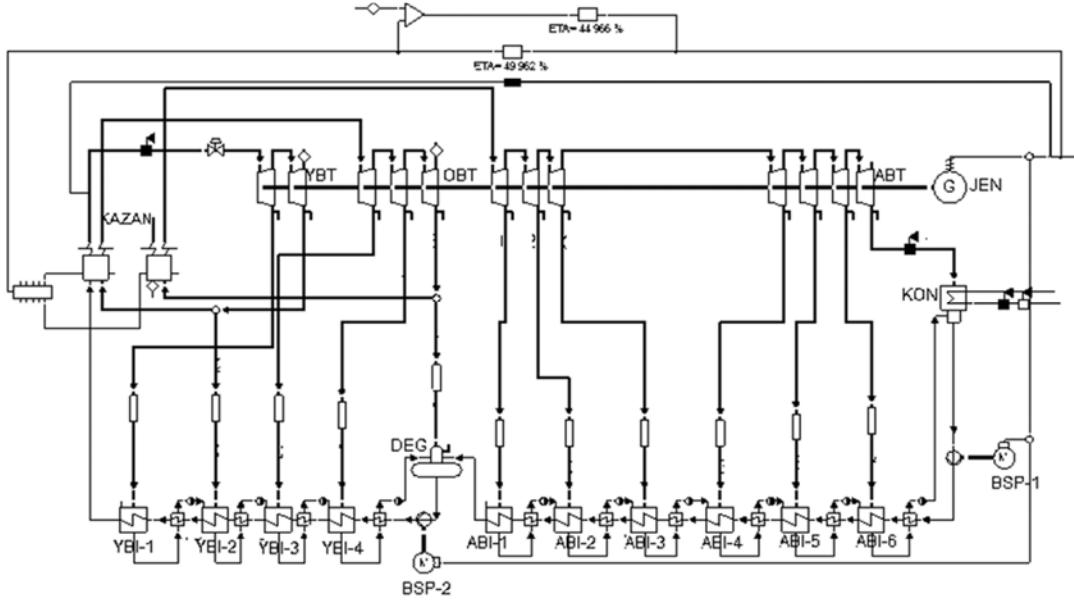


Şekil 4. Uygulama 2'nin basitleştirilmiş akış diyagramı (The simplified flow diagram of Case 2)

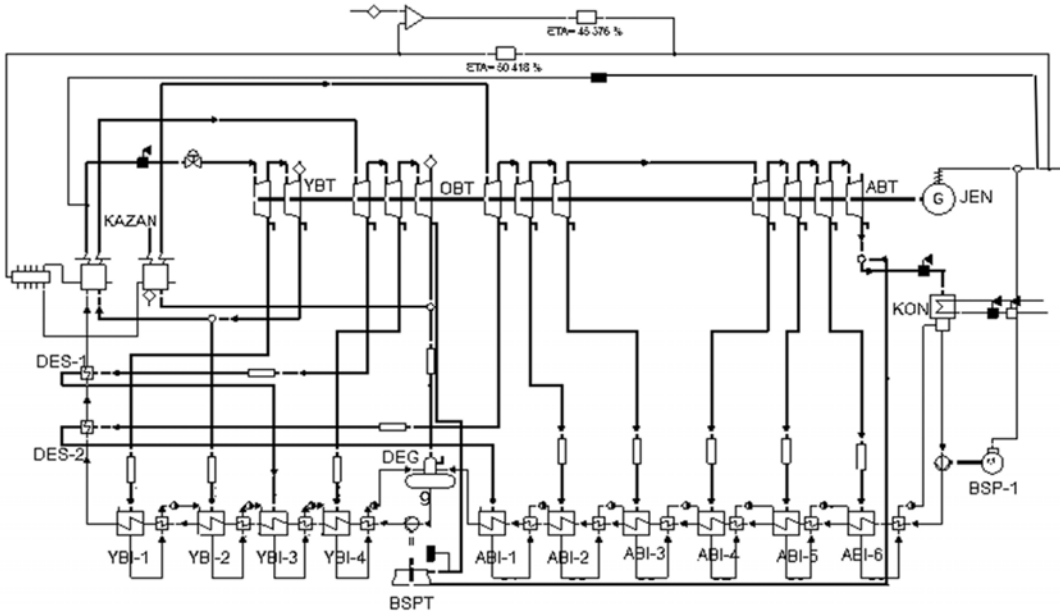
3.5. Uygulama 4: Çift Ara Kızdırmalı On Buhar Çekiş ve Regeneratif Türbinli Ultra-Süperkritik Termik Santrali
(Case 4: Double reheat system with regenerative turbine and two desuperheaters)

Bu sistem oluşturulurken, besleme suyu pompasının (BSP) yüksek enerji harcaması ve birinci ve ikinci ara kızdırma bölgesinden sonra çekilen buhar sıcaklıklarının yüksek olmasından dolayı, BSP-2 için bir adet besleme suyu pompası türbini (BSPT) eklenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıkları değerlendirmek için YBI-3 ve ABI-1'den hemen önce 2 adet kızgınlık giderici (DES) kazan giriş borularına yerleştirilmiştir. Kazandan 600°C ve 300 barda çıkan buhar YBT'ne gelir ve YBI-1 için buhar çekildikten sonra, 1. Ara

kızdırma bölgesine kadar genişler. YBT'nin egzoz çıkışından buhar, 1. Ara kızdırma ve YBI-2 için çekilir. Kazanda 620°C'ye kadar ısıtılarak OBT-1'ne akar. OBT-1 orta kademelerinde YBI-3 ve YBI-4 için çekilen buhar, YBI-3'e gitmeden önce DES-1'den geçer. OBT-1 egzoz çıkışındaki buharın bir kısmı degazöre, bir kısmı besleme suyu pompası türbinine ve kalan kısmı ise 2. ara kızdırma için kazana tekrar gönderilir. Kazanda 620°C'ye kadar ısıtılan buhar OBT-2 ve ABT'ninden geçerek kondensere akar. Buhar ABI-1'e girmeden önce DES-2'ye girerek yüksek ısısının bir kısmını kazan besleme suyuna aktarır. Diğer alçak besleme suyu ısıtıcıları için de OBT ve ABT'nden ara buharlar çekilir. Uygulama 4'ün basitleştirilmiş akış şeması Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. Uygulama 3'ün basitleştirilmiş akış diyagramı (The simplified flow diagram of Case 3)



Şekil 6. Uygulama 4'ün basitleştirilmiş akış şeması (The simplified flow diagram of Case 4)

3.6. Sistemlerin Analizi (Analysis of systems)

Bu çalışmada, sistemlerin enerji ve ekserji hesaplamaları için Ebsilon Professional Software kullanılmıştır [18]. Yapılan analizlerin gerçek şartlara en iyi şekilde uyuşması için aşağıdaki varsayımlar kullanılmıştır.

- Sistemlerin kararlı koşullar altında çalıştığı düşünülmüştür;
- Kritik-altı şartlarına sahip sistem için türbinlerin izentropik verimi ve kazan verimi %85 alınmıştır;
- Süperkritik ve ultra-süperkritik sistemler için yüksek basınç (YB), orta basınç (OB) ve alçak basınç (AB) türbin izentropik verimleri ve kazan verimi sırasıyla %88, %91, %87 ve %90 alınmıştır [22];
- Bütün sistemlerin jeneratör ve pompa verimleri sırasıyla %98 ve %80 alınmıştır;
- Kazan besleme suyu ön ısıtması için besleme suyu ısıtıcılarına çekilen buharın basınç kaybı %2 alınmıştır [12];
- Süperkritik ve ultra-süperkritik sistemler için besleme suyu ısıtıcılarındaki sıcaklık artışı, hem alçak basınç ve hem de yüksek basınç ısıtıcılarında eşit alınmıştır [22];
- Ara kızdırma basamaklarındaki basınç düşüşü %10 alınmıştır [23];
- Optimum verim şartlarını sağlamak için 1. ara kızdırma basıncı taze buhar basıncının %30'u, 2. Ara kızdırma

basıncı ise 1. ara kızdırma basıncının %30'u alınmıştır [24-26].

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Farklı yük şartlarında bütün sistemlerin enerji analizleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 3 ise sistemlerin ekserji analizinin sonuçlarını göstermektedir.

Sistemlerin enerji verimleri değerlendirildiğinde, santralin buhar parametrelerini kritik-altı değerlerinden, kritik-üstü değerlerine çıkartmak santralin enerji verimini %100 yükleme altında %21,41, %50 yükleme altında %17,4 arttırmıştır. Buna paralel olarak, sistemin ekserji verimi %100 yükleme altında %21,45, %50 yükleme altında ise %17,41 artmıştır. Bu verim artışlarında, kondenser basıncının 7,50 kPa'dan 5,75 kPa'a düşürülmesinin de etkisi vardır. Ayrıca kazan besleme suyu giriş sıcaklığı, referans santralde 235°C iken, uygulama 1'de kazan besleme suyu sıcaklığı 299,05°C'ye çıkarılmıştır.

Sisteme 2. Ara kızdırma bölgesinin, bir adet ABI'sının eklenmesi ve buhar parametrelerinin ultra-süperkritik değerlere çıkarılmasıyla Uygulama 2 oluşturulmuş ve sistemin enerji ve ekserji verimi sırasıyla Uygulama 1'e göre %100 yükleme altında %0,921 ve %0,803, %50 yükleme altında ise %1,17 ve %1.02 artmıştır.

Tablo 2. Farklı yük şartlarında bütün sistemlerin enerji analiz sonuçları (Energy analysis results of all Cases under various load condition)

Performans ölçütü	Referans			Uygulama 1			Uygulama 2			Uygulama 3			Uygulama 4		
	%100	%75	%50	%100	75%	50%	100%	75%	50%	100%	75%	50%	100%	75%	50%
Yükleme Şartı															
Taze buhar debisi (kg/s)	136	99,4	65,86	792	586	388	696	513	338	729	533	349	741	556	362
Taze buhar basıncı (Bar)	139,3	104	69,26	263	195	129	300	221	147	300	220	145	300	216	142
Taze buhar sıcaklığı (°C)	540	536	528	600	578	554	600	575	547	600	574	547	600	573	545
1.Ara kızdırma Basıncı (Bar)	31,38	23,4	15,79	78,6	59,5	40,5	90	67,9	46	90	68	46,1	90	75	50,7
1.Ara kızdırma sıcaklığı (°C)	540	540	540	610	610	610	620	620	620	620	620	620	620	620	620
2.Ara kızdırma basıncı (Bar)	-	-	-	-	-	-	27	20,5	14,1	27	20,6	14,1	27	21,8	14,8
2.Ara kızdırma Sıcaklığı (°C)	-	-	-	-	-	-	620	620	620	620	620	620	620	620	620
Güç çıkışı (MW)	165	124	83	1000	750	500	1000	750	500	1000	750	500	1000	750	500
Besleme suyu sıcaklığı (°C)	235	223	204,7	299	283	261	309	291	267	329	309	283	338	323	297
Enerji verimi (%)	36,14	36,1	35,16	43,9	42,9	41,3	44,8	43,9	42,5	45	44	42,5	45,4	44,3	42,8
Özgül ısı sarfıyatı (kJ/kWh)	9963	9978	10238	8205	8394	8720	8036	8198	8480	8006	8179	8474	7934	8127	8405

Tablo 3. Farklı yük şartlarında bütün sistemlerin ekserji analiz sonuçları
(Exergy analysis results of all Cases under various load condition)

Performans ölçütü	Referans			Uygulama 1			Uygulama 2			Uygulama 3			Uygulama 4		
	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50
Yükleme Şartı	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50
Ekserji girdisi (MW)	523	393	269	2613	2005	1388	2559	1958	1350	2549	1953	1349	2526	1941	1338
Kömür tüketimi (kg/s)	54,7	41,1	28,1	273	209	145	267	204	141	266	204	140	262,9	202,8	139
Güç çıkışı (MW)	165	124	83	1000	750	500	1000	750	500	1000	750	500	1000	750	500
Ekserji verimi (%)	31,52	31,4	30,6	38,2	37,4	36,0	39,1	38,3	37	39,2	38,4	37,0	39,58	38,64	37,4
Ekserji bozunumu (MW)	358,4	269	186	1612	1254	888	1559	1207	850	1549	1203	849	1526	1191	838
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Kazan	91	92	93	92	92,6	93,1	92	92,8	93,2	91,9	92,5	93	91,9	92,3	92,9
Türbinler	5,19	5,12	4,92	4,80	4,65	4,41	4,59	4,44	4,21	4,71	4,55	4,30	4,75	4,58	4,34
Kondenser	1,93	1,50	1,09	1,16	0,94	0,69	1,15	0,92	0,68	1,15	0,92	0,68	1,15	0,92	0,68
Besleme suyu ısıtıcıları	1,16	0,93	0,82	1,78	1,58	1,34	1,94	1,66	1,52	1,94	1,74	1,51	1,87	1,96	1,64
Diğer parçalar	0,71	0,39	0,26	0,29	0,26	0,42	0,29	0,26	0,42	0,31	0,28	0,45	0,32	0,29	0,48
Toplam	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tablo 4. Farklı yüklemeler ve çalışma saatlerinde Uygulama 4 ile Referans uygulamasının CO₂ emisyonu karşılaştırılması
(CO₂ emission differences between Case 4 and Base case under various load condition and annual operation hour)

Yükleme Şartı (Lf) (%)	%100	%75	%50
Yakıt tüketimi farkı (Δb_y) kg/s	68,6	46,1	30,4
Çalışma saati (H) h/yr	8760	6000	8760
Yıllık yakıt tüketimi farkı (ΔB_y) t/yıl	2163370	1481760	1453810
Yıllık yakılan karbon farkı (ΔB_{yc}) t/yıl	924841	633452	621504
Yıllık CO ₂ emisyonundaki azalma t/yıl	3384916	2318436	2274703

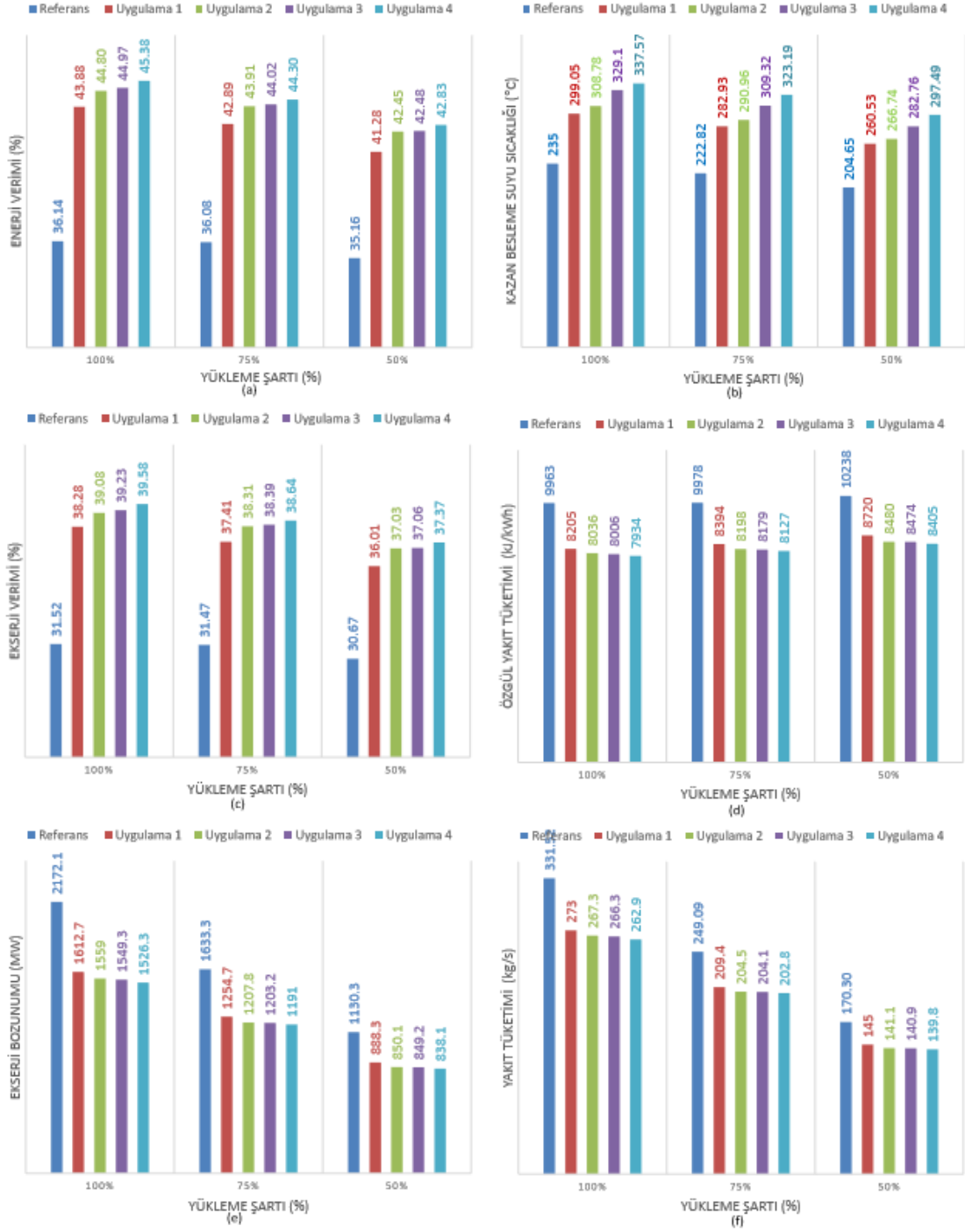
Bu sonuçlara bakılarak 2. ara kızdırma bölgesinin düşük yüklemelerde santralin enerji ve ekserji verimine pozitif etkisinin olduğu görülmüştür.

Uygulama 2 santraline, iki adet YBI'sı ve bir adet ABI'sı eklenmesiyle Uygulama 3 elde edilmiştir. Bu ara ısıtıcılarının eklenmesiyle, kazan besleme suyu giriş sıcaklığının yükseltilmesi amaçlanmıştır ve uygulama 2 ile uygulama 3'ün kazan besleme suyu sıcaklıkları karşılaştırıldığında, kazan besleme suyu sıcaklığının %100 yükleme altında 20,32°C, %50 yükleme altında ise 16,02°C arttığı gözlemlenmiştir. Uygulama 3 santraline bir adet BSPT ve iki adet DES eklenerek uygulama 4 oluşturulmuştur. %100 yükleme altında uygulama 4 ile uygulama 3'ün enerji ve ekserji verimleri karşılaştırıldığında, enerji veriminin %0,9, ekserji veriminin ise %0,89 arttığı görülmüştür.

Bütün sistemlerin ekserji analizleri incelendiğinde kimyasal reaksiyondan dolayı en fazla ekserji bozunumu kazanda gerçekleşmiştir. Ayrıca, sistemlerin yükleme değerleri düşürüldüğünde kazandaki ekserji bozunumu oranı artmıştır. Kazandan sonra en fazla ekserji bozunumu türbinlerde ve kondenserde oluşmuştur.

Farklı yüklemeler altında bütün sistemlerin karşılaştırılmalı enerji ve ekserji analizleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu grafiklerden, enerji ve ekserji verimlerinin sistemlerin yükleme değerleri yükseldiğinde arttığı görülmektedir.

Şekil 7(f), sistemlerin farklı yüklemeler altında yakıt tüketimlerini göstermektedir. %100 yükleme altında uygulama 4'ün yakıt tüketimi ile referans santralin yakıt tüketimi karşılaştırıldığında, yakıt tüketiminin %20,69 azaldığı görülmüştür.



Şekil 7. Farklı yükler altındaki bütün uygulamaların analiz sonuçları (a) enerji verimi (b) kazan besleme suyu sıcaklığı (c) özgül yakıt sarfiyatı (d) ekserji verimi (e) ekserji bozunumu (f) yakıt tüketimi (Analysis results of all Cases under various load condition (a) thermal efficiency (b) final feed water temperature (c) heat rate (d) exergy efficiency (e) exergy loss (f) fuel consumption)

5. SİMGELER (SYMBOLS)

q : Özgül Isı Sarfiyatı(kJ/kWh)
 E_{toplam} : Toplam Enerji Girişi(MW)
 P_{top} : Net Güç Çıkışı(MW)
 η_1 : Enerji Verimi(%)

φ : Yakıt Ekserji Oranı
 Ex_0 : Yakıtın Ekserjisi(MW)
 H_u : Yakıtın Alt Isıl Değeri(kJ/kg)
 c : Yakıt İçerisindeki Karbon
 h : Yakıt İçerisindeki Hidrojen
 o : Yakıt İçerisindeki Oksijen

n	: Yakıt İçerisindeki Azot
$EX_{0,katı}$	: Katı Yakıtın Ekserjisi(kj/kg)
w	: Nem(%)
h_{fg}	: Çevre Sıc. Suyun Buharlaştırma Entalpisi(kj/kg)
EX_g	: Katı Yakıt Tarafından Sisteme Verilen Ekserji(MW)
$m_{kömür}$	: Yakıtın Kütleli Debi(kg/s)
η_{II}	: Ekserji Verimi(%)
B_y	: Yıllık Yakılan Karbon Miktarı(kg/yıl)
L_f	: Santral Yük Faktörü(%)
H	: Santral Yıllık Çalışma Saati(h/yıl)
b_y	: Yakıt Tüketimi(kg/s)
B_{yc}	: Yıllık Yakılan Karbon Miktarındaki Değişim(kg/yıl)
CO_2	: Karbondioksit
C	: Karbon
O	: Oksijen

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, 5 farklı termik güç santrali için buhar parametrelerinin farklı yük şartlarında santralin performansı (enerji ve ekserji verimine), ekserji bozunumu, yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir; Taze buhar parametrelerinin (basınç ve sıcaklık) ve yükleme şartlarının, termik santrallerin enerji ve ekserji verimleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Fakat enerji ve ekserji verimlerindeki artış yükleme şartlarının düşmesiyle azalmaktadır. Bu çalışmada, en yüksek enerji verimi ve ekserji verimi uygulama 4 için bulunmuştur. Örneğin, %100 yük şartlarında uygulama 4 için enerji verimi ve ekserji verimi sırasıyla %45,37 ve %39,58 hesaplanmıştır. Dolayısıyla, uygulama 4 termodinamik olarak en iyi sistem seçilmiştir.

%100 yük şartlarında, uygulama 4 ile referans santralin enerji ve ekserji verimleri karşılaştırıldığında, uygulama 4'ün enerji veriminin %9,24 ve ekserji veriminin de %8,06 arttığı görülmüştür. Fakat yükleme durumu düştüğünde verimlerdeki bu artışın azaldığı belirlenmiştir. Örneğin, %50 yük şartlarında enerji ve ekserji verimlerindeki artış %7,67 ve %6,70 olmaktadır.

Bütün sistemler için en büyük ekserji bozunumu kazanda gerçekleşmektedir. %100 yükleme şartlarındaki uygulama 4'ün kazandaki ekserji bozunumu 1402,66 MW'tır (%91,90). Sistemlerin yükleme şartları düşürüldükçe kazandaki ekserji bozunumu da artmaktadır.

Kazan besleme suyu sıcaklığı, santralin yükleme miktarının düşürülmesi ile olumsuz etkilenmektedir. Uygulama 4'ün %100 yükleme şartında kazan besleme suyu sıcaklığı 337,57°C iken, %50 yükleme şartında kazan besleme suyu sıcaklığı 297,49°C'dir. %100 yük şartlarında, referans uygulama ile karşılaştırıldığında uygulama 4 için atmosfere atılan CO_2 miktarının 3.384.916 $t_{CO_2}/yıl$ azaldığı görülmüştür.

Bu çalışma sadece performans açısından bir değerlendirme içerir. Çalışmaya ekonomik analizler de dâhil edilerek daha anlamlı sonuçlar elde edilebilir.

Liu vd. [17] yaptığı çalışmada 9 ara ısıtmasına ve 1 degazöre sahip USC termik santralde, ekonomizlerdeki baca gazının kullanılması ve taze havanın ısıtılmasıyla termik santral veriminin %48,35'e ulaşabileceği görülmüştür. Yang vd. [25] 660MW gücündeki ultra-süperkritik termik santrale sirkülasyonlu akışkan yatak kazan dizaynı kullanarak ve kazan verimini yerel olarak etkileyen faktörleri matematiksel olarak hesaplayarak 20 senaryo oluşturmuş ve santral verimini %45,46'a çıkarmayı başarmışlardır. Kaşka'nın [14] yaptığı çalışmaya paralel olarak en fazla ekserji bozunumu sırasıyla kazan, türbin ve kondenserde gözlemlenmiştir. Tontu vd. [26] farklı şartlar altında çalışan 3 santralin enerji ve ekserji analizini yapmış ve USC termik santralin enerji ve ekserji verimini sırasıyla %46 ve %40,8 olarak bulmuşlardır. Bu sonuçlar, taze buhar parametrelerinin ve yük şartlarının termik santrallerin performans değerlendirmesi için önemli parametreler olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Erdem H.H., Akkaya A.V., Çetin B., Dağdaş A., Sevilgen S.H., Şahin B., Teke İ., Güngör C., Atas S., Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey, International Journal of Thermal Sciences, 48 (11), 2179-2186, 2009.
2. International Energy Agency, World Energy Outlook, 2014.
3. Çetin B., Avcı H., Technical and economic analysis of the conversion on an existing coal-fired thermal power plant to solar-aided hybrid power plant, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 1027-1046, 2020.
4. Elektrik Üretim Anonim Şirketi, EUAŞ Yıllık rapor 2019. <https://www.euas.gov.tr/tr-TR/yillik-raporlar>. Yayın tarihi Haziran, 2020. Erişim tarihi 15 Haziran, 2020.
5. Türkiye Elektrik İletim A.Ş., 2019 Yılı Elektrik Üretim-Tüketim Raporları, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari>. Yayın tarihi Haziran, 2020. Erişim tarihi 15 Haziran, 2020.
6. Oktay Z., Investigation of coal-fired power plants in Turkey and a case study: Can plant, Applied Thermal Engineering, 29 (2-3), 550-557, 2009.
7. Altınkaynak M., Güneş S., Yakut A.K., Bir termik santralin enerji analizi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 10(3), 20-26, 2018.
8. Zhang D., Ultra-supercritical Coal Power Plants, Woodhead Publishing: Philadelphia, 2013.
9. Xu G., Xu C., Yang Y., Fang Y., Zhou L., Yang Z., Thermodynamic and economic analysis of a partially-underground tower-type boiler design for advanced double reheat power plants, Applied Thermal Engineering, 78, 565-575, 2015.

10. Xu G., Zhou L., Zhao S., Liang F., Xu C., Yang Y., Optimum superheat utilization of extraction steam in double reheat ultra-supercritical power plants, *Applied Energy*, 160, 863-872, 2015.
11. Adibhatla S., Kaushik S.C., Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation, *Applied Thermal Engineering*, 73, 51-65, 2014.
12. Espatolero S., Romeo L.M., Cortes C., Efficiency improvement strategies for the feedwater heaters network designing in supercritical coal-fired power plants, *Applied Thermal Engineering* 73, 449-460, 2014.
13. Regulagadda P., Dinçer İ., Naterer G.F., Exergy analysis of a thermal power plant with measure boiler and turbine losses, *Applied Thermal Engineering*, 30, 970-976, 2010.
14. Kaşka Ö., Bor O., Tokgöz N., Energy and exergy analysis of an organic Rankine-Brayton combined cycle, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1201-1213, 2018.
15. Gonzalez-Salazar M.A., Kirsten T., Prchlik L., Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1497-1513, 2018.
16. Uysal C., Kurt H., Kwak H.Y., Exergetic and thermoeconomic analyses of a coal-fired power plant, *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 106-120, 2017.
17. Liu Y., Li Q., Duan X., Zhang Y., Yang Z., Che D., Thermodynamic analysis of a modified system for a 1000 MW single reheat ultra-supercritical thermal power plant, *Energy*, 145, 25-37, 2018.
18. Çengel Y.A., Boles M.A., *Thermodynamics an Engineering Approach*, 8th ed. McGraw-Hill: New York, 2015.
19. Tekel E., *Termik santrallerin enerji ve ekserji analizi*, Pamukkale Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, 2006.
20. Vardar N., Yumurtacı Z., Emissions estimation for lignite-fired power plants in Turkey, *Energy Policy*, 38, 243-252, 2010.
21. STEAG Energy Services GmbH. Epsilon Professional. <https://www.steag-systemtechnologies.com/en/products/epsilon-professional>, 2017.
22. Li Y., Zhou L., Xu G., Fang Y., Zhao S., Yang Y., Thermodynamic analysis and optimization of a double reheat system in an ultra-supercritical power plant, *Energy*, 1-13, 2014.
23. Drbal L.F., Boston P.G., Westra K.L., Erickson R.B., *Power Plant Engineering by Black&Veatch*, 6th ed. Kluwer Academic Publishers: Massachusetts, 2003.
24. Zhou L., Xu G., Zhao S., Xu C., Yang Y., Parametric analysis and process optimization of steam cycle in double reheat ultra-supercritical power plants, *Applied Thermal Engineering*, 99, 652-660, 2016.
25. Zhu S., Zhang M., Huang Y., Wu Y., Yang H., Lyu J., Gao X., Wang F., Yue G., Thermodynamic analysis of a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler unit, *Energy*, 173, 352-363, 2019.
26. Tontu M., Şahin B., Bilgili M., Using energy and exergy analysis to compare different coal-fired power plants, *Energy Sources*, 2019.



A bi-objective multi-commodity model for multimodal transportation of hazardous materials: A case study of Turkey

Aslı Çalış Boyacı^{1*}, Cevriye Gencer²

¹Department of Industrial Engineering, Ondokuz Mayıs University, Samsun, 55139, Turkey

²Department of Industrial Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- Hazardous materials transportation
- Multimodal transportation
- Bi-objective optimization

Keywords:

- Hazardous materials
- Multimodal transportation
- Preemptive goal programming

Article Info:

Research Article
Received: 18.01.2019
Accepted: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.514832

Acknowledgement:

This manuscript is based upon work supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK).

Correspondence:

Author: Aslı Çalış Boyacı
e-mail: asli.calis@omu.edu.tr
phone: +90 362 312 1919

Graphical/Tabular Abstract

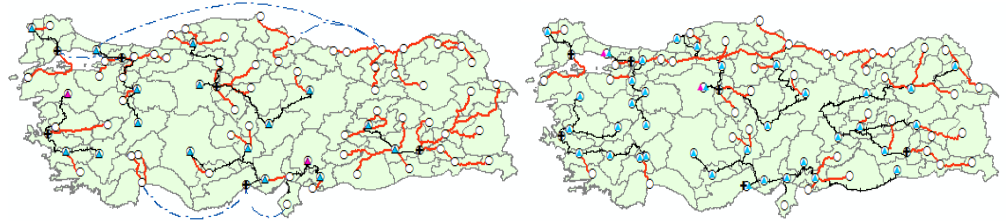


Figure A. Distribution network for cost/risk priority goal programming models

Purpose:

The fact that hazardous materials, which can cause damage to the living creatures and the environment due to their chemical or physical characteristics, have been used in many sectors in recent years so the importance of transportation of hazardous materials is on the rise. Despite the fact that railway and maritime transportation are superior in terms of risk and cost, highway is widely used for transportation of hazardous materials in our country. This study, which focuses on the transportation of fuel constitutes a significant part of the transportation of hazardous materials, a bi-objective multi-modal multi-commodity model consisting of a combination of highway, railway, and seaway has been proposed. The problem has been formulated as a mixed integer programming model.

Theory and Methods:

For the real case study of Turkey cost and risk priority goal programming models have been proposed. The necessary data were collected from organizations within Republic of Turkey Ministry of Transport, Maritime Affairs and Communications, fuel distribution companies and logistics companies for application of the proposed models in Turkey.

Results:

The results were obtained by using GAMS 23.5 modeling language and solved using the CPLEX 12.2.0.0 solver and Turkey's fuel distribution networks were drawn by using ArcGIS software. When the real case-study of hazmat transportation was analyzed, it was observed that if the fuel transportation activities were carried out using more than one mode of transportation, there were significant reductions in both cost and risk. According to the results obtained, İzmit refinery had the highest supplier fill rate for the products and Batman refinery had the lowest rate.

Conclusion:

In Turkey, due to the accidents that occurred in maritime transportation in recent years, the risk value of railway transportation was calculated to be lower than the risk value of maritime transportation. This situation allowed the railway to be preferred instead of the seaway when the risk was prioritized, and in the case of mode changes and short distances, the highway was preferred. However, in terms of cost, maritime transportation was more advantageous than railway and highway transportation and it was preferred for cost-priority model.



Tehlikeli maddelerin çok modlu taşımacılığı için çok ürünlü iki amaçlı bir model önerisi: Türkiye örneği

Aslı Çalış Boyacı^{1*}, Cevriye Gencer²

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Tehlikeli madde taşımacılığı
- Çok modlu taşımacılık
- İki amaçlı optimizasyon

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 18.01.2019
Kabul: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.514832

Anahtar Kelimeler:

Tehlikeli maddeler,
çok modlu taşımacılık,
öncelikli hedef programlama

ÖZET

Kimyasal veya fiziksel karakteristikleri nedeni ile canlılara ve çevreye zarar verebilen tehlikeli maddelerin son yıllarda birçok sektörde kullanılıyor olması, tehlikeli madde taşımacılığının önemini artırmaktadır. Demiryolu ve denizyolu taşımacılığı risk ve maliyet açısından üstünlükler arz ediyor olmasına rağmen, ülkemizde tehlikeli madde taşımacılığı için yaygın olarak karayolu kullanılmaktadır. Tehlikeli madde taşımacılığının önemli bir bölümünü oluşturan akaryakıt taşımacılığının ele alındığı bu çalışmada, arz ve talep noktaları arasındaki toplam ulaştırma maliyeti ve toplam ulaştırma riskinin minimizasyonunu hedefleyen; karayolu, demiryolu ve denizyolunun kombinasyonundan oluşan çok modlu çok ürünlü iki amaçlı bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin Türkiye uygulaması için T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı bünyesindeki kuruluşlar, akaryakıt dağıtım şirketleri ve lojistik firmalarından gerekli veriler toplanarak, öncelikle GAMS/CPLEX optimizasyon programı ile mevcut durumda yaygın olarak kullanılan tek modlu taşımacılık modeli ve önerilen çok modlu taşımacılık modeli için minimum maliyet ve minimum risk değerleri, ardından maliyet öncelikli ve risk öncelikli hedef programlama modellerine ilişkin değerler elde edilmiş ve ArcGIS yazılımı kullanılarak Türkiye'nin akaryakıt dağıtım ağları oluşturulmuştur.

A bi-objective multi-commodity model for multimodal transportation of hazardous materials: A case study of Turkey

H I G H L I G H T S

- Hazardous materials transportation
- Multimodal transportation
- Bi-objective optimization

Article Info

Research Article
Received: 18.01.2019
Accepted: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.514832

Keywords:

Hazardous materials,
multimodal transportation,
preemptive goal
programming

ABSTRACT

The fact that hazardous materials, which can cause damage to the living creatures and the environment due to their chemical or physical characteristics, have been used in many sectors in recent years so the importance of transportation of hazardous materials is on the rise. Despite the fact that railway and maritime transportation are superior in terms of risk and cost, the highway is widely used for the transportation of hazardous materials in our country. This study, which focuses on the transportation of fuel constitutes a significant part of the transportation of hazardous materials, a bi-objective multi-modal multi-commodity model consisting of a combination of highway, railway and seaway is proposed. The model aims at minimizing the total transportation cost and total transportation risk between supply and demand points. First, the minimum cost and minimum risk values for the unimodal transportation model, which is currently widely used, and for the proposed multimodal transportation model are obtained and then the values related to preemptive goal programming models for cost priority and risk priority are obtained using GAMS/CPLEX optimization software by collecting the necessary data from organizations within Republic of Turkey Ministry of Transport, Maritime Affairs and Communications, fuel distribution companies and logistics companies for application of the proposed models in Turkey. Finally, Turkey's fuel distribution networks are drawn by using ArcGIS software.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: asli.calis@omu.edu.tr, ctemel@gazi.edu.tr / Tel: +90 362 312 1919

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tehlikeli madde veya uluslararası kısaltmasıyla HAZMAT (Hazardous Material), kişisel kayıplara ve maddi hasarlara neden olabilen katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerdir. Patlayıcı, yanıcı, bio tehlikeli, korozif veya radyoaktif içerikli olabilen bu maddeler taşıma, elleçleme ve depolama işlemleri sırasında özel koruma gerektirmektedir [1].

Tehlikeli maddeler sanayinin neredeyse her kolunda ürün döngüsü içinde hammadde, yardımcı madde, ürün veya atık olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, işletmelerin lojistik süreçlerinde ve tedarik zinciri yapılarında direkt ya da dolaylı olarak yer alabilmektedirler. Günümüzde tehlikeli maddelerin kimya, petrol, sağlık gibi birçok sektörde kullanılması, tehlikeli yüklerin yer değiştirmesine olan ihtiyacı artırmıştır. Bu durumun sonucu olarak canlılar ve çevre üzerinde onarılamaz etkiler bırakan büyük kazalar ve uzun yıllar etkisi silinemeyen kirlilikler meydana gelmiştir. Bu nedenle tehlikeli madde taşımacılığı, resmi otoriteler, çevreci gruplar ve lojistik firmalarının üzerinde önemle durduğu bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatürde tehlikeli madde taşımacılığı üzerine gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcuttur. Erkut [2], tehlikeli maddelerin rotalanması için geliştirilen koşullu risk modelinin güvenilirliğini araştırmıştır. Karkazis ve Boffey [3] tarafından gerçekleştirilen çalışma, tehlikeli madde taşımacılığında olası bir kaza durumunda nüfus üzerindeki beklenen zararın etkilerini minimize eden optimal rotaların seçimi üzerinedir. Optimal rotaların belirlenmesi için bir dalsınır algoritması geliştirilmiş ve test edilmiştir. Erkut ve Verter [4] çalışmalarında, tehlikeli madde taşımacılığında yaygın olarak kullanılan risk modellerine genel bir bakış sağlamışlardır. Ayrıca literatürdeki alternatif risk modellerini karşılaştırarak, tehlikeli madde rota seçimi için iki kriterli bir yaklaşım önermişlerdir. Leonelli vd. [5] çalışmalarında tehlikeli madde taşımacılığında en iyi rotanın seçimi için risk analizi tabanlı bir metodoloji öne sürmüşlerdir. Optimizasyon problemi bir minimum maliyetli akış problemi olarak formüle edilmiş ve OPTIPATH bilgisayar kodu kullanılarak amonyak taşımacılığına ait sonuçlar tartışılmıştır. Fabiano vd. [6] tarafından gerçekleştirilen çalışmada yerleşim yerine yönelik özgün bir çerçeve geliştirilerek, tehlikeli madde taşımacılığında karayolu rotalarının seçimi için geliştirilen stratejilerden kaynaklanan risk incelenmiştir. Zografos vd. [7] çalışmalarında tehlikeli maddelerin iki amaçlı araç rotalama ve çizelgeleme problemleri için bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Dell'Olmo vd. [8] tarafından tehlikeli maddelerin rotalandığı bir kaynak ve hedef nokta arasındaki alternatif yollar kümesinin bulunması için bir metodoloji sağlanmıştır. İlk aşamada çok ölçütlü en kısa yol algoritması uygulanarak kaynak ve hedef nokta arasındaki Pareto-optimal yollar kümesi bulunmuş; ikinci aşamada ise bulunan her yol için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yardımıyla olası bir kaza sonrasında tehlikeli madde salınımının oluşabileceği etki alanı tahmin edilerek bir

tampon bölge oluşturulmuştur. Erkut ve Alp [9] şebeke üzerindeki tehlikeli madde akışlarından kaynaklanan toplam ulaştırma riskinin minimize edilmesi amacı ile bir tamsayı programlama problemi olarak ağaç tasarım problemini formüle etmişlerdir. Problemin çözümünü genişletmek için bir sezgisel geliştirilmişlerdir. Sadjadi [10] tehlikeli maddelerin optimum ulaştırma planlaması için beklenen maliyeti ve riski minimize edebilen etkili bir algoritma sunmuştur. Carotenuto vd. [11] çalışmalarında, tehlikeli madde taşımacılığında rota seçimi ve hareket zamanı belirleme problemini ele almışlardır. Her sevkiyat için bir rota atamak ve atanan rotalarda toplam gecikmeyi minimize etmek için bu sevkiyatları çizelgeleyen bir tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Brown ve Dunn [12] toksik maddelerin salınımı ile sonuçlanabilecek bir kaza durumunda halkın korunması gereken mesafeleri değerlendiren acil müdahale planlamasına odaklanan bir kantitatif risk değerlendirme yaklaşımı sunmuşlardır. Gickman vd. [13] tehlikeli maddelerin demiryolu ile taşınmasındaki riskleri dikkate alan bir alternatif rotalama stratejisi geliştirmişlerdir. Verma ve Verter [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, demiryolu taşımacılığı riskinin değerlendirilmesinde trenlerin ayırt edici niteliklerini, özellikle de yük hacmini ve türünü içeren analitik bir çerçeve sunulmuştur. Erkut ve Gzara [15] tarafından hükümetin bir şebeke belirlediği ve nakliyecilerin şebeke üzerinde rota seçtiği tehlikeli madde taşımacılığı için şebeke tasarım problemi ele alınmıştır. Problem iki seviyeli bir şebeke akış formülasyonu olarak modellenmiştir. Androustopoulos ve Zografos [16] tehlikeli maddelerin rotalanması için maliyetleri zamana bağlı olarak değişen k-en kısa yol problemini ele almışlardır. Kalkış ve varışın belirlenen zaman pencereleri içinde sınırlandırıldığı bu problemin çözümü için bir etiketleme algoritması önermişlerdir. Dadkar vd. [17] tehlikeli madde taşımacılığında yolların alt kümesinin belirlenmesi için coğrafi çeşitlilik ve performans arasındaki mübadeleyi temsil eden bir karma tamsayı programlama modeli önermişlerdir. Bonvicini ve Spadoni [18] tehlikeli madde taşımacılığında kaynaklanan riskin, rotalamada daha az riskli alternatif yolların tercih edilmesiyle azaltılabileceğini öne sürmüşlerdir. Rotalama probleminin çözümü için farklı optimizasyon stratejilerinin geniş bir yelpazesini sunan OPTIPATH modeli geliştirilmiştir. Risk analizi için OPTIPATH metodolojisi, TRAT4-GIS yazılımına entegre edilmiş ve İtalya'da gerçek bir senaryoya uygulanmıştır. Verma [19] demiryolu tehlikeli madde taşımacılığı için maliyet ve risk minimizasyonunu içeren iki amaçlı bir optimizasyon modeli önermiştir. Önerilen optimizasyon modelini Güneydoğu Amerika'da gerçekçi bir problemin çözümünde kullanarak analiz etmiş ve baskın olmayan çözümleri gösteren bir risk-maliyet sınırı geliştirmiştir. Bianco vd. [20] karayolu ulaşım ağı üzerinde belirli miktarda tehlikeli maddenin, kaynaktan hedefe taşınmasını içeren tehlikeli madde taşımacılığı şebeke tasarımı problemini ele almışlardır. Önerilen iki seviyeli model ve sezgisel algoritma İtalya'nın bölgesel bir şebekesine ait gerçek senaryolar üzerinde denenmiştir. Androustopoulos ve Zografos [21] tarafından tehlikeli

maddelerin dağıtım planlamasında ortaya çıkan iki kriterli rotalama ve çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemin hesaplama yükünün azaltılması amacıyla alternatif bir zamana bağlı k-en kısa yol algoritması önerilmiştir. Verma [22] tren kazalarının karakteristiklerini ve trenlerin ayırt edici özelliklerini dikkate alan bir risk değerlendirme metodolojisi geliştirerek tehlikeli maddelerin demiryolu taşımacılığındaki riskini minimize etmeyi amaçlamıştır. Ma vd. [23] tehlikeli madde taşımacılığı problemini zaman pencereli ve kapasite kısıtlı araç rotalama problemi olarak incelemişlerdir. Problemin çözümü için bir tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Samanhoğlu [24] endüstriyel tehlikeli atık yönetimi için çok amaçlı yer seçimi ve rotalama modeli geliştirerek Marmara bölgesinde uygulamıştır. Pradhananga vd. [25] tarafından tehlikeli maddeler için zaman pencereli araç rotalama ve çizelgeleme probleminin Pareto temelli iki amaçlı optimizasyonu ele alınmış ve bir meta-sezgisel çözüm algoritması önerilmiştir. Saat vd. [26] tarafından Kuzey Amerika'da demir yolu ile yaygın olarak taşınan bir grup kimyasal için bir kantitatif çevresel risk analizi gerçekleştirilmiştir. Bronfman vd. [27] tarafından kentsel alanda birden çok başlangıç ve bitiş noktaları arasında tehlikeli madde rotalama problemi sunulmuştur. Bir tamsayılı programlama formülasyonu ve sezgisel yaklaşım Santiago'nun karayolu ulaştırma şebekesindeki vaka çalışması üzerinde test edilmiştir. Siddiqui ve Verma [28] farklı yapıdaki tankerlerden oluşan ham petrol filosunun rotalarını ve çizelgelerini hazırlamak için kullanılabilen, maliyetin ve ulaştırma riskinin minimizasyonunun amaçlandığı iki amaçlı bir karma tamsayılı optimizasyon programı sunmuşlardır. Karabulut ve Öcalır Akunal [29] karayolu ile tehlikeli madde taşımacılığı için CBS destekli çevresel risk analizi gerçekleştirmişlerdir. Romero vd. [30] tehlikeli madde taşımacılığında tesis yerleşimi ve rotalama kararlarının analizi için bir model geliştirmişlerdir. Modelin çözümü için Lagrange Gevşetmesi'ni sütun ekleme ile birleştiren bir yöntem önerilmiştir. Pamucar vd. [31] tarafından bir şehrin karayolu ağı üzerindeki tehlikeli madde taşımacılığı için Yapay Arı Kolonisi algoritması ile eğitilen bir uyarlanabilir sinirsel bulanık ağ kullanılarak, maliyet ve risk kriterlerinin değerleri belirlenmiş; ardından Dijkstra algoritması ile rota seçimi gerçekleştirilmiştir. Landucci vd. [32] tarafından 2009 yılında İtalya'nın Viareggio kentinde bir yük treninin raydan çıkmasıyla LPG yüklü iki vagona meydana gelen patlama ışığında, tehlikeli madde taşımacılığında risk değerlendirme için prosedürler ve araçlar analiz edilmiştir. Torretta vd. [33] son yıllarda karar vericilere en iyi çözümleri bulmalarında yardımcı olan sistemler geliştirildiğine değinerek karar destek sistemlerini kullanan yazılımları incelemişlerdir. Taslimi vd. [34] tehlikeli madde sevkiyatının gerçekleştiği bir karayolu şebekesi için iki seviyeli bir şebeke tasarımı problemini ele almışlardır. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için ağgözlü yaklaşımını önermişlerdir. Kumar vd. [35] gelişmekte olan bir ülkede tehlikeli madde taşımacılığına ilişkin rotalama kararı için bir model önermişlerdir. Kamyon sayısı ve tipi ile rota tercihlerine ilişkin tamsayı değişkenlerini içeren modelin çözümü için genetik algoritma kullanılmıştır. Literatürde, tehlikeli madde taşımacılığı

üzerine birden fazla ulaştırma modunun kullanılması ile gerçekleştirilen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bubbico vd. [36] tehlikeli maddelerin karayolu, demiryolu ve bu iki ulaştırma modunun birlikte kullanıldığı intermodal taşımacılığında bir veri bankası ile birleştirilmiş CBS kullanımına dayanan risk analizi yaklaşımı önermişlerdir. Bubbico vd. [37] tarafından Sicilya'da tehlikeli maddelerin karayolu ve demiryolu taşımacılığına ilişkin çeşitli risklerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için minimum risk değerlerini tespit eden bir Ulaştırma Risk Analizi (Transportation Risk Analysis-TRA) aracı kullanılmıştır. Verma ve Verter [38] tehlikeli maddelerin karayolu-demiryolu intermodal taşımacılığının planlanması için analitik bir çerçeve sunmuşlardır. Reniers vd. [39] farklı ulaştırma modlarının kullanıldığı tehlikeli madde taşımacılığında göreceli risk seviyelerinin değerlendirilmesi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Elaladi [40] tehlikeli madde taşımacılığında demiryolu ve karayolunun birlikte kullanımının oluşturacağı potansiyel faydaları araştırmak amacıyla intermodal taşımacılık için matematiksel model önermiştir. Xie vd. [41] karayolu ve demiryolu şebekelerinden oluşan, aktarma noktalarının konumlarını ve taşıma rotalarını eş zamanlı optimize eden bir multimodal (çok modlu) tehlikeli madde taşımacılığı modeli önermişlerdir. Verma vd. [42] tarafından tehlikeli maddelerin demiryolu-karayolu intermodal taşımacılığında iki-amaçlı optimizasyon modeli önerilmiştir. Tabu arama tabanlı çözüm yaklaşımı geliştirilerek, önerilen model ile birlikte gerçek boyutlu problem örneklerine uygulanmıştır. Reniers ve Dullaert [43] tarafından önerilen tehlikeli madde taşımacılığı güvenlik açığı değerlendirmesi metodu ile farklı taşıma modlarının göreceli güvenlik risk düzeylerini belirleyen bir yaklaşım sunulmuştur. Jiang vd. [44] tehlikeli maddeler için karayolu ve demiryolu ağlarından oluşan şebekede aktarma noktalarının konumlarının ve taşıma rotalarının eş zamanlı optimizasyonunu sağlayan, toplam maliyeti ve toplam riski minimize etmeyi amaçlayan bir multimodal taşımacılık modeli önermişlerdir. Küçük [45] karayolu ve demiryolu taşımacılığında oluşan çok tipli bir taşıma modeli kullanarak, tehlikeli madde taşımacılığında oluşan maliyeti ve riskleri en aza indirgeyen bir iki amaçlı optimizasyon modeli geliştirmiştir. Assadipour vd. [46] mevcut çalışmalarda demiryolu-karayolu intermodal taşımacılığında terminallerdeki yoğunlukların göz ardı edildiğini vurgulayarak, literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla terminal yoğunluğunu dikkate alan ve uygun ekipman kapasitesini belirleyen iki amaçlı bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Assadipour vd. [47] bir başka çalışmada, taşıyıcı firmaların belirli terminalleri kullanmalarının önüne geçmek adına hükümetin geçiş ücreti gibi caydırıcı önlemler aldığı durumlarda, tehlikeli madde taşımacılığı için demiryolu intermodal terminallerinin kullanımını düzenlemek amacıyla iki seviyeli, iki amaçlı bir model önermişlerdir. Vaezi ve Verma [48] Kanada'daki farklı demiryolu bağlantılarındaki ham petrol hacmini 2030 yılına kadar tahmin etmek için veri güdümlü bir metodoloji sunmuş ve önerilen boru hattı projelerinin etkisini değerlendirmişlerdir. Türkiye, coğrafi konumu ve lojistik avantajları ile karma taşımacılığa elverişli olmasına rağmen,

ulaşım ağının çok geniş olması nedeniyle ülkemizde tehlikeli madde taşımacılığında yaygın olarak karayolu kullanılmaktadır. Hâlbuki demiryolu ve denizyolu gerek maliyet gerek risk açısından karayoluna göre üstünlükler arz etmektedir. Dünyada artan ticaret akışlarıyla birlikte faaliyete geçen lojistik köyler için ülkemizde de altyapı yatırımları hızla artmakta olup, bu sayede daha düşük maliyetli, hava şartlarından daha az etkilenen, emniyetli ve çevre dostu bir karma taşımacılık modelinin yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Tehlikeli madde taşımacılığının önemli bir bölümünü oluşturan akaryakıt taşımacılığının ele alındığı bu çalışmada, arz ve talep noktaları arasındaki toplam ulaştırma maliyeti ve toplam ulaştırma riskinin minimizasyonunu hedefleyen, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak karayolu, demiryolu ve denizyolunun kombinasyonundan oluşan çok modlu çok ürünlü iki amaçlı bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin Türkiye uygulaması için gerekli veriler toplanarak öncelikle GAMS/CPLEX optimizasyon programı ile mevcut durumda yaygın olarak kullanılan tek modlu taşımacılık modeli ve önerilen çok modlu taşımacılık modeli için minimum maliyet ve minimum risk değerleri, ardından maliyet öncelikli ve risk öncelikli hedef programlama modellerine ilişkin değerler elde edilmiş ve CBS yazılımlarından ArcGIS kullanılarak Türkiye'nin akaryakıt dağıtım ağları oluşturulmuştur.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde geliştirilen model incelenmiştir. Üçüncü bölümde, önerilen modelin Türkiye uygulamasına yer verilerek minimum maliyet amaçlı, minimum risk amaçlı, iki amaçlı maliyet öncelikli ve iki amaçlı risk öncelikli modeller için dağıtım ağları elde edilmiştir. Dördüncü bölümde ise sonuçlar bir bütün olarak ele alınmış ve ileriki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. GELİŞTİRİLEN MODELLER (DEVELOPED MODELS)

Bu bölümde tehlikeli madde taşımacılığı için, birden fazla taşıma modunun (karayolu, demiryolu ve denizyolu) birlikte kullanıldığı; akaryakıt dağıtım şirketleri açısından minimum maliyetli; toplum ve çevre açısından ise minimum riskli dağıtım ağının belirlenmesini hedefleyen çok-modlu çok-ürünlü iki-amaçlı matematiksel model önerilmiştir. Doğruluğu sayısal örneklerle test edilmiş olan modele ilişkin formülasyon aşağıdaki gibidir:

Küme ve indisler

N : Şehirler kümesi $i, j \in N = \{1, 2, \dots, n\}$,

P : Ürünler kümesi $k \in P = \{1, 2, \dots, p\}$

Parametreler

C_k^h : Karayolu ile bir birim k ürünü taşıma maliyeti,

C_k^r : Demiryolu ile bir birim k ürünü taşıma maliyeti,

C_k^m : Denizyolu ile bir birim k ürünü taşıma maliyeti,

FC^{tu} : Transfer ünitesi kurmak için gereken sabit maliyet,

D_{ij}^h : i ve j şehirleri arası karayolu mesafesi,

D_{ij}^r : i ve j şehirleri arası demiryolu mesafesi,

D_{ij}^m : i ve j şehirleri arası denizyolu mesafesi,

V_{ik} : i şehrinin k ürününe ait talep miktarı,

U_k^t : Terminalin k ürünü depolama kapasitesi,

U_k^{tu} : Transfer ünitesinin k ürünü aktarma kapasitesi,

U^{rf} : Rafineri kapasitesi,

Q^{tu} : Mevcut transfer ünitesi sayısı,

R_{ij}^h : (i, j) karayolu bağlantısına ait ulaştırma riski,

R_{ij}^r : (i, j) demiryolu bağlantısına ait ulaştırma riski,

R_{ij}^m : (i, j) denizyolu bağlantısına ait ulaştırma riski,

$h_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ ve } j \text{ arasında karayolu bağlantısı mevcutsa,} \\ 0 & \text{diğer durumlarda (dd.),} \end{cases}$

$r_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ ve } j \text{ arasında demiryolu bağlantısı mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$m_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ ve } j \text{ arasında denizyolu bağlantısı mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$Y_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehri tedarik noktasıysa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$t_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrinde terminal mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$w_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrindeki terminalin deniz bağlantısı mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$rf_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrinde rafineri mevcutsa,} \\ 0 & \text{dd.} \end{cases}$

Karar değişkenleri

X_{ijk}^h : (i, j) karayolu ile taşınan k ürünü miktarı,

X_{ijk}^r : (i, j) demiryolu ile taşınan k ürünü miktarı,

X_{ijk}^m : (i, j) denizyolu ile taşınan k ürünü miktarı,

S_{ik} : i tedarik şehrinin k ürünü için arz miktarı,

$a_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrinde mevcut transfer ünitesi kullanılacaksa,} \\ 0 & \text{dd.,} \end{cases}$

$b_i = \begin{cases} 1 & i \text{ şehrine yeni transfer ünitesi kurulacaksa,} \\ 0 & \text{dd.} \end{cases}$

Amaç fonksiyonları

$$\begin{aligned} &Min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h D_{ij}^h c_k^h + \\ &\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r D_{ij}^r c_k^r + \\ &\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m D_{ij}^m c_k^m + \\ &\sum_{j \in N} FC^{tu} b_j \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &Min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h R_{ij}^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r R_{ij}^r + \\ &\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m R_{ij}^m \end{aligned} \quad (2)$$

Kısıtlar

$$\begin{aligned} &\sum_{i \in N} X_{jik}^h h_{ji} + \sum_{i \in N} X_{jik}^r r_{ji} + \sum_{i \in N} X_{jik}^m m_{ji} - \\ &\sum_{i \in N} X_{ijk}^h h_{ij} - \sum_{i \in N} X_{ijk}^r r_{ij} - \sum_{i \in N} X_{ijk}^m m_{ij} \\ &= S_{jk} y_j - V_{jk}, \quad \forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i \in N} X_{ijk}^h h_{ij} - \sum_{i \in N} X_{jik}^h h_{ji} - V_{jk} \leq U^{rf} r_{fj} + U_k^t t_j, \\ &\forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i \in N} X_{ijk}^r r_{ij} \leq U_k^t t_j + U_k^{tu} a_j + U_k^{tu} b_j, \\ &\forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i \in N} X_{jik}^r r_{ji} \leq U^{rf} r_{fj} + U_k^t t_j + U_k^{tu} a_j + U_k^{tu} b_j, \\ &\forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ijk}^m m_{ij} \leq U_k^t w_j, \quad \forall j \in N, \forall k \in P \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i \in N} X_{jik}^m m_{ji} \leq U^{rf} r_{fj} + U_k^t w_j, \\ &\forall j \in N, \forall k \in P \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N} S_{jk} y_j = \sum_{j \in N} V_{jk}, \quad \forall k \in P \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N} a_j \leq Q^{tu} \quad (10)$$

$$X_{ijk}^h, X_{ijk}^r, X_{ijk}^m, S_{jk} \geq 0, \quad (11)$$

$$\forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in P$$

$$a_j, b_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in N \quad (12)$$

Eş. 1, tüm taşıma modları için toplam ulaştırma maliyetinin minimizasyonu ile transfer ünitesi açmanın doğurduğu sabit maliyetin minimizasyonunu; Eş. 2 ise kara, demir ve deniz yolu ile gerçekleştirilen tehlikeli madde taşımacılığında doğan toplam ulaştırma riskinin minimizasyonunu amaçlamaktadır.

Eş. 3 akaryakıt taşımacılığı için akış denge kısıtı olup, tüm şehirlerin akaryakıt taleplerinin karşılanmasını ve uygun taşıma modları kullanılarak tedarikçilerden elde edilen ürünlerin talep noktalarına iletilmesini sağlamaktadır.

Eş. 4, bir şehirde rafineri veya depolama terminali mevcut olmadığı durumda, şehre kara tankerleri ile gelen akaryakıtın farklı bir şehre ulaştırılması sırasında taşıma modunun değiştirilemeyeceğini ifade etmektedir. Demir yolu ile gelen akaryakıtın şehir geneline dağıtımının yapılabilmesi için o şehirde terminal ya da transfer ünitesinin olması gerekmektedir. Eş. 5 ile vagon tankerlerdeki akaryakıtın, terminal ya da transfer ünitesi vasıtasıyla kara tankerlerine aktarımı sağlanabilmektedir. Terminallerde ve rafinerilerde vagon tankerlerin direkt dolumu yapılabilmektedir. Dolayısıyla bir şehirden demir yolu ile başka bir şehre akaryakıt gönderiminin yapılabilmesi için o şehirde ya bir rafineri ya da bir terminal bulunması gerekmektedir. Bu duruma ilave olarak sadece transfer ünitesinin olduğu bir şehre demir yolu ile giren ürünlerin, şehirden kara yolu ile çıkışı söz konusu olduğu gibi mod değiştirmeksizin demir yolu ile çıkışı da Eş. 6 ile mümkün kılınmaktadır.

Eş. 7, bir şehre deniz yolu ile akaryakıt ürünlerinin girebilmesi için o şehirde deniz ile bağlantısı olan bir terminalin bulunmasını ve taşınacak ürün miktarının terminalin depolama kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Eş. 8 ise bir şehirden deniz yolu ile akaryakıt çıkışının olabilmesi için o şehirde ya bir rafinerinin ya da deniz ile bağlantısı olan bir terminalin bulunması gerektiğini ifade etmektedir.

Eş. 9, toplam arzın toplam talebi karşılamasını sağlamaktadır. Ayrıca bu kısıt ile toplam talebin hangi oranlarda mevcut arz noktalarından karşılanacağı da belirlenmektedir.

Eş. 10, kurulum maliyeti gerektirmeden kullanılacak toplam transfer ünitesi sayısının, hâlihazırda mevcut olan transfer ünitesi sayısını aşmaması gerektiğini ifade etmektedir.

Eş. 11, sol taraftaki değişkenlerin negatif olmama durumunu; Eş. 12 ise ilgili değişkenlerin 0 veya 1 değerini alabileceğini ifade etmektedir.

3. TÜRKİYE UYGULAMASI (APPLICATION IN TURKEY)

3.1. Problemin Tanımı ve Verilerin Toplanması (Problem description and data collection)

Türkiye’de, yılda yaklaşık 35 milyon ton akaryakıtın %95’i 55.000 adet karayolu tankeri ile taşınmakta ve bu durumda yılda yaklaşık 1 milyon sefer gerçekleşmektedir. Bu araçların yalnız 12.500 adedi ADR (European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road-Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşması) standartlarına uygundur [49]. Bu gerçek, tehlikeli sınıfta olan akaryakıtın bir kısmının güvenli olmayan araçlarla toplum içerisinde taşındığını net olarak göstermektedir. Akaryakıt dağıtım faaliyetlerinde birden fazla taşıma modunun birlikte kullanıldığı; akaryakıt dağıtım şirketleri açısından minimum maliyetli; toplum ve çevre açısından ise minimum riskli dağıtım ağının belirlenmesini hedefleyen çok-modlu çok-ürünlü iki-amaçlı matematiksel model önerisi Bölüm 3’te verilmiştir. Bu bölümde, önerilen modelin Türkiye uygulaması için, sektörde pazar payının %70’inden fazlasını elinde bulunduran 6 akaryakıt dağıtım şirketi baz alınmıştır. Akaryakıt ürünleri olarak ise benzin ve motorin dikkate alınmıştır. Çalışmada, rafinerilerin bulunduğu iller (İzmit, İzmir, Kırıkkale ve Batman) ile şirketlerin rafinerilere ilave olarak uluslararası kaynaklardan da ürün temin ettikleri terminallerinin bulunduğu iller (Mersin ve Tekirdağ) tedarik noktası olarak kabul edilmiştir. Rafinerilerin kapasitelerinin sınırsız olduğu; yurt içi ve yurt dışı tedarikçilerden satın alınan ürünlerin birim maliyetlerinin aynı olduğu varsayılmıştır. Ülkemizdeki 81 il merkezi ise talep noktası kabul edilmiştir. İllerin aylık akaryakıt talepleri “Petrol Piyasası Sektör Raporu” verilerinden dağıtıcı firmaların illere göre yıllık yurt içi benzin ve motorin türlerinin satış miktarları dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Akaryakıt dağıtım şirketleri, petrol ürünlerinin depolanması için kendi depolama terminallerini kullanabilecekleri gibi diğer firmaların depolarını kiralayabilme imkânına da sahiptirler. Mevcut sistemde yaygın olarak kullanılan depoların bulunduğu iller; İzmit, İzmir, Kırıkkale, Batman, Mersin, Tekirdağ, İstanbul, Antalya, Samsun, Trabzon ve Hatay’dır. Depoların özdeş ve kapasitelerinin 180.000 ton olduğu varsayılmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda benzin/motorin için terminallerin kapasitelerinin yaklaşık 1/7 oranında olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Transfer üniteleri, demiryolu tankerleri ile gelen ürünlerin herhangi bir depolama işlemi olmaksızın karayolu tankerlerine iletilmesini sağlayan ve bünyesinde her biri saatte 120 m³ akaryakıt ürünü aktarabilen iki pompa bulunduran aracı birimlerdir. Bu doğrultuda bir transfer ünitesinin günde 24 saat ve ayda 30 gün çalıştığı varsayılarak yaklaşık kapasitesi 166.000 ton/ay olarak hesaplanmıştır. Benzin/motorin için transfer ünitelerinin kapasiteleri 1/7 oranında hesaplanmıştır. Üretici firmalar ile gerçekleştirilen görüşmeler neticesinde, transfer ünitesinin birim maliyetinin yaklaşık 125.000 \$ olduğu ve mevcut sistemde 2 adet

transfer ünitesinin bulunduğu bilgisi elde edilmiştir. Mevcut sistemde kara tankerleri ile gelen ürünlerin transfer ünitelerinde vagon tankerlere aktarımı söz konusu değildir. Transfer üniteleri taşınabilir durumda olduğundan, gerektiğinde farklı şehirlerde konumlandırılmaları mümkündür. Çalışma kapsamında yeni bir transfer ünitesi kurmak için gereken maliyetin sabit olduğu varsayılmıştır.

Akaryakıt taşımacılığı yapan şirketlerle yapılan görüşmeler doğrultusunda benzin ve mazot gibi akaryakıt ürünlerinin karayolu ile birim ulaştırma maliyeti ton-km başına yaklaşık 0,30 TL; denizyolu ile birim ulaştırma maliyeti ise (14000 ton kapasiteli tanker için) ton-km başına yaklaşık 0,06 TL olarak hesaplanmıştır. TCDD ile yapılan görüşmelerde ise demiryolu ile ulaştırma maliyeti ton-km başına ortalama 0,08 TL olarak elde edilmiştir. TCDD’nin yük taşımacılığı mevzuatına göre, parlayıcı madde yüklü vagonlar yük trenlerinde baştaki ve sondaki lokomotiflerden en az bir emniyet vagonu ile ayrılmak suretiyle lokomotiflerden uzak yerlere verilmektedir. Buna göre birim taşıma maliyetine ilave olarak benzin için %6, motorin için ise %4 oranında emniyet vagonu ücreti bulunmaktadır [50]. Karayolu ve denizyolunda ise benzin ve motorin için birim taşıma maliyeti değişmemektedir.

Karayolu, demiryolu ve denizyolu şebekeleri, ArcGIS yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Karayolu için 81 il, demiryolu için akaryakıt taşımacılığının yapılabildiği iller, denizyolu için ise deniz taşımacılığının aktif olarak gerçekleştirildiği terminallerin bulunduğu iller baz alınmıştır. Çalışmada karayolu taşımacılığı için Erkut ve Verter [4], demiryolu taşımacılığı için Glickman vd. [13], denizyolu taşımacılığı için ise Siddiqui ve Verma [51] tarafından önerilen risk modelleri dikkate alınarak Türkiye’ye uyarlanmıştır. Karayolu taşımacılığı risk modeli için mesafe, karayolundaki kaza olasılığı, kaza meydana geldiğinde tehlikeli maddenin koşullu salınım olasılığı, ortalama nüfus yoğunluğu ve etki alanı parametreleri dikkate alınırken; demiryolu taşımacılığı risk modeli için mesafe, demiryolundaki kaza oranı, tren başına yüklenen vagonların toplam sayısı, hasar gören ya da raydan çıkan tehlikeli madde vagonlarından büyük bir salınım yapılma olasılığı, tehlikeli maddelerin büyük bir salınımı ile sonuçlanan bir kazanın beklenen sonucu; denizyolu taşımacılığı risk modeli için ise mesafe, büyük dökülmeler ile sonuçlanan kaza olasılığı, küçük dökülmeler ile sonuçlanan kaza olasılığı, büyük dökülmelerin boyutu, küçük dökülmelerin boyutu, denizdeki bir tonluk dökülmenin karada oluşturduğu etki alanı ve ortalama nüfus yoğunluğu dikkate alınmıştır. Risk hesaplamaları için T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı [52] bünyesindeki kuruluşlardan gerekli veriler elde edilmiştir.

3.2. Çok-Ürünlü İki-Amaçlı Matematiksel Modelin Analizi (Analysis of Multi-Commodity Bi-Objective Model)

Ülkemizde yaygın olarak karayolu taşımacılığı kullanıldığı için, çok-ürünlü iki-amaçlı matematiksel model (M1), öncelikle ulaştırma modu olarak sadece karayolunun

kullanıldığı tek modlu model (TMM) ve tüm ulaştırma modlarının (kara-demir-deniz) kullanıldığı çok modlu model (ÇMM) olarak GAMS 23.5.1/CPLEX 12.2 optimizasyon programı ile çözülmüş ve Tablo 1'deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 1. M1 için tek modlu ve çok modlu ulaştırma modellerine ilişkin değerler
(Values of single mode and multi-modal transportation models for M1)

M1	Min. Maliyet (TL)	Min. Risk
TMM	94.102.986,900	173.149,496
ÇMM	50.861.833,371	49.150,148

3.3. Çok-Ürünlü İki-Amaçlı Maliyet-Öncelikli Hedef Programlama Modeli ve Analizi

(Multi-Commodity Bi-Objective Cost-Priority Goal Programming Model and Analysis)

Maliyet önceliğinin olduğu durumda hedef programlama modeli (M2) aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$P_1 \gg P_2$ olmak üzere;

$$Min z = P_1 d_1^+ + P_2 d_2^+ \tag{13}$$

s.t.

$$Min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h D_{ij}^h c_k^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r D_{ij}^r c_k^r + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m D_{ij}^m c_k^m + \sum_{j \in N} FC^{tu} b_j + d_1^- - d_1^+ = 50.861.833,371 \tag{14}$$

$$Min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h R_{ij}^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r R_{ij}^r + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m R_{ij}^m + d_2^- - d_2^+ = 49.150,148 \tag{15}$$

$$Eş. (3) - Eş. (12) \tag{16}$$

Modelin analizi:

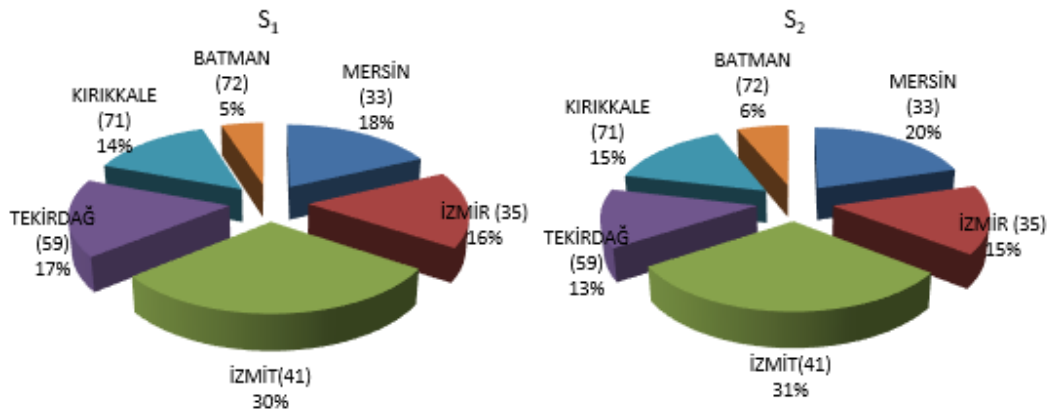
$$z = 50.977,162$$

$d_1^-, d_1^+, d_2^- = 0$, $d_2^+ = 50.977,162$ olarak elde edilmektedir. Buna göre 1. hedef tam olarak sağlanırken, 2. hedeften pozitif yönde 50.977,162 birimlik sapma gerçekleşmiştir.

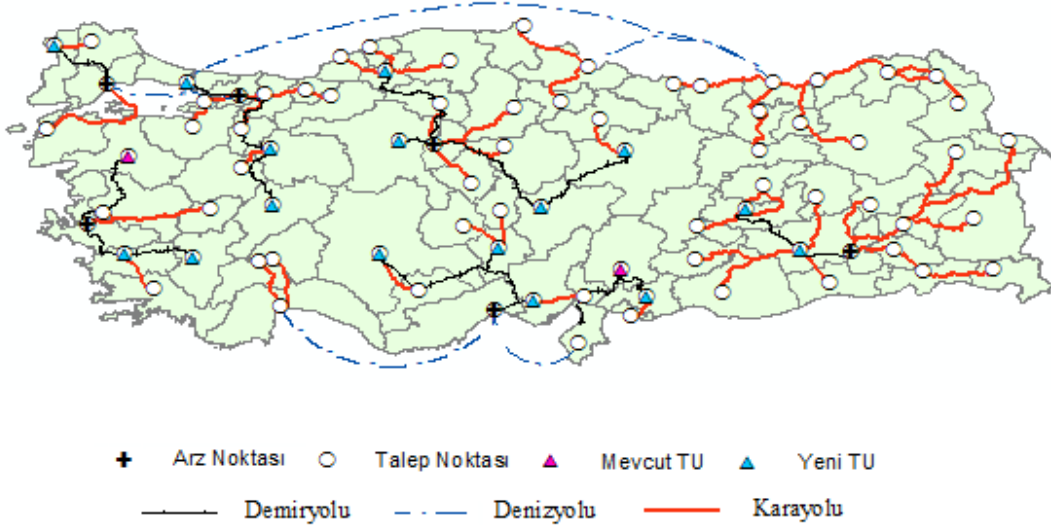
Çok-ürünlü iki-amaçlı maliyet öncelikli hedef programlama modeli (M2) için 1. ve 2. ürüne ait tedarikçilerin talep karşılama oranları Şekil 1'de, ArcGIS ile elde edilen dağıtım ağları ise Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmektedir.

Şekil 1 incelendiğinde, 1. ürün (benzin) için toplam talebin %65'inin rafinerilerden, %35'inin ise yurt dışı bağlantılı terminallerden; 2. ürün (motorin) için ise toplam talebin %67'sinin rafinerilerden, kalan %33'ünün ise yurt dışı bağlantılı terminallerden karşılandığı görülmektedir. Ürünlerin taleplerinin sırasıyla %30 ve %31 oranlarında İzmit rafinerisinden karşılandığı ve en düşük tedarikçi arz yüzdesinin %5 ve %6 oranlarında Batman rafinerisine ait olduğu görülmektedir.

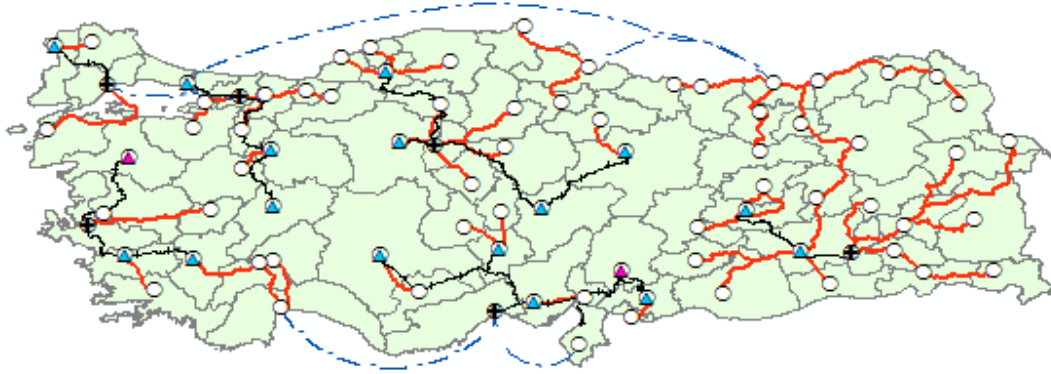
1. ürüne ait dağıtım ağı Şekil 2'de verilmektedir. Şekil 2 incelendiğinde, Hatay'dan Gaziantep ve Kahramanmaraş'a; Mersin'den Adana, Konya ve Niğde'ye; İzmir'den Aydın, Balıkesir ve Denizli'ye; Kocaeli'den Afyon, Eskişehir ve İstanbul'a; Tekirdağ'dan Edirne'ye; Kırıkkale'den Ankara, Kayseri, Sivas, Karabük'e; Batman'dan Diyarbakır ve Elazığ'a yapılan sevkiyatlarda ulaştırma modu olarak demiryolunun kullanıldığı, Mersin'den Antalya ve Hatay'a; Kocaeli'den Trabzon'a; Tekirdağ'dan İstanbul'a ve Trabzon'dan Samsun'a yapılan sevkiyatlarda ise denizyolunun kullanıldığı görülmektedir. Demiryolu ve denizyolu bağlantısının olmadığı şehirlerde ise en kısa mesafeler dikkate alınarak sevkiyatlar karayolu ile yapılmıştır. M2 için 1. ürüne ait dağıtım ağına ilişkin detaylar EK A'da yer alan Tablo 1'de verilmektedir [53].



Şekil 1. M2 için 1. ve 2. ürüne ait tedarikçi talep karşılama oranları (Supplier fill rates for product 1 and 2 of M2)



Şekil 2. M2 için 1. ürüne ait dağıtım ağı (Distribution network for product 1 of M2)



Şekil 3. M2 için 2. ürüne ait dağıtım ağı (Distribution network for product 2 of M2)

2. ürüne ait dağıtım ağı Şekil 3’de verilmektedir. Şekil 3 incelendiğinde, Hatay’dan Gaziantep ve Kahramanmaraş’a; Mersin’den Adana, Gaziantep, Konya ve Niğde’ye; İzmir’den Aydın, Balıkesir ve Denizli’ye; Kocaeli’den Afyon, Eskişehir ve İstanbul’a; Tekirdağ’dan Edirne’ye; Kırıkkale’den Ankara, Kayseri, Sivas, Karabük’e; Batman’dan Diyarbakır ve Elazığ’a yapılan sevkiyatlarda ulaştırma modu olarak demiryolunun kullanıldığı, Mersin’den Antalya ve Hatay’a; Kocaeli’den Trabzon’a; Tekirdağ’dan İstanbul’a ve Trabzon’dan Samsun’a yapılan sevkiyatlarda ise denizyolunun kullanıldığı görülmektedir. Demiryolu ve denizyolu bağlantısının olmadığı şehirlerde ise en kısa mesafeler dikkate alınarak sevkiyatlar karayolu ile yapılmıştır. M2 için 2. ürüne ait dağıtım ağına ilişkin detaylar Tablo A2’de verilmektedir [53].

Ayrıca, Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde mevcut 2 transfer ünitesinin Balıkesir ve Kahramanmaraş’a yerleştirildiği; 16 yeni transfer ünitesinin açıldığı ve ürünlerin dağıtımında üç ulaştırma modunun da kullanıldığı görülmektedir.

3.4. Çok-Ürünlü İki-Amaçlı Risk-Öncelikli Hedef Programlama Modeli ve Analizi

(Multi-Commodity Bi-Objective Risk-Priority Goal Programming Model and Analysis)

Risk önceliğinin olduğu durumda hedef programlama modeli (M3) aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$$P_1 \gg P_2 \text{ olmak üzere;}$$

$$\text{Min } z = P_1 d_1^+ + P_2 d_2^+ \quad (17)$$

s.t.

$$\text{Min } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h R_{ij}^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r R_{ij}^r + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m R_{ij}^m + d_1^- - d_1^+ = 49.150,148 \quad (18)$$

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^h D_{ij}^h c_k^h + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^r D_{ij}^r c_k^r +$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in P} X_{ijk}^m D_{ij}^m c_k^m + \sum_{j \in N} FC^{tu} b_j + \quad (19)$$

$$d_2^- - d_2^+ = 50.861.833,371$$

Eş. (3) – Eş. (12)

Modelin analizi:

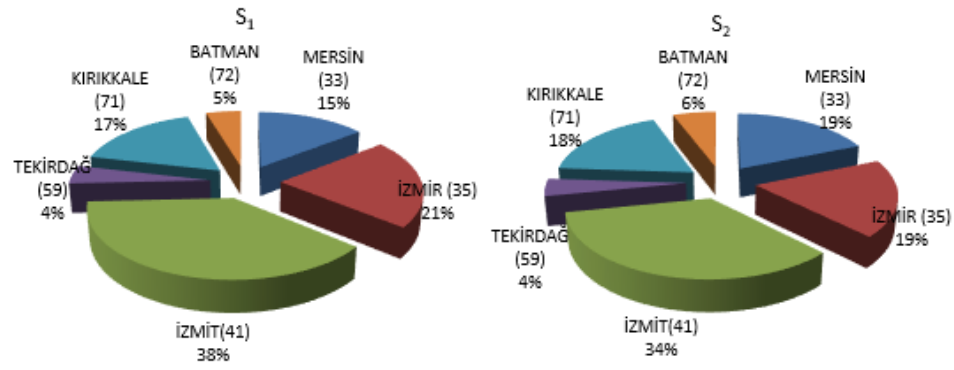
$$z = 14.314.319,183$$

$$d_1^-, d_2^- = 0, \quad d_1^+ = 2,001 \times 10^{-7}, \quad d_2^+ = 14.314.319,183$$

olarak elde edilmektedir. Buna göre pozitif yönde 1. hedeften $2,001 \times 10^{-7}$; 2. hedeften ise 14.314.319,183 birimlik sapma gerçekleşmiştir.

(20)

Çok ürünli-iki amaçlı-risk öncelikli hedef programlama modeli (M3) için 1. ve 2. ürüne ait tedarikçilerin talep karşılama oranları Şekil 4’te, ArcGIS ile elde edilen dağıtım ağları ise Şekil 5 ve Şekil 6’da gösterilmektedir. Şekil 4 incelendiğinde 1. ürün için toplam talebin %81’inin rafinerilerden, %19’unun yurt dışı bağlantılı terminallerden;



Şekil 4. M3 için 1. ve 2. ürüne ait tedarikçi talep karşılama oranları (Supplier fill rates for product 1 and 2 of M3)



Şekil 5. M3 için 1. ürüne ait dağıtım ağı (Distribution network for product 1 of M3)



Şekil 6. M3 için 2. ürüne ait dağıtım ağı (Distribution network for product 2 of M3)

Tablo 2. Modellere ilişkin değerler (Values for the models)

Model	a	b	Maliyet (TL)	Risk
M1				
	<i>TMM (1)</i>	-	94.102.987	-
	<i>TMM (2)</i>	-	-	173.149
	<i>ÇMM (1)</i>	2	50.861.833	-
	<i>ÇMM (2)</i>	2	-	49.150
M2	2	16	50.861.833	100.127
M3	2	37	65.176.153	49.150

2. ürün için ise toplam talebin %77'sinin rafinerilerden kalan %23'lik kısmının yurt dışı bağlantılı terminallerden karşılandığı görülmektedir. Her iki ürün için de talebin çoğunlukla İzmit rafinerisinden karşılandığı ve en düşük tedarikçi arz yüzdesinin Batman rafinerisine ait olduğu görülmektedir.

M3 için 1. ürüne ait dağıtım ağı Şekil 5'te, 2. ürüne ait dağıtım ağı ise Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde, taşıma modu olarak sadece demiryolu ve karayolunun kullanıldığı, mevcut 2 transfer ünitesinin Ankara ve İstanbul'a yerleştirildiği ve ilave olarak 37 yeni transfer ünitesi açıldığı görülmektedir. M3 için 1. ürünün dağıtımına ilişkin detaylar EK B'de yer alan Tablo B1'de, 2. ürünün dağıtımına ilişkin detaylar ise Tablo B2'de sunulmaktadır [53].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tehlikeli maddeler kimyasal ve fiziksel karakteristikleri nedeni ile canlılara ve çevreye zarar verebilecek nitelikteki maddelerdir. Tehlikeli madde taşımacılığı karayolu, demiryolu, denizyolu gibi farklı taşıma modları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Demiryolu ve denizyolu taşımacılığının risk ve maliyet açısından üstünlükleri olmasına rağmen, ulaşım ağının geniş olması nedeniyle Türkiye'de yük taşımacılığının büyük kısmı karayolu ile gerçekleştirilmektedir. Tehlikeli madde taşımacılığının önemli bir bölümünü oluşturan akaryakıt taşımacılığının ele alındığı bu çalışmada, ülkemizdeki akaryakıt dağıtım faaliyetlerinin daha düşük maliyet ve daha az riskle gerçekleştirilebilmesi için uygun taşıma modunun ve dağıtım ağının belirlenmesi hedeflenmiş ve bu doğrultuda matematiksel modeller geliştirilmiştir. Önerilen modeller incelendiğinde birbiri ile çelişen iki amaca sahip olduğu görülmektedir. Bu iki amaçlı modellerde, riskte sağlanabilecek azalma maliyette önemli bir artış; maliyette sağlanabilecek azalma ise riskte önemli bir artış doğurmaktadır. Maliyette ve riskte meydana gelebilecek artışın kabul edilebilir olup olmadığı karar vericilere bağlıdır. Akaryakıt dağıtım şirketleri, kar amacı güden kuruluşlar oldukları için toplumsal riski göz önünde bulundurmalarının yanı sıra bu şirketlerin öncelikli amacı

maliyet minimizasyonu iken, toplum açısından öncelikli amaç ise risk minimizasyonu olmaktadır.

Geliştirilen modeller 8 Gb Ram ve 2.7 GHz işlemcili bilgisayarda GAMS 23.5.1/CPLEX 12.2 optimizasyon programı yardımıyla çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar ArcGIS yazılımında kullanılarak, Türkiye'nin akaryakıt dağıtım ağı oluşturulmuştur. Tablo 2'de önerilen modellere ilişkin değerler görülmektedir.

Tablo 2 incelendiğinde taşıma modu olarak sadece karayolunun kullanıldığı tek modlu çok ürünlü taşımacılık için minimum maliyet değerinin yaklaşık 94.102.987, minimum risk değerinin yaklaşık 173.149 olduğu görülmektedir. Karayolu, demiryolu ve denizyolunun kullanıldığı çok modlu çok ürünlü taşımacılık için minimum maliyet değeri 50.861.833; minimum risk değeri 49.150 olarak bulunmuştur. Çok modlu taşımacılıkta minimum maliyet durumunda mevcut 2 transfer ünitesine ilave 16 yeni transfer ünitesini daha açılmakta iken, minimum risk durumunda maliyetler göz ardı edildiği için mevcut transfer ünitelerine ilave olarak her ile yeni bir transfer ünitesi açılmaktadır. Maliyet hedefinin öncelikli olduğu durumlarda maliyet hedefinden sapma olmazken risk hedefinden pozitif yönde 50.977,162'lik sapma gerçekleşmiştir. Yani maliyet değeri 50.861.833 iken risk değeri 100.127 olarak elde edilmiştir. Bu durumda mevcut transfer ünitelerine ilave 16 yeni transfer ünitesi açılmış ve toplam 18 transfer ünitesi kullanılmıştır. Risk hedefinin öncelikli olduğu durumda ise risk hedefinden pozitif yönde $2,001 \times 10^{-7}$; maliyet hedefinden pozitif yönde 14.314.319'luk sapma olmuştur. Bu doğrultuda risk değeri yaklaşık 49.150,148; maliyet değeri ise 65.176.153 olarak bulunmuştur. Risk hedefinin öncelikli olduğu durumda mevcut 2 transfer ünitesine ilave 37 yeni transfer ünitesi açılarak toplam 39 transfer ünitesi ile çalışılmıştır.

Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi akaryakıt taşımacılığı faaliyetlerinin birden fazla taşıma modu kullanılarak gerçekleştirilmesi durumunda hem maliyet hem de risk açısından önemli oranda azalmalar görülmektedir. Bu durum, karma taşımacılığın taşıma modlarının avantajlarını kendi içinde entegre edip, dezavantajlarını mümkün

olduğunca saf dışı bırakan ve kendini sürekli yenileyen, gelişime açık bir taşımacılık sistemi olduğunu gözler önüne sermektedir. Ayrıca, sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde akaryakıt ürünlerinin en fazla İzmit rafinerisinden temin edildiğini söylemek mümkündür.

Ülkemizde son zamanlarda denizyolu taşımacılığında meydana gelen kazalar nedeniyle, demiryolu risk oranı denizyoluna göre daha düşük olarak hesaplanmıştır. Bu durum ise modellerde görüldüğü gibi riskin öncelikli olduğu durumda denizyolu yerine demiryolunun tercih edilmesini, mod değişimlerinde ve kısa mesafelerde kara yolunun tercih edilmesini sağlamıştır. Bu açıdan bakıldığında toplam ulaştırma riski daha düşük olacaktır. Ancak maliyet açısından denizyolu taşımacılığı demiryolu ve karayolu taşımacılığına göre daha avantajlı olduğu için maliyet öncelikli modelde denizyolu taşımacılığı tercih edilmiştir.

Literatürde tehlikeli maddelerin karma taşımacılığı üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, ağırlıklı olarak karayolu ve demiryolunun birlikte kullanıldığı modlar arası (intermodal) taşımacılığın ele alındığı görülmektedir. Ülkemiz tehlikeli maddelerin karayolu, demiryolu ve denizyolu ile taşımacılığı açısından elverişli bir pozisyona sahip olduğundan, bu çalışmada bahsi geçen üç ulaştırma modunun birlikte kullanıldığı çok modlu taşımacılığa yer verilmiştir. Tehlikeli madde taşımacılığı üzerine bu üç ulaştırma modunun birlikte kullanılması ile gerçekleştirilmiş bir çalışma mevcut olmadığından, çalışma bu yönüyle literatüre katkı sağlayacak durumdadır. İleriki çalışmalarda, literatürdeki diğer risk modelleri de kullanılarak sonuçların karşılaştırılması ve teknolojideki gelişmelere bağlı olarak probleme uygun ilave taşıma modlarının kullanılması ile yeni modellerin önerilmesi mümkündür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamındaki desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Jiang M.W., Ying M., Study on Route Selection for Hazardous Chemicals Transportation, *Procedia Engineering*, 71, 130-138, 2014.
2. Erkut E., On the credibility of the conditional risk model for routing hazardous materials, *Oper. Res. Lett.*, 18 (1), 49-52, 1995.
3. Karkazis J., Boffey T., Optimal location of routes for vehicles transporting hazardous materials. *Eur. J. Oper. Res.*, 86 (2), 201-215, 1995.
4. Erkut E. and Verter V., Modeling of transport risk for hazardous materials, *Operations Research*, 46 (5), 625-642, 1998.
5. Leonelli P., Bonvicini S., Spadoni G., Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology, *J. Hazard. Mater.*, 71 (1), 283-300., 2000.
6. Fabiano B., Curro F., Palazzi E., Pastorino R., A framework for risk assessment and decision-making strategies in dangerous good transportation, *J. Hazard. Mater.*, 93 (1), 1-15, 2002.
7. Zografos K.G., Androutsopoulos K.N., A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems, *Eur. J. Oper. Res.*, 152 (2), 507-519, 2004.
8. Dell'Olmo P., Gentili M., Scozzari A., On finding dissimilar Pareto-optimal paths, *Eur. J. Oper. Res.*, 162 (1), 70-82, 2005.
9. Erkut E., Alp O., Designing a road network for hazardous materials shipments, *Comput. Oper. Res.*, 34 (5), 1389-1405, 2007.
10. Sadjadi S.J., An application of efficient frontier in transportation of hazardous materials, *Computers & Industrial Engineering*, 53 (2), 357-360, 2007.
11. Carotenuto P., Giordani S., Ricciardelli S., Rismondo S., A tabu search approach for scheduling hazmat shipments, *Comput. Oper. Res.*, 34 (5), 1328-1350, 2007.
12. Brown D.F., Dunn W.E., Application of a quantitative risk assessment method to emergency response planning, *Comput. Oper. Res.*, 34 (5), 1243-1265, 2007.
13. Glickman T.S., Erkut E., Zschocke M.S., The cost and risk impacts of rerouting railroad shipments of hazardous materials, *Accident Analysis & Prevention*, 39 (5), 1015-1025, 2007.
14. Verma M., Verter V., Railroad transportation of dangerous goods: Population exposure to airborne toxins. *Comput. Oper. Res.*, 34 (5), 1287-1303, 2007.
15. Erkut E., Gzara F., Solving the hazmat transport network design problem. *Comput. Oper. Res.*, 35 (7), 2234-2247, 2008.
16. Androutsopoulos K.N., Zografos K.G., Solving the k-shortest path problem with time windows in a time varying network, *Operations Research Letters*, 36 (6), 692-695, 2008.
17. Dadkar Y., Jones D., Nozick L., Identifying geographically diverse routes for the transportation of hazardous materials, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44 (3), 333-349, 2008.
18. Bonvicini S., Spadoni G., A hazmat multi-commodity routing model satisfying risk criteria: a case study, *J. Loss Prevent. Proc.*, 21 (4), 345-358, 2008.
19. Verma M., A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14 (5), 300-308, 2009.
20. Bianco L., Caramia M., Giordani S., A bilevel flow model for hazmat transportation network design, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17 (2), 175-196, 2009.
21. Androutsopoulos K.N., Zografos K.G., Solving the bicriterion routing and scheduling problem for hazardous materials distribution, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18 (5), 713-726, 2010.

22. Verma M., Railroad transportation of dangerous goods: A conditional exposure approach to minimize transport risk, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19 (5), 790-802, 2011.
23. Ma H., Cheang B., Lim A., Zhang L., Zhu Y., An investigation into the vehicle routing problem with time windows and link capacity constraints, *Omega*, 40 (3), 336-347, 2012.
24. Samanlıoğlu F., A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem, *Eur. J. Oper. Res.*, 226 (2), 332-340, 2013.
25. Pradhananga R., Taniguchi E., Yamada T., and Qureshi A. G., Bi-objective decision support system for routing and scheduling of hazardous materials, *Socio-Econ. Plan. Sci.*, 48 (2), 135-148, 2014.
26. Saat M.R., Werth C.J., Schaeffer D., Yoon H., Barkan C.P., Environmental risk analysis of hazardous material rail transportation, *J. Hazard. Mater.*, 264, 560-569, 2014.
27. Bronfman A., Marianov V., Paredes-Belmar G., Lüer-Villagra A., The maximin HAZMAT routing problem, *Eur. J. Oper. Res.*, 241 (1), 15-27, 2015.
28. Siddiqui A.W., Verma M., A bi-objective approach to routing and scheduling maritime transportation of crude oil, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, 65-78, 2015.
29. Karabulut S., Öcalır Akünal E.V., Geographical information system based environmental risk analysis for road transportation of hazmats, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (3), 351-359, 2015.
30. Romero N., Nozick L.K., Xu N., Hazmat facility location and routing analysis with explicit consideration of equity using the Gini coefficient, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 165-181, 2016.
31. Pamučar D., Ljubojević S., Kostadinović D., Đorović B., Cost and risk aggregation in multi-objective route planning for hazardous materials transportation- A neuro-fuzzy and artificial bee colony approach, *Expert Syst. Appl.*, 65, 1-15, 2016.
32. Landucci G., Antonioni G., Tugnoli A., Bonvicini S., Molag M., Cozzani V., HazMat transportation risk assessment: A revisit in the perspective of the Viareggio LPG accident, *J. Loss Prevent. Proc.*, 49, 36-46, 2017.
33. Torretta V., Rada E.C., Schiavon M., Viotti P., Decision support systems for assessing risks involved in transporting hazardous materials: a review, *Saf. Sci.*, 92, 1-9, 2017.
34. Taslimi M., Batt R., Kwon, C., A comprehensive modeling framework for hazmat network design, hazmat response team location, and equity of risk, *Comput. Oper. Res.*, 79, 119-130, 2017.
35. Kumar A., Roy D., Verter V., Sharma D., Integrated fleet mix and routing decision for hazmat transportation: A developing country perspective, *Eur. J. Oper. Res.*, 264, 225-238, 2018.
36. Bubbico R., Di Cave S., Mazzarotta B., Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a GIS approach, *J. Loss Prevent. Proc.*, 17 (6), 483-488, 2004.
37. Bubbico R., Maschio G., Mazzarotta B., Milazzo M.F., Parisi E., Risk management of road and rail transport of hazardous materials in Sicily, *J. Loss Prevent. Proc.*, 19 (1), 32-38, 2006.
38. Verma M., Verter V., A lead-time based approach for planning rail-truck intermodal transportation of dangerous goods, *Eur. J. Oper. Res.*, 202 (3), 696-706, 2010.
39. Reniers G. L., De Jongh K., Gorrens B., Lauwers D., Van Leest M., Witlox F., Transportation Risk ANalysis tool for hazardous Substances (TRANS)-A user-friendly, semi-quantitative multi-mode hazmat transport route safety risk estimation methodology for Flanders, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15 (8), 489-496, 2010.
40. Elaldı P., Intermodal transportation of hazardous materials with supplier selection: Application in Turkey, Master's Thesis, The Graduate School of Engineering and Science of Bilkent University, Ankara, 2011.
41. Xie Y., Lu W., Wang W., Quadrioglio L., A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation, *Journal of Hazardous Materials*, 227, 135-141, 2012.
42. Verma M., Verter V., Zufferey N., A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48 (1), 132-149, 2012.
43. Reniers G., Dullaert W., A method to assess multimodal Hazmat transport security vulnerabilities: Hazmat transport SVA. *Transport Policy*, 28, 103-113, 2013.
44. Jiang Y., Zhang X., Rong Y., Zhang Z., A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation based on multi-commodity flow model, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 138, 791-799, 2014.
45. Küçük Ö., Tehlikeli Maddelerin Taşınmasında Çok Tipli Bir Model Önerisi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Kara Harp Okulu, Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
46. Assadipour G., Ke G.Y., Verma M., Planning and managing intermodal transportation of hazardous materials with capacity selection and congestion, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 76, 45-57, 2015.
47. Assadipour G., Ke G.Y., Verma M., A toll-based bi-level programming approach to managing hazardous materials shipments over an intermodal transportation network, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 208-221, 2016.
48. Vaezi A., Verma M., Railroad transportation of crude oil in Canada: Developing long-term forecasts, and evaluating the impact of proposed pipeline projects, *Journal of Transport Geography*, 69, 98-111, 2018.

49. Yavuz S., Akaryakıt lojistiğinde demiryolu bir seçenek değil zorunluluk. <http://www.lojistikhatti.com/haber/2019/10/akaryakit-lojistikinde-demiryolu-bir-secenek-degil-zorunluluk>. Yayın tarihi Ekim 22, 2019. Erişim tarihi: Mart 15, 2020.
50. TCDD, Lojistik Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2017.
51. Siddiqui A., Verma M., An expected consequence approach to route choice in the maritime transportation of crude oil, *Risk Analysis*, 33 (11), 2041-2055, 2013.
52. T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara, 2017.
53. EK, https://personel.omu.edu.tr/tr/asli.calis/dosyalar_



Empirical modelling of cutting forces by using build-up factor and cutting parameters in turning operation

Bahattin Yılmaz*^{ID}, Abdulkadir Güllü^{ID}

Department of Manufacturing Engineering, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey

Highlights:

- Modeling of cutting forces by curve fitting method
- Effects of cutting parameters on built-up factor
- The relationship between cutting forces and built-up factor

Keywords:

- Cutting forces
- Mathematical model
- Cutting parameters
- Build-up factor
- AISI 1050

Article Info:

Research Article
Received: 08.03.2019
Accepted: 13.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.537386

Correspondence:

Author: Bahattin Yılmaz
e-mail:
bahattinyilmaz@gazi.edu.tr
phone: +90 312 202 8676

Graphical/Tabular Abstract

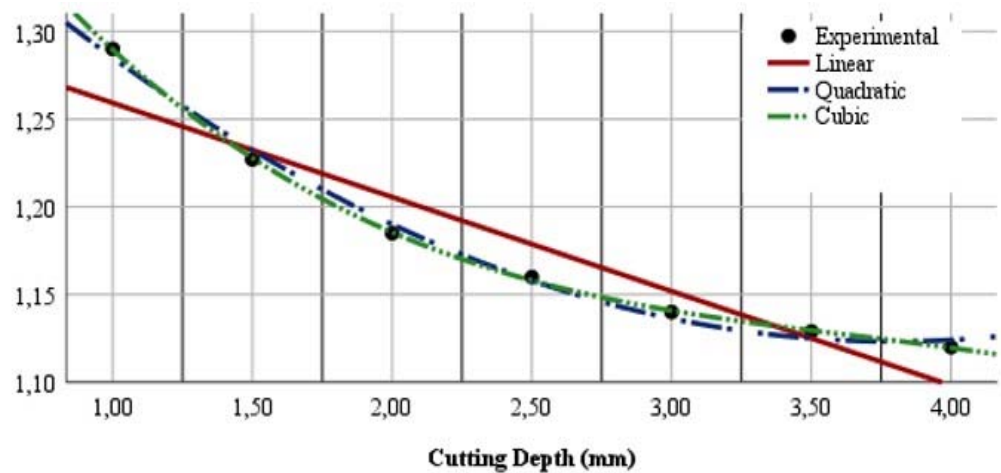


Figure A. Three different equation types used in curve fitting studies

Purpose: The purpose of this study is to determine the effects of cutting parameters cutting forces and built-up factor during turning operation and to model these effects by using three different equation types. It is aimed to model by establishing a relationship between cutting force and built-up factor with new concepts derived. It is aimed to develop a different approach apart from the cutting parameters in modeling of forces and built-up factor with the models created.

Theory and Methods:

In the scope of this research, statistical and experimental studies were used. As a result of turning tests performed by using different cutting parameters, the cutting forces were measured and the data were collected. These data were input values for different statistical analyzes and curve fitting studies. As a result of statistical studies, the modeling of cutting forces was carried out by using different equation types.

Results:

The most effective cutting parameters for cutting forces and built-up factor and the change of forces and built-up factor depending on these parameters were determined. Curve fitting studies were performed by using three different types of equations to model the cutting forces. Equations are derived by determining the correlation coefficient for the types of equations. New concepts based on cutting forces and built-up factors were developed and the forces were modeled on the built-up factor. Control experiments were performed to verify the accuracy of their models.

Conclusion:

It was determined that the most effective parameter on the cutting forces was the depth of cut and the feed rate, and the increase of these parameters increased the forces. It has been determined that the most effective parameters for the built-up factor are the depth of cut and the feed rate, increasing the built-up factor with increasing feed speed, and the increasing depth of cut decreases the built-up factor. The developed models showed acceptable results.



Tornalama operasyonunda yığılma faktörü ve kesme parametreleri kullanılarak kesme kuvvetlerinin ampirik modellenmesi

Bahattin Yılmaz*^{ORCID}, Abdulkadir Güllü^{ORCID}

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Eğri uydurma yöntemi ile kesme kuvvetlerinin modellenmesi
- Kesme parametrelerinin yığılma faktörü üzerindeki etkileri
- Kesme kuvvetleri ve yığılma faktörü arasındaki ilişki

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.03.2019

Kabul: 13.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.537386

Anahtar Kelimeler:

Kesme kuvvetleri,
matematiksel model,
kesme parametreleri,
yığılma Faktörü,
AISI 1050

ÖZET

Talaşlı imalat diğer üretim yöntemlerine göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Talaşlı imalat operasyonlarında proses verimliliğini belirleyen parametrelerin başında kesme kuvvetleri gelmektedir. Kesme kuvvetleri operasyon sırasında tüketilen enerjinin büyüklüğü hakkında bilgi verir. Belirli şartların sağlanmasıyla düşük kesme kuvvetlerinin oluşturulması maliyetleri düşürür. Bu ise, kesme parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesine bağlıdır. Bu çalışmada; AISI 1050 çeliği kullanılarak üç farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinde deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda, kesme kuvvetleri için en etkili kesme parametreleri belirlenmiştir. Yığılma faktörü incelenerek yeni kavramlar tanımlanmıştır. Tanımlanan bu kavramlar ve işleme parametreleri ile kesme kuvvetleri arasındaki ilişki, oluşturulan matematiksel modellerle ifade edilmiştir. Bu çalışma ile geliştirilen matematiksel modeller sayesinde kuvvet oluşumu parametreler üzerinden açıklanmış, ideal kuvvet değerleri için uygun işleme parametrelerinin daha kolay belirlenmesi sağlanmıştır.

Empirical modelling of cutting forces by using build-up factor and cutting parameters in turning operation

H I G H L I G H T S

- Modeling of cutting forces by curve fitting method
- Effects of cutting parameters on built-up factor
- The relationship between cutting forces and built-up factor

Article Info

Research Article

Received: 08.03.2019

Accepted: 13.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.537386

Keywords:

Cutting forces,
mathematical model,
cutting parameters,
build-up factor,
AISI 1050

ABSTRACT

Metal cutting is widely used than other production methods. Cutting forces are the leading parameters that determine process efficiency in machining operations. Cutting forces inform us about the magnitude of energy consumption during the operation. By providing certain conditions, the creation of low cutting forces reduces the costs. This is due to the accurate determination of the cutting parameters. In this study, the experiments were performed with three different cutting speeds, three different feed rates and three different cutting depths by using of AISI 1050. As a result of the experiments, the most effective cutting parameters were determined in order to keep under control of cutting forces values and get the best results. New concepts are defined by analyzing the build-up factor. These defined concepts and the relationship between machining parameters and cutting forces are expressed by mathematical models. Thanks to the mathematical models developed with this study, the force formation is explained through parameters and the appropriate processing parameters are provided for the ideal force values.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: bahattinyilmaz@gazi.edu.tr, agullu@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 202 8676

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalat operasyonlarından yüksek verimin alınabilmesi; iş parçasının özelliklerinin iyi bilinmesi ve diğer girdi parametrelerinin iyi seçilmesi ile mümkündür. İş parçası ve diğer girdi etkileşimleri “İşlenebilirlik” başlığı altında değerlendirilebilir. İşlenebilirlik, bir malzemenin uygun kesici ile ve doğru kesme koşullarında işlenmesinin göreceli kolaylığını gösterir. İşlenebilirliği değerlendirmek için kullanılan kriterlerden biri de kesme kuvvetleridir [1]. Talaş kaldırma işleminin temelini yüksek gerinme hızları ve biçimlendirme sırasında sıcaklık oluşumuna sebep olan plastik deformasyon oluşturur [2]. Kesme düzleminde gerçekleşen plastik deformasyon kesme kuvvetlerini ve harcanan gücü etkilediği gibi talaş geometrisini de önemli ölçüde etkilemektedir. Plastik deformasyonun bir sonucu olarak çıkan toplam talaş boyu (w') teorik kesme uzunluğundan (w) daha kısa olmaktadır. Bu durum, talaş akış hızının kesme hızından daha küçük olmasına neden olmaktadır [3]. Söz konusu boyutsal farklılık deforme olmuş talaş kalınlığının kesme derinliğinden daha büyük gerçekleşmesini sağlamaktadır. Talaş kalınlığı (a_2) ve kesme derinliği (a_1) oranı ile yığılma faktörü (λ) tanımlanmaktadır [4]. Yığılma faktörü; tanımı değişse de çeşitli kaynaklarda farklı isimler (talaş oranı, talaş kalınlık oranı, kesme oranı vb.) ile ifade edilmektedir [1, 3, 4]. Yığılma faktörü kesici takım ve iş parçası özellikleri ile yakından ilgilidir. Talaş yapısının konu alındığı çalışmalar içeriğinde yığılma faktörüne yer verilmiştir [5, 6]. Yığılma faktörü kavramı kayma düzlem çizgisi ve takım-talaş temas mesafesinin tahmini için geliştirilen analitik çalışmalarda da kullanılmıştır [7-10]. Yığılma faktörü (a_2/a_1) ve a_1/L oranı arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu, a_1/L oranı arttıkça a_2 değerinin belirli bir seviyeye kadar azaldığı bildirilmiştir. Bu çalışma kapsamında takım-talaş mesafesi L ile sembolize edilmiştir [10-12]. Deformasyonun bir sonucu olarak açığa çıkan yığılma faktörü ile deformasyonu oluşturan kesme kuvvetleri arasında bir etkileşim vardır. Bu çalışmada bu etkileşimin ortaya konulması amaçlanmıştır.

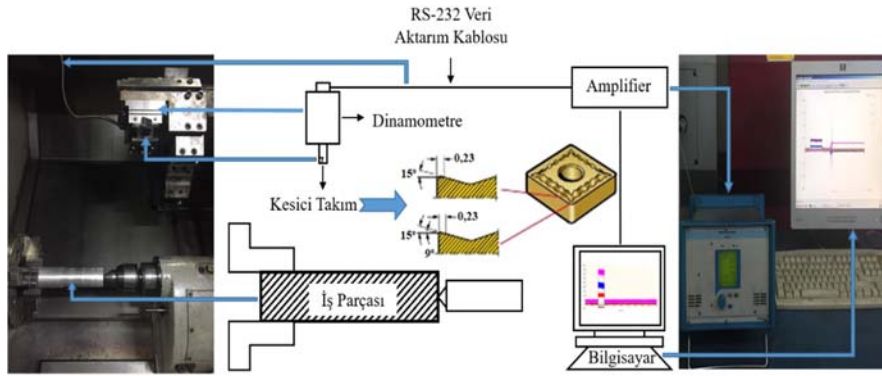
Talaş kaldırma işlemlerinde talaşı iş parçasından ayırmak için büyük bir güç gerekir. Talaş kaldırmak için harcanan bu güç ile kesme kuvvetleri arasında bir ilişki vardır [4]. Kesme sırasında oluşan kuvvetler, önemli maliyet kalemlerinden biri olan güç tüketimi hakkında ipuçları vermektedir. Kesme kuvvetleri güç gereksinimi yanında, ısı oluşumu, takım ömrü, işlenen yüzeyin kalitesi ve iş parçası boyutları üzerinde de önemli etkiye sahiptir [13]. Kesme kuvvetlerinin maliyetler açısından büyük önem taşıması, kuvvet oluşumunun modellenmesini gerekli kılmaktadır. Kesme kuvvetlerine birden çok parametre etki etmektedir. Kesme kuvvetleri; takım tezgâhı rijitliği, kesme parametreleri, kesici takım geometrisi, iş parçası malzemesi gibi birçok parametreye bağlı olarak değişiklik gösterir [13]. Kesme kuvvetlerini etkileyen bu kadar çok değişkenin olması araştırmacıları kuvvet oluşumunun modellenmesi konusunda çalışmaya teşvik etmiştir [14]. Matematiksel model, elde edilen verileri kullanarak sistemin tamamını temsil amacıyla oluşturulan sabit katsayı ve değişken

parametre ilişkisini ifade eden sayısal bir yöntemdir. Deneysel verilere dayanarak geliştirilen model denenmeyen ya da önceden tespiti mümkün olmayan verilerin tespitini mümkün kılmaktadır. Eğri benzetme algoritmaları kısıtlı sayıda elde edilen verilerden yola çıkarak en uygun matematiksel modeli oluşturmada kullanılır [15]. Kesme kuvvetlerinin modellenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan birinde; farklı kesici takımlar, kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliklerinin kuvvetler üzerindeki etkisi X40CrMoV5-1 numuneler üzerinde tornalama yapılarak incelenmiştir. Kesme kuvvetlerinin modellenmesinde DEFORM 3D ve varyans analiz kullanılmıştır. Deneysel sonuçta kuvvetler için en etkili parametreler belirlenmiştir [16]. AISI 1050 malzeme kullanılarak yapılan çalışmada ise kesme kuvvetlerinin değişimi kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve talaş kırıcı geometrisine göre değerlendirilmiştir. Regresyon analizi yardımıyla geliştirilen model ile deneysel sonuçların uyumlu bir dağılım sergilediği görülmüştür [2]. Kesme kuvvetlerinin modellenmesini hedefleyen bir diğer çalışmada kaplamalı- kaplamsız takımlar ve farklı kesme parametreleri kullanılmıştır. Kuvvet oluşumu için en etkili değişkenler ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesici takım cinsi olarak belirtilmiştir [17]. Alüminyum malzemenin tornalanması ile gerçekleştirilen deneysel çalışmada ise kesme parametrelerinin ve iş parçası özelliklerinin kuvvet ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkileri incelenmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki matematiksel model ile ifade edilmiş ve operasyon verimliliği artırılmıştır [18]. Bu çalışmada farklı kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Eğri benzetim algoritmaları ile kesme kuvvetlerinin önceden tahminini mümkün kılan matematiksel modellerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında imalat sektöründe önemli bir yeri olan orta karbonlu çelik AISI 1050 kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, modeller üzerinden hesaplanan değerler ve elde edilen ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuçların doğruluğu için kontrol deneyleri yapılmış bu deneyler üzerinden de hesaplanan ve ölçülen değerler kıyaslanmıştır.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Kullanılan Tezgâh ve Cihazlar (Machine Tools and Devices)

Deneysel çalışmalar kapsamında kesme kuvvetlerinin ölçümü “KISTLER 9257A” tipi piezoelektrik dinamometre ile gerçekleştirilmiştir. KISTLER Type 5019 Amplifier ile elde edilen veriler bilgisayara aktarılmış ve Dyno Ware programı ile zaman-kuvvet grafikleri elde edilmiştir. Deneyler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Deneylerde Johnford TC35 marka sanayi tipi CNC torna tezgâhı kullanılmıştır. Kullanılan tezgâhın gücü 10 kW, en yüksek devir sayısı ise 3600 rev/min dir. Deneylerde, Sandvik firması tarafından üretilen SNMG 120408-QM kodlu kesici takım kullanılmıştır. Yığılma faktörünün belirlenmesi sırasında talaş kalınlıkları 0,01 mm hassasiyetindeki dijital kumpas ile ölçülmüştür. Şekil 1’de deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental setup)

Tablo 1. AISI 1050 Malzemenin kimyasal karakterizasyon (Chemical characterization of AISI 1050 material)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Fe
0,43	0,21	0,73	0,019	0,039	0,0077	0,007	0,009	0,011	0,005	0,297	98,06

2.2. İş Parçası Malzeme Özellikleri (Workpiece Material Properties)

Deneysel çalışmada endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılan AISI 1050 çeliği kullanılmıştır. İş parçası ham ölçüleri Ø100x400 mm olarak belirlenmiştir. Deneyler belirlenen parametre kombinasyonları ile sabit 15 mm kesme uzunluğunda gerçekleştirilmiş, oluşan ve ölçülen kuvvet değerleri kaydedilmiştir. İş parçasının kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir.

2.3. Kesme Parametreleri (Cutting Parameters)

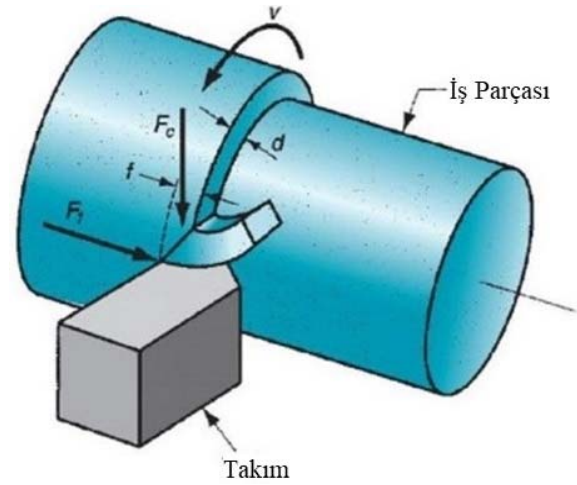
Değişen kesme parametrelerine bağlı olarak “Kesme kuvvetlerinin” değişimini ortaya koyabilmek için üç farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği kullanılmıştır. Tüm deneysel parametreler literatür ve kesici takım katalogları baz alınarak belirlenmiştir. Belirli oranlarda artırılan kesme parametrelerine karşılık oluşan kuvvet değişiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Üç değişken parametrenin her biri için üç seviye belirlenerek Taguchi L9 deney tasarım modeline uygun bir deney sistemi kurulmuş ve Tablo 2’de sunulmuştur. Yapılan istatistiksel analizler ile kuvvetler açısından en etkili parametreler Minitab programı ile belirlenmiştir. En etkili değişkenlere dört seviye daha eklenerek yapılan deneyler ile eğri benzetme operasyonları ise SPSS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi (The Investigation of Cutting Forces)

Bu çalışmada güç sarfıyatı açısından büyük öneme sahip olan kesme kuvvetleri için en önemli kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Etkili parametreler kullanılarak kuvvetlerin önceden tahminine imkân sunan matematiksel modeller geliştirilmiştir. Kesme kuvvetleri, esas kesme

kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal (pasif) kuvvetin (F_r) bileşikleri alınarak tek bir kuvvet (F_k) olarak ifade edilmiştir. Kesme kuvvetlerinin oluşumu Şekil 2’de sunulmuştur. Bileşke kuvvetin (F_k) hesaplanmasında Eş. 1 kullanılmıştır [19].

Şekil 2. Bileşke kesme kuvveti (F_k) şematik gösterimi (The schematic illustration of the resultant cutting force (F_k)) [1]

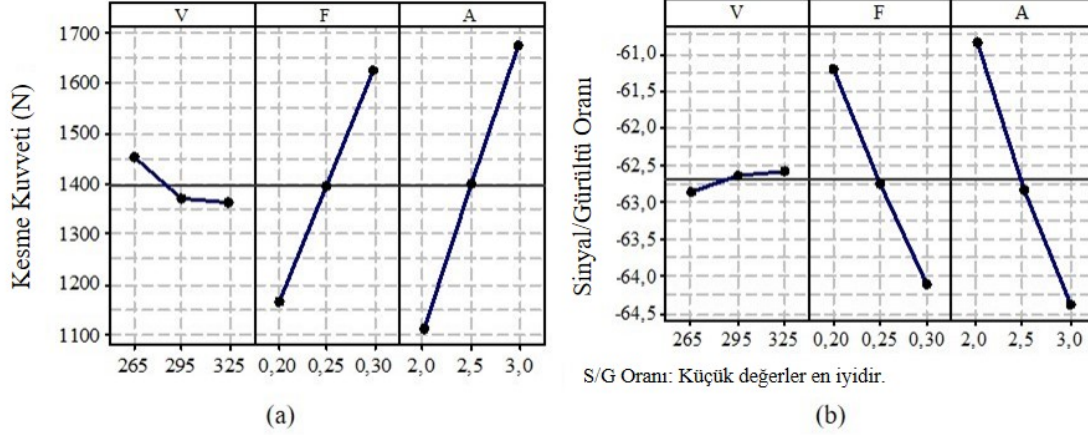
$$F_k = \sqrt{(F_c^2 + F_f^2 + F_r^2)} \quad (1)$$

Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen veriler ve uygulanan istatistiksel analizler sonucunda Şekil 3a ve Şekil 3b grafikleri çizilmiştir.

Şekil 3a değerlendirildiğinde kesme kuvvetleri için en etkili parametrenin ilerleme hızı ve kesme derinliği olduğu belirlenmiştir [20]. Kesme hızının bu iki parametreye göre etkisinin çok düşük olduğu grafikte görülmektedir. Kesme kuvvetleri üzerinde %58 oran ile en etkili parametre kesme derinliği olmuş, %39 ‘luk bir oran ile ilerleme hızı ikinci

Tablo 2. Deneysel parametreleri (Experiment parameters)

Deneysel No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kesme Hızı (V)	265	265	265	295	295	295	325	325	325
İlerleme Hızı (F)	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30
Kesme Derinliği (A)	2,0	2,5	3,0	2,5	3,0	2,0	3,0	2,0	2,5

**Şekil 3.** Kesme kuvveti değerleri için ortalama etki (a) ve sinyal/gürültü (b) grafikleri (Mean effect (a) and signal/noise (b) graphs for cutting force values)

etkili parametre olarak belirlenmiştir. Kesme hızının etkisi ise %1 gibi çok küçük bir değere sahiptir [21]. Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan malzeme ve kesme koşulları göz önüne alınarak en düşük kesme kuvvetleri için en ideal kesme parametrelerinin kesme hızı 325 m/min, ilerleme hızı 0,20 mm/rev ve kesme derinliği 2,0 mm olduğu Şekil 3b ile belirlenmiştir. İdeal kesme koşulları ve etkili parametrelerin uyum içinde olduğu görülmüştür.

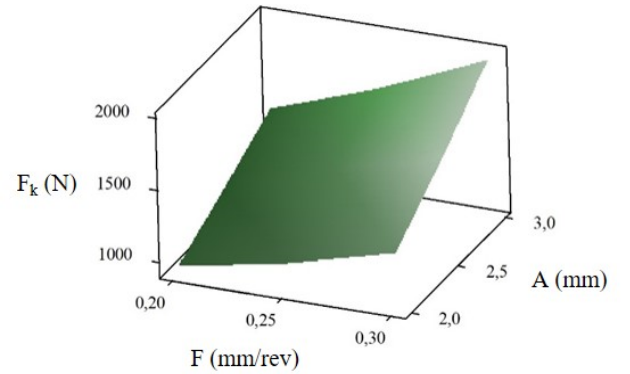
$$F_k = -732,094 - 1,4665V + 4617,7F_i + 562,37A \quad (2)$$

Yapılan regresyon analizi sonucunda Eş.2 geliştirilmiştir. Geliştirilen bu matematiksel modelin verileri ifade etmekteki temsil oranı $R^2=0,9935$ olarak hesaplanmıştır. Denklemi oluşturan değişkenlerin katsayıları değerlendirildiğinde en etkili parametreler olan ilerleme hızı ve kesme derinliğinin katsayılarının çok yüksek olduğu görülmektedir.

F_k Artan kesme derinliği ve ilerleme hızı ile kesme kuvvetlerinin arttığı Şekil 4'de sunulan üç boyutlu grafikte açık bir şekilde görülmektedir. Artan ilerleme hızı ve kesme derinliği talaş kesit alanını artıracığından kesme kuvvetleri de artacaktır [21, 23]. Artan kesme hızları ile kesme kuvvetlerinin ise nispeten düştüğü veriler incelendiğinde görülmektedir [24]. Bu durum ise artan kesme hızı ile kesme bölgesinde artan sıcaklığa ve kolay deformasyona bağlanmıştır [25, 26].

Kesme kuvvetlerinin oluşumunda en etkili parametreler olan kesme derinliği ve ilerleme hızının etkilerini tam anlamıyla ortaya koyabilmek ve matematiksel olarak modelleyebilmek için her iki parametre de, ilave dört seviye ile deneylere tabi tutulmuştur. Kesme derinliğinin kesme kuvvetlerinin

oluşumunda etkisinin belirlenebilmesi için 325 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerleme hızı parametreleri eşliğinde 7 farklı kesme derinliği (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 ve 4,0 mm) kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre kesme derinliğine bağlı kesme kuvveti değişimi ve geliştirilen denklem tiplerine ait eğriler Şekil 5'de ifade edilmiştir.

**Şekil 4.** Kesme kuvvetinin kesme parametrelerine göre değişimi (The cutting force changes according to the cutting parameters)

Deney sonuçları; artan kesme derinliği ile kesme kuvvetlerinin de arttığını ortaya koymuştur. Bu eğilimi genelleştirebilmek ve matematiksel olarak ifade edebilmek için eğri benzetme çalışmaları yapılmıştır. Eğriyi en iyi şekilde ifade eden üç farklı (Lineer, kuadratik ve kübik) denklem elde edilmiştir. Kesme kuvvetleri üzerindeki kesme derinliğinin etkisini hesaplamak için üç farklı denklem tipi kullanılmıştır. Tablo 3'de üç denklem tipi içinde türetilen

denklemlere ait katsayılar sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda üç denklem tipinin de deneysel sonuçları ifade etme konusunda çok başarılı olduğu, hesaplanan sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin çok güçlü olduğu $R^2 = 1$ görülmüştür.

Tablo 3’de verilen denklem parametreleri ışığında;

Lineer Denklem:

$$F_k = 430,827A + 85,220 \quad (3)$$

Kuadratik Denklem:

$$F_k = -4,203A^2 + 451,843A + 63,153 \quad (4)$$

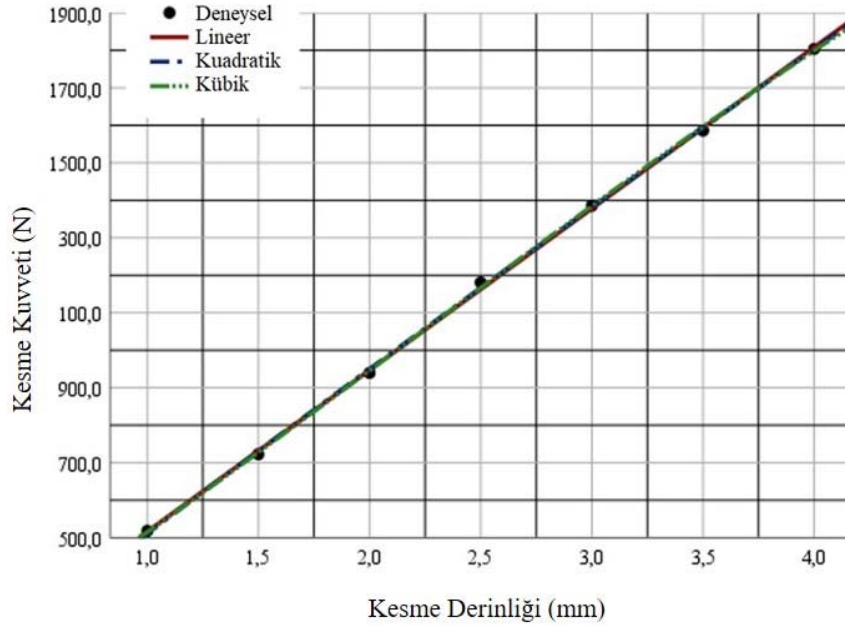
Kübik Denklem:

$$F_k = -5,177A^3 + 34,627A^2 + 363,828A + 121,398 \quad (5)$$

olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu denklemler için kontrol deneyleri yapılmış denklemler ile hesaplanan ve ölçülen kuvvet değerleri Tablo 4’de kıyaslanmıştır.

Kontrol deneyleri için sabit şartlarda 3,3 ve 2,3 mm kesme derinlikleri kullanılmıştır. Bu değerler eşliğinde kuvvetler sırası ile 1501,53 ve 1089,25 N olarak ölçülmüştür. Farklı denklem değerleri ve hesaplanan kesme kuvvetleri ile ölçülen kuvvet değerleri arasında %1 den daha düşük bir fark mevcuttur. Bu durum geliştirilen modellerin başarılı bir şekilde kuvvet oluşumunu ifade ettiğini göstermektedir. İlerleme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini görebilmek için 325 m/min kesme hızı ve 2 mm kesme derinliği değerleri ile 7 farklı ilerleme hızı (0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 ve 0,40 mm/rev) kullanılarak deneyler yapılmıştır. Şekil 6’ da ilerleme hızı ile kuvvet değişimi ve geliştirilen denklem tiplerine ait eğriler sunulmuştur.

Deneysel bulgular artan ilerleme ile kuvvetlerin de arttığını ortaya koymuştur. İlerleme hızı ve kesme kuvvetleri



Şekil 5. Kesme derinliğine bağlı kesme kuvveti değişimi ve geliştirilen denklem tiplerine ait eğriler
(Curves of developed equation types and the change of cutting force related to the depth of cut)

Tablo 3. Kesme derinliği-Kesme kuvveti ilişkisi için geliştirilen denklem tiplerine ait denklem parametreleri
(Equation parameters of equation types developed for cutting depth-shear force relationship)

Denklem Tipi	Regresyon İlişkisi R^2	Denklem Parametreleri			
		Sabit	b1	b2	b3
Lineer	1,000	85,220	430,827	-	-
Kuadratik	1,000	63,153	451,843	-4,203	-
Kübik	1,000	121,398	363,828	34,627	-5,177

Tablo 4. Kontrol deneyleri sonucunda hesaplanan ve ölçülen kuvvet (N) değerleri
(Calculated and measured force (N) values as a result of control experiments)

Kontrol Değeri	Lineer Denk.	Kuadratik Denk.	Kübik Denk.	Ölçülen Kuvvet Değeri
A: 3,3mm	1506,9491	1508,46423	1513,072581	1501,533454
A: 2,3mm	1076,1221	1080,15803	1078,390671	1089,249242

arasındaki ilişki için üç farklı matematiksel model geliştirilmiş ve Tablo 5’de denklem katsayıları verilmiştir.

Yapılan eğri benzetme çalışmaları sonucunda geliştirilen üç modelin de eğilimi başarılı bir şekilde ifade ettiği görülmüştür. Geliştirilen eğriler ve deneysel veriler arasındaki temsil ilişkisi her üç denklem sistemi için de $R^2=0,99$ un üzerindedir. Kübik denklem sistemi $R^2=0,999$ ile en yüksek temsil oranına sahiptir.

Tablo 5’de verilen denklem parametreleri ışığında;

Lineer Denklem:

$$F_k = 3941,637F + 160,481 \quad (6)$$

Kuadratik Denklem:

$$F_k = 2397,520F^2 + 2742,877F + 286,351 \quad (7)$$

Kübik Denklem:

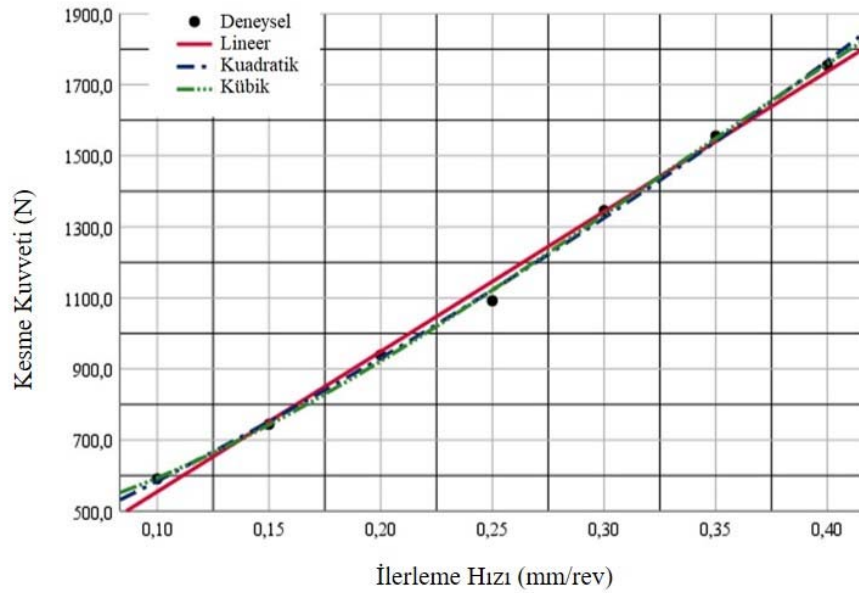
$$F_k = -11929,012F^3 + 11344,279F^2 + 714,945F + 420,553 \quad (8)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemler için kontrol deneyleri yapılmış denklemler ile hesaplanan ve ölçülen kuvvetler Tablo 6’da karşılaştırılmıştır.

Kontrol deneyleri için 0,125 ve 0,33 mm/rev ilerleme hızları kullanılmıştır. Bu değişkenler ile yapılan deneylerde sırası ile 674,68 ve 1459,69 N kuvvetler ölçülmüştür. Geliştirilen modeller burada da kabul edilebilir sonuçlar ortaya koymuştur.

3.2. Yığılma Faktörünün İncelenmesi (The Investigation of Build-up Factor)

Kesme operasyonu sırasında gerçekleşen plastik deformasyonun bir sonucu olarak yığılma faktörü kavramı



Şekil 6. İlerleme hızına bağlı kesme kuvveti değişimi ve geliştirilen denklem tiplerine ait eğrileri
(Curves of developed equation types and the change of cutting force related to the feed rate)

Tablo 5. İlerleme hızı-Kesme Kuvveti ilişkisi için geliştirilen denklem parametreleri
(Developed equation parameters for feed rate - cutting force relation)

Denklem Tipi	Regresyon ilişkisi R^2	Denklem Parametreleri			
		Sabit	b1	b2	b3
Lineer	0,996	160,481	3941,637	-	-
Kuadratik	0,998	286,351	2742,877	2397,520	-
Kübik	0,999	420,553	714,945	11344,279	-11929,012

Tablo 6. Kontrol deneyleri sonucunda hesaplanan ve ölçülen kuvvet (N) değerleri
(Calculated and measured force (N) values as a result of control experiments)

Kontrol Değeri	Lineer Denk.	Kuadratik Denk.	Kübik Denk.	Ölçülen Kuvvet Değeri
F: 0,125 mm/rev	653,185625	666,671875	663,8766328	674,6814597
F: 0,330 mm/rev	1461,22121	1452,590338	1463,183929	1459,687685

ortaya çıkmıştır. Yığılma faktörü; deforme olmuş talaş kalınlığı ile deforme olmamış talaş kalınlığının (kesme derinliğinin) oranı ile tanımlanmaktadır [3]. Yığılma faktörü için en etkili parametreler Şekil 7’de incelenmiştir.

Yapılan araştırmalar neticesinde yığılma faktörü için ilerleme hızı ve kesme derinliğinin en etkili iki parametre olduğu görülmüştür. Yığılma faktörü için en etkili parametre %53,5 ile kesme derinliği olurken ilerleme hızı %43,5 ile ikinci sırayı almıştır. Kesme hızı etkisinin bu iki parametreye nazaran çok çok düşük olduğu (%1) görülmüştür. Kesme hızındaki artış ile yığılma faktörü bir miktar azalmıştır. Kesme hızındaki artış ile ilerleme hızının yığılma faktörü üzerindeki etkisinin azaldığı bildirilmiştir [5]. Artan kesme hızı ile birlikte plastik deformasyon için gereken kuvvetin uygulama süresi de kısalmaktadır. Bu kısalmamanın yığılma faktöründeki azalmayı da etkilediği düşünülmektedir.

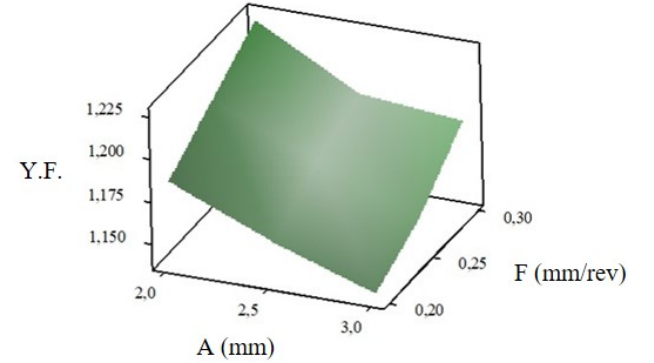
Kesme derinliği ve ilerleme hızı parametrelerinin yığılma faktörüne etkisi Şekil 8’de gösterilmiştir. Artan ilerleme hızı ile plastik deformasyon için uygulanan kuvvetin arttığı, bu durumun yığılma faktörünü de artırdığı görülmüştür. Yığılma faktörü artan kesme derinliği ile azalmaktadır [6]. Artan kesme derinliği ile deformasyona zorlanan alanın arttığı bu durumun daha yüksek deformasyon sertleşmesine neden olduğu ve sonuç olarak yığılma faktörünün artan kesme derinliği ile azaldığı belirlenmiştir.

Yapılan regresyon analizi sonucunda Eş. 9 geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modelin verileri ifade etmedeki temsil oranı $R^2=0,977$ olarak hesaplanmıştır. Denklemi oluşturan değişkenlerin katsayıları değerlendirildiğinde en etkili parametreler olan ilerleme hızı ve kesme derinliğinin katsayılarının çok yüksek olduğu görülmektedir.

$$\lambda = 1,21602 - 8,14815e-005 V + 0,395556 F - 0,0438889 A \quad (9)$$

Değişen ilerleme hızı ve kesme derinliğinin yığılma faktörü üzerindeki etkisini belirgin bir şekilde ortaya koyabilmek

için ilave dört parametre ile değişimler gözlemlenmiş ve Şekil 9 oluşturulmuştur.



Şekil 8. Yığılma faktörünün kesme parametrelerine göre değişimi
(The change of the build-up factor according to the cutting parameters)

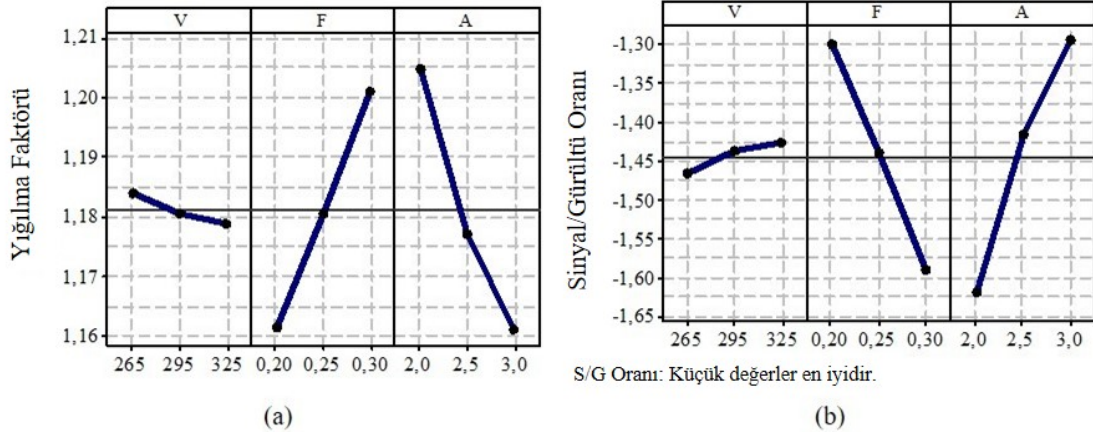
3.3. Yığılma Faktörü-Kesme Kuvveti İlişkisi (The Relationship Between Build-up Factor and Cutting Force)

Talaşlı imalatta ana kesme işlemi kayma düzleminde meydana gelmektedir. Kayma düzleminde gerçekleşen plastik deformasyon için harcanan enerji kesme kuvvetleri olarak ortaya çıkarken, plastik deformasyonun bir sonucu olarak da yığılma faktörü oluşmaktadır. Bu sebeple kesme kuvvetleri ile yığılma faktörü arasında bir ilişki kurulmuştur.

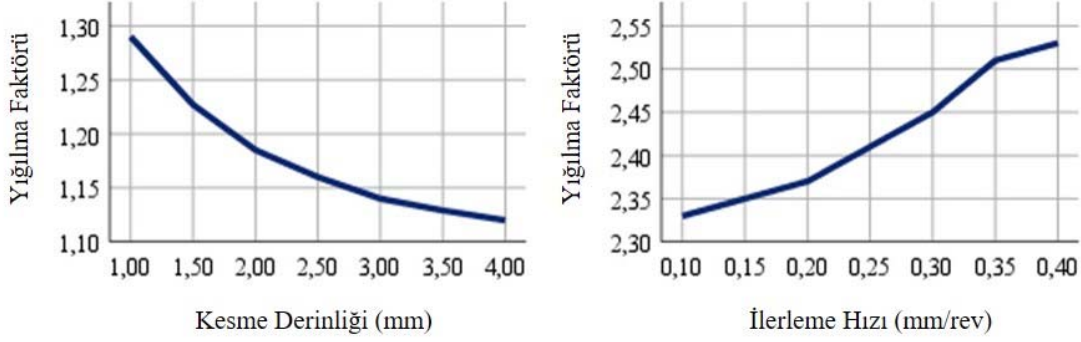
Yığılma faktörü kesme derinliği boyunca talaş kesitindeki şekil değişimini ifade etmektedir. Farklı kesme derinlikleri yığılma faktörünü önemli ölçüde değiştirdiği için birim kesitteki şekil değişimi “Birim Yığılma (BY)” kavramı ile tanımlanmıştır. Birim yığılma ifadesi tanımlanırken gerinim ($\varepsilon = \Delta l / l$) kavramından hareket edilmiştir.

$$BY = \frac{\Delta a}{a_1} \quad (10)$$

$$\Delta a = a_2 - a_1$$



Şekil 7. Yığılma faktörü için ortalama etki (a) ve sinyal/gürültü (b) grafikleri
(Mean effect (a) and signal/noise (b) graphs for build-up factor)



Şekil 9. Artan ilerleme hızı ve kesme derinliğine göre değişen yığılma faktörü
(Build-up factor, depending on increasing feed rate and depth of cut)

Eş. 10'da a_2 deforme olmuş talaş kalınlığını, a_1 ise deforme olmamış talaş kalınlığını (kesme derinliğini) ifade etmektedir. BY yığılma faktörü (λ) cinsinden Eş. 11'de verildiği şekli ile tanımlanabilir.

$$BY = \lambda - 1 \quad (11)$$

Benzer bir yaklaşım ile birim alana düşen kuvvet "Birim Kesme Kuvveti (BKK)" olarak ifade edilmiştir. BKK ifadesi hesaplanırken ölçülen kuvvetler talaş kesit alanına bölünmüş ve böylece birim alana düşen kuvvet hesaplanmıştır. Talaş kesit alanı kesme derinliği ve ilerleme miktarının çarpımı ile bulunmuştur.

$$BKK = \frac{F}{f_i \times a_1} \quad (12)$$

Gerek kesme kuvvetleri gerekse yığılma faktörü için en kritik parametreler olan ilerleme hızı ve kesme derinliği dikkate alınarak BY ve BKK üzerinde yığılma faktörü ve kesme kuvvetleri arasında bir ilişki kurulmuştur. Tablo 7'de artan ilerleme hızına göre değişen BY ve BKK değerleri verilmiştir.

Tablo 7. Artan ilerleme hızına göre ölçülen BY ve BKK değerleri

(BY and BKK values measured according to increasing feed rate)

V	F	A	BY	BKK
325	0,10	2	0,164	2954,125
325	0,15	2	0,179	2480,912
325	0,20	2	0,188	2348,375
325	0,25	2	0,205	2183,638
325	0,30	2	0,219	2242,520
325	0,35	2	0,253	2221,729
325	0,40	2	0,261	2192,804

Artan ilerleme hızına bağlı olarak BY ve BKK ilişkisini açıklayabilmek için üç farklı denklem tipi (Lineer, Kuadratik ve Kübik) kullanılmıştır. Elde edilen veriler ışığında Şekil 10 oluşturulmuştur. Yapılan eğri benzetme çalışmaları sonucunda Lineer denklem tipinin $R^2=0,642$ ile en düşük temsil oranına sahip olduğu ve söz konusu iki parametre

arasındaki ilişkiyi tanımlama konusunda başarısız kaldığı görülmüştür. Kübik denklem tiplerinin b3 katsayısı sıfır olarak belirlenmiştir. Bu durum Kuadratik ve Kübik denklem tiplerini aynı denklem yapmıştır. Aynı denklemi ifade eden her iki denklem tipinin de temsil oranı $R^2=0,932$ dir. Bu yüksek doğruluk oranı iki parametre arasındaki ilişkiyi başarılı bir şekilde ortaya koymaktadır.

Artan ilerleme hızı ile kesme kuvvetlerinin ve yığılma faktörünün arttığı daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Artan ilerleme hızı ile BY değerinin arttığı ve birim talaş kesitinde meydana gelen uzamanın arttığı görülmektedir. İlerleme hızı artışı ile BKK değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Artan ilerleme hızı ile birim alana düşen kuvvet değeri azalmış, bu durum birim alanda daha küçük kuvvetler ile daha büyük deformasyonlar olduğunu ortaya koymuştur. Artan kesme hızı ile kesme bölgesindeki sıcaklıkların arttığı, bununla birlikte artan ilerleme hızlarının da kesme bölgesindeki sıcaklıkları yükselttiği bilinmektedir. Ancak ilerleme hızı etkisi kesme hızı etkisi kadar güçlü değildir [1]. Artan ilerleme hızına bağlı olarak, artan sıcaklık değerlerinin, birim alana düşen daha küçük kuvvetler ile daha yüksek deformasyonlara yol açtığı düşünülmektedir. Artan ilerleme hızına bağlı BY-BKK ilişkisi için geliştirilen denklem tipleri için katsayılar Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8'de verilen denklem parametreleri ışığında;

Lineer Denklem:

$$BKK = -6093,530BY + 3678,542 \quad (13)$$

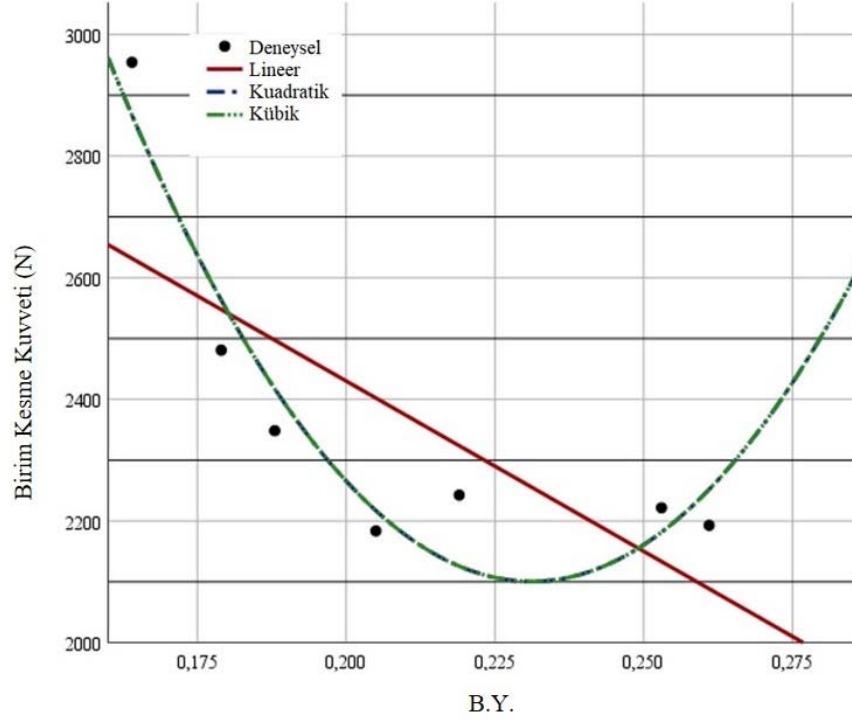
Kuadratik Denklem:

$$BKK = 173157,386BY^2 - 79859,541BY + 11319,410 \quad (14)$$

Kübik Denklem:

$$BKK = 0BY^3 + 173157,386BY^2 - 79859,541BY + 11319,410 \quad (15)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemler için kontrol deneyleri yapılmış denklemler ile hesaplanan ve deneyler sonucunda elde edilen BKK değerleri Tablo 9'da kıyaslanmıştır.



Şekil 10. Artan ilerleme hızı ile değişen BY ve BKK değerleri değişimi
(Change of BY and BKK values with increasing feed rate)

Tablo 8. Artan ilerleme hızına bağlı BY-BKK ilişkisi için geliştirilen denklem parametreleri
(Developed equation parameters for BY-BKK relation according to increasing feed rate)

Denklem Tipi	Regresyon İlişkisi R ²	Denklem Parametreleri			
		Sabit	b1	b2	b3
Lineer	0,642	3678,542	-6093,530	-	-
Kuadratik	0,932	11319,410	-79859,541	173157,386	-
Kübik	0,932	11319,410	-79859,541	173157,386	,000

Tablo 9. Kontrol deneyleri sonucunda hesaplanan ve ölçülen BKK değerleri
(BKK values calculated and measured as a result of control experiments)

Kontrol Değeri	BY Değeri	Lineer Denk.	Kuadratik Denk.	Kübik Denk.	Deneysel BKK Değeri
F:0,125 mm/rev	0,170	2642,642 4.8	2747,537	2747,537 1.1	2778,726
F: 0,33 mm/rev	0,230	2277,030 2.95	2111,741	2111,741 4.5	2211,648

Kontrol deneyleri sırasında kullanılan ilerleme hızları için BY değerleri hesaplanmıştır. Geliştirilen modeller kullanılarak BKK değerleri tahmin edilmiştir. Modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kuadratik ve Kübik denklem tiplerinin başarılı tahminlerde bulunduğu, Lineer denklem tipinin 0,125 mm/rev ilerleme değerinde %5 değerlerine yakın bir sapma ortaya koyduğu görülmüştür.

Artan ilerleme hızı etkisinin değerlendirildiği gibi; artan kesme derinliğinin BY ve BKK üzerine etkileri de araştırılmıştır. Tablo 10'da artan kesme derinliğine göre değişen BY ve BKK değerleri verilmiştir.

Tablo 10. Artan kesme derinliğine göre ölçülen BY ve BKK değerleri
(BY and BKK values measured by increasing depth of cut)

V	F	A	BY	BKK
325	0,2	1	0,290	2588,942
325	0,2	1,5	0,227	2408,852
325	0,2	2	0,185	2348,375
325	0,2	2,5	0,160	2361,261
325	0,2	3	0,140	2309,345
325	0,2	3,5	0,129	2265,636
325	0,2	4	0,120	2255,045

İki değişken arasındaki ilişkinin tanımlanabilmesi için yine üç farklı denklem tipi (Lineer, Kuadratik ve Kübik) kullanılmış ve Şekil 11 oluşturulmuştur. Lineer denklem tipinin BY ve BKK arasındaki ilişkiyi tanımlama başarısı $R^2=0,944$; Kuadratik ve Kübik denklem tiplerinin ise $R^2=0,958$ dir. Tüm denklem tipleri yüksek doğruluk oranı ile ilişkiyi tanımladığı görülmüştür. Artan kesme derinliği ile BY ve BKK değerlerinin azaldığı görülmektedir. Artan kesme derinliği deforme edilen bölgenin artmasına neden olmaktadır. Artan deformasyon bölgesi daha fazla dislokasyonu harekete geçirerek deformasyon sertleşmesini yükseltmektedir. Bu durum artan kesme kuvvetleri ile BKK değerlerinin ve dolayısıyla BY değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Artan kesme derinliğine bağlı BY-BKK ilişkisi için geliştirilen denklem tipleri için katsayılar Tablo 11’de sunulmuştur.

Tablo 11’de verilen denklem parametreleri ışığında;

Lineer Denklem:

$$BKK = 1800,560BY + 2040.708 \quad (16)$$

Kuadratik Denklem:

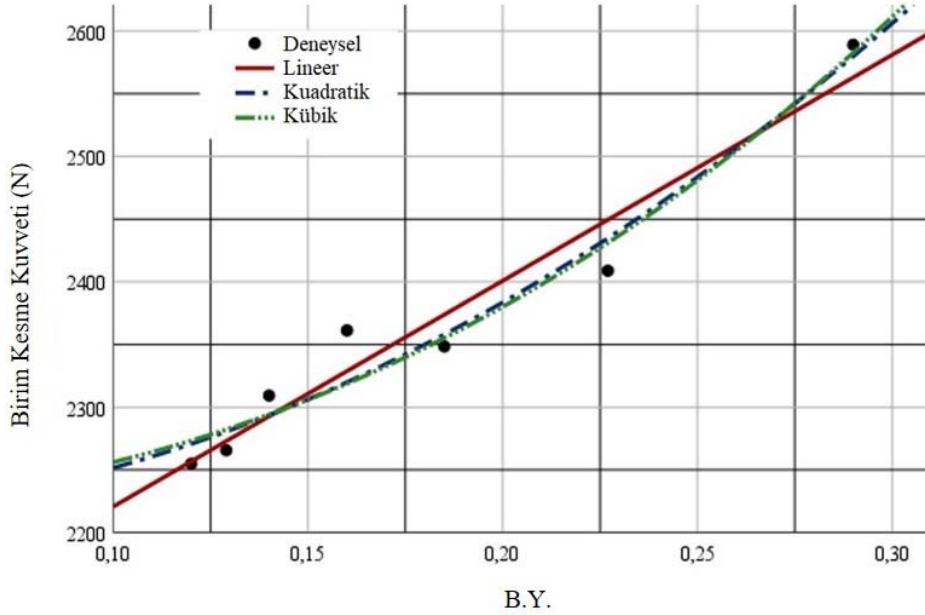
$$BKK = 4527,146BY^2 - 38,907BY + 2210,289 \quad (17)$$

Kübik Denklem:

$$BKK = 3358,490BY^3 + 3344,648BY^2 + 0BY + 2219,416 \quad (18)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemler için kontrol deneyleri yapılmış denklemler ile hesaplanan ve deneyler sonucunda elde edilen BKK değerleri Tablo 12’de kıyaslanmıştır.

Yapılan kontrol deneyleri tüm denklem tiplerinin BKK değerlerinin tahminin de tatmin edici başarılar ortaya



Şekil 11. Artan kesme derinliği ile değişen BY ve BKK değerleri değişimi
(Change of BY and BKK values with increasing cutting depth)

Tablo 11. Artan kesme derinliği bağlı BY-BKK ilişkisi için geliştirilen denklem parametreleri
(Developed equation parameters for BY-BKK relation according to increasing cutting depth)

Denklem Tipi	Regresyon İlişkisi R^2	Denklem Parametreleri			
		Sabit	b1	b2	b3
Lineer	0,944	2040,708	1800,560		
Kuadratik	0,958	2210,289	-38,907	4527,146	
Kübik	0,958	2219,416	0,000	3344,648	3358,490

Tablo 12. Kontrol deneyleri sonucunda hesaplanan ve ölçülen BKK değerleri
(BKK values calculated and measured as a result of control experiments)

Kontrol Değeri	BY Değeri	Lineer Denk.	Kuadratik Denk.	Kübik Denk.	Deneysel BKK Değeri
A: 3,3mm	0,130	2275,326 0.01	2282,085 0.31	2283,635 0.31	2275,051
A: 2,3mm	0,170	2346,020 1.82	2333,858 2.34	2331,957 2.42	2389,672

koyduğunu göstermektedir. Lineer denklem tipine ait R^2 değeri diğer denklem tiplerine oranla bir miktar düşük olsa da kontrol deneyleri sonucunda daha yakın değerler ortaya koymuştur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada operasyon parametrelerinin kesme kuvvetlerinin oluşumuna etkileri incelenmiştir. Eğri uydurma algoritmaları kullanılarak kesme kuvvetleri modellenmiştir. Modelleme sırasında kesme parametreleri ve oluşan talaş boyutları dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda ölçülen kuvvet verileri, geliştirilen modeller aracılığıyla hesaplanan kuvvet verileri ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar ışığında elde edilen sonuçlar:

- Kesme kuvvetleri üzerinde en etkili parametrenin kesme derinliği ve ilerleme hızı olduğu belirlenmiştir.
- Artan ilerleme hızı ve kesme derinliği ile kesme kuvvetlerinin arttığı, kesme hızının artışı ile kesme kuvvetlerinin az da olsa düştüğü görülmüştür.
- Artan kesme derinliği için üç farklı model geliştirilmiş, bu modellerle kesme derinliği-kesme kuvveti ilişkisi başarılı bir şekilde açıklanmıştır.
- Artan ilerleme hızı için geliştirilen üç farklı modelin her üçü de kesme kuvvetleri- ilerleme hızı arasındaki ilişkiyi başarılı bir şekilde ifade etmiştir.
- Yığılma faktörü için en etkili parametrelerin kesme derinliği ve ilerleme hızı olduğu belirlenmiştir.
- Artan ilerleme hızı ile yığılma faktörünün arttığı, artan kesme derinliğinin ise yığılma faktörünü azalttığı tespit edilmiştir.
- Değişen ilerlemeye bağlı olarak birim yığılma ve birim kesme kuvveti ilişkisi için Kuadratik denklem tipi başarılı sonuçlar vermiştir.
- Değişen kesme derinliğine bağlı olarak birim yığılma ve birim kesme kuvveti ilişkisi için üç denklem tipi de kabul edilebilir sonuçlar ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Groover M. P., Principles of modern manufacturing, J. Wiley & Sons, 2011.
2. Kurt A., Sürücüler S., Kirik A., Kesme Kuvvetlerinin Tahmini İçin Matematiksel Bir Model Geliştirme, J. Polytech., 13, 15–20, 2010.
3. Yılmaz B., Pnömatik tahrikli dinamik talaş kırıcı tasarımı ve işleme parametrelerine etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2016.
4. M. Cemal Çakır, Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri, Dora Yayıncılık, 2010.
5. Barry J., Byrne G., Lennon D., Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy, Int. J. Mach. Tools Manuf., 41, 1055–1070, 2001.
6. Sutter G., Chip geometries during high-speed machining for orthogonal cutting conditions, Int. J. Mach. Tools Manuf., 45, 719–726, 2005.
7. Toropov A., Ko S. L., Prediction of tool-chip contact length using a new slip-line solution for orthogonal cutting, Int. J. Mach. Tools Manuf., 43, 1209–1215, 2003.
8. Lee E. H., Shaffer B. W., The theory of plasticity applied to a problem of machining, Transactions of the ASME 73, 1951.
9. Uzun İ., Aslantaş K., Karabulut A., Ortogonal kesme işleminde takım-talaş temas uzunluğundaki değişimin araştırılması, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 24 (3), 477–484, 2009.
10. Fang N., Jawahir I. S., Analytical predictions and experimental validation of cutting force ratio, chip thickness, and chip back-flow angle in restricted contact machining using the universal slip-line model, Int. J. Mach. Tools Manuf., 42, 681–694, 2002.
11. Chao B. T., Trigger K. J., Controlled contact cutting tools, Trans. ASME J. Eng. Ind., 81, 139–151, 1959.
12. Wallace P. W., Boothroyd G., Tool forces and tool-chip friction in orthogonal machining, J. Mech. Eng. Sci., 6, 74–87, 1964.
13. Çiftçi İ., Gökçe H., Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (1), 201–214, 2018.
14. Aydın M., Köklü U., A study of ball-end milling forces by finite element model with Lagrangian boundary of orthogonal cutting operation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 517–527, 2018.
15. Özlü B., Demir H., Nas E., CNC Tornalama İşleminde Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetlerine Etki Eden Parametrelerinin Matematiksel Olarak Modellenmesi, J. Adv. Technol. Sci., 3, 75–86, 2014.
16. Yaşar N., Sertleştirilmiş X40CrMoV5-1 Çeliğinin Tornalanmasında Kesme Kuvvetinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 6, 765–773, 2018.
17. Gürbüz H., Farklı Kesme Parametrelerinde Kaplamalı ve Kaplamasız Kesici Takımlar ile AISI 1050 Çeliğin Tornalanmasında Oluşan Esas Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi ve İstatiksel Olarak Analizi, Batman Üniversitesi Yaşam Bilim. Derg., 5, 147–162, 2015.
18. Ay M., Turhan A., Tornalama İşleminde Kesme Parametrelerinin ve İş Parçası Uzunluğunun Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi, Makine Teknol. Elektron. Derg., 7, 55–67, 2010.
19. Uzun G., Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons, Measurement, 142, 122–130, 2019.
20. Yılmaz B., Karabulut Ş., Güllü A., Performance analysis of new external chip breaker for efficient machining of Inconel 718 and optimization of the cutting parameters, J. Manuf. Process., 32, 553–563, 2018.

21. Çiftçi İ., The Influence of Cutting Tool Coating and Cutting Speed on Cutting Forces and Surface Roughness in Machining of Austenitic Stainless Steels, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 20 (2), 205–209, 2005.
22. Korkut I., Donertas M. A., The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling, Mater. Des., 28, 308 –312, 2007.
23. Yağmur S., Çakiroğlu R., Acir A., Şeker U., AISI 1050 Çeliğinin Delinmesinde İtme Kuvvetinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 5, 241–246, 2017.
24. Yağmur S., Kurt A., Şeker U., Evaluation and mathematical modeling of delamination and cutting forces in milling of carbon fiber reinforced composite (CFRP) materials, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 457– 465, 2020.
25. Sun S., Brandt M., Dargusch M. S., Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys, Int. J. Mach. Tools Manuf., 49, 561–568, 2009.
26. Mavı A., Uzun G., Dupleks 1.4462 Paslanmaz Çeliğın Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin İşlenebilirlik Üzerine Etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 5, 177–184, 2017.



Strengthening of reinforced concrete frames with insufficient earthquake resistance using drywalls sheathed with steel sheet

Fatih Süleyman Balık*

Eregli Kemal Akman Vocational School, Necmettin Erbakan University, 42320, Konya, Turkey

Highlights:

- The earthquake behavior of four different specimens was investigated
- Drywall systems contributed positively to the earthquake behavior of the reinforced concrete frame
- A more efficient strengthening method can be developed by changing the details of drywall systems

Keywords:

- Reinforced concrete
- Strengthening
- Infill walls

Article Info:

Research Article
Received: 08.04.2019
Accepted: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.550978

Acknowledgement:

This work was supported by Necmettin Erbakan University Scientific Research Projects Office with the project number 171225001

Correspondence:

Author: Fatih Süleyman Balık
e-mail: fsbalik@erbakan.edu.tr
phone: +90 332 712 7424

Graphical/Tabular Abstract

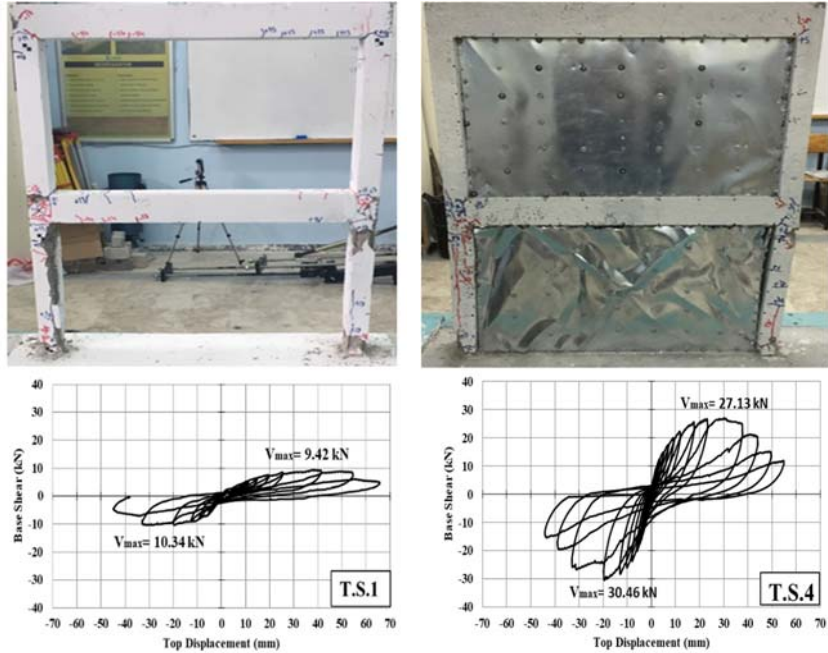


Figure A. Failure mode of T.S.1 and T.S.4

Purpose: The aim of this study is to develop an effective strengthening method for fast, economical, lightweight, functional, heat and sound insulation. For this purpose, a total of 4 reinforced concrete frames were produced in order to reflect the defects in the existing structures. Depending on the purpose of the study, two of these reinforced concrete frames were strengthened by using drywalls sheathed with steel sheet.

Theory and Methods:

In this experimental study; two reinforced concrete frames were strengthened with single skeleton drywall system double skeleton drywall system. In order to determine the effectiveness of these strengthening, two reinforced concrete frames were tested as the reference specimens. The first reference specimen was the bare reinforced concrete frame. The second reference specimen was produced by filling the frame with autoclaved aerated concrete walls. The specimens are subjected to cyclic lateral load reversals while a constant axial load was applied.

Results:

As a result of this study, it has been observed that single and double skeleton drywall systems improves the lateral load carrying capacity, energy dissipation capacity and initial stiffness of the reinforced concrete frame.

Conclusion:

Test results showed that reinforced concrete structures could be strengthened effectively by using dry walls sheathed with steel sheet. In addition, it was concluded that a more efficient strengthening method could be developed by changing the member size and connection details used in dry wall systems.



Çelik sac ile kaplanmış kuru duvarlar kullanarak deprem dayanımı yetersiz betonarme çerçevelerin güçlendirilmesi

Fatih Süleyman Balık*^{ID}

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Ereğli Kemal Akman Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 42320 Ereğli Konya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Dört farklı numunenin deprem davranışı incelenmiştir
- Kuru duvar sistemleri, betonarme çerçevenin deprem davranışına olumlu katkı sağlamıştır
- Kuru duvar sistemlerinin detayları değiştirilerek daha verimli bir güçlendirme yöntemi geliştirilebilir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 08.04.2019
Kabul: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.550978

Anahtar Kelimeler:

Betonarme,
güçlendirme,
dolgu duvarları

ÖZET

Bu çalışmanın amacı; hızlı, ekonomik, hafif, fonksiyonel, ısı ve ses yalıtımında etkili bir güçlendirme yönteminin geliştirilmesidir. Bu deneysel çalışmada, mevcut yapılardaki kusurları yansıtabilecek şekilde toplam 4 adet betonarme çerçeve sınanmıştır. Çalışmanın amacı dahilinde betonarme çerçevelerden iki adedi çelik sac ile kaplanmış kuru duvarlar kullanarak güçlendirilmiştir. Uygulan bu güçlendirmelerin etkinliğini belirleyebilmek amacıyla betonarme çerçevelerden ikisi referans numune olarak test edilmiştir. Birinci referans numunesi boş betonarme çerçeve olarak, ikinci referans numune ise gaz beton dolgu duvarlarla üretilmiştir. Bu numunelerin testleri, sabit eksenel yük ve tersinir-tekrarlanır yatay yük etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde; tek ve çift iskeletli kuru duvar sistemlerin, betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesine, enerji tüketme kapasitesine ve başlangıç rijitliğine olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür.

Strengthening of reinforced concrete frames with insufficient earthquake resistance using drywalls sheathed with steel sheet

H I G H L I G H T S

- The earthquake behavior of four different specimens was investigated
- Drywall systems contributed positively to the earthquake behavior of the reinforced concrete frame
- A more efficient strengthening method can be developed by changing the details of drywall systems

Article Info

Research Article
Received: 08.04.2019
Accepted: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.550978

Keywords:

Reinforced concrete,
strengthening,
infill walls

ABSTRACT

The aim of this study is develop an effective strengthening method to provide a fast, economical, lightweight, functional system which also ensures good heat and sound insulation. The experimental study includes a total of 4 reinforced concrete frames that were produced to reflect the defects in the existing structures. Two of the reinforced concrete frames were strengthened by using drywalls sheathed with steel sheet. Other two frames were the reference specimen to check the effectiveness of the strengthening strategy. The first reference specimen was a bare reinforced concrete frame. The second reference specimen was produced by filling the frame with autoclaved aerated concrete walls. The specimens are subjected to cyclic lateral load reversals while a constant axial load was applied. As a result of this study, it has been observed that single and double skeleton drywall systems improves the lateral load carrying capacity, energy dissipation capacity and initial stiffness of the reinforced concrete frame.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: fsbalik@erbakan.edu.tr / Tel: +90 332 712 7424

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek sismik riske sahip ülkelerde, yeterli deprem dayanımına sahip yapıların tasarlanması ve inşa edilmesi hayati öneme sahiptir. Geçmişte yaşanan depremlerde, deprem davranışı yetersiz birçok betonarme binanın ağır yapısal hasar aldığı veya bazılarının ise tamamen yıkıldığı bilinmektedir [1-3]. Çeşitli tasarım ve yapım hatalarına bağlı olarak ülkemizde birçok mevcut betonarme binanın da deprem davranışının yetersiz olduğu bilinmektedir [4]. Bu nedenle, gelecekte yaşanacak olası depremlerde can ve mal kaybının azaltılabilmesi için deprem davranışı yetersiz olan bu binaların hızlı ve etkin bir şekilde güçlendirilmesi gerekmektedir [1, 5]. Günümüze kadar, betonarme çerçeveli yapıların güçlendirilmesi konusunda birçok farklı çalışma yapılmıştır. Literatürde, mevcut betonarme çerçeve içerisine betonarme perde duvarların eklenmesi yöntemi ile yapıların deprem davranışının iyileştirilmesi konusunda birçok başarılı çalışma yer almaktadır. Yapılan bu çalışmalar da, betonarme çerçeveye boşluksuz betonarme perde duvarlar, kapı/pencere boşluklarına sahip betonarme perde duvarlar veya farklı parametrelere sahip betonarme perde duvarlar eklenerek, bu tür güçlendirme yönteminin etkinliği araştırılmıştır [1, 4, 6-8]. Deprem yüklerine karşı yapıların dayanımını ve rijitliğini artıran mevcut tuğla duvarların güçlendirilmesi konusunda yapılan çalışmalar, hasır çelik donatılı özel sıvalarla [9], çeşitli lifli polimerlerle [10-13], prefabrik beton/betonarme panellerle [14, 15], çelik şeritler veya profillerle [3, 16] ve delikli çelik levhalarla yapılan güçlendirilmeler [17] şeklinde sıralanabilir. Delikli saç levhalar kullanılarak tuğla dolgu duvarların güçlendirilmesi konusunda yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, numunelerin dayanım, süneklik ve enerji tüketme özelliklerinde önemli derecede iyileşmeler sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır [17]. Betonarme çerçeveli tuğla dolgu duvarların delikli saç levhalarla güçlendirilmesi ile yapılan çalışmalarda da numunelerin oldukça sünek davranış sergilediği ve %7,5 görel kat ötelenme oranlarında dahi önemli dayanım kaybına uğramadığı görülmüştür [18]. Yapılan bu çalışmaların sonuçlarına göre analitik çalışmalar yapılmış ve delikli saç levhalarla güçlendirilme konusunda modelleme yapabilmek için dayanım, rijitlik ve deformasyon sınırları açısından yaklaşık hesap yöntemi geliştirilmiştir [19]. Ayrıca, farklı malzemelerden oluşturulan dolgu duvarlı sistemler üzerinde gerçekleştirilen birçok çalışmada yapılmıştır. Özellikle çelik panellerle oluşturulan dolgu duvarlı sistemler bu çalışmalar arasında yer almaktadır [20, 21]. Yapıların deprem davranışının iyileştirilmesi konusunda yapılan bu çalışmalar sayesinde araştırmacılar konu hakkında önemli sonuçlara ulaşabilmiştir. Yapıların güçlendirilmesinde, yapının yeterli deprem dayanımına kavuşturulması düşüncesi daima öncelikli olmuştur. Ancak bu öncelikle beraber güçlendirme uygulamasının, tamamlanma süresi, yapıların fonksiyonelliğine etkisi, yapı ölü yükünü ne kadar artırdığı ve maliyeti de önemli hususlardır. Belirtilen bu hususlar dikkate alındığında özellikle mevcut betonarme çerçeveye, betonarme perde duvarların eklenmesi ile gerçekleştirilen güçlendirmeler;

yapı ölü yükünün artmasına, güçlendirme işleminin uzun sürmesine ve bu süreçte yapının kullanımında zorlukların yaşanmasına neden olmaktadır [17]. Bu tür dezavantajları azaltmak amacıyla mevcut güçlendirme yöntemlerine alternatif olabilecek yeni yöntemlerin geliştirilebilmesi için konuyla ilgili çalışmalar ve araştırmalar günümüzde de devam etmektedir. Yeni güçlendirme yöntemlerinin geliştirilebilmesinde uygun güçlendirme malzemelerinin tercihi oldukça önemlidir. Betonarme çerçeveli yapıların dolgu duvarlarının inşasında, farklı özelliklere sahip birçok yapı malzemesi kullanılmaktadır. Kullanımları nispeten yeni olan çelik malzemedan üretilen ve soğuk şekillendirilmiş profillerin kullanıldığı kuru duvar sistemleri de bunlardan biridir. Kuru duvar sistemlerinin diğer duvar sistemlerine göre hafif olması, hızlı uygulanabilir olması, fonksiyonel olması, ısı ve ses yalıtımının daha iyi olması en önemli avantajları olarak sıralanabilir. Bu avantajları sayesinde kuru duvar sistemleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle soğuk şekillendirilmiş çelik profillerle imal edilmiş kuru duvarların deprem davranışlarının belirlenmesi amacıyla son yıllarda araştırma çalışmalarının yapıldığı görülmektedir. Konuyla ilgili yapılan bu çalışmalarda, soğuk şekillendirilmiş çelik profilli çerçevelerin yüzeyleri, lifli çimento panellerle [22] ve çelik sac levhalarla kaplanarak [23] testlere tabi tutulmuştur. Bu çalışmalara ek olarak kuru duvar sistemlerinin, betonarme yapıların deprem davranışına etkilerini belirleyebilmek için yeni araştırmaların yapılması gerekliliği de önemli görülmektedir.

Bu çalışmada; hızlı, ekonomik, hafif, fonksiyonel ve ısı ve ses yalıtımında etkili yeni bir güçlendirme yönteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kuru duvar sistemlerinin, betonarme yapıların deprem davranışına katkısını belirleyebilmek için çalışma kapsamında 1/5 ölçekli, tek açıklıklı, iki katlı 4 adet betonarme çerçeve üretilmiştir. Üretilen betonarme çerçevelerden; biri dolgu duvarsız betonarme çerçeve olarak, biri gaz beton dolgu duvarlı betonarme çerçeve olarak, iki adedi ise tek iskeletli ve çift iskeletli kuru duvar sistemleri ile güçlendirilerek sabit eksenel yük ve tersinir-tekrarlanır yatay yük etkisi altında test edilmiştir. Testler sonunda numunelere ait sonuçlar; kuru duvar sistemlerinin, mevcut yapılardaki kusur ve zayıflıklara sahip betonarme çerçevelerin deprem davranışına katkılarını belirleyebilmek için dayanım, rijitlik ve enerji tüketim özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL WORK)

2.1. Deneysel Elemanları (Test Specimens)

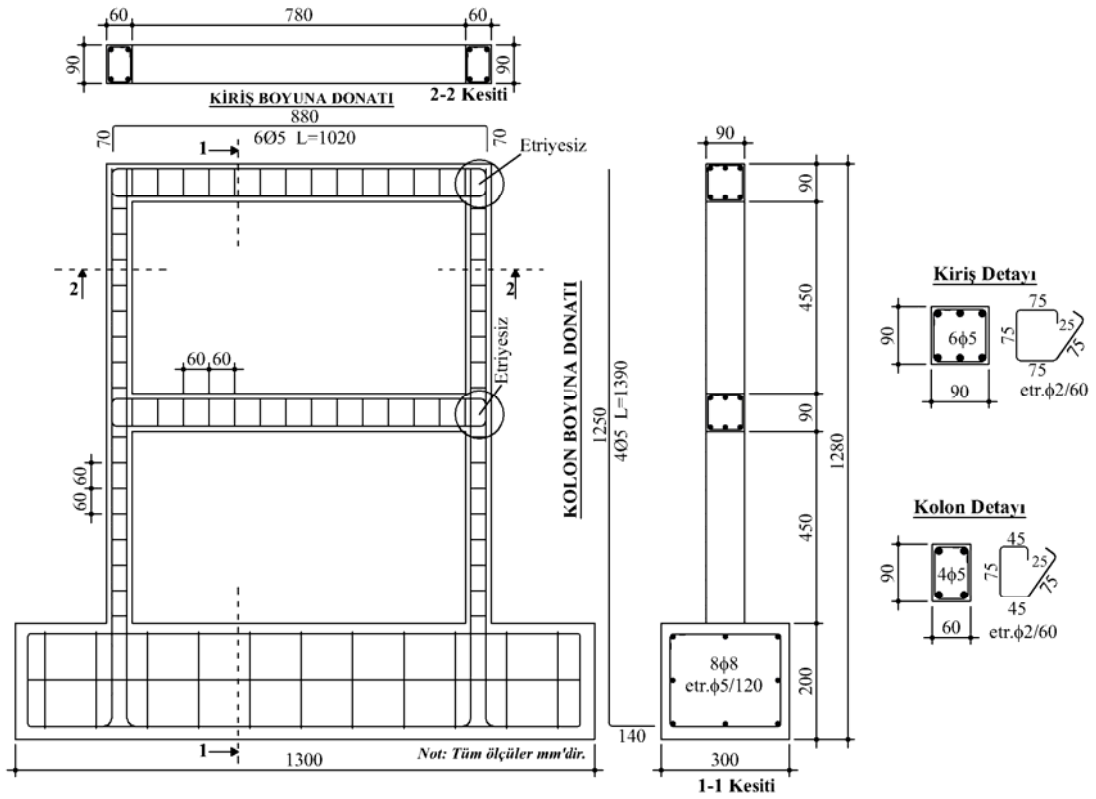
Deneysel çalışma için, 1/5 geometrik ölçekli, tek açıklıklı, iki katlı toplam 4 adet betonarme çerçeve laboratuvar ortamında yatay olarak üretilmiştir. Üretilen bu betonarme çerçevelerin mevcut yapılardaki kusur ve zayıflıkları yansıtabilmesi amacıyla [13], düşük basınç dayanıma sahip beton kullanılmış, etriye sıklaştırması yapılmamış, kolon-

kiriş birleşim bölgesi içinde kolon etriyesi devam ettirilmemiş, etriye kanca büküm açısı 90° yapılmış ve etriye aralıkları TBDY 2018'e [24] ve TS500'e [25] göre büyük tutulmuştur. Mevcut betonarme yapıların birçoğunun çerçevelerin, zayıf kolonlara ve güçlü kirişlere sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle deney numunelerinde, kiriş boyutları 90×90 mm, kolon boyutları ise 60×90 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Betonarme çerçevenin mesnetlendiği temel kirişinin boyutları ise $200 \times 300 \times 1300$ mm'dir. Betonarme çerçevelerin kolonlarında 4 adet $\phi 5$ mm çapında, kirişlerinde ise 6 adet $\phi 5$ mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolon ve kirişlerinde etriye aralığı 60 mm tutularak, $\phi 2$ mm çapında düz yüzeyli donatı kullanılmıştır. Üretilen betonarme çerçevelerde kat yüksekliği 540 mm ve kat açıklığı ise 840 mm'dir. Betonarme çerçevelerin donatı ve boyut detayları Şekil 1'de verilmiştir. Deney numunelerine ait özellikler ise Tablo 1'de verilmiştir.

Çalışma kapsamında testleri gerçekleştirilen numunelerden birincisi, dolgu duvarsız betonarme çerçeve (D.N.1)'dir.

İkinci numune (D.N.2)'de, betonarme çerçevenin içerisine çerçevenin ölçüğü dikkate alınarak $120 \times 55 \times 50$ mm boyutunda kesilmiş gaz beton bloklardan oluşan dolgu duvar örülmüştür. Bloklarla duvar örme işleminde, gaz beton duvar örgü tutkalı kullanılmıştır. Duvar örme işlemleri tamamlandıktan sonra numunenin duvarlarına yaklaşık 2 mm kalınlığında alçı sıva yapılmıştır. Güçlendirme amaçlı yapılacak olan kuru duvar sistemli betonarme çerçeve numunelerin, betonarme çerçevenin deprem davranışına katkısını net belirleyebilmek için bu numunenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Gaz beton dolgu duvarlı (D.N.2)'ye ait detaylar Şekil 2'de verilmiştir.

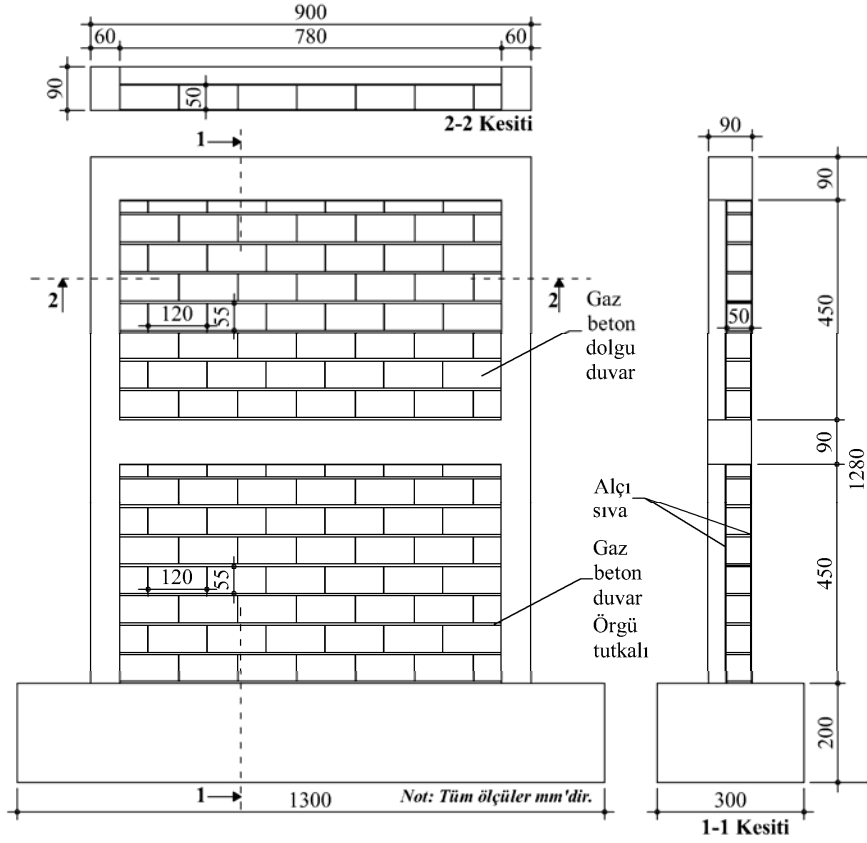
Kuru duvar sistemleri ile güçlendirilen numunelerde kullanılmak üzere betonarme çerçevenin ölçüğü ve gerçek kuru duvar sistemlerinde kullanılan çelik profillerin boyutları dikkate alınarak soğuk şekillendirilmiş çelik profiller özel olarak üretilmiştir. Çalışma kapsamında test edilecek üçüncü numunede, betonarme çerçeve içerisine gerçek yapılarda uygulanan tek iskeletli kuru duvar sistemini



Şekil 1. Betonarme çerçevelerin geometrisi ve donatı detayları (Geometry and reinforcement details of the RC frames)

Tablo 1. Deney numunelerine ait özellikler (Properties of test specimens)

Deney Numunesi	Dolgu Duvar		
	Kalınlık w (mm)	Uzunluk l_w (mm)	Yükseklik h_w (mm)
1 Dolgu duvarsız B/A çerçeve	-	-	-
2 Gaz beton dolgu duvarlı B/A çerçeve	50	780	450
3 Tek iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	26	780	450
4 Çift iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	60	780	450



Şekil 2. Deney numunesi 2'ye ait detaylar (Details of test specimen 2)

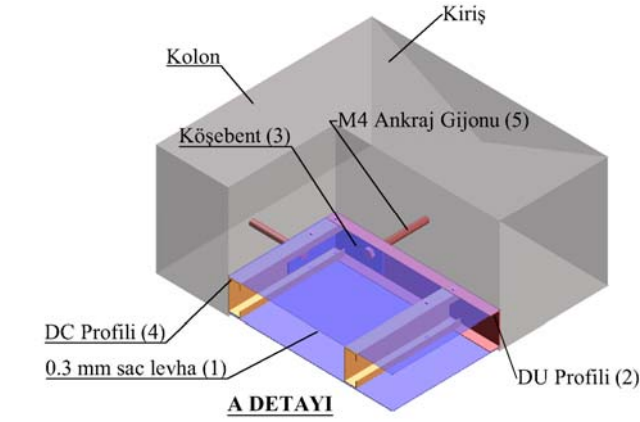
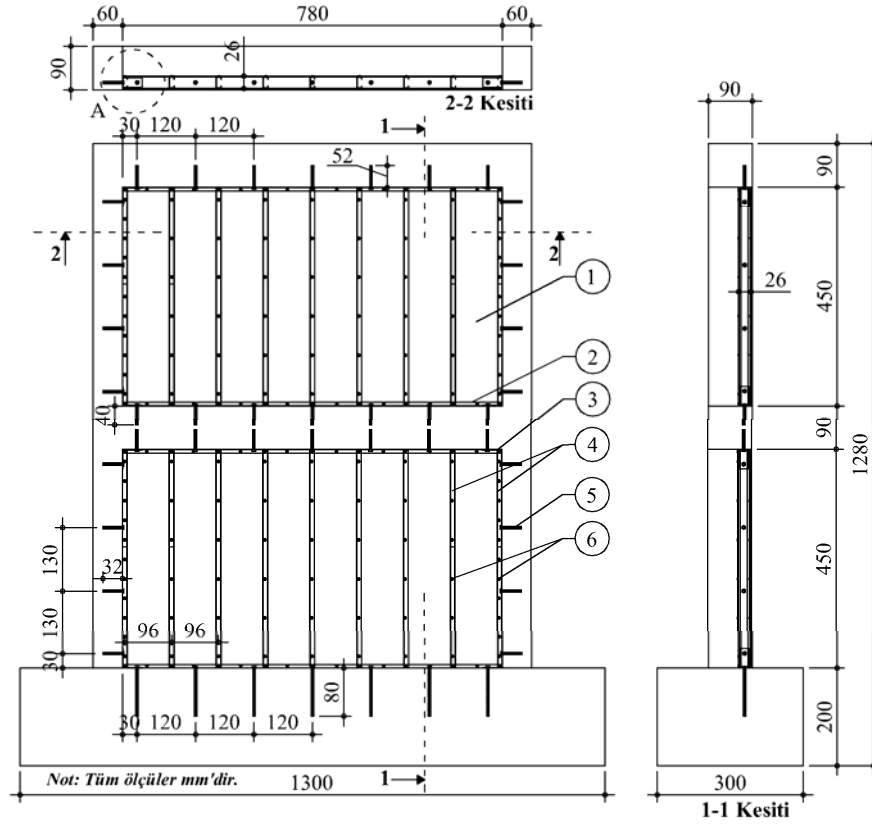
benzeştirecek şekilde dolgu duvar oluşturulmuştur. Duvarların oluşturulmasında ilk olarak kuru duvar sistemi ile betonarme çerçeve arasındaki gerekli bağlantıyı sağlayabilmek için temelde 120 mm aralığında 80 mm derinliğinde, kolonlarda 130 mm aralığında 32 mm derinliğinde, ikinci kat kirişinde 120 mm aralığında 52 mm derinliğinde, birinci kat kirişi alt ve üst yüzeyinde ise 120 mm aralığında 40 mm derinliğinde ve çapı 5 mm olan ankraj delikleri açılmıştır. Daha sonra betonarme çerçeveye tespit edilecek soğuk şekillendirilmiş çelik profillere de ankraj detaylarına bağlı olarak delikler açılmış ve bu profiller (DU ve DC) M4'lük gijonlar ve epoksi kullanılarak çerçeveye bağlanmıştır. Betonarme çerçeveye sabitlenen profillere, duvar dolgu profilleri olarak kullanılan 7 adet (DC) profili eşit aralıklarla ve matkap uçlu vida kullanılarak sabitlenmiştir. Betonarme çerçeve içerisine eklenen bu profillerin her iki yüzü 0,3 mm kalınlığında çelik sac levha ile kaplanmıştır. Çelik sac levhaların profillere sabitlenmesinde yine matkap uçlu vidalar kullanılmıştır. Vidalama aralıkları, betonarme çerçeveye bitişik olan profillerde 50 mm ve diğer profillerde yatayda 96 mm, düşeyde ise 80 mm'dir. Üçüncü numune olan (D.N.3)'de toplam duvar kalınlığı 26 mm'dir. Tek iskeletli kuru duvar sistemli (D.N.3)'e ait detaylar Şekil 3'de verilmiştir.

Çift iskeletli kuru duvar sistemli dördüncü test numunesinde, betonarme çerçeve içerisine gerçek yapılarda uygulanan çift iskeletli kuru duvar sistemini benzeştirecek şekilde dolgu

duvar eklenmiştir. Duvarın oluşturulmasında ilk olarak D.N.3'te belirtilen detaylara göre betonarme çerçeveye çift iskeletli kuru duvarın ilk iskeletini oluşturacak profiller eklenmiştir. Daha sonra bu iskeleti oluşturan profillere, iki iskelet arasındaki bağlantıyı sağlayacak olan omega profilleri, yatayda 10°'lik açığa sahip olacak şekilde matkap uçlu vidalar yardımı ile bağlanmıştır. Duvarın ikinci iskeleti oluşturulurken DCC profilleri kullanılmış ve betonarme çerçeveye bağlantıları M4'lük gijonlar ve epoksi kullanılarak sağlanmıştır. DCC profillerinin omega profillerine bağlantıları yine matkap uçlu vidalarla gerçekleştirilmiştir. En son işlem olarak profillerin her iki yüzü D.N.3'te olduğu gibi 0,3 mm kalınlığında çelik sac levha ile kaplanmış ve böylelikle D.N.4'de toplam duvar kalınlığı 60 mm olmuştur. Çift iskeletli kuru duvar sistemli (D.N.4)'e ait detaylar Şekil 4'de verilmiştir.

2.2. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Betonarme çerçevelerin betonunun üretiminde, maksimum çapı 6 mm olan agregalar kullanılmış ve Su/Çimento oranı 0,65 olarak ayarlanmıştır. Üretilen bu betondan alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç deneyleri sonucunda betonun ortalama basınç dayanımı 13 MPa çıkmıştır. Betonarme çerçevelerde kullanılan donatıların dayanımları Tablo 2'de verilmiştir. Kuru duvar sistemleri ile güçlendirilen numuneler (D.N.3 ve D.N.4)'de kullanılan soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin ve çelik sac



Şekil 3. Deneysel numune 3'e ait detaylar (Details of test specimen 3)

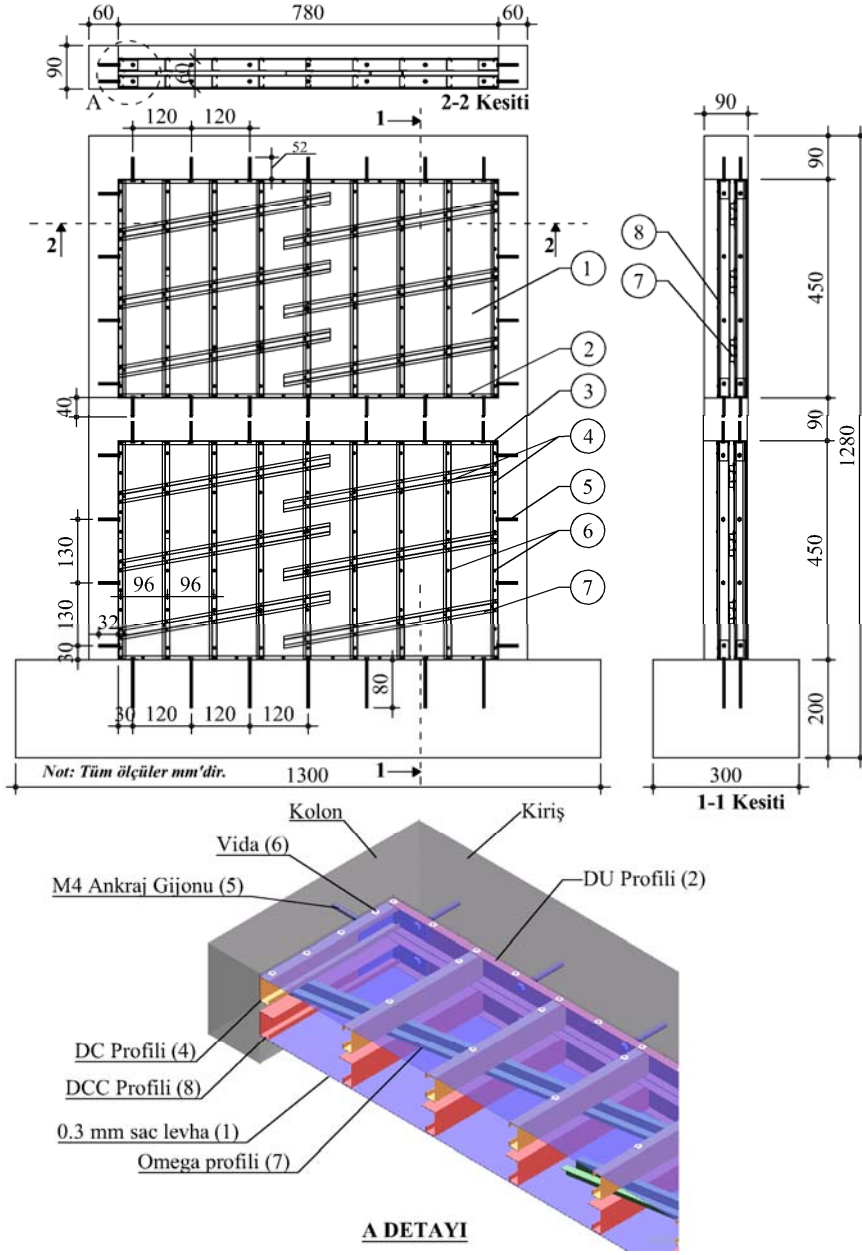
levhaların, akma dayanımları (f_{yp}) 220 MPa, kopma dayanımları ise (f_{up}) 350 MPa'dır. D.N.3 ve D.N.4'de kullanılan profillere ve sac levhaya ait geometrik özellikler ise Tablo 3'de verilmiştir.

2.3. Deneysel Düzenegi (Test Setup)

Deneysel numunelerinin testleri, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Ereğli Kemal Akman Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü Laboratuvarında bulunan, tersinir tekrarlanabilir yüklemeye yapılabilen deneysel düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak ilk olarak numunelerin üst kat kirişine yerleştirilen çelik bir dağıtma kirişi vasıtasıyla kolon üst noktalarından her bir kolona eşit yük gelecek şekilde, sabit

eksenel yük uygulanmıştır. Numunelerin kolonlarına uygulanan yük kolonlarının taşıma kapasitelerinin yaklaşık %20'si (14 kN) kadardır. Eksenel yüklemeye, bir adet hidrolik krikodaki yükleri okumak için bir adet 50 kN kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Numunelerin testleri sırasında eksenel yük sisteminin numune üst kirişi ile birlikte yatay yönde hareket edebilmesi için yüklemeye düzeneği çerçevesinin üst kirişi ile eksenel yüklemeye sistemi arasındaki bağlantı detayında tekerlekli sistem kullanılmıştır.

Numunelerin yatay yüklenmesinde 200 kN itme-çekme kapasiteli bir hidrolik krika kullanılmıştır. Yüklemeler el ile kumandalı hidrolik pompa ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Deneysel numunesi 4'e ait detaylar (Details of test specimen 4)

Deneylerde hidrolik krikodan yapılan yüklemenin ölçülüp, yük verilerinin bilgisayar ortamına aktarılmasında itme ve çekmede kapasitesi 200 kN olan yük hücresi (loadcell) kullanılmıştır. Hidrolik krikonun ucuna bağlanan bu yük hücresine vidalarla bir çelik levha bağlanmış ve yüklemeler esnasında numunelerin alt ve üst katların da oluşabilecek farklı deplasmanlarda sistemin rahat hareket edebilmesi için bu levhanın ucuna mafsallı bir sistem yapılmıştır. Bu mafsallı, 80x80 mm kesitinde 700 mm boyunda çelik yük dağıtma aparatına kaynaklanmıştır. Yük dağıtma aparatı ile mafsallı birleşimi, hidrolik krikodan gelen toplam yatay yükün, 2/3'ünü üst kat kirişi hizasından 1/3'ünde alt kat kirişi hizasından deney numunelerine aktarabilecek şekilde tasarlanmıştır [9, 26]. Yük dağıtma aparatından, numunelere yük aktarımı alt ve üst kirişler hizasından iki tane mafsallı



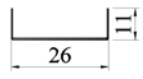


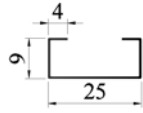
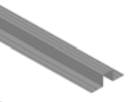
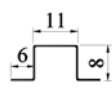
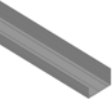
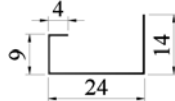
çelik levhayla sağlanmıştır. Bu mafsallı levhalara, çekme çevrimlerinde numuneye yük aktarımını sağlayacak iki çelik levha, betonarme çerçevenin diğer yüzeyinde ve kirişlerin hizasında olacak şekilde bağlanmıştır. Bu bağlantı, kiriş eksenine paralel şekilde yerleştirilen ve bir ucu mafsallı olarak teşkil edilmiş olan gergi milleri ile sağlanmıştır. Deneylerde yatay yükleme etkisine karşı, temel hareketinin engellenebilmesi için yükleme düzeneği çerçevesinin alt kirişi ile numune temelinin bağlantısında 20 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılmıştır.

Test edilen numuneler farklı dayanımlara sahip olduğundan, deneylerde özdeş bir yükleme programı uygulanamamıştır. Numuneler maksimum yük düzeyine ulaşıncaya kadar uygulanacak olan çevrimlerde, D.N.1'e yaklaşık 1 kN, diğer

Tablo 2. Donatı özellikleri (Properties of reinforcement)

Donatı çapı (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Donatı Tipi
2	435	595	Düz
3	424	562	Düz
5	639	809	Nervürlü

Tablo 3. Çelik profillerin ve çelik sacın geometrik özellikleri (Geometric properties of steel profiles and steel sheet)

İsim ve detay numarası	Geometrisi	Kalınlık (mm)	Ölçüler (mm)
Çelik Sac Levha (1)		0,3	780x450
DU Profili (2)		0,5	
Köşebent (3)		1	40x40x20
DC Profili (4)		0,5	
Omega Profili (7)		0,5	
DCC Profili (8)		0,5	

numunelere ise yaklaşık 2,5 kN yatay yük artışı olacak şekilde yükleme yapılması hedeflenmiştir. Maksimum yük düzeyi sonrasındaki çevrimlerde ise ikinci kat deplasman değerinin, D.N.1’de yaklaşık 10 mm, diğer numunelerde yaklaşık 5 mm artırılması ile deneylere devam edilmesi hedeflenmiştir. Deneylerde, yük hücresinden okunan yatay yük değerleri ve potansiyometrik cetvellerden okunan deplasman değerleri veri toplama sistemi vasıtasıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Yük hücresi ve potansiyometrik cetvellerden 0,125 saniye aralığında veri aktarımı gerçekleştirilmiştir. Aktarılan bu veriler ile deneyler esnasında her kat için yük-deplasman eğrileri grafiksel olarak bilgisayar ekranında çizdirilmiş ve tasarlanan yükleme programına dikkat edilmiştir. Ancak, deneylerin son çevrimlerinde numunelerde oluşan ani hasarlara bağlı olarak uygulanması düşünülen kat deplasmanı değerlerinde küçükte olsa sapmaların olduğu gözlemlenmiştir. Bütün deneyler, numunelerin yük taşıma kapasitelerinde büyük kayıp meydana gelene kadar devam ettirilmiştir. Testlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil 5’de verilmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

3.1. Deney Numunelerinin Davranışları (Behaviour of Test Specimens)

Deney numunelerinin testleri, sabit eksenel yük ve tersinir tekrarları yatay yükler altında gerçekleştirilmiş ve deneyler esnasında her bir numunede gözlemlenen davranışlar sırayla

anlatılmıştır. Deney numunelerinin göçme konumuna ulaşmasında, birinci katta oluşan hasarlar etkili olmuştur. Bu nedenle numunelerin davranışlarının anlatımında, numunelerin maksimum yük düzeyleri ile bu düzeylerde hesaplanan birinci kat yatay ötelenme oranlarına yer verilmiştir.

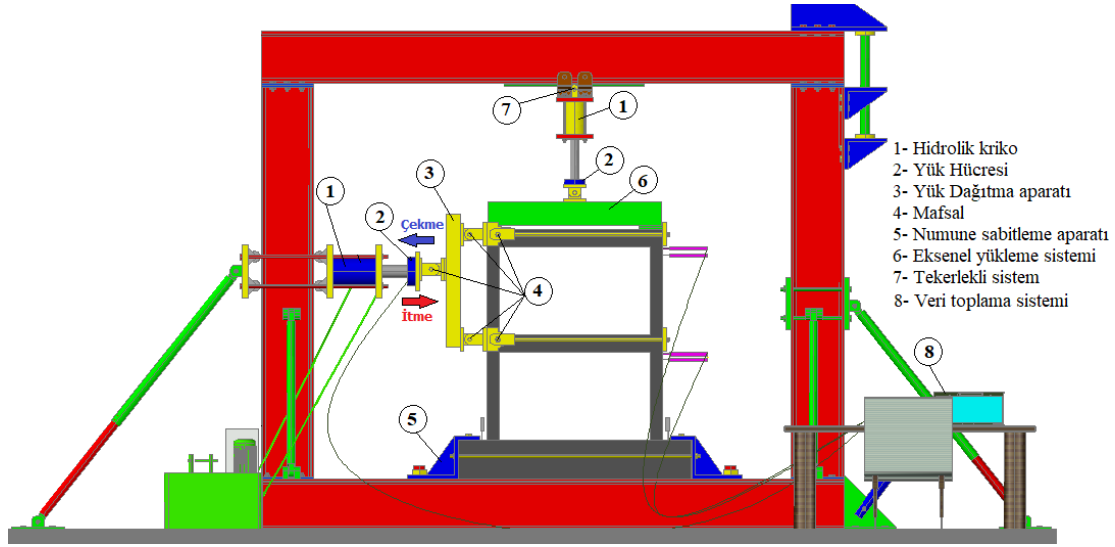
Dolgu duvarsız betonarme çerçevesi numune (D.N.1)’e, itme ve çekmede toplam 11 yük çevrimi uygulanmıştır. 9. itme çevriminde numuneye uygulanan toplam yük maksimum düzeye ulaşmış (9,4 kN) ve bu çevrimden sonra numunenin yatay yük taşıma kapasitesinde azalma meydana gelmeye başlamıştır. Bu çevrimde maksimum yükte hesaplanan birinci kat yatay ötelenme oranı %3,96’dır. 10. çekme çevriminde ise numunenin maksimum 10,3 kN toplam yatay yüke dayandığı ve birinci katta yatay ötelenme oranının %3,45 olduğu görülmüştür. Numunenin, kolon-kiriş ve kolon-temel birleşim bölgelerinde yoğun olarak kesme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, betonarme çerçevede düşük dayanıma sahip betonun kullanılmasına ve uygulanan pas payı miktarına bağlı olarak birinci kat kolon yüzeylerinde kabuk betonda dökülmelerin olduğu görülmüştür. Betonarme çerçevede etriye aralıkları 60 mm’dir, numune ölçeği dikkate alındığında en büyük enine donatı aralığı 300 mm’ye karşılık gelmektedir. Ayrıca, kuvvetli kiriş-zayıf kolon davranışı oluşturmak amacıyla kirişlerin düzlem içi rijitlikleri, kolonların düzlem içi rijitliklerinden daha büyük tutulmuştur. Beklenildiği gibi deneyin son çevrimlerinde, çatlak oluşumunun yoğun olduğu

birinci kat kolonlarının alt ve üst uç bölgelerinde önemli derecede beton ezilmeleri meydana gelmiş ve numune göçme konumuna ulaşmıştır. 1/5 ölçekli D.N.1'e ait deney sonuçları, literatürde yer alan 1/3 ölçekli benzer detaylara sahip çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır [27]. Maksimum yük düzeyine kadar uygulanan çevrimlerde, 1/5 ve 1/3 ölçekli numunelerde meydana gelen çatlak formasyonunu genel olarak benzerlik göstermektedir. Ancak, maksimum yük düzeyi sonrası uygulanan çevrimlerde, numunelerin üretiminde kullanılan beton dayanımlarının farklı olmasından dolayı 1/5 ölçekli numunenin birinci kat kolonlarının uç bölgelerinde hasar boyutunun 1/3 ölçekli numuneye göre daha fazla olduğu görülmüştür. 1/5 ve 1/3 ölçekli numunelerin, yük taşıma kapasitelerinde farklılıklar olmasına rağmen histeresis eğrileri benzer özelliktedir. Ayrıca, 1/5 ve 1/3 ölçekli numuneler için maksimum yük düzeyinde hesaplanan birinci kat yatay ötelenme oranlarının da birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. D.N.1'e ait taban kesme kuvveti-deplasman eğrisi ve göçme modu Şekil 6'da verilmiştir.

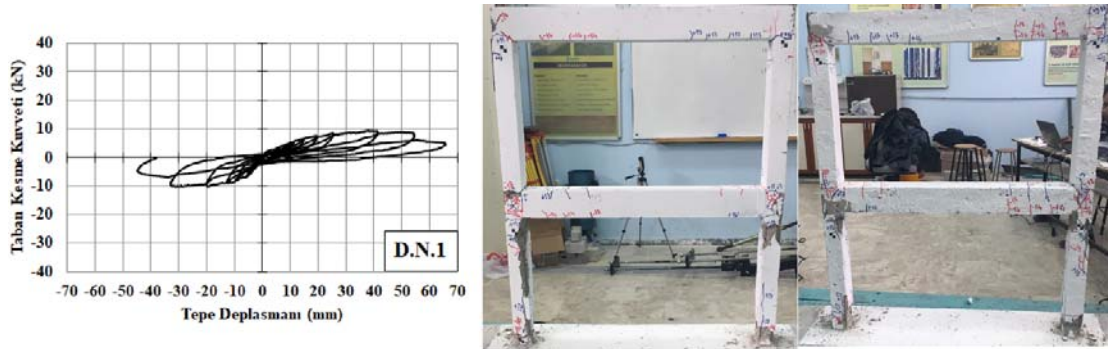
Gaz beton dolgu duvarlı betonarme çerçevesi numune (D.N.2)'ye, itme ve çekme yönünde toplam 11 yük çevrimi uygulanmıştır. D.N.2, 8. itme çevriminde 18 kN, 8. çekme

çevriminde ise 24,2 kN maksimum yatay yüke dayanmıştır. Bu çevrimlerde maksimum yükte hesaplanan birinci kat yatay ötelenme oranları, itme çevriminde %2,73, çekme çevriminde %3,17 olmuştur. Numunede çatlak oluşumu ilk olarak birinci kat kolonlarında eğilme çatlakları şeklinde, dolgu duvarlarda ise kesme çatlakları şeklinde gerçekleşmiştir. Birinci kat dolgu duvarının ilk sıra duvar üst hizasında kayma çatlakları oluşmuş ve çerçeve ile dolgu duvar arasında ayrışmalar gerçekleşmiştir. Deneyin ilerleyen çevrimlerinde mevcut kılcal çatlaklar genişlemiş ve birinci kat dolgu duvarının köşelerinde ezilmeler olmuştur. Ayrıca birinci kat kolonlarının kabuk betonunda önemli derecede dökülmelerin olduğu görülmüştür. Numunenin ikinci katında hasar oluşumu kılcal düzeyde çatlaklarla sınırlı kalırken, numunenin göçmesinde birinci katta oluşan hasarlar etkili olmuştur. D.N.2'ye ait taban kesme kuvveti-deplasman eğrisi ve göçme modu Şekil 7'de verilmiştir.

Tek iskeletli kuru duvar sistemli betonarme çerçevesi numune (D.N.3)'e, itme ve çekmede toplam 13 yük çevrimi uygulanmıştır. Deney numunesi 3, 9. itme çevriminde 20,6 kN, 11. çekme çevriminde ise 26 kN maksimum yatay yüke dayanmıştır. Bu çevrimlerde maksimum yük düzeyinde hesaplanan birinci kat yatay ötelenme oranları, itme



Şekil 5. Deney düzeneği (Test Setup)

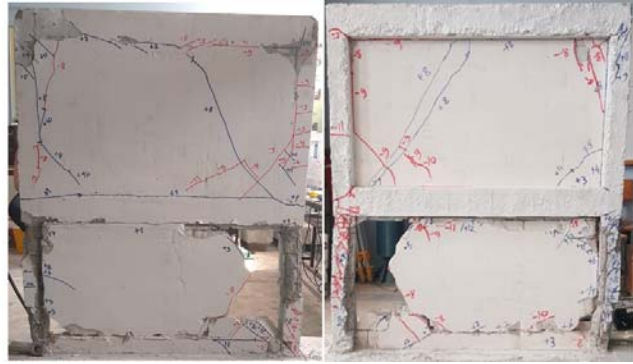
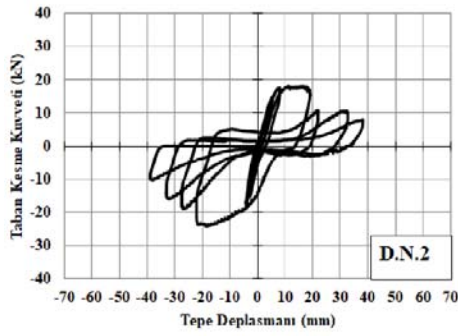


Şekil 6. D.N.1'e ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman eğrisi ve göçme modu (Load-displacement curve of T.S.1 and failure mode) [28, 29]

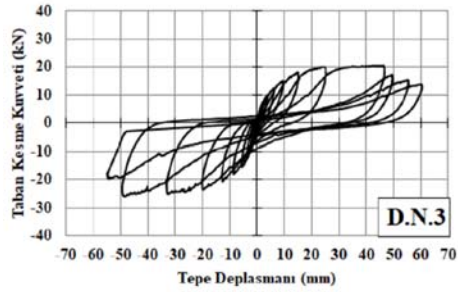
çevriminde %6,27, çekme çevriminde %7,03 olmuştur. Numunede çatlak oluşumu ilk olarak birinci kat kolonlarında eğilme çatlakları şeklinde gerçekleşmiştir. Deneyin ilerleyen çevrimlerinde mevcut kılcal çatlaklar genişlemiş ve kolonlarda kesme çatlakları da oluşmuştur. Birinci katın kolonlarında bu çatlaklar yoğun bir şekilde oluşmuş, ikinci kat kolonlarında ise çatlak oluşumu sınırlı kalmıştır. Numunenin birinci kat kolonlarının alt ve üst uçlarında plastik mafsalların oluştuğu görülmüştür. Daha sonraki çevrimlerde, numunede yatay yer değiştirme değeri artmış ve birinci kat dolgu duvarının köşelerinde kullanılan ankraj gijonları betonarme çerçeveden sıyrılmaya başlamıştır. Ayrıca numunenin dolgu duvarlarında kullanılan çelik sac levhalarda da buruşmalar oluşmuştur. Çelik sac levhalarda

gerçekleşen bu buruşmalar, birinci katta yoğun olarak gerçekleşirken ikinci kat levhalarında sınırlı kalmıştır. D.N.3'e ait taban kesme kuvveti-deplasman eğrisi ve göçme modu Şekil 8'de verilmiştir. D.N.3'ün dolgu duvarlarında kullanılan soğuk şekillendirilmiş çelik profillerde oluşun hasarları görmek için deney sonunda numunenin bir cephesindeki çelik sac levhalar sökülüştür (Şekil 9).

Çift iskeletli kuru duvar sistemli betonarme çerçeveli numune (D.N.4)'ün deneyinde, itme ve çekmede toplam 15 yük çevrimi uygulanmıştır. Deney numunesi 4, 12. itme çevriminde 27,1 kN, çekme çevriminde ise 30,5 kN maksimum yatay yüke dayanmıştır. Bu çevrimlerde maksimum yük düzeyinde hesaplanan birinci kat yatay



Şekil 7. D.N.2'ye ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman eğrisi ve göçme modu
(Load-displacement curve of T.S.2 and failure mode)



Şekil 8. D.N.3'e ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman eğrisi ve göçme modu
(Load-displacement curve of T.S.3 and failure mode)



Şekil 9. Çelik sac levhalar çıkarıldıktan sonra D.N.3'ün görünümü (View of T.S.3 after removed steel sheets)

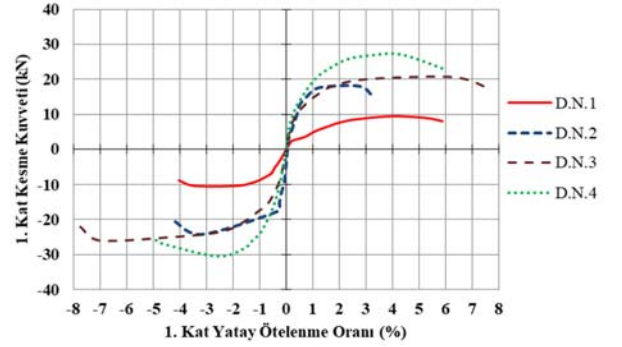
ötelenme oranları, itme çevriminde %4,27, çekme çevriminde %2,63 olmuştur. Deneyin ilk çevrimlerinde, numunenin birinci kat kolonlarında eğilme çatlaklarının oluştuğu görülmüştür. Deneyin ilerleyen çevrimlerinde, mevcut kılcal çatlaklar genişlemiş ve kolon-kiriş birleşim bölgesinde kesme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. D.N.3'te olduğu gibi bu numunenin birinci katın kolonlarında da çatlak oluşumunun yoğunlaştığı, ikinci kat kolonlarında ise çatlak oluşumunun sınırlı kaldığı görülmüştür. Numunenin birinci kat kolonlarının alt uçlarında plastik mafsalların oluştuğu net bir şekilde görülmüştür. Daha sonraki çevrimlerde, numunede gerçekleşen yatay yer değiştirmenin artmasıyla birinci kat dolgu duvarı profillerinin kolonlarla bağlantısını sağlayan ankraj gijonlarının betonarme çerçeveden sıyrılarak ayrıldığı görülmüştür. Numunenin dolgu duvarlarında kullanılan çelik sac levhalarında, D.N.3'tekine benzer şekilde buruşmalar oluşmuştur. D.N.4'e ait taban kesme kuvveti-deplasman eğrisi ve göçme modu Şekil 10'da verilmiştir. D.N.4'ün dolgu duvarlarının bir cephesindeki çelik sac levhalar sökülüş ve numunenin bu görünümü Şekil 11'de verilmiştir.

3.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of Test Results)

3.2.1. Dayanımların karşılaştırılması (Comparison of strengths)

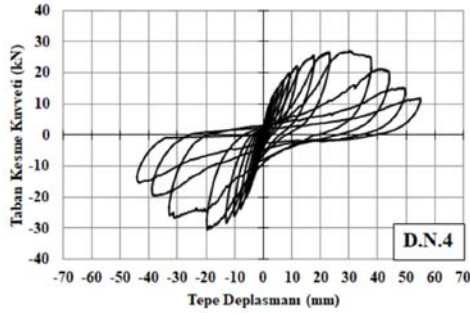
Deney numunelerine ait en yüksek ötelenme oranlarını bulmak için yük-ötelenme oranı zarf eğrileri oluşturulmuştur. Bu zarf eğrileri, yük-yatay deplasman zarf

eğrilerine benzer şekilde oluşturulmuş ancak yatay ekseninde yatay deplasman değerleri yerine ötelenme oranları yüzde olarak verilmiştir [3, 6, 18, 30]. Numunelerinin maksimum yük taşıma kapasitelerinde %15 kaybın gerçekleştiği noktaya karşılık gelen ötelenme oranları en yüksek ötelenme oranları olarak alınmıştır [18]. Numunelerin 1. katı için oluşturulan zarf eğrileri Şekil 12'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deney numunelerine ait yatay yük taşıma kapasiteleri ve D.N.1'e göre yük taşıma kapasitelerindeki artış oranları Tablo 4'de verilmiştir.



Şekil 12. Deney numunelerine ait zarf eğrileri
(Envelope curves of test specimens)

Şekil 12 ve Tablo 4'den de görüldüğü üzere deney numuneleri arasında en fazla yatay yükü, çift iskeletli kuru duvar sistemli betonarme çerçeveli numune (D.N.4) taşımıştır. D.N.4; D.N.1 göre yaklaşık %188 ve D.N.2'ye göre yaklaşık %50 daha fazla yatay yük taşımıştır.



Şekil 10. D.N.4'e ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman eğrisi ve göçme modu
(Load-displacement curve of T.S.4 and failure mode)



Şekil 11. Çelik sac levhalar çıkarıldıktan sonra D.N.4'ün görünümü (View of T.S.4 after removed steel sheets)

Deneyleerde D.N.3'ün yatay yük taşıma kapasitesi, D.N.2'nin yük taşıma kapasitesine oldukça yakın çıkmıştır. Ancak gaz beton dolgu duvarlı numune (D.N.2)'de, maksimum yüke ulaşıldıktan sonra numunenin yük taşıma kapasitesinde hızlı düşüş gerçekleşmiş ve numune göçme konumuna ulaşmıştır. Ayrıca D.N.3, dolgu duvarsız numune (D.N.1)'e göre itme çevriminde yaklaşık %119 daha fazla yatay yük taşımış ve D.N.2'ye göre daha fazla deplasman yaparak göçme konumuna ulaşmıştır.

3.2.2. Rijitliklerin karşılaştırılması (Comparison of stiffnesses)

Deneyleeri gerçekleştirilen her bir numune için rijitlik değerleri, numunelerine ait taban kesme kuvveti-ikinci kat yatay deplasman zarf eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır. Rijitlik değeri, en yüksek yük düzeyindeki noktanın zarf eğrisinin orijinine birleştirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimidir [18, 31, 32]. Deneyle numuneleri için hesaplanan rijitlik değerleri ve D.N.1'e göre rijitlik değerlerindeki artış oranları Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 5'e göre çerçeveye eklenen çift iskeletli kuru duvar sistemin, betonarme çerçevenin rijitlik özelliğine en büyük katkıyı sağladığı görülmektedir. Tek iskeletli kuru duvar sistemli numune (D.N.3)'nin başlangıç rijitliği, dolgu duvarsız numune

(D.N.1)'e göre 2,59 kat artmıştır. D.N.3'ün ve D.N.2'nin başlangıç rijitlik değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Beklenildiği üzere dolgu duvarlar, betonarme çerçevenin rijitlik özelliğine önemli derecede katkı sağlamıştır [33].

3.2.3. Enerji tüketim kapasitelerinin karşılaştırılması (Comparison of the energy dissipation capacities)

Deneyle numunelerine ait enerji tüketim değerleri, itme ve çekme çevrimleri için oluşturulan yük-deplasman grafiklerinde oluşan kapalı alanların hesaplanmasıyla belirlenmiştir [30]. Enerji tüketim değerleri her çevrimde tüketilen enerjinin birikimli olarak toplanmasıyla elde edilmiştir. Numunelerin göçme konumu için hesaplanan enerji tüketim değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da belirtilen göçme yükü ($0,8 \cdot V_{max}$), deneyle numunelerinin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra dayanımın %20 azaldığı düzeydeki yükü ifade etmektedir.

Tablo 6'dan görüldüğü üzere deneylelerde en fazla enerji tüketimi, kuru duvar sistemli numuneler D.N.3 ve D.N.4'te gerçekleşmiştir. Tek iskeletli kuru duvar sistemli numune itme çevriminde, D.N.2'ye göre yaklaşık %232, D.N.1'e göre yaklaşık %144 daha fazla enerji tüketmiştir. Çift iskeletli kuru duvar sistemli numune de ise D.N.2'ye göre

Tablo 4. Deneyle numunelerinin yanal yük taşıma kapasitelerinin özeti
(Summary of the lateral load carrying capacities of test specimens)

Deneyle Numuneleri	Maksimum Yatay Yük (V) Oran*			
	İtme Çevrimi	Çekme Çevrimi	İtme Çevrimi	Çekme Çevrimi
1 Dolgu duvarsız B/A çerçeve	9,42	10,34	1	1
2 Gaz beton dolgu duvarlı B/A çerçeve	18,04	24,20	1,92	2,34
3 Tek iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	20,61	25,95	2,19	2,51
4 Çift iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	27,13	30,46	2,88	2,95

*Deneyle numunelerinin dayanımlarının, D.N.1'in dayanımına oranı

Tablo 5. Deneyle numunelerine ait rijitlik değerleri (Stiffness values of test specimens)

Deneyle Numuneleri	Başlangıç (kN/mm)	Maksimum Yükte (kN/mm)				
		İtme Çevrimi	Çekme Çevrimi	Ortalama	Başlangıç*	Maksimum yükteki ortalamaya göre*
1 Dolgu duvarsız B/A çerçeve	1,53	0,25	0,33	0,29	1	1
2 Gaz beton dolgu duvarlı B/A çerçeve	3,59	1,11	1,31	1,21	2,35	4,17
3 Tek iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	3,97	0,44	0,53	0,49	2,59	1,69
4 Çift iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	7,26	0,88	1,56	1,22	4,75	4,21

*Deneyle numunelerinin rijitlik değerlerinin, D.N.1'in rijitlik değerlerine oranı

Tablo 6. Deney numunelerine ait enerji tüketim değerleri (Energy dissipation values of test specimens)

Deney Numuneleri	İtme Çevrimi		Çekme Çevrimi	
	Kümülatif Tüketilen Değerleri (J) <i>Göçme yüküne kadar (0,8*Vmax)</i>	Toplam Enerji Tüketilen Enerji Oranları D.N.1'e göre	Kümülatif Tüketilen Değerleri (J) <i>Göçme yüküne kadar (0,8*Vmax)</i>	Toplam Enerji Tüketilen Enerji Oranları D.N.1'e göre
1 Dolgu duvarsız B/A çerçeve	567	1	422	1
2 Gaz beton dolgu duvarlı B/A çerçeve	416,44	0,73	756,44	1,79
3 Tek iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	1384,20	2,44	2441,37	5,79
4 Çift iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	1495,06	2,64	1589,17	3,77

Tablo 7. Deney numunelerine ait enerji tüketim değerleri (Energy dissipation values of test specimens)

Deney Numuneleri	İtme Çevrimi		Çekme Çevrimi	
	Kümülatif Tüketilen Enerji Değerleri (J) <i>Birinci kat ötelenme oranı (%2)</i>	Toplam Enerji Tüketilen Enerji Oranları D.N.1'e göre	Kümülatif Tüketilen Enerji Değerleri (J) <i>Birinci kat ötelenme oranı (%2)</i>	Toplam Enerji Tüketilen Enerji Oranları D.N.1'e göre
1 Dolgu duvarsız B/A çerçeve	106,75	1	229,97	1
2 Gaz beton dolgu duvarlı B/A çerçeve	202,41	1,90	343,42	1,49
3 Tek iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	257,12	2,41	492,75	2,14
4 Çift iskeletli kuru duvar sistemli B/A çerçeve	332,37	3,11	598,61	2,60

yaklaşık %259, D.N.1'e göre yaklaşık %164 daha fazla enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Gaz beton dolgu duvarlı numune (D.N.2) göçme konumuna, D.N.1'e göre daha az deplasman yaparak ulaştığı için bu numunenin enerji tüketimi değeri (itme çevriminde) D.N.1'dekinden daha küçük olmuştur.

Deney numunelerinin, kat ötelenme oranına bağlı olarak tükettikleri enerji değerlerini kıyaslamak amacıyla her bir numunede birinci kat ötelenme oranı %2 için enerji tüketim değerleri hesaplanmıştır. Numunelerin itme ve çekme çevrimleri için hesaplanan enerji tüketim değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7'ye göre birinci kat ötelenme oranları %2 için en fazla enerji tüketimi, kuru duvar sistemli numuneler D.N.3 ve D.N.4'te gerçekleşmiştir. Tek iskeletli kuru duvar sistemli numune itme çevriminde, D.N.2'ye göre yaklaşık %27, D.N.1'e göre yaklaşık %141 daha fazla enerji tüketmiştir. Çift iskeletli kuru duvar sistemli numune ise D.N.2'ye göre yaklaşık %64, D.N.1'e göre yaklaşık %211 daha fazla enerji tüketmiştir. Gaz beton dolgu duvarlı numunenin birinci kat ötelenme oranı %2'de enerji tüketimi, D.N.1'e göre itme çevriminde %90, çekme çevriminde ise %49 fazla olmuştur.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

f_{yp} : Çelik sac levha ve soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin akma dayanımı
 f_{up} : Çelik sac levha ve soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin kopma dayanımı

f_y : Donatıların akma dayanımı
 f_u : Donatıların kopma dayanımı

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; deprem davranışı yetersiz mevcut yapıların özelliklerini yansıtabilecek özellikte, 1/5 ölçekli, tek açıklıklı, iki katlı 4 adet betonarme çerçeve üretilmiştir. Bu betonarme çerçevelerden, birincisi dolgu duvarsız betonarme çerçeve, ikincisi gaz beton dolgu duvarlı betonarme çerçeve, diğer iki adedi ise tek iskeletli ve çift iskeletli kuru duvar sistemi ile güçlendirilmiş çerçeveler olarak, sabit eksenel yük ve tersinir-tekrarlanır yatay yük etkisi altında test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir.

Betonarme çerçeve içerisine eklenen tek ve çift iskeletli kuru duvar sistemleri, betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesine, enerji tüketme kapasitesine ve başlangıç rijitliğine önemli katkı sağlamıştır. Ayrıca deney sonuçları, tek ve çift iskeletli kuru duvar sistemli numunelerin dayanım, rijitlik ve göçme konumunda enerji tüketim değerlerinin, gaz beton dolgu duvarlı numuneden de iyi olduğunu göstermiştir. D.N.2'nin testinde, gaz beton bloklarla oluşturulan dolgu duvarın önemli bir kısmının düzlem dışı davranış göstererek devrildiği görülmüştür. D.N.2'nin dolgu duvarında gözlemlenen bu davranış ise betonarme çerçeve sisteminde yumuşak kat oluşumu riskini arttırmıştır. Tek ve çift iskeletli kuru duvar sistemli numunelerde, duvarlar ile betonarme çerçeve arasında çelik gijonlarla bağlantı sağlandığından ve bu tür duvarlar bir

bütün olarak davranış sergileyebildiğinden bu numunelerin duvarlarında düzlem dışı devrilme gerçekleşmemiştir. Böylelikle, sistem göçme konumuna ulaşsa dahi dolgu duvarlar, çerçevenin düşey yük taşıma kapasitesine katkı sağlayamaya devam edebilmiştir. Tek ve çift iskeletli kuru duvar sistemleri hafif oldukları için mevcut yapının ölü yükünün azaltılabilmesi de mümkün olmuştur. Yapı ölü yükünün azaltılması ise depremlerde yapıya etki edecek olan deprem yükünün azaltılabilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca tek ve çift iskeletli kuru duvar sistemlerinde, soğuk şekillendirilmiş profiller arasına gerekli yalıtım malzemelerinin yerleştirilmesiyle yapının ısı ve ses yalıtım özelliği de artırılabilir. Böylelikle bu tür güçlendirme çalışmasıyla, çevre dostu enerji verimliliği yüksek yapıların oluşturulması da sağlanabilir. Tek ve çift iskeletli kuru duvar sistemlerinde kullanılan malzemeler önceden hazırlandığından ve yapıda sadece yerine monte edileceğinden, güçlendirme çalışması daha kolay ve daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ayrıca mimari açıdan uygun olan yapılarda mevcut dolgu duvarların yıkılmasına gerek kalmadan tek veya çift iskeletli kuru duvar sistemlerinin çerçeve içerisine eklenmesiyle de daha etkin ve estetik bir güçlendirme yapılabileceği düşünülmektedir. Sınırlı sayıda numune üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları, kuru duvar sistemleriyle yapılan güçlendirme yöntemi ile mevcut yapıların deprem davranışının iyileştirilebileceği gerçeğini ortaya koymuştur. Konuyla ilgili gelecekte yapılacak çalışmalarda, duvar elemanlarının kalınlıklarının artırılmasıyla, elemanların birbirleri ile olan bağlantıların sıklaştırılmasıyla ve ankraj aralıklarının azaltılmasıyla daha etkili bir güçlendirme yapılabileceği de öngörülmektedir. Ayrıca, bu çalışmada kolon boyuna donatıları, kolonlar boyunca sürekli formda yerleştirildiği için bindirmeli ek etkisinin numunelerin davranışlarına olan etkileri belirlenememiştir. Bu nedenle yapılacak yeni araştırmalarda, mevcut yapılarda olduğu gibi bindirmeli ek donatı detaylarına sahip numuneler ile çalışmaların yapılması önemli görülmektedir. Böylece yapılan güçlendirme çalışmalarının, betonarme çerçeveye katkıları tam olarak belirlenebilecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu araştırma, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 171225001 nolu proje desteği ile gerçekleştirilmiştir. Bilime destek sunan BAP Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kara M.E., Altın S., Behavior of reinforced concrete frames with reinforced concrete partial infills, *ACI Struct. J.*, 103 (2), 701-709, 2006.
2. Ozcan O., Binici B., Ozcebe G., Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers, *Eng. Struct.*, 30 (6), 1632-1646, 2008.
3. Özbek E., Can H., Strengthening of infill brick walls using steel profiles, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (4), 921-929, 2012.
4. Altın S., Anil O., Kara M.E., Strengthening of RC nonductile frames with RC infills: An experimental study, *Cem. Concr. Compos.*, 30 (7), 612-621, 2008.
5. Bıkçe M., Türkiye'deki depremlerde alınan ve alınabilecek önlemler, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 9 (2), 24-31, 2017.
6. Anil Ö., Altın S., An experimental study on reinforced concrete partially infilled frames, *Eng. Struct.*, 29 (3), 449-460, 2007.
7. Sonuvar M. O., Ozcebe G., Ersoy U., Rehabilitation of reinforced concrete frames with reinforced concrete infills, *Struct. J.*, 101 (4), 494-500, 2004.
8. Canbay E., Ersoy U., Ozcebe G., Contribution of reinforced concrete infills to seismic behavior of structural systems, *ACI Struct. J.*, 100 (5), 637-643, 2003.
9. Kamanlı M., Korkmaz H.H., Unal A., Balık F.S., Bahadır F., Cogurcu M.T., Seismic improvement of infilled nonductile RC frames with external mesh reinforcement and plaster composite, *Earthquakes and Struct.*, 8 (3), 761-778, 2015.
10. Altın S., Anil Ö., Kara M. E., Kaya M., An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips, *Composites Part B*, 39 (4), 680-693, 2008.
11. Binici B., Ozcebe G., Ozcelik R., Analysis and design of FRP composites for seismic retrofit of infill walls in reinforced concrete frames, *Composites Part B*, 8 (5-6), 575-583, 2007.
12. Triantafyllou T.C., Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates, *J. of Compos. Constr.*, 2 (2), 96-104, 1998.
13. Erdem I., Akyuz U., Ersoy U., Ozcebe G., An experimental study on two different strengthening techniques for RC frames, *Eng. Struct.*, 28 (13), 1843-1851, 2006.
14. Baran M., Tankut T., Experimental study on seismic strengthening of reinforced concrete frames by precast concrete panels, *ACI Struct. J.*, 108 (2), 227-237, 2011.
15. Frosch R.J., Li W., Jirsa J.O., Kreger M.E., Retrofit of non-ductile moment-resisting frames using precast infill wall panels, *Earthquake Spectra*, 12 (4), 741-760, 1996.
16. Farooq S.H., Ilyas M., Ghaffar A., Technique for strengthening of masonry wall panels using steel strips, *Asian J. Civil Eng.*, 7 (6), 621-638, 2006.
17. Aykaç B., Özbek E., Babayani R., Baran M., Aykaç S., Seismic strengthening of infill walls with perforated steel plates, *Eng. Struct.*, 152, 168-179, 2017.
18. Özbek E., Delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarların çerçeve davranışı üzerindeki etkisi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
19. Özbek E., Aykaç B., Can H., Kalkan İ., Aykaç S., Recommendations for calculation of strengthened brick walls with perforated plates, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 1-15, 2019.

20. Veladi H., Armaghani A., Davaran A., Experimental investigation on cyclic behavior of steel shear walls, *Asian J. Civil Eng.*, 8 (1), 63-75, 2007.
21. Shin H.M., Lee H.D., Shin, K.J., Shaking table test and analysis of reinforced concrete frame with steel shear wall with circular opening and slit damper, *Int. J. Steel Struct.*, 18 (4), 1420-1430, 2018.
22. Zeynalian M., Ronagh H.R., Seismic performance of cold formed steel walls sheathed by fibre-cement board panels, *J. Constr. Steel Res.*, 107, 1-11, 2015.
23. Niari S.E., Rafezy B., Abedi K., Seismic behavior of steel sheathed cold-formed steel shear wall: experimental investigation and numerical modeling, *Thin Walled Struct.*, 96, 337-347, 2015.
24. Türkiye bina deprem yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
25. TS500, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
26. Kaltakci M.Y, Ozturk, M., An experimental study on the strengthening of non-ductile reinforced concrete frames via external shear Wall, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 (1), 59-76, 2012.
27. Bahadır, F., Düzlem dışı perde duvarla güçlendirilmiş deprem davranışı yetersiz betonarme çerçevelerin davranışına pencere boşluklarının etkisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2012.
28. Balık, F.S, Bahadır, F., Experimental studies on 1/5 scaled reinforced concrete frames by using different strengthened methods, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 7 (3), 663-680, 2019.
29. Balık, F.S, Bahadır, F., Investigation of short column behaviors at 1/5 scaled reinforced concrete frames using different strengthening methods, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9 (1), 433-445, 2019.
30. Li X., Xu Z., Bao Y., Cong Z., Post-fire seismic behavior of two-bay two-story frames with high-performance fiber-reinforced cementitious composite joints, *Eng. Struct.*, 183, 150-159, 2019.
31. Sevil T., Baran M., Bilir T., Canbay E., Use of steel fiber reinforced mortar for seismic strengthening, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2), 892-899, 2011.
32. Kara M.E., Sünek olmayan betonarme çerçevelerin betonarme parçasal dolgu duvarlarıyla güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
33. Lee H.S., Woo S.W., Effect of masonry infills on seismic performance of a 3-storey R/C frame with non-seismic detailing, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 31 (2), 353-378, 2002.



Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing

Muhammed Enes Gebel¹, Mehmet Ermurat*¹

Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Engineering and Architecture Faculty, Mechanical Engineering, 46050, Kahramanmaraş Turkey

Highlights:

- Polymer matrix continuous fiber reinforced composite additive manufacturing
- Nozzle design for photocurable material based composite additive manufacturing
- Carbon and glass fiber reinforced composite 3 dimensional printer

Keywords:

- Additive Manufacturing
- Composite additive manufacturing
- Carbon fiber
- Glass Fiber
- Continuous fiber reinforcement

Graphical/Tabular Abstract

SEM images show cross sections of photocurable polymer matrix composite fibers fabricated with carbon fiber (Figure (i)) and glass fiber (Figure (ii)) as reinforcing material.

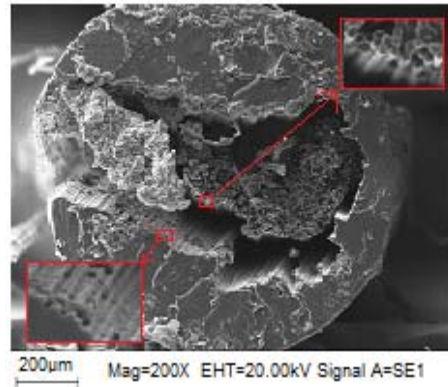


Figure A. SEM image of Carbon Fiber Composite

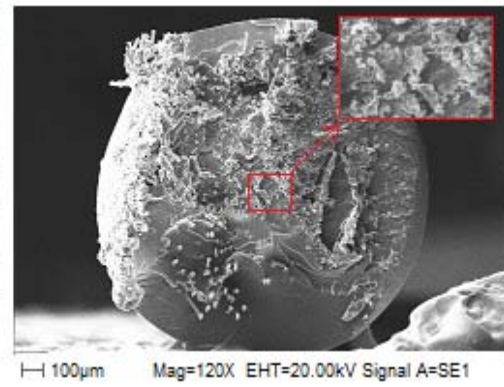


Figure B. SEM image of Glass Fiber Composite

Article Info:

Research Article
Received: 19.08.2019
Accepted: 19.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.606618

Acknowledgement:

This work was supported by grants from Kahramanmaraş Sütçü Imam University Scientific Research Projects, Project No: 2017/2-25 YLS

Correspondence:

Author: Mehmet Ermurat
e-mail:ermurat@ksu.edu.tr
phone: +90 344 300 1698

Purpose: It is aimed to develop a 3D printer that can produce composite parts using continuous fiber as reinforcing. Aimed reinforcing materials are glass fiber and carbon fiber in a continuous form and matrix material is photocurable epoxy resin in liquid form.

Theory and Methods:

First step of this study is to design and manufacture a composite fiber printing nozzle. Designed nozzle has the ability to perform some tasks that can feed the continuous fiber by wetting with liquid photocurable epoxy resin and then can cure epoxy resin by UV light. Second step of the study, is to do some experiments to form successful composite fibers building on a platform using 3D printer coupled with composite fiber printing nozzle. In the last stage of the study, the curing ability of the produced samples was examined. Variable parameters were reinforcing material type, nozzle tip diameter and UV light power. Examination methods were curing ability by observing with SEM microscopy and curing ratio calculation by measuring the weight of the samples.

Results:

For the carbon fiber experiments; liquid photopolymer surrounding the fibers on the outer fiber bundle was cured successfully, but the liquid photopolymer surrounding inside fibers of the fiber bundle could not be cured due to the UV light shading by the outer fibers due to opacity as in shown in Figure A. For the glass fiber experiments; any shadowing effect was not happened due to transparency of the glass fibers. Whole liquid photopolymer material surrounding fibers was cured successfully as shown in Figure B.

Conclusion:

It was found that carbon fiber has limitations about curing of inner part of resin due to its opacity. In contrast, glass fiber was found to be suitable for the process. Because of its transparency glass fiber allow resin curing throughout the fiber even inner part of fiber bundle. The designed nozzle was confirmed by examining the resin and fiber behavior. As the nozzle diameter decreases, the amount of resin decreases, which increases the proportion of fiber in the total mass. However, resin flow is getting increase as the nozzle diameter increases, that adversely affects the process. Because of this situation, the proportion of fiber in the total mass decreases.



Kompozit eklemeli imalat için polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parça üretilebilirliğinin araştırılması

Muhammed Enes Gebel^{ID}, Mehmet Ermurat*^{ID}

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Avşar Yerleşkesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 46040, Onikişubat, Kahramanmaraş, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit eklemeli imalat
- Işıklı kürlenmiş malzeme bazlı kompozit eklemeli imalat için nozul tasarımı
- Karbon ve cam fiber takviyeli kompozit 3 boyutlu yazıcı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 19.08.2019
Kabul: 19.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.606618

Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat,
kompozit eklemeli imalat,
karbon fiber,
cam fiber,
sürekli fiber takviye

ÖZET

Polimer esash eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için, polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit eklemeli imalat üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda önemli bir artış göstermektedir. Bu çalışmada, kompozit eklemeli imalat yöntemi için polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parçaların üretilebilirliği araştırılmıştır. Bu maksatla matris malzemesi olarak UV ışıkla kürlenebilen epoksi reçine, takviye malzemesi olarak da sürekli cam/karbon fiber demetleri kullanılarak kompozit fiber üretilebilen bir sistem geliştirilmiştir. Fiber demeti ve sıvı formda olan ve ışıkla kürlenebilen epoksi reçine bir nozul içerisinden beslenmekte, nozul üzerine monte edilen eş eksensli bir UV ışık kaynağı ile nozuldan çıkan fotopolimerin kürlenmesi sağlanmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda genel olarak matris malzemesinin takviye malzeme demetini tamamiyle kuşattığı, matris malzemesinin UV ışık kaynağı ile kürlenme işleminin sağlandığı ve böylece nozul ekseni doğrultusunda kompozit fiber üretiminin gerçekleştirilebildiği görülmüştür. Opaklığından dolayı karbon fiber takviyeli numunelerde demetin dış kısımdaki fiberlerin demetin iç kısmında bulunan sıvı fotopolimerin kürlenmesi için gerekli UV ışığını gölgelemiş ve kürlenme işlemi başarısız sonuçlanmıştır. Ancak, bu gölgeleme problemi, cam fiber takviyeli numunelerde gözlenmemiştir. Böylece, polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parçaların eklemeli imalat yöntemi ile üretilmesi bakımından cam fiber takviye malzemesinin karbon fiber malzemesine nazaran daha uygun olduğu ortaya konmuştur.

Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing

H I G H L I G H T S

- Polymer matrix continuous fiber reinforced composite additive manufacturing
- Nozzle design for photocurable material based composite additive manufacturing
- Carbon and glass fiber reinforced composite 3 dimensional printer

Article Info

Research Article
Received: 19.08.2019
Accepted: 19.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.606618

Keywords:

Additive manufacturing,
composite additive
manufacturing,
carbon fiber, glass fiber,
continuous fiber
reinforcement

ABSTRACT

Studies on polymer matrix continuous fiber reinforced composite additive manufacturing have shown a significant increase in recent years to improve the mechanical properties of parts produced by polymer-based additive manufacturing methods. In this study, producibility of polymer matrix continuous fiber reinforced composite parts was investigated for the composite additive manufacturing method. For this purpose, a system that can produce composite fiber using UV light curing epoxy resin as matrix material and continuous glass/carbon fiber bundles as reinforcement material has been developed. Photocurable epoxy resin in liquid form and fiber bundle are fed through a nozzle, the photopolymer is cured in the exit of nozzle with a coaxial UV light source that mounted on the head. As a result of the experiments, it has been observed that the matrix material completely encompasses the reinforcement material bundle, the curing process of the matrix material with the UV light source is provided and thus, composite fiber production can be carried out in the direction of the nozzle axis. Because of the opacity, carbon fibers block UV light, so the photopolymer resin at the inner section of the fiber bundle cannot be cured, so carbon fiber reinforced composite fiber production has failed. However, this shading problem was not observed with glass fiber reinforced samples. Thus, it has been demonstrated that glass fiber reinforcement material is more suitable than carbon fiber material in terms of producing polymer matrix continuous fiber reinforced composite parts by additive manufacturing method.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ermurat@ksu.edu.tr / Tel: +90 344 300 1698

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat prosesi fiziksel parçaların geleneksel imalat yöntemleri kullanılmadan 3 boyutlu CAD model verisi kullanılarak malzemelerin birbiri üzerine eklenmesiyle üretilmesi işlemidir.

Fiziksel parçaların hızlı ve otomatik bir şekilde üretilmesine olanak tanıyan eklemeli imalat, günümüzde daha çok kavramsal ürün tasarım denemeleri, hızlı prototipleme sistemleri, fonksiyon ve uyum uygulamaları, master modeller ve son olarak hızlı imalat olanaklarıyla kullanılmaktadır [1]. Bu nedenle günümüzde eklemeli imalat teknolojileri birçok farklı mühendislik alanında (mekanik, biyomedikal, havacılık, elektronik ve daha fazlası) yaygın olarak kullanılmaktadır.

Uzun zamandır yapılan çalışmalarda eklemeli imalat teknolojisi tek tür malzemenin kullanımına dayanmaktaydı. Fakat günümüzde eklemeli imalat teknolojisinin avantajları sebebiyle kompozit malzemelerin eklemeli imalatı üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu nedenle polimer, toz, fiber ve seramik gibi farklı malzemelerin kombinasyonlarının diğer imalat yöntemlerinde kompozit malzemelere yönelimlerin olduğu gibi bu teknikte kullanımı da hızla artmaktadır [2-5]. Eklemeli imalat yönteminde polimerler, özellikle üretim ve elde edilebilirlik kolaylığı açısından çalışmaların odağı haline gelmiştir. Eklemeli imalat endüstrisinde termoplastik polimerler eritilip katılaştırılmasıyla, termoset malzemeler ise katalizör veya ışıkla kürlenmesiyle kullanılmaktadır [6, 7]. Plastik bazlı malzemelerin kullanıldığı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçaların sahip olduğu zayıf mekanik özellikleri iyileştirmek için fiber veya parçacıkla güçlendirme çalışmaları gerçekleştirilmektedir [8]. Ayrıca karbon, kompozit malzemelerde elektrik iletkenliğini sağlamak için de kullanılmaktadır [9]. Polimerlerin fiber takviyeler ile kombinasyonu eklemeli imalat teknolojisinde farklı mekanik özelliklere sahip parça imalatı açısından büyük imkânlar sunmaktadır.

Eriyik yığıma modellemesi (Fused Deposition Modeling) (FDM) prosesi termoplastik bir malzemenin eritilerek yığılmasıyla katman oluşturulması ve katmanların üst üste dizilmesiyle istenilen fiziksel parçanın oluşturulması prensibine dayanır. FDM prosesinde bir filament malzeme eritilerek beslenmektedir. Bu filament malzemesi türüne göre tek tip polimer olarak (ABS, PLA vb.) veya karbon parçacık katkılı filamentler olabilmektedir. FDM prosesinde ABS polimeri içerisine cam fiber parçacıkların [10] ve karbon fiber parçacıkların [11] eklenmesi ile çekme gerilmesini iyileştirme üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Sürekli fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerle eklemeli imalat ile kompozit parça üretimi üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır [3, 12, 13]. Takviye malzemesinin sürekli formda olması kesintili parçacıklı ve karışık yönlü olmasına karşı mekanik özellik bakımından avantajlar getirirken [14], eklemeli imalat yöntemi ile üretilmesi bakımından çeşitli zorluklar barındırmaktadır [15]. Daha önce yapılan çalışmalarda termoplastik polimer

olan (PLA, ABS vb.) sürekli karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit eklemeli imalat işlemi başarılı şekilde uygulanmıştır. Sürekli karbon fiber kullanılarak UV ışıkla kürlenme yönteminde de bazı çalışmalar yapılmaktadır [16]. Ancak bu yöntemde takviye elemanı olan karbon fiberin UV ışığını gölgelemesi sorun teşkil etmektedir. Bundan dolayı karbon fiber tarafından bloke edilen UV ışığı karbon fiber demetinin iç kısmına nüfuz eden reçine bölgelerini sertleştirememektedir. Bu nedenle de heterojen bir yapı oluşmaktadır. Lü vd. [17] bu durumu engellemek için karbon fiber yerine cam fiber kullanmanın sürekli fiber demetinin iç kısmına nüfuz eden reçine bölgelerini kürlenmek için yararlı olabileceğini önermişlerdir.

Gupta vd. [18] ise sürekli karbon fiberlerin takviye, ışıkla kürlenilen reçinenin matris olduğu eklemeli imalat uygulamalarında yaşanan blokenin engellenmesi için UV ışığın yanı sıra sıcaklığın da kullanılmasını önermişlerdir. Çift polimerizasyonun kullanıldığı bir başka çalışmayı da Invernizzi vd. [19] gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada da hem cam ve hem de karbon fiber takviyeli kompozit eklemeli imalatı için matris vazifesi görececek olan reçinenin hem UV ışık hem de sıcaklık etkisi ile kürlenebilen özel bir formülasyonunu kullanmışlardır.

Alpöz vd. yaptıkları çalışmada ışıkla kürlenme metodunun ve ışığın nüfuziyet süresinin reçine tabanlı dışçılık malzemelerinin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Işık kaynağı olarak 2 farklı ışık kaynağı kullanmışlardır. Birincisi 400-515nm dalga boyunda 700mW/cm² yoğunlukta olan Optilux501 halojen ışık kaynağı, ikincisi 430-490nm dalga boyuna sahip 500mW/cm² yoğunlukta olan LED bluephase C5 marka LED ışık kaynağıdır. Çalışmada dental uygulamalarda kullanılan 3 farklı reçine tipi (1. tip Tetric Ceram, 2. tip Compoglass, 3. tip Fuji II LC) üzerinde LED ve halojen ışık kaynağı ile farklı nüfuziyet zamanları (20s ve 40s) kullanılarak reçinelerin küreledikten sonra Vickers sertlik değeri ve basma dayanımı ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda 1. tip reçine 40s LED ile 40s halojen ışık kaynağı ile küreyip önemli bir basma dayanımı gözlemlenmemiştir. Ancak LED ışık kaynağı ile 20s küreldiğinde basma dayanımında önemli bir düşüş meydana gelmiştir. 2. tip reçine ise en yüksek basma dayanımını sırasıyla LED ışık kaynağı ile 40s ve 20s daha sonra halojen ışık kaynağı ile 40s değerlerinde vermiştir [20].

Chantarapanich vd. [21] stereolitografi yöntemini kullanarak foto kürlenmiş epoksiden kenar ve yüzeyden katmanlandırarak elde ettikleri çekme numunelerini farklı dizilim açıları ile üretilen fotopolimer reçinenin mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Deneyler, ortam ışığının kürlenme etkisini gidermek amacıyla karanlık ortamda yapılmıştır. Deneyde kullanılan sabit değerler olarak katman kalınlığı 0,175 mm, lazer tarama hızı 3200 mm/sa, lazer spot genişliği 0,08 mm, lazer tarama metodu olarak çapraz tarama ve lazer gücü 2,5W seçilmiştir. Fotopolimer reçine olarak WatershedXC 11122(DSM Samos, Inc, USA) kullanılmıştır.

Çekme numuneleri farklı yüzey ve kenar olmak üzere 0° , 45° , 90° olarak üretilmiştir. Ayrıca üretilen numunelere 0, 2, 4, 6, 8 saat olmak üzere son kütleme işlemi uygulanmıştır. Deney sonuçlarında maksimum çekme dayanımı kenardan üretilen ve 0° açığa sahip numunede en yüksek çıkmıştır. En düşük çekme dayanımı değeri yüzeyden 0° ile üretilen numunede ortaya çıkmıştır. Son kütleme sonuçlarında aynı metotla ve aynı açıda 5 numune üretilip farklı sürelerde tutulup daha sonra çekme testi uygulanmıştır. Bunun sonucunda en yüksek çekme dayanımı 8 saat son kütleme uygulanmış numunede çıkmıştır. Son kütleme uygulanmayan numunede ise en düşük çekme dayanımı değeri tespit edilmiştir.

Lee vd. [22] yaptıkları çalışmada fotopolimerin kürlenme derinliğini deneysel ve teorik olarak belirlemeye çalışmışlardır. Stereolitografi yönteminde fotopolimer reçinenin kürlenme derinliğinin katman kalınlığını belirlediğini, aynı zamanda kürlenme derinliği ve ışık şiddeti arasında ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Deneylerinde fotopolimer reçine ve 325nm dalga boyunda, spot genişliği olarak 250 μ m ve lazer gücü 40mW olan (He-Cd) lazer kullanmışlardır. Katman kalınlığını belirlemek için 3 farklı enerji yoğunluğunda (0,931 J/cm², 1,732 J/cm², 22,255 J/cm²) deneyler yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda enerji dozajı arttıkça kürlenme derinliğinin katlanarak arttığını belirtmişlerdir.

Matris malzemesi olarak ışıkla kürlenmiş polimerlerin kullanıldığı ve kürlenme davranışının hem geometrik hem de mekanik olarak değerlendirildiği çalışmalarda [20-22], kullanılan ışığın şiddetinin, ışığın dalga boyunun, ışığın maruziyet süresinin ve enerji seviyesinin matris mukavemetine önemli oranda etkisinin olduğu ortaya konulmuştur. Diğer yandan, sürekli fiber ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için kullanılan genel denklem, Eş. 1'de gösterilmektedir [23].

$$\sigma_c(u) = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (1)$$

Bu denklemde $\sigma_c(u)$ kompozit malzemenin gerilme dayanımını, σ_m ve σ_f sırasıyla matris ve takviye malzemesinin çekme dayanımını, V_m ve V_f ise sırasıyla matris ve takviye malzemesinin hacim oranını temsil

etmektedir. Buna göre kompozit bir malzemenin mukavemetinde takviye malzemesinin kullanım oranının yani fiber kütle oranının yüksek olmasının önemli karakteristik bir özellik olduğu anlaşılmaktadır.

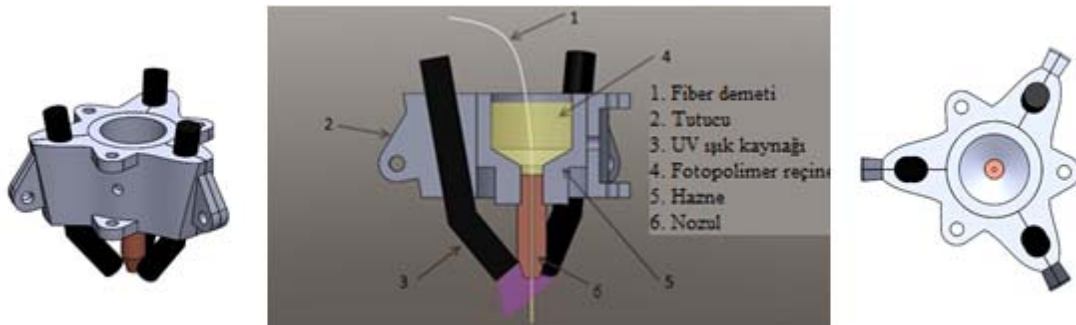
Kompozit malzemelerde takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki yapışmama sorunu zayıf ara yüz bağı oluşmasına neden olmaktadır. Bu zayıf ara yüz bağı takviye malzemesinde daha düşük kuvvetlerde bile kırılmalara neden olmakta ve bu da elde edilen kompozit malzemenin mukavemetini olumsuz etkilemektedir [24]. Diğer kompozit üretim yöntemlerinde olduğu gibi eklemeli imalat yöntemi ile kompozit parça üretim tekniklerinde de yapışma kabiliyeti önemli yer tutmaktadır.

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak UV ışıkla kürlenebilen epoksi reçine, takviye malzemesi olarak da sürekli cam/karbon fiber demetleri kullanılarak kompozit fiber üretilen bir sistem geliştirilmiştir. Fiber demeti ve sıvı formda olan epoksi reçine bir nozul içerisinden beslenmekte, nozul üzerine monte edilen eş eksenli bir UV ışık kaynağı ile nozuldan çıkan fotopolimerin kürlenmesi sağlanmaktadır. Geliştirilen deney seti ile bu çalışmada, kompozit eklemeli imalat yöntemi için polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit fiber parçaların üretilirliği araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Sistemin Genel Tanıtımı (General Information About Test System)

Deney seti olarak kullanılan sistem 3 eksen hareket kabiliyetine sahip bir CNC üzerine kompozit fiber üretim modülünün geliştirilip üretilerek monte edilmesi ile elde edilmiştir. Özgün olarak tasarlanan ve Şekil 1'de gösterilen, kafa olarak da adlandırılan kompozit fiber üretim modülü çeşitli kısımlardan oluşmaktadır. Sürekli forma sahip takviye fiber demeti nozul içerisinden sabit bir hızda beslenebilmekte, bu işlem esnasında nozul üzerinde konumlandırılmış sıvı fotopolimer ile dolu bir hazne içerisinden geçirilmektedir. Takviye fiber demetinin nozul içerisinden beslenmesi, fiber demetinin kafanın alt bölgesinde bulunan platform üzerine önceden tutturulması ve platformun nozul eksenli boyunca (Z eksenli boyunca nozuldan uzaklaştırılması ile) hareket ettirilmesiyle



Şekil 1. Kafa tasarımı (Head Design)

gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde nozuldan çıkan fiber demeti üzerinde belirli miktarda sıvı polimer tutundurulmaktadır. Kafa üzerine konumlandırılan ve nozuldan çıkan fiber demeti üzerine çepeçevre odaklanan UV ışık kaynakları yardımıyla fiber demeti üzerine tutunan fotopolimer malzemenin kürlenmesi gerçekleştirilmektedir.

Numune üretimi fiber demetinin sadece nozul ekseninde boyunca beslenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni nozul çevresinde sadece 3 adet UV ışık kaynağı kullanılmasıdır. Işık kaynakları arasında 120°'lik açı olduğundan dolayı yatay yönlerdeki farklı doğrultularda numuneler UV ışık kaynaklarının farklı tesir bölgelerine maruz kalmaktadır. Bu durumda yönden bağımsız bir kürlenme davranışı elde edilemediğinden dolayı numune üretimi için yatay yönler tercih edilmemiştir.

2.2. Deneysel Parametreleri (Experiment Parameters)

Çalışmalarda kullanılan fotopolimer reçinenin yoğunluğu 1,1g/cm³, reaksiyon enerjisi 423 mJ/cm², çekme dayanımı 62,7MPa'dır. Kullanılan UV led ışık kaynakları 420-480nm dalga boyuna sahiptir ve voltaj ayarlaması yapılarak ışık şiddeti farklılaştırılmıştır. Fiber üretim hızı (Z eksen hızı) 5 mm/sn olarak sabit tutulmuştur. Karbon fiber demeti 1K, cam fiber demeti 300 tex özelliklerinde seçilmiştir. Şekil 2'de karbon fiber ve cam fiber demetlerinin SEM görüntüleri verilmektedir.

Takviye malzemesi olarak opak olan karbon ve şeffaf olan cam fiber demetlerinin kullanılması ile bu malzemelerin ışığı absorbe etmesi/geçirmesi neticesindeki kürlenme davranışı incelenmiştir. Farklı delik çaplarına sahip nozulların kullanılması ile oluşan fiber kütle oranı ve ışık kaynaklarının güç yoğunluklarının farklı şiddette uygulanmasıyla ise ışık

etkisi ile kürlenme kabiliyeti incelenmiştir. Hedeflenen bu inceleme konularına göre, karbon ve cam fiber takviye malzemeleri için ayrı ayrı yapılan deneylerin değişken parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

2.3. Numunelerin Üretimi ve İncelenmesi (Producing and Investigating of Samples)

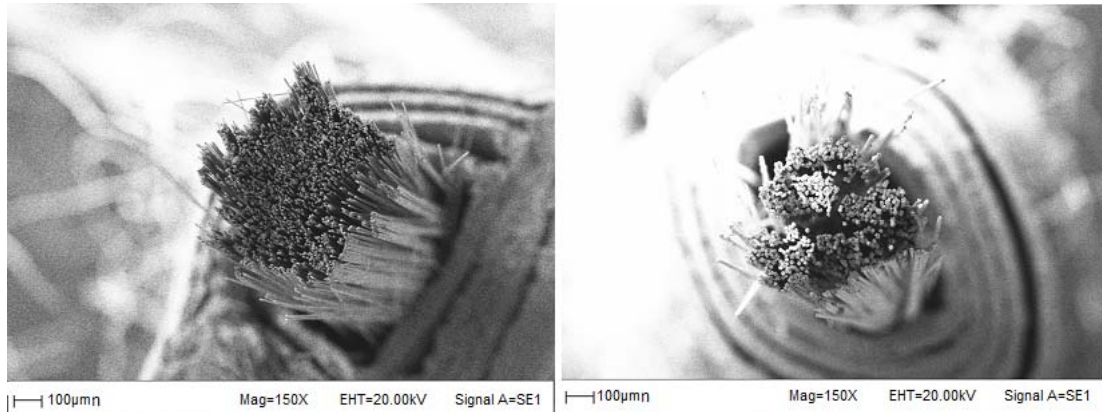
Numuneler her iki takviye malzemesi için ayrı ayrı olmak üzere tam faktöriyel tasarıma göre 9'ar adet deney yapılarak üretilmiştir. Karbon fiberle yapılan deneyler 3'er kez, cam fiber ile yapılan deneyler 2'şer kez gerçekleştirilmiş, sonuçlar ortalama olarak verilmiştir. Deney esnasında alınan görüntüler Şekil 3'de görülmektedir.

Her biri 15cm boyunda üretilen numuneler uç kısımlarından kesilerek her biri 14cm uzunluğuna getirilmiş ve hassas terazide tartılarak toplam kütle değerleri bulunmuştur. Aynı şekilde her iki fiber demeti de hassas terazi ile tartılarak takviye malzemesi kütle değerleri bulunmuştur. Bu veriler kullanılarak fiber kütle oranı değerleri hesaplanmıştır. Cam veya karbon fiber demeti kütlelerinin kürlenme neticesinde elde edilen kompozit fiberin toplam kütlelerine oranı 'fiber kütle oranı' olarak adlandırılmıştır. Fiber kütle oranı Eş. 2 ile elde edilmiştir.

$$R_m = \frac{M_f}{M_t} \quad (2)$$

Burada R_m fiber kütle oranını, M_f takviye fiber kütlelerini, M_t toplam kütleyle ifade etmektedir.

Nozuldan çıkarak karbon fiberler etrafında tutunan reçinenin ışıkla kürlenmesi esnasında, karbon fiberin opak olmasından dolayı özellikle iç bölgelerde olmak üzere ışığın



Şekil 2. Fiber demetlerinin SEM görüntüleri. Karbon fiber (solda) Cam fiber (sağda)
(SEM images of fiber bundles. Carbon fiber (left), Glass fiber (right))

Tablo 1. Karbon fiber ve Cam fiber takviyeli kompozit numuneler için Değişken Parametreler
(Variable Parameters for carbon fiber or fiber glass reinforcement composite samples)

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Nozul çapı	1 mm	1,4 mm	1,8 mm
Işık Güç Yoğunluğu	1565 mW/cm ²	1050 mW/cm ²	465 mW/cm ²

ulaşmadığı kısımlardaki reçine kürlenmemektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi karbon fiberin kesit alanı cam fiberden fazladır. Bu durum sebebiyle karbon fiber demeti cidarına tutunan reçine miktarı cam fiber demetine nazaran daha az olmuş ve gölgelemenin de etkisiyle numune cidarlarında süreksiz kürlenmelere sebebiyet vermiştir. Bu durum Şekil 6a'da açıkça görülmektedir. Cidarda oluşan bu kısımlardaki sıvı olarak kalan süreksiz bölgelerden reçine emdirilerek uzaklaştırılmıştır.

Bu durumdan dolayı karbon fiber kompozit numuneleri, üretimden hemen sonra hassas terazi ile tartılarak ham ağırlık değerleri elde edilmiştir. Daha sonra aynı numuneler, üzerindeki kürlenmeyen epoksi reçinenin uzaklaştırılmasından sonra tekrar tartılmış ve böylece ikincil ağırlık değerleri elde edilmiştir. Eş. 3 kullanılarak kürlenme oranı değerleri hesaplanmıştır. Sadece karbon fiber numuneleri için hesaplanan kürlenme oranı, kürlenmiş reçine miktarının, toplam kullanılan reçine miktarına oranı ile elde edilmiştir.

$$R_c = \frac{R_t - R_c}{R_t} \times 100 \quad (3)$$

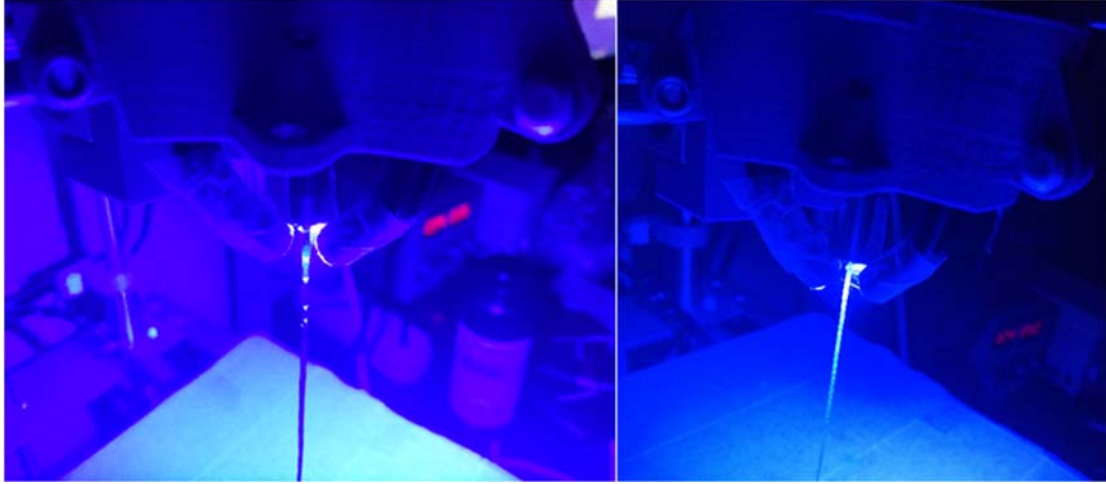
Burada R_c kürlenme oranını, R_c uzaklaştırılan reçine miktarını, R_t Toplam reçine miktarını belirtmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

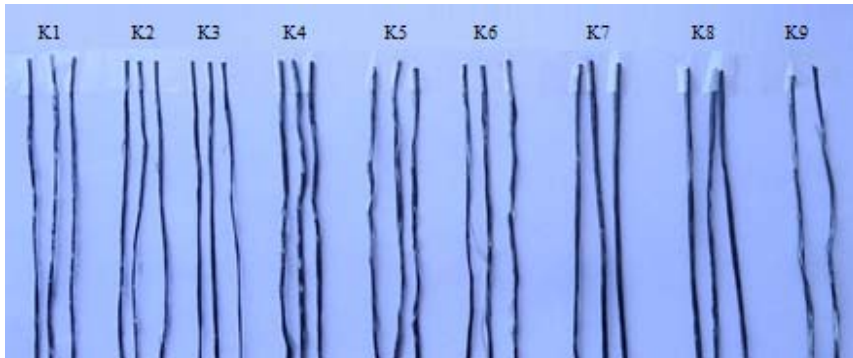
Karbon fiber ve cam fiberden elde edilen numuneler ayrı ayrı değerlendirmeye tabi tutulmuş, sonuçlar ayrı ayrı başlıklar altında verilerek irdelenmiştir. Sonuçlar ve tartışma kısmında numuneler fiber kütle oranları bakımından tartışılmıştır. Karbon fiber takviyeli numunelerde denenmiş tüm parametrelere rağmen tam kürlenme sağlanamadığı için kürlenme oranı ayrıca incelenmiş ve opaklığı sebebiyle metoda ait dezavantajı ortaya konmuştur. Cam fiber takviyeli numunelerde ışığın liflerin hem kesiti boyunca geçebilmesi ve hem de eksenini doğrultusunda yayılabilmesi sebebiyle karbon fiber takviyeli numunelere nazaran çok farklı davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Cam fiber numunelerinin hiç birinde kürlenme sorunuyla karşılaşılması sebebiyle cam fiber takviyeli numunelerde kürlenme oranı %100 olarak kabul edilmiş, sonuçlar kısmında tekrardan belirtilmemiştir.

3.1. Karbon Fiber Takviyeli Numuneler (Carbon Fiber Reinforced Samples)

Karbon fiber takviyeli kompozit numunelere ait bir fotoğraf Şekil 4'te gösterilmiştir. Karbon fiber takviyeli deneylerde fiber demetinin dış kısmında bulunan reçinenin ışıkla



Şekil 3. Karbon (solda) ve cam (sağda) fiber ile yapılan deneyler (Experiments with carbon(left) and glass (right) fiber)



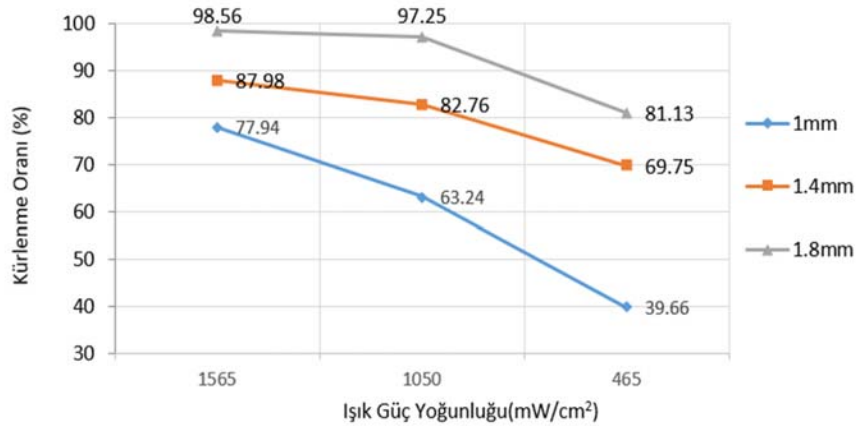
Şekil 4. Karbon fiber takviyeli kompozit fiber numuneleri (Carbon fiber reinforced composite fiber samples)

kürlenmesine karşın karbon fiberin opak oluşundan dolayı ışığı absorbe edip geçişine müsaade etmeyişi, prosesin tam anlamıyla tamamlanmasına engel olmaktadır. Karbon fiberle yapılan deney sonuçları Tablo 2’de gösterilmiştir. Numuneler öncelikle ham olarak, daha sonra da kürlenmeyen sıvı reçinenin uzaklaştırılması ile elde edilen ikincil hali ile tartılmış, ham ve ikincil durumu için fiber kütle oranı değerleri ayrı ayrı hesaplanarak tabloda gösterilmiştir. Karbon fiberle yapılan deneyler sonucunda nozul çapı arttıkça reçinenin takviyeye oranı artmış, bu durum gölgelenmeyen kısımlarda kürlenmiş reçine miktarının artmasından dolayı daha rijit numuneler elde edilmesine sebep olmuştur. 465mW/cm² ışık güç yoğunluğu ile elde edilen numunelerde ışık gücü reçineyi kürlemekte yetersiz kalmış, cidarda oluşan ince bir katman dışında iç kısım kürlenmemiştir. 1 mm, 1,4 mm, 1,8 mm nozul çapına ait kürlenme oranları Şekil 5’te gösterilmiştir. Şekil 5’te ışık güç yoğunluğunun artmasıyla UV ışığının daha iç kısımlara

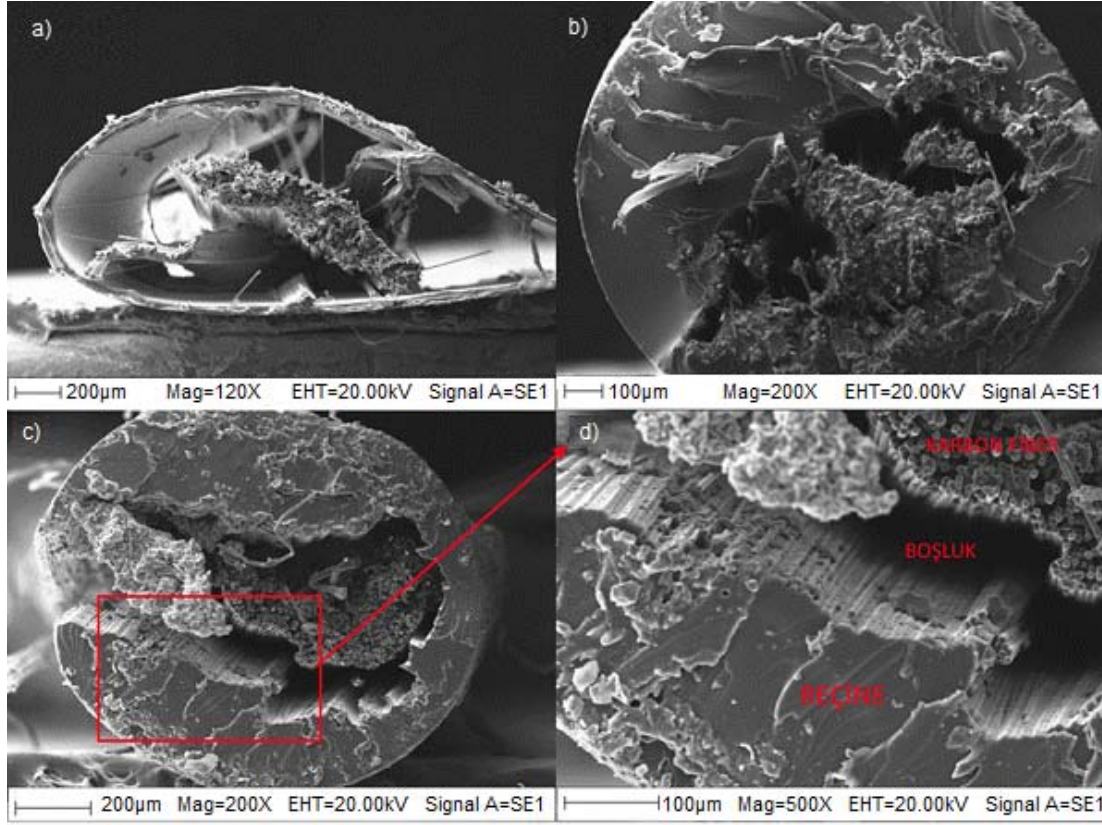
nüfuz ederek kürlenme oranının arttığı görülmektedir. Nozul çapının artmasının da kürlenme oranına pozitif katkı yaptığı görülmektedir. Bunun nedeni SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Şekil 6’de büyük nozul çapına sahip numunelerde fiber demetinin matrisin iç kısmında sınırlı bir alana toplanmış olduğu, bundan dolayı da fiber demetinin dış kısmında kalan ve gölgelemeye maruz kalmayan matris malzemesi miktarının fazla olduğu görülmektedir. Bu da büyük nozul çapına sahip numunelerdeki kürlenme oranının yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Bundan dolayı 1,8 mm nozul çapıyla ve 1565mW/cm² ışık güç yoğunluğu ile elde edilen numuneler, rijitliği en fazla olan numunelerdir. Fakat numuneler kesildiğinde fiberin içerisinde halen kürlenmeyen sıvı halde kalan reçinenin olduğu gözlemlenmiştir. Fiber etrafındaki reçine miktarının artması ve bu reçinenin kürlenerek duvar etkisi oluşturmasından dolayı kürlenmemiş olan reçine numuneden uzaklaştırılamamıştır. Bu sebeple Şekil 5’de 1,8 mm için gözlemlenen yüksek değerler

Tablo 2. Karbon fiberle yapılan deneylerden elde edilen veriler (Data obtained by experiments with carbon fiber composite)

Numune Nr.	Nozul Çapı (mm)	Işık Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)	Ham/İkincil	Toplam (gr)	Fiber kütle oranı	Kürlenme Oranı (%)	Standart Sapma
K1	1	1565	Ham	0,073	0,382	77,94	0,02
			İkincil	0,063	0,442		
K2	1	1050	Ham	0,073	0,382	63,24	0,02
			İkincil	0,057	0,494		
K3	1,4	465	Ham	0,067	0,420	39,66	0,027
			İkincil	0,043	0,646		
K4	1,4	1565	Ham	0,167	0,168	87,98	0,004
			İkincil	0,150	0,187		
K5	1,4	1050	Ham	0,163	0,171	82,76	0,004
			İkincil	0,140	0,200		
K6	1,8	465	Ham	0,150	0,187	69,95	0,008
			İkincil	0,113	0,247		
K7	1,8	1565	Ham	0,260	0,108	98,56	0,007
			İkincil	0,257	0,109		
K8	1,8	1050	Ham	0,270	0,104	97,25	0,002
			İkincil	0,263	0,106		
K9	1,8	465	Ham	0,240	0,117	81,13	0,005
			İkincil	0,200	0,140		



Şekil 5. Karbon Fiber numunelerinin kürlenme oranları (Curing rates graphics of Carbon Fiber samples)



Şekil 6. Karbon kompozit fiber numunelerine ait SEM görüntüleri (1565 mW/cm²) a)1 mm nozul, b)1,8 mm nozul c,d)1,4 mm nozul (SEM images of carbon composite fiber samples a) 1 mm nozzle b) 1.8 mm nozzle c,d) 1.4 mm nozzle)

(özellikle 1565mW/cm² ve 1050mW/cm² ışık güç yoğunluğunda) kürlenme oranını tam olarak yansıtmamaktadır.

Şekil 6'da karbon fiber numunelerinden elde edilen SEM görüntüleri verilmektedir. Karbon fiber numunelerinde fiber-reçine arasında boşluklar olduğu gözlenmektedir. Bu boşluğun bir nedeni karbon fiberlerinin UV ışınlarını absorbe ederek iç kısımda ve arka kısımda kalan reçinenin kürlenmesini engellemesidir. Şekil 6a'dan anlaşıldığına göre, nozul çapının düşük olması fiber etrafındaki reçine miktarının az oluşmasına, dolayısıyla reçinenin ince bir cidar şeklinde oluşmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı 1 mm'lik nozul karbon kompozit fiber üretimi için çok yetersiz kalmaktadır. Büyük çapa sahip nozullarla elde edilen kompozit fiberlerde ise reçine miktarının fazla olmasından dolayı kürlenmiş reçine cidar kalınlığı fazla olmuştur. Dolayısıyla küçük çaplı nozul numunelerine göre daha rijit numuneler elde edilmiştir (Şekil 6). Numune üretimi sonucunda kürlenmeyip sıvı durumda kalan reçinenin uzaklaştırılması neticesinde boş olarak kalan hacimler SEM görüntülerinde gösterilmiştir. Şekil 6d'de reçinenin kürlenmesi sırasında reçine cidarına tutunan ve ışığın iç kısma geçişini engelleyen fiber taneleri reçine ile boşluk bölge arasında gözlenmektedir. SEM görüntüleri verilen numuneler, 1565mW/cm² ışık güç yoğunluğunda yapılan deneylerden elde edilen numunelerdir. Grafikselsel olarak Şekil 5'te ve SEM görüntüleri olarak da Şekil 6'da görüldüğü gibi

karbon fiber kompozit deneylerinde üretilen hiçbir numunede kürlenme tam olarak gerçekleşmemiştir. Bu durum literatürde yapılan diğer çalışmalarda da görülmüş ve aynı şekilde karbon fiberlerin opak olmasından dolayı ışık kaynağının iç kısımlarda gölgelenmesi nedenine dayandırılmıştır [18, 20]. Bu nedenle, kürlenme işleminin ışık kaynağı ile yapıldığı sistemlerde ışığın geçişine izin vermeyecek şekildeki şeffaf olmayan takviye malzemelerinin uygun malzemeler olmadığı söylenebilir.

3.2. Cam Fiber Takviyeli Numuneler (Glass Fiber Reinforced Samples)

Karbon fiber numuneleri ile yapılan çalışmaların ardından Cam fiber ile denemeler yapılmıştır. Cam fiber numuneleri hazırlanırken tüm deneyler birer kez tekrarlanarak ikişer numune üretilmiştir. Sonuçlar ortalama olarak verilmiştir. Cam fiber ile yapılan kompozit numunelerin görüntüleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

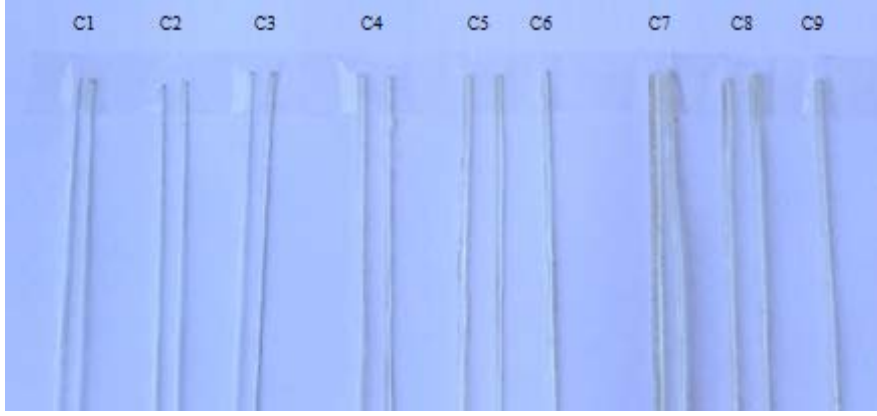
Cam fiber numunelerinde, karbon fiber numunelerindeki gibi gölgeleme etkisinin olmaması ve fiber demeti içerisine giren ışık hızının Z eksenini boyunca uzanan fiberlerin içinde yansıma yoluyla ilerleyerek kürlenmeye yardımcı olması sebebiyle (Şekil 3) cam fiber numunelerinde kürlenme problemi yaşanmamıştır. Cam fiber numunelerinin incelenmesinde reçinenin tamamen kürlendiği gözlemlendiğinden dolayı deney verilerinde kürlenme oranı

%100 olarak belirlenmiştir. Kırılma problemi olmayan cam fiber deneylerinde elde edilen numuneler karbon fiber deneylerinde elde edilen numunelere nazaran daha rijit olduğu gözlemlenmiştir.

Cam fiberlerin karşılaştırılmasında fiber miktarının toplam ağırlığa oranı fiber kütle oranı olarak adlandırılmıştır. Nozul çapına bağlı olarak fiber kütle oranı değeri elde edilmiştir. Cam fiberlerle yapılan deney sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir. Farklı ışık güç yoğunluğuna göre farklı nozul çapları nezdinde oluşan fiber kütle oranı değerlerinin

grafiksel gösterimi Şekil 8'de gösterilmektedir. Işık güç yoğunluğu etkisinin nozul çapına kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buna göre, nozul çapı azaldıkça reçine miktarı azalmakta bu da fiberin toplam kütle içerisindeki payını artırmaktadır. Eş. 1'e bakıldığında kompozit malzemelerde takviye oranının artması kompozit parçanın mukavemet özelliklerini doğrudan artırıcı nitelikte etki eden bir parametre olduğu görülmektedir.

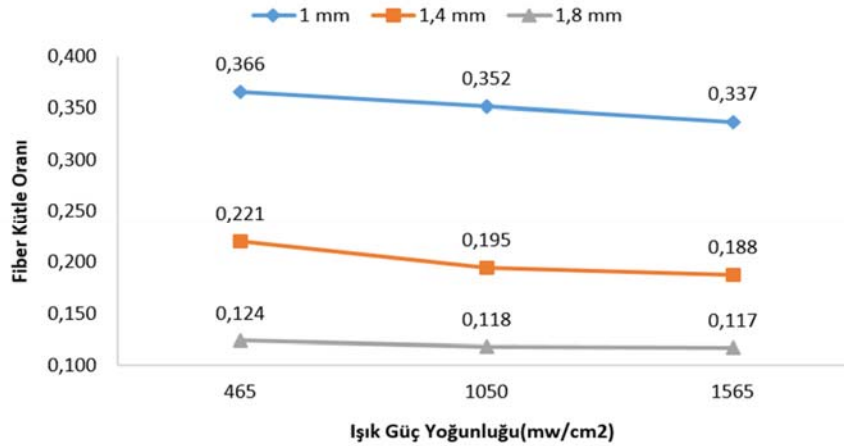
Şekil 9'da cam fiber kullanılarak elde edilen numunelerin SEM görüntüleri verilmektedir. Cam fiber kompozit fiber



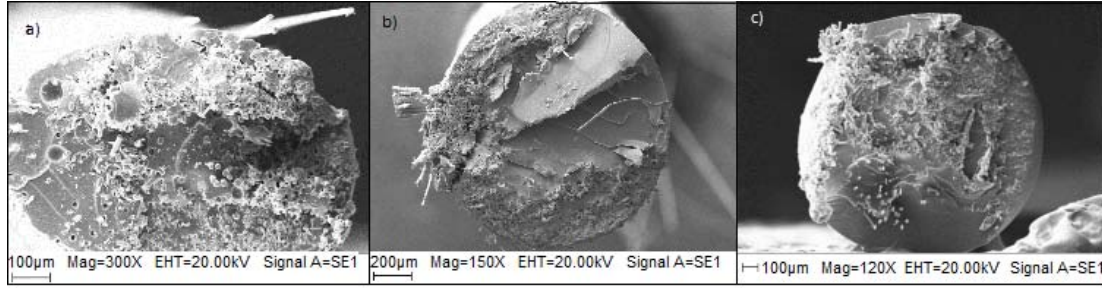
Şekil 7. Cam fiber takviyeli kompozit fiber numuneleri (Glass fiber reinforced composite fiber samples)

Tablo 3. Cam fiberle yapılan deneylerden elde edilen veriler (Data obtained by experiments with glass fiber composite)

Numune Nr.	Nozul Çapı (mm)	Işık Gücü (mW/cm ²)	Toplam (gr)	Fiber Kütle Oranı	Standart Sapma
C1	1	1565	0,125	0,337	0,019
C2		1050	0,120	0,352	0,041
C3		465	0,115	0,366	0,022
C4	1,4	1565	0,225	0,188	0,017
C5		1050	0,217	0,195	0,005
C6		465	0,190	0,221	0,01
C7	1,8	1565	0,360	0,117	0,041
C8		1050	0,355	0,118	0,002
C9		465	0,340	0,124	0,005



Şekil 8. Cam fiber numunelerinin fiber kütle oranları grafiği (Fiber volume ratios graphics of glass fiber samples)



Şekil 9. Cam Kompozit fiber numunelerine ait SEM görüntüleri a) 1 mm nozul b) 1,4 mm nozul c) 1,8 mm nozul
(SEM images of Glass composite fiber samples a) 1 mm nozzle b) 1.4 mm nozzle c) 1.8 mm nozzle)

numunelerine bakıldığında fiberin ıslanmasına rağmen cam fiberlerin kesit alanda homojen bir dağılım göstermediği görülmektedir. Fiber demetinin reçine tarafından tam olarak ıslatılması için yardımcı bir düzenek nozul içerisinde yoktur. Şekil 9b'deki numuneye bakıldığında cam fiber demetinin nozula girmeden önceki kesit şeklini nozul çıkışında da büyük oranda korumaya çalıştığı gözlemlenmiştir. Cam fiber demeti nozula girmeden önce yüksekliği enine göre çok az olan dikdörtgen bir kesit alana sahiptir. Fakat 1 mm nozulda kesitin dar oluşu fiber demetinin nozul öncesi kesit şeklinin değişmesinde etkilidir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Polimer matrisli ve sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerin eklemeli imalat üretim mantığı ile üretilebilirliğinin incelendiği bu çalışmada kısaca şu sonuçlar elde edilmiştir. Cam fiber numunelerinin üretiminde cam fiberin geçirgen (şeffaf) olması nedeniyle gölgelemeye neden olmadığı ve hatta her bir UV Led ışık kaynağından yansıyan ışığın bütün bölgelerde etkili olduğu gözlenmiştir. Bundan dolayı cam fiber takviyesi ile üretilen numunelerde sıvı fotopolimer tamamen kürlenmiştir.

Karbon fiber numunelerinin üretiminde ise nispeten dış kısımda bulunan sıvı fotopolimerin külendiği, ancak fiber demetinin iç kısımlarında bulunan sıvı fotopolimerin gölgeleme problemi nedeniyle kürlenmediği gözlenmiştir. SEM görüntülerinden de anlaşıldığı gibi iç kısımlardaki matris malzemesinin kürlenmesi gerçekleşmediği için fiber demetlerinin matris malzemesi tarafından tutunması tam olarak gerçekleşmemiştir. Bu çalışmada elde edilen numuneler üzerinde mukavemet incelemesi yapılmamış olmasına rağmen karbon fiberlerin matris malzemesine tam olarak tutunamamasından dolayı bu numunelerde mukavemet problemleri yaşanacağı sonucuna ulaşılmıştır. Hem karbon fiberde hem de cam fiberde 1,8 mm nozul çapıyla yapılan deneylerde reçinenin fiber kalınlığının değişmemesi ve fiber ile nozul deliği arasındaki boşluğun artması sebebiyle fiberden daha hızlı akmaya eğilim gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak artan nozul çapının fiber kütle oranını düşürdüğünden dolayı tercih edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada kompozit eklemeli imalat için numune üretme kabiliyetinin araştırılması çalışılmış numuneler üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmemiştir. Ancak Eş. 1'den de anlaşılacağı gibi takviye elemanının hacimce yüksek olması yani fiber kütle

oranının yüksek olması mukavemeti artıran bir genel karakteristik özelliktir. Bu yüzden düşük nozul çapı ile üretilen numunelerde takviyenin malzemesinin hacimce oranının artması daha yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlayacaktır.

5. ÖNERİLER (FUTURE WORKS)

- Üretimin bilgisayar kontrollü olarak gerçekleşmesi için yazılıma ihtiyaç duyulmaktadır.
- İlerleyen süreçte fiber üzerinde oluşan ışık şiddeti karakteristiği irdelenerek sistemin daha verimli hale getirilebileceği düşünülmektedir.
- Eklemeli imalatın yapılabilmesi için tabla yüzeyinde farklı geometrilerde ve ilerleme hızları uygulanarak her birim hacme uygulanan ışık şiddetinin besleme ve ilerleme hızına bağlı değişken hale getirilmesi sağlanması düşünülmektedir.
- Farklı besleme yönü ve açıları da üretimler gerçekleştirilmesi için nozul tasarımı iyileştirilmelidir. Farklı açılarda kompozit fiber üretimi gerçekleştirilebilirse bu yöntemle latis yapılaraya sahip parçalar üretilebilir.
- Yatay yönlerde fiber üretiminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için nozul etrafında her yönde homojen bir ışık tesiri oluşturması bakımından ışık sayısı artırılabilir.
- Geleneksel katmanlı imalat mantığında 3 boyutlu yapılarda geometriler üretilebilmesi için yatay eksenlerde de üretim yapılacak şekilde nozul tasarımının iyileştirilmesi ve bu nozula uygun algoritmalara sahip yazılımlar geliştirilmesi gerekmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

2017/2-25 YLS "3D Yazıcı ile Kompozit Parça Üretimi Yönteminin Geliştirilmesi" projesi Kahramanmaraş Sütçüimam Üniversitesi BAP tarafından desteklenmiş, Proje kapsamında 2019/10399 ve 2019/10402 numaraları ile iki patent için Türk Patent ve Marka Kurumu'na başvuruda bulunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Necmi Kara, Havacılıkta Katmanlı İmalat Teknolojisinin Kullanımı, Mühendis ve Makina, 54 (636), 70-75, 2013.

2. Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Composites Part B: Engineering* 80, 369–378, 2015.
3. Matsuzaki R., Ueda M., Namiki M., Jeong T.-K., Asahara H., Horiguchi K., Nakamura T., Todoroki A., Hirano Y., Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation, *Scientific Reports*, 6, 23058, 2016.
4. Sezer H.K., Eren O., Börklü H.R., Özdemir V., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 663-674, 2019.
5. Topçu İ., Güllüoğlu A.N., Bilici M.K., Gülsoy H.Ö., Investigation of wear behavior of Ti-6Al-4V/CNT composites reinforced with carbon nanotubes, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1441-1449, 2019.
6. Gu DD, Meiners W, Wissenbach K, Poprawe R., Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, *Int Mater Rev*, 57 (3), 133–164. 2012.
7. Hofmann M., 3D printing gets a boost and opportunities with polymer materials, *ACS Macro Letters*, 3 (4), 382–386, 2014.
8. Ivanova, C. Williams, T. Campbell, Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges, *Rapid Prototyp. J.*, 19 (4), 353–364, 2013.
9. Uysal A, Altan E, Karbon Siyahı Takviyeli Elektriği İleten Polipropilen Kompozite Delik Delinmesinde İşlem Parametrelerinin İncelenmesi, *Journal of Polytechnic*, 18 (4), 241-249, 2015.
10. W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song, Z. Li, Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling, *Mater. Sci. Eng:A*, 301 (2), 125–130, 2001.
11. F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, S. Wang, Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Compos. Part B Eng.*, 80, 369–378, 2015.
12. Tekinalp HL, Kunc V, Velez-Garcia GM, Duty CE, Love LJ, Naskar AK, Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing, *Compos Sci Technol*, 105, 144–150, 2014.
13. Van Der Klift F, Koga Y, Todoroki A, Ueda M, Hirano Y, Matsuzaki R., 3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic (CFRTP) tensile test specimens, *Open J Compos Mater*, 6, 18-27, 2015.
14. Parandoush p, Lin D, A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 182, 36-53, 2017.
15. Andrew N. Dickson, James N. Barry, Kevin A. McDonnell, Denis P. Dowling, Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing *Additive Manufacturing*, 16, 146-152, 2017.
16. Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D, 3D printing of polymer matrix composites: A Review and prospective, *Composites Part B*, 110, 442-458, 2017.
17. Lü L, Fuh JYH, Wong YS., Improvements of Mechanical Properties by Reinforcements. *Laser-Induced Materials and Processes for Rapid Prototyping*, 67–88, 2001.
18. Gupta A, Ogale AA, Dual curing of carbon fiber reinforced photoresins for rapid prototyping, *Polym Compos*, 23, 1162–1170, 2002.
19. Invernizzi M, Natale G, Levi M, Turri S, Griffini G, UV-Assisted 3D Printing of Glass and Carbon Fiber-Reinforced Dual-Cure Polymer Composites , *Materials*, 9 (7), 583, 2016.
20. Alpöz R, Ertuğrul F, Cogulu D, Topaloğlu Ak A, Tanoğlu M, Kaya E, Effects of Light Curing Method an Exposure Time on Mechanical Properties of Resin Based Dental Materials, *European Journal of Dentistry*, 2, 37-42, 2008.
21. Chantarapanich N , Puttawibul P, Sittthiseripratip K , Sucharitpwatskul S, Chantaweroad S, Study of the mechanical properties of photo-cured epoxy resin fabricated by stereolithography process, *Songklanakarin J. Sci. Technol*, 35 (1), 91-98, 2013.
22. Jim H. Lee, Robert K. Prud'homme, and Ilhan A. Aksay, Cure depth in photopolymerization: Experiments and theory, *Journal of Materials Research*, 16 (12), 3536-3544, 2001.
23. Callister W.D., *Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 2007.
24. Goh G.D., Dikshit V, Nagalingam A.P, Goh G.L, Agarwala S, Sing S.L, Wei J, Yeong W.Y, Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics, *Materials and Design* 137, 79-89, 2018.



An algorithm and a decision support system for the panelist assignment problem: The case of TUBITAK

Bora Kat

The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), 06100, Kavaklıdere, Ankara, Turkey

Highlights:

- Interactive and dynamic Decision Support System for panelist assignment
- Heuristic algorithm that satisfies equity and relevance
- Competitive performance on test panels: within 1% of exact solutions

Keywords:

- Reviewer assignment problem
- Dynamic panelist assignment
- Integer programming
- Heuristic algorithm
- Decision support system

Graphical/Tabular Abstract

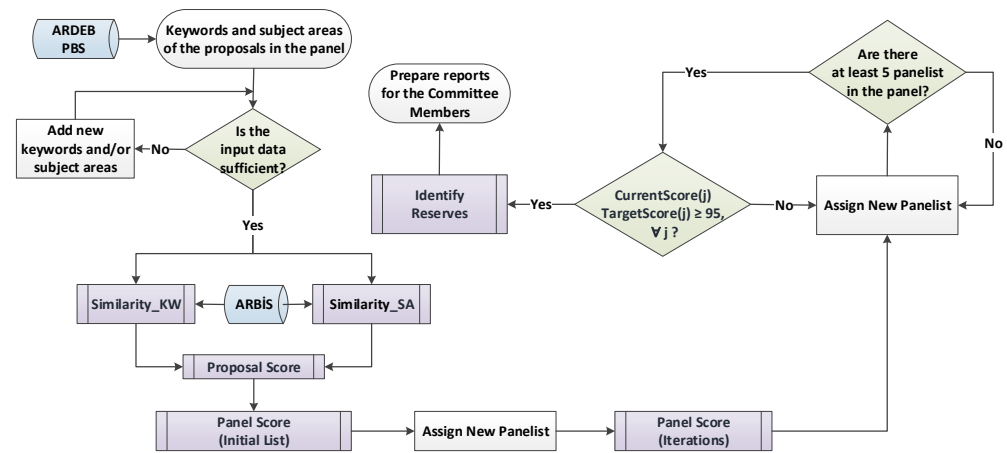


Figure A. Main steps of PaneLIST

Article Info:

Research Article
Received: 08.10.2019
Accepted: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.631071

Acknowledgement:

The author gratefully acknowledges TÜBİTAK for providing this opportunity and thanks Serkan Üçer and Prof. Dr. Lale Özbakır for their comments.

Correspondence:

Author: Bora Kat
e-mail:
bora.kat@tubitak.gov.tr
phone: +90 312 298 1231

Purpose: This study proposes a decision support system (PaneLIST) that would help funding organizations, conference organizers and journal editors in assigning the most appropriate panelists/reviewers in an interactive way while keeping the balance between the evaluation levels of the proposals/papers.

Theory and Methods:

Relevance scores of the candidate panelists are calculated based on the overlaps between their academic expertise and the expertise requirements of the proposals. Keywords and technological codes in TÜBİTAK are used to define these overlaps. Then, a heuristic algorithm is developed to provide a dynamic list of most appropriate candidates considering the existing profile of the panel in order to keep balance of evaluation levels across proposals. Finally, a visual and interactive decision support system (PaneLIST) is developed based on the algorithm.

Results:

PaneLIST's suggestions have been validated on the test panels generated based on the TÜBİTAK data. Its performance was compared with the results of the two integer programming models having the objectives of maximizing the sum of relevance scores (EBSkT) and minimizing the total deviation among the evaluation levels of the proposals (EKSp) as well as a third model (EBSkT-5) which couples the two. The numerical experiments showed that PaneLIST attains high sum of relevance scores with a balanced distribution in terms of evaluation levels of proposals, thus shows regard to objectives of both EBSkT and EKSp at the same time; moreover, the results are so close (less than 1%) to the results of EBSkT-5 in which sum of relevance scores is maximized under a 5% constraint on the total deviation among the evaluation levels of the proposals.

Conclusion:

PaneLIST is a first attempt to automatize panelist/reviewer assignment process in a dynamic and inter-active manner. Besides, it considers not only the total relevance scores assigned to subjects but also the balance across the proposals in terms of their evaluation levels. Further studies on determining relevance scores are needed for better performance of such assignment procedures.



Panelist atama problemi için bir algoritma ve karar destek sistemi: TÜBİTAK örneği

Bora Kat*

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Tunus Caddesi, No:80, 06100, Kavaklıdere, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Panelist atamaları için dinamik ve interaktif bir Karar Destek Sistemi
- En uygun ve dengeli atama sağlayan sezgisel algoritma
- Test panelleri kapsamında kesin çözüm yöntemlerine yakın performans (%)

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 08.10.2019
Kabul: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.631071

Anahtar Kelimeler:

Akran değerlendirmesi,
panel değerlendirmesi,
karar destek sistemi,
hakem atama problemi,
TÜBİTAK,
tamsayı programlama,
sezgisel algoritma,
dinamik panelist atama

ÖZET

Proje önerilerinin sağlıklı bir şekilde ve proje konusunda uzmanlığa sahip kişiler tarafından değerlendirilmesi hem kaynakların etkin bir şekilde kullanılması hem de bu hizmetleri yürüten kurumların güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, birden fazla proje önerisinin değerlendirildiği panellerde en uygun panelist kümesinin oluşturulması için potansiyel panelist adaylarını dinamik bir şekilde listeleyen bir algoritma ve bu algoritmayı kullanan bir karar destek sistemi (PanelIST) geliştirilmiştir. MS Excel VBA tabanlı PanelIST, ülkemizde araştırma desteklerinin önemli bir bölümünü sağlayan ve bunu gerçekleştirirken her yıl çok sayıda panel düzenleyen TÜBİTAK'ın verileri kullanılarak oluşturulan test panellerinde sınanmış ve elde edilen sonuçların öngörülen kriterlerin tamamını önemli ölçüde sağladığı görülmüştür. Ayrıca, PanelIST'in sunduğu çözümler, uygunluk skorları toplamını en büyükleen (EBSkT) ve proje önerilerinin değerlendirme seviyeleri arasındaki sapmaları en küçükleen (EKSp) tamsayı programlama modelleri ile birlikte bu iki durumu bir arada ele alan üçüncü bir modelden (EBSkT-5) elde edilen kesin ve en iyi çözümleri ile kıyaslanmıştır. PanelIST'in, yüksek uygunluk skorları toplamını, projeler arasında dengeli bir dağılım gözeterek gerçekleştirdiği ve bu yönüyle EBSkT ve EKSp'de yer alan iki hedefi bir arada gözettiği; %5'lik bir sapma kısıtı altında en büyük skoru bulmayı amaçlayan problem (EBSkT-5) ile hemen hemen aynı (%1'in altında yakınlık) performansı gösterdiği belirlenmiştir.

An algorithm and a decision support system for the panelist assignment problem: The case of TUBITAK

H I G H L I G H T S

- Interactive and dynamic Decision Support System for panelist assignment
- Heuristic algorithm that satisfies equity and relevance
- Competitive performance on test panels: within 1% of exact solutions

Article Info

Research Article
Received: 08.10.2019
Accepted: 10.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.631071

Keywords:

Peer review,
panel evaluation,
decision support system,
reviewer assignment problem,
TUBITAK,
integer programming,
heuristic algorithm,
dynamic panelist assignment

ABSTRACT

Evaluation of project proposals in a proper manner and by the people who have expertise on the topics of the proposals is crucial not only for efficient deployment of resources, but also for credibility of the funding organizations. In this study, an algorithm and a decision support system (PanelIST) are developed to provide a dynamic list of potential panelists from which the most appropriate set of panelists will be selected. PanelIST, which is based on MS Excel VBA, has been validated by using the data of TUBITAK, primary organization responsible for research funding and conducts the comprehensive peer review activities for a long time. The results showed that the PanelIST satisfies the required criteria to a great extent. Moreover, PanelIST's performance was compared with the results of the two integer programming models having the objectives of maximizing the sum of relevance scores (EBSkT) and minimizing the total deviation among the evaluation levels of the proposals (EKSp) as well as a third model (EBSkT-5) which couples the two. The numerical experiments showed that PanelIST attains high sum of relevance scores with a balanced distribution in terms of evaluation levels of proposals, thus shows regard to objectives of both EBSkT and EKSp at the same time; moreover, the results are so close (less than 1%) to the results of EBSkT-5 in which sum of relevance scores is maximized under a 5% constraint on the total deviation among the evaluation levels of the proposals.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: bora.kat@tubitak.gov.tr/ Tel: +90 312 298 1231

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilimsel ve teknolojik araştırmalar, ekonomik, sosyal ve çevresel açılardan toplumların gelişmesi ve refah düzeyinin artması yönünde büyük önem taşımaktadır. Hızla artan dünya nüfusunun ihtiyaçları ve her geçen gün farklı ve daha karmaşık bir yapıya bürünen üretim-tüketim ilişkileri sonucunda ortaya çıkan, kaynakların mümkün olduğunca etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılması zorunluluğu da bilimsel ve teknolojik araştırmaların önemini artırmıştır. Bu süreçlerin işleyebilmesi; altyapı, malzeme ve en önemlisi yetişmiş insan gücü gerektirmektedir ki bu girdilerin tamamı ancak iyi hazırlanmış planlar ve finansman ile mümkün olabilir. Araştırma ve geliştirme çalışmaları için ihtiyaç duyulan fonların bir bölümü, rekabet etme yeteneklerine sundukları katkılardan dolayı özel sektör eliyle veya kâr amacı gütmeyen yerel/bölgesel/küresel örgütler tarafından sağlanıyor olsa da gelişmekte olan ülkelerde ağırlıklı olarak kamusal kaynaklar ile karşılanmaktadır. Bu bağlamda, stratejik bakımdan, kamu kaynaklarının araştırma ve/veya geliştirme alanlarına en etkin şekilde paylaşılması; operasyonel açıdan ise belli bir alandan gelen proje fikirlerinin doğru yöntemler ile değerlendirilmesi kritik karar süreçleri olarak karşımıza çıkar. Bu çalışma, ikinci problemi, yani birden fazla proje önerisinin bilimsel olarak değerlendirilmesi sürecini ele alırken, sunulan önerilerin proje konusunda en uygun uzman grubu tarafından değerlendirilmesine yardımcı olacak bir karar destek sisteminin (KDS) geliştirilmesini amaçlamaktadır.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), ülkemizde akademik ve endüstriyel araştırma ve geliştirme çalışmalarına fon sağlayan en önemli kurumdur. Çeşitli alt bileşenleri aracılığı ile yürüttüğü çok sayıda ve farklı yapıdaki destek programı kapsamında akran değerlendirmeleri gerçekleştirmektedir. Özellikle Araştırma Destek Programları Başkanlığı (ARDEB) kapsamında yapılan değerlendirmelerin önemli bir bölümünde 2004 yılından bu yana panel değerlendirmesini kullanmaktadır. TÜBİTAK'ta uygulanan panel değerlendirmesi, benzer konudaki proje önerilerinin konunun uzmanı olan araştırmacıların katılımı ile gerçekleştirilen bir toplantı kapsamında sıra ile tartışıldığı ve belirli değerlendirme kriterleri çerçevesinde puanlanarak hem bilimsel hususları hem de bütçe hususlarını içeren ortak değerlendirme raporlarının hazırlandığı bir yöntemdir. Yıllar içerisinde, elde edilen tecrübe ve "know-how" ile birlikte bu değerlendirmeleri daha etkin yönetmek amacıyla çeşitli veri tabanları ve iş uygulama yazılımları geliştirilerek bütünlük bir bilgi yönetim sistemi oluşturulmuştur. Araştırmacı Bilgi Sistemi (ARBİS) ile başlayan bu yapı, zamanla geliştirilen Proje Başvuru Sistemi (ARDEB-PBS), Panel Yönetim Sistemi (PYS) ve Proje Takip Sistemi (ARDEB-PTS) ile birlikte bütünlük bir yapıda servis sağlamaktadır. Öngörülen algoritma ve KDS (PaneLIST) mevcut pilot versiyonunda ARBİS ve ARDEB-PBS verileri ile çalışmaktadır. Sonraki aşamada ise PYS'ye entegre edilmesi planlanmaktadır. ARDEB kapsamında 2004 yılında 71 panel

ile başlayan süreç, 2018 yılı itibariyle yaklaşık bine ulaşmıştır. Bunlara ek olarak, dış danışmanlar tarafından uzaktan değerlendirilen proje önerisi sayısı ise 2018 için 3-4 bin mertebelerindedir. Çalışmada kurgulanan PaneLIST yazılımı, hangi proje önerilerinin yer alacağı belirli olan bir panel için; proje önerisi ile potansiyel panelistlerin anahtar kelimelerinin ve faaliyet alanlarının ne kadar örtüştüğüne göre hesaplanan skorları dikkate alarak bir öneri listesi oluşturmaktadır. Daha da önemlisi, oluşturulan bu liste, panele panelist eklendikçe veya davet edilen panelistlerin katılmayı kabul etmemesi durumunda, panelin mevcut durumunu dikkate alarak dinamik bir şekilde güncellenmektedir. PaneLIST, ARDEB'e bağlı Mühendislik Araştırma Grubu'nda (MAG) Endüstri Mühendisliği alanındaki veriler kullanılarak test edilmiştir. Oluşturulan panellerin kalitesini belirlemek için PaneLIST'in sunduğu çözümler, ikisi doğrusal olmayan üç farklı tamsayı programlama modeli ile kıyaslanmıştır. Bunlardan ilki, uygunluk skorları toplamını en büyükleyen EBSkT modeli; ikincisi, proje önerilerinin değerlendirme seviyeleri arasındaki sapmaları en küçükleyen EKSp modeli ve sonuncusu da ilk iki modeldeki amaçları birlikte temsil eden EBSkT-5 modelidir. PaneLIST'in, yüksek uygunluk skorları toplamını, projeler arasında dengeli bir dağılım gözeterek gerçekleştirdiği ve bu yönüyle EBSkT ve EKSp'de yer alan iki hedefi bir arada gözettiği; %5'lik bir sapma kısıtı altında en büyük skoru bulmayı amaçlayan EBSkT-5 ile hemen hemen aynı (%1'in altında yakınlık) performansı gösterdiği belirlenmiştir.

Makalenin bundan sonraki bölümünde ilk olarak literatür taraması sunulacak, ardından ise tanımlar ve metod bölümü gelecektir. Dördüncü bölümde ARDEB kapsamındaki uygulamalar açıklanıp, PaneLIST'in Endüstri Mühendisliği verileri baz alınarak hazırlanan test panellerindeki performansı analiz edilecektir. Beşinci bölüm simgelere, altıncı bölüm ise sonuçların özetlenmesi ve ileride yapılacak çalışmalara ayrılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Akran değerlendirmesi, bilimsel dergi makalelerinden araştırma fonu için sunulan proje önerilerine, konferans bildirilerinden akademik unvanların veya ödül alacak kişilerin belirlenmesine pek çok alanda kullanılan bir değerlendirme yöntemidir. Bu yöntemin; ülkeler, bilimsel alanlar, varsa değerlendirme sonucunda karar verilen bütçe miktarı, değerlendirme için verilen süre kısıtı vb. hususlara bağlı olarak pratikte pek çok varyasyonu bulunmaktadır. Bu varyasyonların her biri için önceden belirlenmiş kriterler ve performans ölçütlerini en üst derecede sağlayacak algoritma ve yaklaşımlara yönelik literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu bölümde, konunun farklı boyutlarına yönelik literatür genel olarak ele alınacaktır. Bununla birlikte, TÜBİTAK özelinde tanımlanan problem kapsamında, belirlenmiş bir panel için en uygun panelistlerin atanması problemi ile yakın ilişkili olan çalışmalara odaklanılacaktır.

2.1. TÜBİTAK Örneği ve Bu Örneğin Literatürdeki Yeri (Case of TUBITAK and Its Place in the Literature)

TÜBİTAK ARDEB kapsamında düzenlenen panellere ilişkin sürecin bütünü aşağıda Şekil 1’de özetlenmiştir. Bu süreç, ulusal ve uluslararası fonlayıcı kuruluşlarda da ana hatları ile benzer bir şekilde işlemektedir, örn. [1]. Süreçte yer alan Adım 4-Adım 6 dışındakiler, çerçevesi daha net olan ve mevcut uygulama yazılımları ile büyük oranda sistematik hale getirilmiş rutin işlemleri içermektedir. Ancak, Adım 4-Adım 6’da, daha etkin ve sağlıklı bir değerlendirme yapılabilmesi ve süreçlerin daha şeffaf ve ikna edici olabilmesi için karar destek sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu süreçler hâlihazırda aşağıda sunulan alt adımlar ile gerçekleştirilmektedir:

Adım 4: Öneriler, her panelde 3 ila 5 proje önerisi olacak şekilde konularına göre gruplanmaktadır. Bu işlem, proje yürütücülerinin ARDEB-PBS’de girmiş oldukları panel tercihleri de dikkate alınarak Kurul Üyeleri’nin (ARDEB Araştırma Destek Grupları faaliyetleri ile ilgili konularda görüş, öneri ve karar oluşturan Grup Yürütme Kurulu – GYK- Üyeleri ile GYK’ya görüş bildirmekle sorumlu Danışma Kurulu Üyeleri) görüşleri doğrultusunda ARDEB Araştırma Destek Grupları tarafından gerçekleştirilmektedir. Kurul Üyeleri, bu aşamada ayrıca her bir grup için sorgu yapılacak anahtar kelimeleri belirlemektedir.

Adım 5: İlgili anahtar kelimeler, çıkar ilişkileri ve varsa projenin önceki değerlendirmeleri dikkate alınarak ARBİS, Web of Knowledge, Scopus ve YÖK veri tabanlarında tarama yapılarak potansiyel panelist listeleri oluşturulur ve ilgili Kurul Üyeleri’ne iletilir.

Adım 6: Kurul Üyeleri’nin belirlediği asil ve yedek listeler, Grup Koordinatörü’nün onayı doğrultusunda kullanılarak paneller kurulur.

Panelist atama problemleri, konferans bildirilerinin değerlendirilmesi veya bir dergiye gönderilen makalelerin değerlendirme süreciyle önemli benzerlikler içermektedir. Bu problemlerde, ülkeler ve kurumlar tarafından farklı yaklaşımlar sergilense de, izlenen yöntemler iki ana grupta toplanabilir (akran değerlendirmesi üzerine daha detaylı bilgi için bkz. [2]):

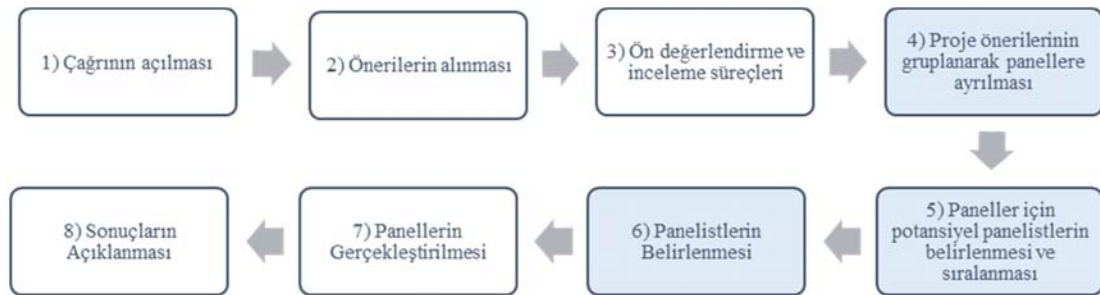
1. Değerlendiricilerin tüm değerlendirme süreçlerini internet üzerinden ve diğer değerlendiricilerden bağımsız olarak gerçekleştirdikleri yöntem. Bu yöntem, pratikte iki şekilde uygulanır:

- Akademik dergilere sunulan makaleler veya fon sağlayıcı kuruluşlarda herhangi bir çağrı dönemi olmaksızın sürekli başvuruya açık olan programlara sunulan proje önerileri bu yöntemle değerlendirilir. Başvuru sayısının, alan bazında konu bütünlüğü sağlanabilecek şekilde gruplamaya imkân vermediği veya değerlendirme süreci için kısa süre verilen çağrılar için de kullanılabilir. Bu yöntemde, makale ve öneriler diğer başvurulardan bağımsız olarak bireysel bir şekilde değerlendirilir. ARDEB kapsamında yürütülen 1002-Hızlı Destek Programı, 3501-Kariyer Programı ve çok sayıda ikili iş birliği programı bu şekilde değerlendirmeye alınmaktadır.
- Başvurular toplu olarak ele alınır. Konferans organizasyonlarında bu yöntem uygulanır.

2. Değerlendiricilerin nihai değerlendirmelerini bir araya gelerek gerçekleştirdikleri yöntem. Literatürde panel veya komite yöntemi olarak da adlandırılır [3-5]. Bu yöntemin pratikteki karşılığı da iki ana grupta toplanmaktadır:

- Panelistlerin çok sayıda proje önerisinin yer aldığı panelde belirli önerilere atandığı; panelistler için işyükü, öneriler için ise atanan minimum panelist sayısı kısıtlarının yer aldığı yöntem. Pek çok ülkedeki fon sağlayıcı kuruluşlarda, Avrupa Çerçeve Programı kapsamındaki çağrılarda ve Avrupa Bilim Vakfı’nın düzenlediği panellerde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır [2, 3].
- Az sayıda proje önerisinin değerlendirildiği ve panelistlerin, ön değerlendirme raporu hazırlamasalar bile tüm proje önerileri için oylamaya katılımlarının zorunlu olduğu uygulama. Bu yöntem ARDEB kapsamında düzenlenen tüm panellerde uygulanmaktadır.

Literatürdeki çalışmalar genellikle Şekil 1’deki Adım 4-Adım 6 ile 1b ve 2a’da yer alan problemleri ele almaktadır. 1b ve 2a’daki problemler çözüm açısından küçük nüanslara sahip olmakla birlikte esasında aynı problemdir. Her ikisinde de amaç, bir grup makale, bildiri veya proje önerisine belirli sayıda veya üzerinde hakem/panelist atamak ve her



Şekil 1. TÜBİTAK ARDEB kapsamında panel ile değerlendirme yapılan programlara ilişkin süreç
(Process steps related to the TUBITAK ARDEB programs which are evaluated at panel meetings)

hakem/panelist için belirli sayıda veya altında atama yapmaktır. Literatürde en sık çalışılan yapı olan bu problem Hakem Atama Problemi, HAP, (Reviewer Assignment Problem, RAP; Conference Paper Assignment Problem, CPAP) olarak adlandırılır. 1a'daki problem, tek bir proje veya makaleyi ele aldığından, aslında Adım 5'in sonucunda ortaya çıkan liste üzerinden, varsa ek hususlar dikkate alınarak basit bir prosedür ile çözülebilmektedir. Mevcut çalışmada, yukarıda 2b grubunda tanımlanan uygulama ele alınmakta ve bu problemde Adım 5 ve Adım 6 için katkı sağlayacak modeller önerilmektedir. Bu problem, mevcut çalışmada tam eşleşmeli Hakem Atama Problemi, teHAP (complete match Reviewer Assignment Problem, cmRAP) olarak adlandırılmıştır. Elbette, teHAP, HAP'ın özel bir durumudur ve önerilere atanması gereken panelist sayısı ve panelistlerin atanabileceği öneri sayısı değiştirilerek teHAP durumu elde edilebilir. Ancak, panelistlerin panelde yer alan tüm öneriler için puan vermesi durumu, her panelistin her proje önerisi için belirli seviyede uzman olmasını zorunlu kılmaktadır. Diğer taraftan, öneriler arasında değerlendirme düzeyleri açısından dengeli bir dağılım olması da bu çalışmanın amaçları arasındadır. Literatürde, her bir öneriye veya bildiriye atanacak kişi sayısının belirli bir değerin üzerinde olmasını ve belirli bir uygunluk skoru seviyesini sağlamayı amaçlayan ve dengeleme kısıtlarını ayrı ayrı farklı kurgularda ele alan çalışmalar olsa da hepsinin birlikte ele alındığı bir çalışma bulunmamaktadır. ARDEB örneği, bu çalışmaların, ek kısıtlar veya amaçlar getirilerek uyarlanması ile oluşturulabilir ki son bölümde bu formülasyonlar sunulmuştur. Ayrıca PaneLIST, Adım 5 için gerçekleştirdiği hesaplamalar sonucunda, karar vericilerin en yüksek skorlu yüz aday arasından dinamik bir şekilde panelist belirlemesini öngörmektedir. Bu ölçekte bir problem için tüm kombinasyonları dikkate alarak amaçları sağlayacak en uygununu seçme problemi, gelişmiş veri işleme kapasiteleri dikkate alındığında makul süreler içinde çözülebilir. Ancak, bu çalışmadaki en önemli katkı, tüm bu hususların problemin doğası gereği dinamik bir yapıda ele alınması, asil/yedek panelistlerin belirlenmesi, asil-yedek değişiminin yapılması, uygunluk skoru dışında dikkat edilen diğer hususların da bu yapı içerisinde kolaylıkla yönetilebilmesidir. Bir sonraki bölümde, literatürdeki yaklaşımlar, kesin çözüm yöntemleri ve sezgisel algoritmalar; problemin daha iyi konumlandırılması ve PaneLIST'in genel kabul gören performans kriterlerini ne ölçüde sağladığını analiz etmek için detaylı bir şekilde sunulmuştur.

2.2. Konu ile Yakından İlgili Çalışmalar (Review of Closely Related Studies)

İki veya daha fazla kümenin elemanları arasında en iyi eşleşmeyi amaçlayan atama problemleri (AP) literatürde 60 yıldan uzun süredir çalışılmaktadır. Bu problemlerde amaç, en küçük maliyeti veya en büyük karı/faydayı elde etmek olabileceği gibi aşağıdaki bölümlerde değinileceği üzere, ele alınan problem özelinde belirlenmiş farklı amaçlar için de kullanılmıştır. Klasik AP, Macar Yöntemi [6] ile polinom zamanlı çözülebilir bir problemdir. Klasik AP için zaman içerisinde uygulama alanları ile değişen amaçları ve kısıtları dikkate alan çok sayıda varyant tanımlanmış ve bunlara

yönelik çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir [7, 8]. Diğer taraftan, klasik AP, literatürde ağırlıklı İki Parçalı Eşleştirme Problemi (Weighted Bipartite Matching Problem) ve İnsan Kaynağı Tahsisi Problemleri (Human Resource Allocation Problem, HRAP) ile belirli koşullar altında matematiksel olarak eşitir [7, 9]. Kaynak tahsisi probleminin (resource allocation problem, RAP) kaynak olarak insan kaynağı olduğu özel durumunu ele alan HRAP, üretim planlama, sağlık sistemleri, proje yönetimi, bakım yönetimi, otel yönetimi, eğitim sistemleri, askeri hizmetler ve spor yönetimi alanları kapsamında ele alındığı gibi hakem/panelist atamaları kapsamında da değerlendirilebilir [9]. Ayrıca, kişilerin yetkinlikleri ve tercihleri dikkate alınarak ekip oluşturma ve oluşan ekipleri belirli görevlere/kişilere atama problemleri de bu kapsamda değerlendirilebilir, örn. [10].

Bu çalışmada ele alınan HAP, kısıtlar ve amaç fonksiyonları olarak farklı AP'ler ile ortak özellikler taşımaktadır. Sonuç olarak, elimizde panelist adayları ve proje önerileri olmak üzere iki küme bulunmakta, en büyük uygunluk skorlarını elde etme amacıyla birlikte dengeli atama problemi (balanced assignment problem) ve en küçük sapmalı atama problemlerine (minimum deviation assignment problem) benzer şekilde, proje önerilerinin değerlendirme seviyelerinin mümkün olduğunca birbirine yakın olmaları beklenmektedir [7, 11].

HAP, en genel haliyle Eş. 1-Eş. 4'deki gibi tanımlanır [12]:

$$\text{Maks } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} * x_{ij} \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = a_j \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq b_i \quad \forall i \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq \left\lfloor \frac{c_{ij}}{T} \right\rfloor \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ veya } 1$$

Bu modelde, I ve J kümeleri, sırasıyla kişileri ve görevleri temsil etmektedir. $c(i, j)$, i hakeminin j makalesi ile eşleşme derecesini göstermektedir. x_{ij} ise i hakeminin j makalesine atanması durumunda 1, aksi durumda 0 değerini alan ikili değişkendir. a_j makale j için atanması gereken hakem sayısını, b_i ise hakem i için en çok kaç makale atanabileceğini göstermektedir. Eş. 2'de j makalesine atanacak hakem sayısı sabitlenmekte, Eş. 3'te ise her hakemin değerlendireceği makale sayısı sınırlandırılmaktadır. T ise bir hakemin bir makaleye atanabilmesi için gerekli olan en düşük eşleşme seviyesini belirtmekte ve her bir makale için yazılan kısıtlar Eş. 4'te görülmektedir. Bazı durumlarda, bir makale için en az bir hakemin belirli bir eşik değeri aşması, mümkün olduğunca uzman olması ("as expert as possible", [13]) yeterli görülebilir. Böyle bir durumda Eş. 4, $\max_{i \in I} \{c_{ij} x_{ij}\} \geq T$ şeklinde uyarlanır [12]. HAP, bir önceki bölümde de belirtildiği üzere aslında birkaç adımda oluşmakta ve

uygulamada farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu çalışmada ele alınan TÜBİTAK örneğini değerlendirirken literatürdeki çalışmaların Adım 4- Adım 6 ve 1b, 2a ve 2b ile ilişkileri de kurulacaktır.

Adım 4, yani projelerin gruplandırılması problemi, pazarlamadan siyasete, sosyolojiden teknoloji yönetimine pek çok farklı alanda karşılaşılan yaygın bir problemdir. Burada amaç, belirli bir kümede yer alan elemanların, aralarındaki benzerlik ilişkileri dikkate alınarak gruplanmasıdır. Kümeleme (clustering) olarak bilinen bu problem için son yıllarda çok gelişmiş istatistiksel yöntemler ve makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmaktadır. ARDEB’de hâlihazırda proje önerileri Kurul Üyeleri ve Araştırma Destek Grupları tarafından yürütücülerin önerdikleri panel isimleri de dikkate alınarak gruplandırılmaktadır. Mevcut çalışma, bu aşamanın tamamlandığı, yani hangi projelerin yer alacağı belirli olan panelleri ele almaktadır. Literatürde projelerin gruplaması aşamasını [1] veya mevcut bir panel içindeki projelerin gruplanmasını kapsayan çalışmalar bulunmaktadır [14-18].

Goldsmith ve Sloan [19] HAP’ın varyantlarını ve bunlara yönelik sunulan çözüm yöntemlerini derledikleri çalışmalarında, literatürde kullanılan altı farklı amaç fonksiyonunu tanımlamış ve sadece hakem adaylarının tercihlerinin dikkate alındığı durum için problemleri Minimum/En Küçük Maliyet Akış Problemi (Minimum Cost Flow Problem, MCFP) olarak modellemiştir. Diğer taraftan, makaleler için de bir tercih sıralaması dikkate alındığında problem Kararlı Evlilik Problemi’nin (Stable Marriage Problem) polinom zamanda çözülemeyen bir varyantına dönüşmektedir. Ancak, sonraki bölümlerde de değinileceği üzere panele atanan tüm panelistlerin tüm proje önerileri için puanlamaya katılma zorunlulukları ve konunun doğası gereği atama yapılırken mevcut panel durumunun dikkate alınması veya daveti kabul etmeyen panelistler için yeni isimlerin belirlenmesi gereksinimleri, daha esnek ve dinamik bir yaklaşımın geliştirilmesini elzem kılmaktadır. Diğer taraftan, Hartvigsen vd. [13], HAP için iki aşamalı bir çözüm yöntemi önermiştir. İlk aşamada her bir hakem adayının her bir makale için uzmanlık seviyeleri belirlenmektedir. Adayların bildirdikleri uzmanlık alanları ve makale yazarlarının bildirdikleri makalenin uzmanlık alanları dahilinde çok sayıda Ulaştırma Probleminin (Transportation Problem) çözümü sonucunda, hakem-makale çiftleri arasındaki uzmanlık değerleri hesaplanmaktadır. İkinci aşamada ise, her bir makale için en az bir atanmanın yüksek uzmanlık seviyesinde olması için Kapasite Kısıtlı Darboğaz Aktarma Problemi (Capacitated Bottleneck Transshipment Problem) tanımlanmıştır.

Janak vd. [3] 2a’daki problemi ABD Ulusal Bilim Vakfı (US National Science Foundation, NSF) özelinde Çok Kaynaklı Genelleştirilmiş Atama Problemi (Multi Resource Generalized Assignment Problem, MRGAP) olarak ele almıştır. NSF’deki uygulama, aslında panelist seçimini değil, panel için atanmış panelistlerin hangi projelere hangi görevle (ana sorumlu - lead, raportör - scribe, hakemler -

reviewers) atanacağını belirlemeyi amaçlamaktadır ve bu aşamada panelistlerin her bir proje için yaptıkları tercihleri de dikkate almaktadır. Bu problem, hangi panelistlerin panele atanacağına karar vermemesi, tüm panelistlerin tüm projeler için değerlendirme yapma zorunluluğu olmaması ve uygunluk skoru yerine tercihlerin dikkate alınması hususları ile mevcut çalışmadan ayrılmaktadır. Geliştirilen yöntemin NSF örneği özelinde uygulandığı bir başka çalışma ise Hettich ve Pazzani’nin [17] çalışmasıdır. Bu çalışmada, önerilerin paneller bazında gruplanması ve hakem belirlenmesi aşamalarında Terim Frekansı - Ters Belge Frekansı (Term Frequency - Inverse Document Frequency, TF-IDF) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, sunulan öneriler ve panelist adaylarının daha önce sundukları öneriler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Panelist-proje eşleşmelerini ise, elde ettikleri terim ağırlıkları üzerinden hesapladıkları indekslerin tepe tırmanma (hill climbing) sezgiselinde kullanmıştır. Bu çalışmada da dinamik bir yaklaşım söz konusu değildir.

HAP’ların önemli sayıda çalışma ile ele alındığı bir kurum da Çin Ulusal Doğa Bilimleri Vakfı’dır (National Natural Science Foundation of China, NSFC). Xu vd. [15], 2008 yılında yaklaşık 80.000 önerinin sunulduğu NSFC için internet tabanlı bir bilim bilişim sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, öncelikle proje önerilerini disiplinlere ayırmakta, ardından her disiplinindeki önerileri konularına göre gruplamakta [18] ve son olarak da hakem atamalarını gerçekleştirmektedir. Atamalar için Açgözlü Rastgele Uyarlanabilir Arama Prosedürü (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, GRASP) ve genetik algoritma kullanılmıştır. Bu yapı, bir proje grubuna atanan panelistlerin o gruptaki tüm projelere atanması ile ARDEB uygulamasına yakın görüne de her bir panelistin birden fazla panele atanmasını da içermesi ve dinamik bir çözüm sunmayı bakımından ARDEB uygulaması ile farklılaşmaktadır. Sun vd. [20] yine NSFC’yi baz alarak [15]’dakine benzer bir yapıda uzmanlık skorları toplamını en büyükleyen bir model geliştirmiştir. Çözüm için matematiksel karar modelleri ve bilgi kuralları kullanılmıştır. NSFC özelinde yapılan bir başka çalışmada, Liu vd. [21] karar modelleri ve bilgi kuralları tabanlı bir akıllı karar destek sistemi tasarlamış; uzmanlık kriterinin yanısıra çıkar çakışması ve farklı seviyelerdeki proje önerilerin dengeli bir dağılımla atanması hususları da dikkate alınmıştır. Xu ve Zuo [22], NSFC’ye sunulan öneri sayısının 2015 yılı itibarıyla 150.000’i aştığını belirtmiş; Saklı Dirichlet Tahsisi (Latent Dirichlet Allocation, LDA) ile konu kelimelerinin proje önerileri metinlerinden, uzman profillerinin ise metin madenciliği teknikleriyle elde edildiği bir yaklaşım geliştirmiştir. Elde edilen veriler gruplandırılmış; makaleler için elde edilen verilere yönelik iki ağırlık grubu (proje başlığı, disiplini ve anahtar kelimeler; özet ve giriş bölümleri), uzmanlar için elde edilen veriler için ise dört ağırlık grubu (profesyonel alan, araştırma yönü ve durumu; yayınlar; araştırma projeleri; kişisel yetkinlikler, unvan ve ödüller) belirlenmiştir. Son olarak kosinüs benzerliği kullanılarak 8 adaylık kısa öneri listesi oluşturulmaktadır. Protasiewicz vd. [23] bilgi erişimi (information retrieval) teknikleri ile

desteklenmiş bir hakem önerme sistemi geliştirmiştir ve bu sistemi Polonya Ulusal Araştırma ve Geliştirme Merkezi (Poland National Center for Research and Development, NCRD) verileri ile test etmiştir. Bilgi erişimi ile; yayınların kategorize edilmesi, yazarlara yönelik belirsizliğin giderilmesi, anahtar kelime çıkarımı ve tam metin indeksleme aşamaları gerçekleştirilen bu yaklaşımda, öneriler ve adayların anahtar kelimeleri veya indeksleri arasındaki kosinüs benzerliği kullanılmaktadır. Adayların anahtar kelimeleri, hangi kaynaklardan elde edildikleri ve frekansları dikkate alınarak ağırlıklandırılmıştır.

Daş ve Göçken [16] HAP'ı paneller kapsamında ele almış ve panelistlerin belirlenmesine yönelik bir bulanık model geliştirmiştir. Panelist-öneri eşleme seviyeleri dilsel değişkenlerle (linguistic variables) belirlenmiştir. Xu vd. [15] tarafından önerilen projelerin gruplanarak hakemlere atanması fikri bu çalışmada da kullanılmıştır. Modelin, literatürdeki diğer modellerden en önemli farkı, panel oluşturulması aşamasının bütçe kısıtı altında gerçekleştirilmesi durumunu da ele almasıdır. Ancak, ARDEB panellerinde değerlendirilen projelerin bütçeleri ve destek oranları dikkate alındığında; panel için harcanan bütçenin, verilmesi beklenen fon miktarına göre ihmal edilebilir seviyede olması nedeniyle bu yaklaşım pratikte ARDEB için çok geçerli değildir. Ayrıca, bütçe kısıtı nedeniyle mesafe olarak Ankara'ya yakın kurumlardan panelist belirlenmesini teşvik edebilecek bu yapı, ARDEB panelleri için en önemli kriterlerden birisi olan panelistlerin ülke genelinden seçilmesine yönelik yaygın dağılım hedefi ile çelişmektedir. Tayal vd. [24] ise panelist adaylarının uzmanlık seviyelerinin belirlenmesinde tip-2 bulanık kümeleri kullanmış; çok sayıda kriter (patent sayısı, tez danışmanlıkları, eğitim bilgileri, yazılan kitaplar, yapılan hakemlikler, son yayından bugüne geçen süre vb.) dikkate alınmış ve ağırlıkları belirlenmiştir. Bu çalışmada hakem atama probleminde dikkate alınan diğer kriterlerin yanında çıkar çakışması hususu da yer almıştır. Çalışma sonucunda bir uygulama yazılımı geliştirilmiştir.

Cook vd. [25] 2a'daki problemi farklı bir şekilde ele alarak, proje önerilerini ikili gruplara ayırmış ve amaç olarak her bir çift için değerlendirme yapan ortak panelist sayılarının toplamını en büyükmüştür. Bu problemi Küme Kapsama (Set Covering) Problemi olarak modellemiş ve ayrıca sezgisel bir çözüm yöntemi önermiştir. Yeşilçimen ve Yıldırım [26] aynı ikili gruplama fikrinden yola çıkarak farklı çiftler arasında dengeli bir değerlendirme hususunu da dikkate alan ve veri ölçeğine göre polinom zamanlı olan bir formülasyon ile birlikte en iyileme tabanlı bir sezgisel geliştirmiştir. Yıldırım vd. [14], aynı yapıda, panellerin oluşturulması aşamasını da içine alan daha kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmaların ARDEB panellerinden en önemli farkı, ARDEB değerlendirmelerinde proje önerilerinin mümkün olduğunca kıyaslanmadan birbirinden bağımsız şekilde puanlanması hususudur. Ayrıca, önceki örnekler gibi bu çalışmalar da teHAP problemini değil klasik HAP problemini ele almaktadır.

Dumais ve Nielsen [27], HAP yapısındaki öncül çalışmalarında, konferanslar için hakem atama probleminde Saklı Anlam İndeksleme (Latent Semantic Indexing, LSI) kullandıkları bir yöntem geliştirmiştir; eşleşme derecesi, bildiriler için başlık ve özetler; hakemler için ise daha önceki konferanslara sundukları bildirilerin özet bilgileri veya kendilerinden ayrıca istenen özetler kullanılarak hesaplanmıştır. Ancak, hesaplanmış eşleşme değerleri kullanılarak bir atama yöntemi önerilmemiş; sadece adayların kendileri için hesaplanmış sıralama hakkında yaptıkları değerlendirmeler üzerinden analiz yapılmıştır. Garg vd. [28] değerlendirmeyi gerçekleştirecek olan komite/panel üyelerinin sözlüksel (lexicographic) tercihlerini dikkate alarak leximin-optimal ağırlıklar vektörü ile HAP'a çözüm önermiştir. Zhao vd. [29] problemi bir sınıflama problemi olarak tanımlamıştır. Başvurular ile hakemler arasındaki benzerlik "Word Mover's Distance" algortiması kullanılarak hesaplanmış ve Yapıcı Kapsama Algortiması ile sınıflama gerçekleştirilmiştir. Mungen vd. [30] hakem arama probleminde, yani atama olmadan sadece adaylar için uygunluk değerlerinin hesaplanmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, istatistiksel yaklaşımlar ve Geliştirilmiş Yerel Yakınlık Yayılımı (Improvement Topical Affinity Propagation, I-TAP) yöntemi kullanılmıştır.

Liu vd. [31] hakemlerin uzmanlıklarının proje konusu ile örtüşmesinin yanısıra alanlarında yetkinliklerini ve çalışma alanlarının çeşitliliğini de dikkate alan, Yeniden Başlamalı Rastgele Yürüyüş (Random Walk with Restart) yöntemi ile çözüm sağlayan bir yaklaşım önermiştir. Jin vd. [32] ise benzer şekilde yetkinlik ve konusal örtüşme ile birlikte araştırma ilgisi kriterleri biraraya getirilmiş olan adayların skorlarını belirlemek üzere doğrusal tamsayı programlama modeli geliştirmiştir.

Karimzadehgan vd. [33] hakem veya panelist adaylarının makale veya öneriler için uygunluklarını bir bütün olarak değil de alt konular bazında ele almışlardır. Atamaların tüm alt konuları yeterince kapsayacak şekilde gerçekleşmesi için stratejiler ve performans kriterleri tanımlanmıştır. Atamaları birbirinden bağımsız bir şekilde gerçekleştiren bu çalışmadan farklı olarak; Karimzadehgan ve Zhai [5], tüm paneli/komiteyi dikkate alarak eş zamanlı atama yapılmasını sağlayan doğrusal tamsayı programlama formülasyonu önermiştir.

Yakın zamanda gerçekleştirilmiş olan çalışmada [34], MINARET ismi verilen bir öneri sistemi geliştirilmiştir. MINARET, konunun kapsamı, bilimsel etki (atıf sayısı veya h-İndeks), yakın zamanda konu ile ilgili yayın yapıp yapılmadığı, yapılan hakemlik sayıları, mevcut dergideki yayın yapıp yapılmadığı gibi hususlar için belirlenen ağırlıklarla hesaplanan skora göre sıralanmış bir liste sunmaktadır. Ayrıca, Panelist'de olduğu gibi, MINARET de kriterlerin bir bölümünü modele doğrudan entegre etmeden filtreler aracılığıyla uygulayarak aday havuzunu daraltmaktadır. Nguyen vd. [35] ise klasik HAP'ı ele almış ve hakem adaylarını, erişime açık farklı kaynaklardan elde

edilen verileri PaneLIST'teki önceliklendirme sistemine benzer bir yapıda Sıralı Ağırlıklandırılmış Ortalamalar (Ordered Weighted Averaging, OWA) hesaplayarak, önceliklendirmiştir. Ancak, bu iki çalışmada da PaneLIST'teki gibi dinamik bir listeleme ve adım adım ilerleme veya yedek panelist işlemleri gibi özellikler bulunmamaktadır.

Panelistlerin, dış danışmanların veya hakemlerin bilimsel yöntemler ile belirlenmesi konusu TÜBİTAK bünyesinde de uzun süredir gündemde olan ve mesai harcanan bir konudur. Bu konuda en büyük problem, kullanıma hazır ve farklı sistemlerin birbiri ile konuşabildiği bir veri yapısının eksikliği, son yıllarda yapılan ve halen devam etmekte olan çalışmalar ile bu eksiklik önemli oranda giderilmektedir. Diğer taraftan, kurumda gerçekleştirilen Uzmanlık ve Başuzmanlık tezleri ile konunun algoritmaya dönük altyapısı oluşturulmaktadır. Üçer [36] TÜBİTAK Uzmanlık Tezi kapsamında üç farklı skorun geliştirilmesine odaklanmıştır: araştırmacıların TÜBİTAK destekleri ile gerçekleştirdikleri bilimsel çalışmalara ilişkin performans skorları, TÜBİTAK için yerine getirdikleri görev ve hizmetler kapsamındaki performans skorları ve belirli bir konuda uzmanlıklarına ihtiyaç duyulması halinde hesaplanan uygunluk skorları. Mevcut makalede, Üçer'in ele aldığı üçüncü bileşen olan uygunluk skorlarının hesaplanmasından çok, uygunluk skorları belirlenmiş panelistlerin panele atanmasına odaklanılmış; uygunluk skorları için ise Üçer'in önerdiği yaklaşımın daha sadeleştirilmiş bir versiyonu kullanılmıştır. Ancak, skor hesaplamasında gerçekleştirilecek iyileştirmeler panelist ataması aşamasını da doğrudan etkileyeceği için Üçer'in önerdiği hesaplamaların, yukarıda detaylı olarak sunulan benzerlik/uygunluk skorları hesaplama çalışmaları ile birlikte geliştirilmesi önem taşımaktadır. Selçuk Doğan [37], yüksek lisans tezi kapsamında, LDA ile alanlar ve hakem adayları arasında anlamsal bir katman oluşturan bir uzman bulma sistemi geliştirmiş ve TÜBİTAK Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı'na (TEYDEB) sunulan proje önerileri üzerinde test etmiştir. Önerilen model, sıralı bir liste oluşturma ve yedek aday belirleme açılarından mevcut çalışma ile ortak hususlar taşısa da, proje önerileri için değerlendirmeler ayrı ayrı ele alınmaktadır; diğer bir deyişle, panel değerlendirmesi söz konusu değildir. Ayrıca, PaneLIST, dinamik listelerin oluşturulması ve proje önerileri

için değerlendirme seviyeleri bazında dengeli bir atama öngörmesi açılarından Selçuk Doğan [37] ile farklılaşmaktadır. Aksop [38] ise TÜBİTAK Başuzmanlık Tezi'nde, TÜBİTAK tarafından yayımlanan akademik dergiler için, kaynakçada yer alan yayınların Dijital Nesne Tanımlayıcılarından (Digital Object Identifier, DOI) faydalanarak bir hakem öneri sistemi geliştirmiştir. Diğer bir deyişle, sunulan makalede atıf verilen DOI'lerin yazarları ve bu DOI'lere atıfta bulunan diğer yazarlar potansiyel hakem adayları olarak görülmektedir. Bu fikrin mevcut çalışmanın sonraki aşamalarında kullanılması düşünülmektedir.

3. TANIMLAR VE METOT (DEFINITIONS AND METHODOLOGY)

Bu bölümde, geliştirilen algoritma ve MS Excel VBA kullanılarak oluşturulan uygulamanın detaylarına yer verilecektir. Öncelikle, algoritma kapsamında kullanılan indisler, parametreler, kümeler ve bunların tanımları verilecektir. Ardından, önce algoritmayı oluşturan her bir alt modülün sözde kodları ve açıklamaları sunulacak, sonra ise algoritmanın genel işleyişi şematik gösterimi ile birlikte açıklanacaktır. Bölümün sonunda, geliştirilen yazılımın yetenekleri ve nasıl kullanıldığı arayüz görüntüleri üzerinden özetlenecektir.

3.1. Tanımlar ve Notasyon (Definitions and Notation)

PaneLIST'te kullanılan indis, parametre ve kümeler, tanımları ile birlikte Tablo 1'de sunulmuştur. Algoritmada kullanılan iki temel indis, havuzda yer alan panelist adayları, i , ve panelde değerlendirilecek olan projelerdir, j . Ayrıca, panelist adaylarının ve projelerin anahtar kelimeleri (k ve l) ve faaliyet alanları (p ve r) için de indisler tanımlanmıştır. Herhangi bir anda panele eklenmiş panelistlerin yer aldığı küme ise \overline{panel} ile gösterilmektedir. Bu tabloda yer alan $I_{j,20}$ kümesi ise bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde açıklanacak olan referans ve hedef değerlendirme düzeylerinin hesaplanmasında kullanılacaktır; j projesi için en yüksek skora sahip 20 adayı içermektedir.

Tablo 2., ARDEB-PBS ve ARBİS'deki proje ve kişi verilerinin algoritmanın kullanacağı formatta kaydedilmesi için tanımlanmış parametre ve fonksiyonlar ile bunların tanımlarını içermektedir.

Tablo 1. İndisler (Indices)

Sembol	Tanım
i, i', I	Panelist adayına yönelik indisler ve ilgili küme
j, J	Panelde yer alan projelerin indisi ve ilgili küme
k, K	Panelist adayına ait anahtar kelimenin indisi ve ilgili küme
l, L	Projedeki anahtar kelimenin indisi ve ilgili küme
p, P	Panelist adayının faaliyet alanına ait indis ve ilgili küme
r, R	Projedeki faaliyet alanına ait indis ve ilgili küme
s, S	Tüm anahtar kelimelerin indisi ve ilgili küme
$I_{j,20}$	j projesi için en yüksek 20 skora sahip panelistlerin kümesi
\overline{panel}	Panele eklenmiş panelistlerin kümesi

Tablo 2. Parametre ve fonksiyonlar (Parameters and functions)

Sembol	Tanım
N_{pan}	Veri tabanındaki tüm panelist adaylarının sayısı
N_{prj}	Paneldeki proje sayısı
$N_{panAK}(i)$	i panelist adayının anahtar kelime sayısı
$N_{prjAK}(j)$	j projesinin anahtar kelime sayısı
$N_{panFA}(i)$	i panelist adayının faaliyet alanı sayısı
$N_{prjFA}(j)$	j projesinin faaliyet alanı sayısı
$panAK(i, k)$	i panelist adayının k 'nci anahtar kelimesi
$prjAK(j, l)$	j projesinin l 'inci anahtar kelimesi
$panFA(i, p)$	i panelist adayının p 'inci faaliyet alanı
$prjFA(j, r)$	j projesinin r 'inci faaliyet alanı
$AKskor(i, j)$	i panelist adayının j projesi için anahtar kelime bileşeni
$FAskor(i, j)$	i panelist adayının j projesi için faaliyet alanı bileşeni
$Skor(i, j)$	i panelist adayının j projesi için toplam skoru
$ToplamSkor(i)$	i panelist adayının toplam skoru
$MinSkor$	Aday listesinde yer alabilmek için gerekli minimum uygunluk skoru
$RefSkor(j)$	j projesi için referans değerlendirme düzeyi
$HedefSkor(j)$	j projesi için hedeflenen değerlendirme düzeyi
$gr[s]$	s anahtar kelimesinin bağlı olduğu ana grup
$gr[t]$	t faaliyet alanının bağlı olduğu ana grup
w	Uygunluk skoru hesaplamasında anahtar kelimelere verilen ağırlık
$wd(j)$	j projesi için, panelin mevcut durumu dikkate alınarak, dinamik olarak beliren değer ve bu değere ulaşmak için hesaplanan ara değerler
$sapma(i)$	i adayının olabilecek en iyi adaydan sapma miktarı

3.2. Algoritma (The Algorithm)

ARBİS'teki aday panelistlerin bir proje önerisine bilimsel açıdan ne kadar uygun olduklarını belirlemek için iki temel veri önem taşımaktadır: anahtar kelimeler ve faaliyet alanları. Elbette, panelistlerin belirlenmesi süreci sadece bu bilimsel kriterlerle sınırlı değildir. TÜBİTAK örneğinde, bunların dışında bir kısmı aşağıda sıralanan pek çok kriter de göz önünde bulundurulur:

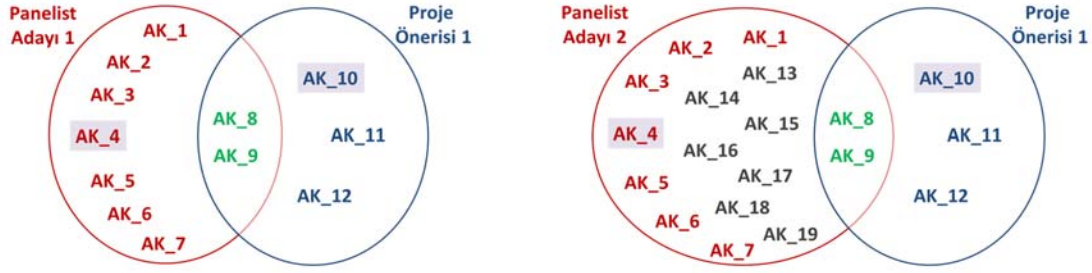
- Akademik unvan
- Daha önce yapılan panelistlik / dış danışmanlık sayıları
- TÜBİTAK Ödülleri, TÜBA üyeliği gibi yetkinlik belirten hususlar
- TÜBİTAK Projesi deneyimi (yürütücü/araştırmacı/danışman/bursiyer/...)
- TÜBİTAK BİDEB bursiyerliği
- Çıkar ilişkileri (tez danışmanı/öğrencisi, akrabalık, ortak yayın, aynı kurumda görev vb.)
- Kurumlar ve bölgeler arası yaygın dağılımın korunması

Yukarıda sıralanan hususların bir kısmı panelist belirlenmesi açısından farklı programlarda hâlihazırda dikkate alınmakta, bir kısmının ise yakın zamanda alınması planlanmaktadır. Ancak, bu kriterlerin algoritma kapsamında hesaplanan puanlamaya doğrudan katılmasından ziyade aday havuzunu daraltmak için filtreler şeklinde uygulanması hem sonuç kalitesi bakımından daha anlamlı, hem de PaneLIST'in sorgu sonucunu oluşturması aşamasında gereken veri işleminin boyutunu ve dolayısıyla işlem süresini azaltması açısından önemlidir. Sonuç olarak; PaneLIST'te, bu bölümün başında da değinildiği üzere, ARBİS'te yer alan bir

kişinin bir proje için ne kadar uygun olduğu, anahtar kelimeler ve faaliyet alanları verisi dikkate alınarak sayısallaştırılmıştır. Önerilen hesaplama, literatürde farklı şekilde hesaplanan ve Üçer'in [36] Uzmanlık Tezi'nde belirtilen hesaplamanın bir versiyonudur. Mevcut makalenin katkısı, uygunluk skorunun hesaplanmasından daha çok, uygunluk skoru belirlenmiş olan adayların dinamik bir liste aracılığıyla ve panelin mevcut kompozisyonu dikkate alınarak panellere atanması aşamasındadır.

Bu nedenle, uygunluk skoru hesaplaması, mümkün olduğunca sade, anlaşılır, literatür ile uyumlu ve ihtiyaca cevap veren bir şekilde tasarlanmıştır. Bu skor, güvenilir veriye oldukça bağımlıdır, pek çok açıdan geliştirilmeye açıktır ve TÜBİTAK'ın da bu konuda çalışmalarını devam ettirmektedir. Örneğin, beyan edilen anahtar kelimeler yerine ORCID veya Web of Science tarafından sağlanmış yayınlarda geçen anahtar kelimeler, proje önerisinde atıfta bulunulan yayınların DOI'leri, TÜBİTAK'ta başarı ile sonuçlanmış projelerdeki anahtar kelimeler ve daha önce panelist veya dış danışman olarak görev alınan projelerdeki anahtar kelimeler de bu skorun hesaplanmasına entegre edilebilir. Bu konuda yakın zamanda gerçekleştirilen Başuzmanlık Tezi [38] dergi makaleleri için hakem belirlenmesi aşamasında kaynakçada yer alan DOI'leri dikkate alan bir yaklaşım önermektedir.

Bir proje önerisinin, panelist adayları için anahtar kelimeler üzerinden hesaplanan uygunluk skoru bileşeninin nasıl belirlendiğinin şematik gösterimi Şekil 2'de, sözde kodu ise Şekil 3'te sunulmuştur. Faaliyet alanları bileşeninin şematik gösterimi de Şekil 2 'dekine benzer şekilde gerçekleşmekte, sözde kodu ise Şekil 4 'de yer almaktadır.



Şekil 2. Panelist adayları ve proje önerilerinin anahtar kelime bazında kesişimi
(Intersection of candidate panelist and project proposal in terms of keywords)

```

for all i ∈ I
  for all j ∈ J
    AKskor(i,j) ← 0
    for k ← 1 to NpanAK(i)
      for l ← 1 to NprjAK(j)
        if panAK(i,k) = prjAK(j,l) then AK_Skor(i,j) = AK_Skor(i,j) + 1
        elseif gr[panAK(i,k)] = gr[prjAK(j,l)] then AK_Skor(i,j) ← AK_Skor(i,j) + 0,25
      end for (l)
    end for (k)
  end for (j)
end for (i)

```

Şekil 3. Sözde kod – Anahtar kelime benzerlik modülü (Pseudocode – Keyword similarity module)

```

for all i ∈ I
  for all j ∈ J
    FAskor(i,j) ← 0
    for p ← 1 to NpanFA(i)
      for r ← 1 to NprjFA(j)
        if panFA(i,p) = prjFA(j,r) then FA_Skor(i,j) = FA_Skor(i,j) + 1
        else if gr[panFA(i,p)] = gr[prjFA(j,r)] then FA_Skor(i,j) = FA_Skor(i,j) + 0,25
      end for (r)
    end for (p)
  end for (j)
end for (i)

```

Şekil 4. Sözde kod – Faaliyet alanı kesişim modülü (Pseudocode – Subject area similarity module)

Şekil 2 'de görüldüğü üzere, adaylar ile ele alınan proje önerisinin ortak anahtar kelimeleri 2 adettir. Diğer taraftan, adayların anahtar kelimeleri arasında yer alan AK_4 ile proje önerisindeki AK_{10} aynı üst gruba dahildir, $gr(AK_4) = gr(AK_{10})$. Gerçekleştirilen çok sayıda ön deneme sonucunda; skorlar hesaplanırken tam eşleşmeler için 1 puan, üst grup eşleşmeleri için ise 0,25 puan kullanılması öngörülmüştür. Bu durumda, her iki aday için de uygunluk skorlarının anahtar kelime bileşenleri 2,25 olarak hesaplanır, $AK_Skor(i,j) = 2 \cdot 1 + 0,25 = 2,25$. Diğer taraftan, iki adayı daha yakından kıyasladığımızda, iki adayın da proje ile tam veya üst grup bazında örtüşen anahtar kelimeleri eş olmasına rağmen ilk adayın anahtar kelime sayısının 9, ikincisinin ise 16 olduğu görülmektedir. Bu durumda, her iki adayın da eş seviyede uygun olduğunu kabul etmek oldukça güçtür. Bu husus, Şekil 5'te yer alan skor hesabında görüldüğü üzere

dikkate alınmıştır. Bir sonraki aşama, panelist adayları ile panelde yer alan proje önerileri arasında oluşan eşleşme skorlarını aynı ölçeğe getirmek üzere gerçekleştirilen işlemdir. Bu işlemde, öncelikle her bir proje önerisi için en yüksek skor belirlenir ve tüm adayların skorları bu skora bölünüp 100 ile çarpılarak skorlar 0 ile 100 arasında bir ölçeğe yerleştirilmiş olur. Projelerin konuları ve kapsamaları dikkate alındığında, her öneri için gereken uzmanlık ihtiyacına cevap verebilecek potansiyel farklı olabilir. Örneğin, AK_1 ve AK_2 konularında çok az sayıda uzman bulunabilirken; AK_3 ve AK_4 konularında ülkemizde çok sayıda araştırmacı bulunabilir. Bu husus, her bir proje önerisi için belirleyeceğimiz hedef değerlendirme skorlarının farklı referans değerler ile belirlenmesi gerektiğini işaret eder. Bu nedenle, önerilen algoritmada bu referans değerlerin belirlenmesine yönelik de bir çözüm düşünülmüştür.

Öncelikle, ilgili proje önerisi için hesaplanan skorlar büyükten küçüğe sıralanır, ardından en yüksek 20 değerini ortalaması alınır. Bu ortalama, kendisinden küçük ve 2,5'in katı olan en yakın sayıya yuvarlanarak referans değerlendirme seviyesi hesaplanır; bu yuvarlamanın nedeni, daha standart ve kategorik referans değerleri kullanılmak istenmesidir. Bu parametre için belirlenen 20 rakamı, diğer tüm parametrelerin belirlenmesinde olduğu üzere detaylı ön analizler, testler ve geçmiş uygulamalardaki deneyimler sonucunda elde edilmiştir. Örneğin, ortalama alınırken en yüksek 10, 20, 30, 40 ve 50 seviyeleri test edilmiş; ortalama değerini 10 ve 20 için kayda değer bir şekilde azaldığı (%10-25 arası), 20'den sonra ise bu azalmanın önemli ölçüde yavaşladığı (yaklaşık %5-%7) ve sonucu çok değiştirmedeği gözlenmiştir. Diğer taraftan en yüksek 10 adayın ortalaması alındığında, hedef değerlendirme seviyesinin 5 panelistle karşılanmadığı durumlarla sıklıkla karşılaşmıştır. Hedef değerlendirme seviyesi, bir projenin sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesi için belirlenmiş olan toplam skoru göstermektedir. Paneldeki tüm panelistlerin, 0 ile 100 arasındaki uygunluk skorlarının toplamının bu değerini en az %95'ini sağlaması beklenmektedir. TÜBİTAK panellerinde yer alan panelist sayısı genellikle 5'tir; bu sayı aynı zamanda bir panelin kurulması için gerekli olan en küçük panelist sayısıdır. Hedef değer de, 5 panelistin yer aldığı paneller için referans değerini 5 ile çarpımı ile hesaplanmaktadır. 5'ten fazla panelist yer alan panellerde ise, her bir ekstra panelist için referans değerini yarıya eklenerek hedef değer hesaplanır; bunun nedeni, eklenen panelist sayısı arttıkça, listede görece daha düşük skorlu adayların kalmasıdır.

Makalenin farklı bölümlerinde değinildiği üzere, Panelist'in asıl özgülüğü, panel kurulum aşamasında paneldeki mevcut panelistleri dikkate alarak dinamik listeler ve proje önerileri için dengeli bir panelist kümesi sunması olarak belirtilebilir. Panel skoru modülü verilen bu aşamanın sözde kodu Şekil 6'da görülebilir. Dengeli yapının sağlanması, listenin ilk kez oluşturulması aşamasında ve sonraki iterasyonlarda farklılık göstermektedir. İlk aşamada, panele henüz panelist eklenmediğinden, projeler üzerinden skorlar toplamı en yüksek olan adayın ilk sırada yer alması

makul bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Ancak; toplam skora bakılması, dengeli bir atamanın yapılmasını garanti etmeyecektir. Örneğin, 5 projenin yer aldığı bir panelde, uygunluk skorları sırasıyla [100|100|100|80|50] olan bir aday yerine skorları [85|85|85|85|85] skorlarına sahip bir aday tercih edilebilir. İlk adayın proje skorlarının aritmetik ortalaması, ikinci adaydan yüksektir. Ancak; ikinci aday, tüm projeler için dengeli ve belirli bir seviyenin üzerinde skorlara sahiptir. Bu nedenle, ilk listenin aritmetik yerine geometrik ortalamaya göre sıralanması tercih edilmiştir. Örnekteki adaylar için aritmetik ortalamalar sırasıyla 86 ve 85'ken; geometrik ortalamalar, sırasıyla 83,25 ve 85'tir.

Sonraki iterasyonlarda ise, paneldeki proje önerilerinin mevcut değerlendirme seviyeleri (*MevcutSkor(j)* / *HedefSkor(j)*) her bir proje için ve ortalama olarak hesaplanır (satır 19 ve 20). Ardından, ortalama değerlendirme seviyeleri, mevcut değerlendirme seviyesinden çıkarılarak, mevcut önerinin ortalamasının ne kadar gerisinde olduğu hesaplanır. Bu farka normalde 1 eklenip *RefSkor(j)* ile çarpılarak ilgili proje için hangi puana sahip bir aday eklenirse hedefin tutturulacağı belirlenir. Ancak, koddan görüleceği üzere, bu aşamada 1 yerine 1,2 eklenmiştir (daha önce de değinildiği üzere, bu parametrelerin değerleri; farklı seviyeleri, bir süredir test aşamasında olan sistemde detaylı bir şekilde analiz edilerek belirlenmiştir). Bunun sebebi, dengeli dağılımdan ödün vermeden daha yüksek skorlu adayları öne çıkarmaktır. Burada yapılan işlemi şöyle değerlendirmek daha uygun olur: panele yeni bir panelist eklenirken her bir proje için hedef skorların yakalanması amaçlanmaktadır.

Bu aşamada yapılan işlem ile, bir sonraki adayın puanları nasıl olursa tüm hedeflerin sağlanacağı hesaplanmakta; yani ilgili durum için ideal bir adayın profili tanımlanmaktadır. Satır 28'de yapılan işlem ile; adayın, ideal adaya ne kadar benzediği her bir proje skoru ile ideal adayın skorlarının farklarının karesi toplanarak elde edilir.

Panel skoru modülü kullanılarak; en az 5 panelist olmak üzere, her proje önerisinin değerlendirme seviyesi en az %95

```

for all i ∈ I
  for all j ∈ J
    Skor(i,j) ← w * AKskor(i,j)/sqrt(max{9,NpanAK(i)}) + (1-w) * FASKor(i,j)/sqrt(max{4,NpanFA(i)})
  end for (j)
end for (i)

for all j ∈ J
  for all i ∈ I
    Skor(i,j) ← 100 * Skor(i,j) / max{Skor(i',j) | i' ∈ I}
  end for (i)
  RefSkor(j) ← ortalama{Skor(i',j) | i' ∈ Ij,20} değerini 2,5'in en yakın katına yuvarla
  HedefSkor(j) ← max{5, 5 + n(panel)/2} * RefSkor(j)
end for (j)

```

Şekil 5. Sözde kod – Proje Skoru Modülü (Pseudocode – Proposal score module)

```

0  İlk çözüm:
1  for all j ∈ J
2  ToplamSkor(i) ← 1
3      for all i ∈ I
4          ToplamSkor(i) ← Skor(i,j) * ToplamSkor (i)
5      end for (i)
6  ToplamSkor (i) ← ToplamSkor (i)(1/NPrj)
7  end for (j)
8  Sıralai[Azalan, ToplamSkor (i)]

9  İterasyonlar:
10  $\overline{\text{Panel}} \leftarrow \overline{\text{Panel}} \cup \{i\}$  : Listedeki i'panelistini panele ekle
11 top_wd ← 0
12 ToplamSkor(i) ← 0
13 sapma(i) ← 0
14 for all j ∈ J
15     MevcutSkor(j) ← 0
16     for all i ∈  $\overline{\text{Panel}}$ 
17         MevcutSkor(j) ← MevcutSkor(j) + Skor(i,j)
18     end for (i)
19     wd(j) ← MevcutSkor(j) / RefSkor(j)
20     top_wd ← top_wd + wd(j)
21 end for (j)
22 avg_wd ← top_wd / NPrj

23 for all j ∈ J
24     wd(j) ← [avg_wd - wd(j) + 1,2] * RefSkor(j)
25 end for (j)

26 for all i ∈ I
27     for all j ∈ J
28         sapma(i) ← sapma(i) + [Skor(i,j) - wd(j)]2
29     end for (j)
30 end for (i)
31 Sıralai[Artan, sapma(i)]

```

Şekil 6. Sözdde kod - Panel Skoru Modülü (Pseudocode – Panel score module)

olana kadar panelist eklenmesine devam edilir. Panellerin oluşturulmasında önemli hususlardan birisi de yedeklerin belirlenmesidir. Panelist adaylarının programlarının önceden belirlenmiş olan panel tarihlerine uymaması veya öneri aşamasında belirtilmemiş/tespit edilememiş bir çıkar ilişkisinin ortaya çıkması ihtimal dahilindedir. Bu nedenle, TÜBİTAK'taki paneller için hazırlanan aday listeleri en az birer yedek belirlenmiş olarak hazırlanır. Panelist'te kullanılan yedek isim belirleme modülü Şekil 7'de özetlendiği üzere basit bir mantıkla çalışmaktadır: liste, ilgili panelistin çıkarılması durumunda oluşan panel kompozisyonunu dikkate alınarak sıralanır. Bu aşamada akla gelen bir diğer seçenek, ilgili paneliste benzerliği en yüksek olan adayların sıralanması olabilir. Diğer bir deyişle, yedeği belirlenmek istenen panelistin skor matrisi ile mesafesi (skor farklarının kareleri toplamı) en yakın olan adaylar sıralanabilir. Ancak, analizler bu yöntemin pratikte iyi işlemediğini göstermiştir. Çünkü bu yöntem, özellikle en

başlarda eklenen bir panelistin yedeğini belirlerken, o kişiden sonra eklenecek kişilerin skorlarını dikkate almamaktadır.

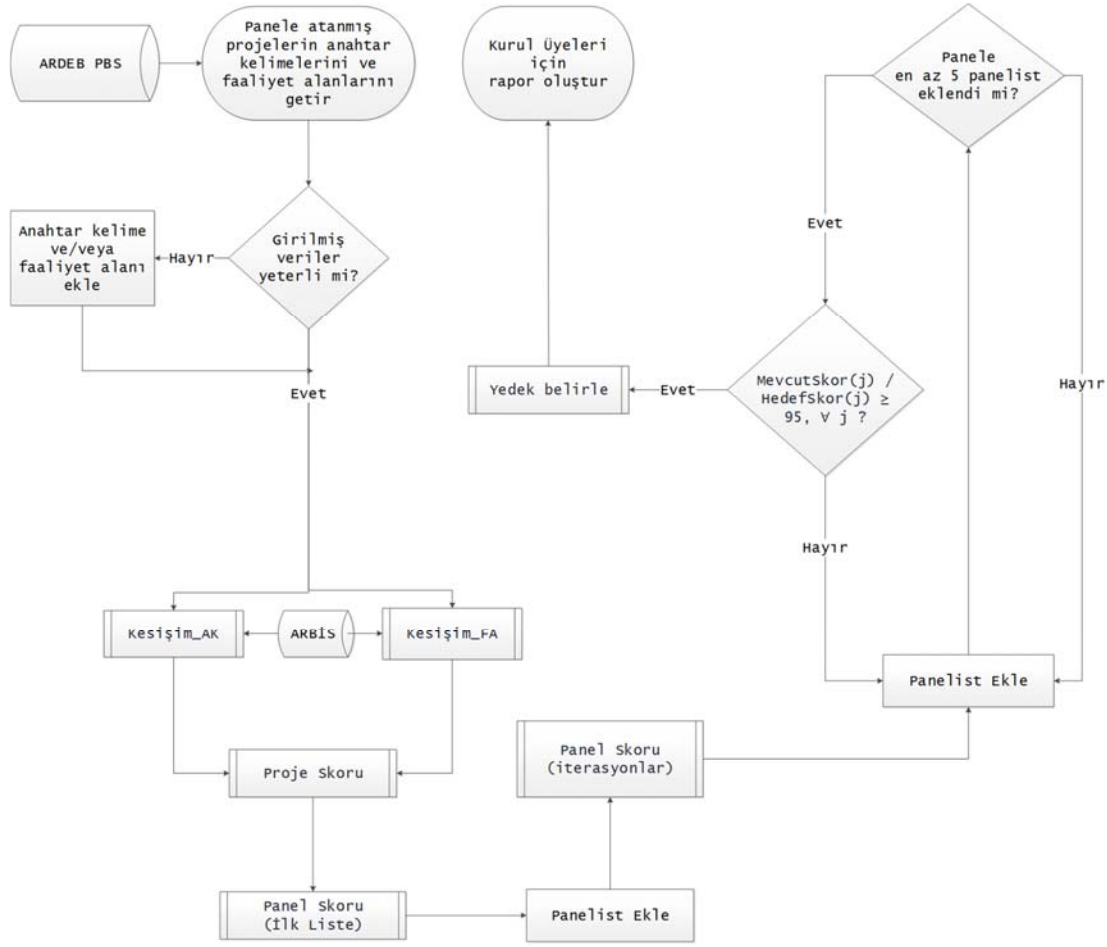
```

for all i ∈  $\overline{\text{panel}}$ 
 $\overline{\text{panel}} = \overline{\text{panel}} - \{i\}$ 
Çağır → Panel Skoru (İterasyon)
i için yedek panelist belirle
 $\overline{\text{panel}} = \overline{\text{panel}} + \{i\}$ 
end for (i)
Return Yedek Panelist Listesi

```

Şekil 7. Sözdde kod – Yedek Belirleme Modülü (Pseudocode – Reserve panelist module)

Yukarıda açıklanan alt modüllerin tamamının bütünlüklü bir biçimde nasıl işlediği Şekil 8'de sunulmuştur. Bu şekilde de



Şekil 8. Algoritmanın genel işleyişi (General overview of the algorithm)

görüldüğü üzere, proje önerilerinin anahtar kelimeleri ARDEB-PBS'den alınmakta, yürütücüler tarafından projeyi tanımlamakta eksik bırakıldığı düşünülen uzmanlık alanları ise Grup Uzmanları ve Kurul Üyeleri'nin görüşleri ile tamamlanmaktadır. Ardından, asil ve yedek listeler belirlenerek, nihai kararın verilmesi için Kurul Üyeleri ile paylaşılmaktadır.

3.3. PaneLIST Arayüzü (PaneLIST Interface)

Bir önceki bölümde detayları sunulan algoritma, TÜBİTAK iş uygulama yazılımlarına entegre edilmek üzere pilot olarak hazırlanan bir KDS yazılımına dönüştürülmüştür. Bu pilot yazılımın arayüzleri bu bölümde kısaca tanıtılacaktır.

Bir panelde yer alan proje önerileri için proje ekipleri tarafından ARDEB-PBS'ye girilmiş olan anahtar kelimeler ve faaliyet alanları Şekil 9'de görülen ekrana girilmektedir. Bu ekranda ayrıca anahtar kelimelere verilecek ağırlık değeri (w) belirlenir. Bu ağırlık, değerlendirme derin uzmanlık gerektiren paneller için yüksek, daha genel bakabilen ve daha geniş araştırma alanları olan adayların gerektiği paneller için düşük bir değer olarak belirlenir. Daha önce değinildiği üzere, eksik olduğu düşünülen anahtar kelime ve faaliyet alanları da bu aşamada girilir.

Veri girişinin tamamlanmasının ardından, skor hesaplamaları ve ilk listenin oluşturulması için yazılım çalıştırılır. Bu aşamanın sonucunda oluşan ilk liste Şekil 10'da görülebilir. Geometrik ortalamaya göre sıralanan listede, eklenmesi istenen panelist için ilgili hücreye "x" girilerek atama yapılır. Burada, atamalar tek tek yapılabileceği gibi toplu halde de yapılabilir. Ancak, toplu atama yapılması, PaneLIST'in en önemli yeteneği olan dinamik listelemeden faydalanılmaması anlamına geldiğinden tercih edilmemektedir. Ancak, tek bir projenin ele alındığı dış danışman panellerinde toplu atama kullanılır. Şekil 11'de asil ve yedek adayların yer aldığı tablolarla birlikte, her projenin değerlendirme seviyesinin sayısal ve görsel olarak sunulduğu ekran görülmektedir. Bu ekranda görüldüğü üzere, seçilen asil için yedek belirlemek üzere listenin güncellenmesi, yedek ismin asil listeye kaydırılması, asil veya yedek listeden isim silinmesi gibi işlemler yapılabilmektedir.

4. VAKA ÇALIŞMASI (CASE STUDY)

Geliştirilen PaneLIST yazılımı, TÜBİTAK ARDEB MAG kapsamında Endüstri Mühendisliği alanı verileri ile test edilmiştir. Bu bağlamda öncelikle, YÖK AKADEMİK veri tabanında "Temel Alan" olarak "Mühendislik" ve "Bilim

Anahtar Kelimeler	Proje 1	Proje 2	Proje 3	Proje 4
	Anahtar Kelime 5	Anahtar Kelime 25	Anahtar Kelime 50	Anahtar Kelime 5
	Anahtar Kelime 50	Anahtar Kelime 50	Anahtar Kelime 62	Anahtar Kelime 51
	Anahtar Kelime 51	Anahtar Kelime 93	Anahtar Kelime 93	Anahtar Kelime 148
	Anahtar Kelime 62	Anahtar Kelime 128	Anahtar Kelime 171	Anahtar Kelime 171
	Anahtar Kelime 99	Anahtar Kelime 171	Anahtar Kelime 342	Anahtar Kelime 406
	Anahtar Kelime 128	Anahtar Kelime 300	Anahtar Kelime 551	Anahtar Kelime 429
	Anahtar Kelime 171	Anahtar Kelime 406	Anahtar Kelime 632	Anahtar Kelime 551
	Anahtar Kelime 300	Anahtar Kelime 551		Anahtar Kelime 632
Anahtar Kelime 429				
Faaliyet Alanları	Proje 1	Proje 2	Proje 3	Proje 4
	Faaliyet Alanı 8	Faaliyet Alanı 43	Faaliyet Alanı 8	Faaliyet Alanı 8
	Faaliyet Alanı 43	Faaliyet Alanı 51	Faaliyet Alanı 51	Faaliyet Alanı 51
	Faaliyet Alanı 51	Faaliyet Alanı 72	Faaliyet Alanı 72	Faaliyet Alanı 81
	Faaliyet Alanı 72	Faaliyet Alanı 81		

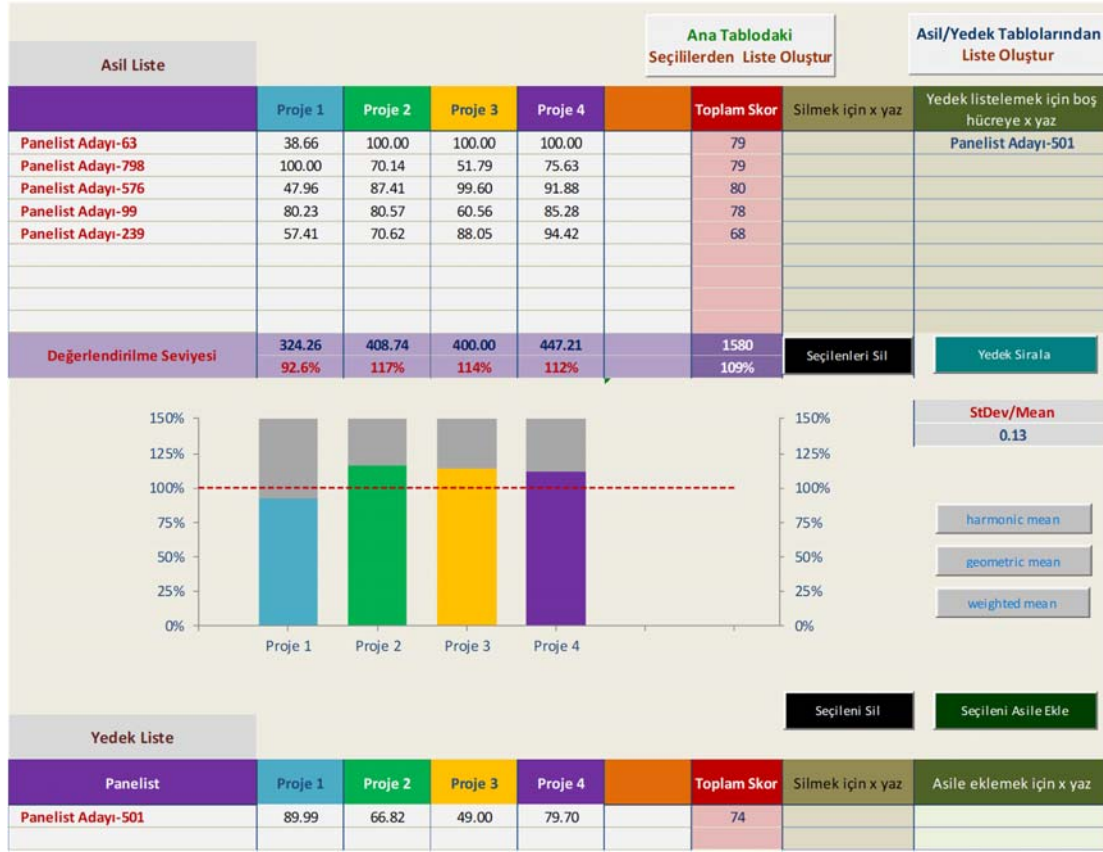
Şekil 9. Proje önerilerinin anahtar kelimeleri ve faaliyet alanlarının girildiği ekran
(The screen where the keywords and fields of activity of the project proposals are entered)

Kişi	Proje 1	Proje 2	Proje 3	Proje 4	Panel Skoru	Seçileni Yedek Ata
						Seçilenleri Ata
Panelist Adayı-63	38.66	100.00	100.00	100.00	79	x
Panelist Adayı-576	47.96	87.41	99.60	91.88	79	
Panelist Adayı-239	57.41	70.62	88.05	94.42	76	
Panelist Adayı-99	80.23	80.57	60.56	85.28	76	
Panelist Adayı-383	46.58	69.19	99.60	91.88	74	
Panelist Adayı-521	60.90	76.78	64.54	91.88	73	
Panelist Adayı-798	100.00	70.14	51.79	75.63	72	
Panelist Adayı-627	53.70	72.99	80.48	83.76	72	
Panelist Adayı-501	89.99	66.82	49.00	79.70	70	
Panelist Adayı-839	67.13	64.45	73.31	73.10	69	
...	66.19	61.61	51.79	75.63	63	

Şekil 10. PaneLIST tarafından oluşturulan ilk liste. (The first list created by PaneLIST.)

Alanı” olarak “Endüstri Mühendisliği” seçen araştırmacıların listesi ARBİS’teki verilerle eşleştirilerek 659 kişilik havuz oluşturulmuştur. Bu kişilerin hem YÖK’teki hem de ARBİS’teki anahtar kelimeleri listede yer almaktadır. Ayrıca, bu kişilerin bölüm web sayfaları/kişisel web sayfaları, varsa “Google Scholar” profillerindeki anahtar kelimeler ve Web of Science verileri taranarak eksik olan anahtar kelimelerin büyük bir bölümü de listeye eklenmiştir. Son olarak, hiyerarşik bir yapıda olmayan anahtar kelime havuzu üzerinde gruplama çalışması yapılmıştır. Daha önce Şekil 2’de özetlendiği üzere panelist adayları ile proje önerilerinin anahtar kelimeleri için iki tür eşleşme söz konusudur: birebir eşleşme ve üst grupların eşleşmesi. Anahtar kelime havuzunun çok geniş olduğu

dikkate alındığında, birebir eşleşmelerle sık karşılaşılacağı açıktır; ön çalışmalar da bu hususu işaret etmiştir. Bu aşamada temel kriter Şekil 2’deki AK_4 ve AK_10 üzerinden açıklanabilir. Eğer AK_4 konusunda uzman olduğunu beyan eden bir panelist adayının AK_10’un da uzmanı sayılabileceği düşünülüyorsa bu iki kelime aynı üst gruba atanmıştır. Oluşturulan gruplardan bir kısmı Tablo 3’te sunulmuştur. Örneğin, uzmanlık alanında anahtar kelime olarak “Ağ Analizi” girmiş bir adayın “Ağ Modelleri” anahtar kelimesine sahip bir proje önerisini de değerlendirebileceği varsayılabilir. Bu veri işlemlerinin ardından, geçmiş proje önerileri ve panel verileri dikkate alınarak 3, 4 ve 5 projenin yer aldığı 4’er panel olmak üzere toplamda 12 adet test paneli (tp1-tp12) oluşturulmuş,



Şekil 11. Asil ve yedek listelerle birlikte performans değerlerinin yer aldığı ekran (Display of performance values with main and reserve lists)

Tablo 3. Anahtar kelime grup örnekleri (Cluster samples for keywords)

Acil Durum Lojistiği	Ağ Akış Problemleri	Kuyruk Modelleri	Araç Rotalama Problemleri
Acil Durum ve Risk Yönetimi	Ağ Analizi	Kuyruk Sistemleri	Filo Yönetimi
Afet Hazırlığı ve Acil Müdahale	Ağ Modelleri	Kuyruk Teorisi	Gezgin Satıcı Problemi
Afet Lojistiği	Ağ Optimizasyonu		Güzergah Planlama
Afet Operasyonları Yönetimi	Ağ Planlama		Rota Planlama
Afet Sonrası İlk Yardım Lojistiği	Ağ Tasarımı		
İnsani Yardım Lojistiği	Ağ Teorisi		

Panelist'in bu paneller kapsamındaki performansı panel ataması problemi için hazırlanan tam sayılı model sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Panelist Atama için Tamsayı Doğrusal Programlama Modeli (EBSkT)

(Integer Linear Program for Panelist Assignment (EBSkT))

Hangi proje önerilerinin değerlendirileceği belirli olan bir panel için proje skorları toplamını enbüyükleyen tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturulmuştur (EBSkT):

$$\text{Maks } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{Skor}(i, j) * x_i \quad (5)$$

s. t.

$$\sum_{i \in I} x_i = N_{pan} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} \text{Skor}(i, j) * x_i \geq \text{HedefSkor}(j) \quad \forall j \quad (7)$$

Bu modelde x_i ikili bir değişkendir ve panelist aday i 'nin panele atanması durumunda 1, aksi durumda 0 değerini almaktadır. Sunulan amaç fonksiyonu (Eş. 5), panele atanmış panelistlerin proje skorlarını tüm proje önerisileri üzerinden enbüyüklemek olarak tanımlanmıştır. Eş. 6, panele atanan panelist sayısının panelde yer alması öngörülen panelist sayısına, (pratikte genellikle 5 olarak belirlenir) eşit olmasını garanti eden kısıttır. Eş. 7'de ise her bir proje önerisinin, hedeflenen değerlendirme seviyesini sağlaması garanti edilmektedir. Model, temel olarak uygunluk skorlarını enbüyüklemeye yönelik olup, proje önerilerinin değerlendirme seviyeleri arasındaki varyasyonu dikkate almamakta, bu yönüyle dengeleme amacını yeterince karşılamamaktadır. Bu nedenle, Eş. 8 tanımlanmıştır.

$$\sqrt{\frac{\sum_{j \in J} \left[\sum_{i \in I} \left[\frac{Skor(i,j) * x_i}{HedefSkor(j)} \right] \right]^2}{(Nprj-1)}} \quad (8)$$

$$\leq 0,05 * (\sum_{j \in I} [\sum_{i \in I} Skor(i,j) * x_i / RefSkor(j)]) / NPrj$$

Bu eşitsizliğin sol tarafı, proje önerilerin değerlendirme seviyelerinin standart sapmasını vermektedir. Bu değer in ortalama değerlendirme düzeylerinin ortalamasının %5'ini aşmaması amaçlanmıştır. EBSkT modeline bu kısıtın eklenmesiyle oluşan model EBSkT-5 olarak adlandırılmıştır. EBSkT'nin yanında, PaneLIST'in dengeli bir panel kurmada ne ölçüde başarılı olduğunu test etmeye yönelik bir başka modele daha ihtiyaç duyulmuş ve hedef skorlar sağlanırken tek amacın dengeli bir panel kurulmasının olduğu model de tanımlanmıştır. EKSp olarak adlandırılan bu model EBSkT ile aynı kısıtlar altında amaç fonksiyonu olarak, Eş. 8'deki eşitsizliğin sol tarafında yer alan terimlerin (proje önerilerin değerlendirme seviyelerinin standart sapması), sağ taraftaki 0,05 ile çarpılan terime (değerlendirme seviyelerinin ortalaması) bölümünü kullanmaktadır. Aslında dengeleme amacı ile skorları en büyükleme amacı kullanılarak iki-amaçlı bir model kurmak da mümkündür; ancak, dengeleme amacının kısıt olarak kullanıldığı EBSkT-5 bu ihtiyacı kolaylıkla karşılamaktadır.

4.2. Sonuçların Karşılaştırılması (Comparison of the Results)

Matematiksel model, hesaplanan panel skorları en yüksek olan 100 kişi arasından her proje önerisi için hedef skorları sağlamak üzere 5 panelisti seçecek şekilde oluşturulmuştur. 5 panelist ile olurlu çözüm elde edilemezse, panelist sayısı ($Npan$) birer artırılarak devam edilmiştir. PaneLIST ise, ilk kez oluşturulan listede ve sonrasında dinamik bir şekilde güncellenen listelerde ilk sırada yer alan panelistin, hedef skorlar sağlanana kadar eklenmesi şeklinde çalıştırılmıştır. Sonuçlar, Tablo 4'te özetlenmiştir. Bu tabloda, PaneLIST; skorlar toplamı, değerlendirme seviyelerinin ortalaması ve değerlendirme yüzdelerinin standart sapmalarının ortalamaya oranları olmak üzere üç performans kriteri kapsamında EBSkT, EBSkT-5 ve EKSp modelleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, skorlar toplamı için yüzde değişim; diğer başlıklarda ise, değerler zaten yüzde olarak sunulduğu için sayısal fark olarak hesaplanmıştır. Skorlar toplamında pozitif bir değişim daha yüksek skora işaret etmekte; diğer iki başlıkta yer alan pozitif değerler ise dengelilik açısından daha kötü bir panele işaret etmektedir. Görüldüğü üzere, PaneLIST, skorlar toplamı açısından EKSp'ten ortalama %12,20 daha iyiyken, bu amaç için olabilecek en iyi sonucu çözümü üreten EBSkT'den %4,14 daha düşüktür. Diğer taraftan, PaneLIST, olabilecek en dengeli panelin kurulmasına yönelik kesin çözüm veren EKSp modelinden yüzde olarak 3,93 puan daha az dengeli olan paneller önermektedir. Ancak, dengelilik kriteri dikkate alındığında, PaneLIST'in EBSkT'den 5,50 puan daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. PaneLIST ile EBSkT-5 karşılaştırıldığında, bu iki modelin hemen hemen eş sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Her bir performans kriteri bazında,

iki modelin sonuçlarının ortalama farkı %1'in veya yüzdesel olarak 1 puanın altındadır. Bu durumda, PaneLIST'in toplam değerlendirme skorlarını mümkün olduğunca büyükleterek (EBSkT'nin sadece %4,14 gerisindedir), olabilecek en dengeli panelin %5 yakınında paneller önerdiğini söyleyebiliriz. Yani, öngörülen her iki amaç da büyük oranda karşılanmaktadır.

PaneLIST'in performansına yönelik yukarıda değinilen tüm hususlardan bağımsız olarak, PaneLIST'in EBSkT ve EKSp'ye göre en büyük avantajı, karar vericilere pek çok alternatifini interaktif bir şekilde sunmasıdır. Diğer bir deyişle, diğer modellerin statik bir yapıda tek bir çözüm üretmesi önemli bir dezavantajdır. Bu dezavantaj, polinom zamanlı çözümleri de olan bu modellerin de bir KDS çerçevesinde entegrasyonu ile aşılabılır. Ancak, her aşamada yeni bir model çözülmesi, PaneLIST'teki gibi basit sayısal operatörlerle yapılan hesaplamalara göre daha yüksek çözüm karmaşıklığına sahip olacaktır. Test panellerinin çözümünde, listede en üstte yer alan kişilerin seçilmesi, sadece deneylerin kıyaslanabilir bir şekilde ve sistematik bir biçimde yapılması için gerçekleştirilmiştir. Pratikte, karar vericiler, kişilerin daha detaylı profillerini ve tercih nedeni olabilecek diğer kriterleri de kolayca dikkate alarak listeden herhangi bir kişiyi panele ekleyebilmekte ve bunun etkisini, kendisine sunulan sayısal ve görsel verilerle anında değerlendirebilmektedir. Ayrıca, yedek belirleme, asil-yedek değişikliği, panelist çıkarma gibi sunduğu opsiyonlar da PaneLIST'in artıları olarak sıralanabilir.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
ARDEB	: Araştırma Destek Programları Başkanlığı
TEYDEB	: Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı'na
MAG	: Mühendislik Araştırma Destek Grubu
ARBİS	: Araştırmacı Bilgi Sistemi
ARDEB-PBS	: ARDEB Proje Başvuru Sistemi
ARDEB-PTS	: ARDEB Proje Takip Sistemi
PYS	: Panel Yönetim Sistemi
AP	: Atama Problemi
HAP (RAP)	: Hakem Atama Problemi (Reviewer Assignment Problem)
teHAP (cmRAP)	: tam eşleşmeli Hakem Atama Problemi, (complete match Reviewer Assignment Problem)
CPAP	: Conference Paper Assignemnt Problem (Konferans Makale Atama Problemi)
MCFP	: Minimum Cost Flow Problem (Minimum/En Küçük Maliyet Akış Problemi)
MRGAP	: Multi Resource Generalized Assignment Problem (Çok Kaynaklı Genelleştirilmiş Atama Problemi)
GRASP	: Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (Atamalar için Açgözlü Rastgele Uyarlanabilir Arama Prosedürü)

Tablo 4. Performans Karşılaştırması: PaneLIST ve Diğer Modeller
(Performance Comparison: PaneLIST vs Other Models)

Test Paneli	Skorlar Toplamı				Değerlendirme Yüzdesi: Ortalama				Değerlendirme Yüzdesi: Standart Sapma / Ortalama			
	PaneLIST	EBSKT	EKSp	EBSKT-5	PaneLIST	EBSKT	EKSp	EBSKT-5	PaneLIST	EBSKT	EKSp	EBSKT-5
tp1	1126,61	1138,41	868,33	1138,41	123,46%	124,68%	95,16%	124,68%	2,77%	4,40%	0,08%	4,40%
tp2	1012,51	1138,80	833,44	1000,28	118,30%	137,28%	96,62%	116,86%	5,09%	19,10%	0,07%	4,75%
tp3	958,96	975,79	928,91	957,45	99,60%	101,43%	96,49%	99,80%	3,73%	5,03%	0,29%	4,15%
tp4	1141,32	1194,04	927,80	1142,80	122,09%	128,26%	98,97%	122,31%	4,30%	9,89%	0,06%	4,77%
tp5	1615,69	1677,14	1403,35	1598,48	110,50%	115,41%	96,00%	109,24%	5,03%	9,64%	1,08%	4,95%
tp6	1583,94	1629,33	1496,81	1590,42	103,74%	107,64%	98,11%	104,21%	2,59%	8,35%	0,99%	3,65%
tp7	1384,53	1514,80	1169,70	1374,19	115,95%	128,46%	97,48%	115,19%	5,90%	14,59%	0,12%	4,96%
tp8	1639,74	1673,00	1413,32	1639,74	111,56%	114,43%	95,81%	111,56%	4,17%	10,58%	0,14%	4,17%
tp9	1711,90	1806,76	1644,84	1644,84	107,16%	113,31%	102,84%	102,84%	5,20%	11,96%	1,54%	1,54%
tp10	1859,31	1914,92	1715,94	1865,82	105,00%	108,52%	96,67%	105,41%	3,08%	9,32%	0,52%	4,63%
tp11*	2068,05	2103,90	1880,85	2023,18	110,60%	112,67%	99,93%	107,89%	7,15%	10,79%	1,67%	4,53%
tp12	2055,41	2084,73	1741,07	1998,93	116,16%	117,97%	98,06%	112,84%	5,38%	7,38%	0,71%	4,47%
Ortalama	1513,17	1570,97	1335,36	1497,88	112,01%	117,51%	97,68%	111,07%	4,53%	10,09%	0,61%	4,25%
PaneLIST'e göre performans	-	4,14%	-12,20%	-0,84%	-	5,50%	-14,33%	-0,94%	-	5,55%	-3,93%	-0,29%

* Bu panelde, öngörülen değerlendirme seviyeleri 5 panelistle sağlanamadığı için 6 panelist eklenmiştir. Diğer test panellerinin tamamına 5 panelist atanmıştır.

LDA	: Latent Dirichlet Allocation (Saklı Dirichlet Tahsisi)
LSI	: Latent Semantic Indexing (Saklı Anlam İndeksleme)
HRAP	: Human Resource Allocation Problem (İnsan Kaynağı Tahsisi Problemleri)
TF-IDF	: Term Frequency - Inverse Document Frequency (Terim Frekansı - Ters Belge Frekansı)
I-TAP	: Improvement Topical Affinity Propagation (Geliştirilmiş Yerel Yakınlık Yayılımı)
DOI	: Digital Object Identifier (Dijital Nesne Tanımlayıcı)
ESF	: European Science Foundation (Avrupa Bilim Vakfı)
NSF	: US National Science Foundation (Ulusal Bilim Vakfı)
NSFC	: National Natural Science Foundation of China (Çin Ulusal Doğa Bilimleri Vakfı)
NCRD	: Poland National Center for Research and Development (Polonya Ulusal Araştırma ve Geliştirme Merkezi)
YÖK	: Yükseköğretim Kurumu

6. SONUÇLAR (CONCLUSION)

TÜBİTAK, uzun yıllardır bilimsel proje önerilerini değerlendirmek üzere paneller düzenlemektedir. Bu

süreçlerin yönetilmesi aşamalarında yıllar içerisinde çeşitli iş uygulama yazılımları geliştirilmiş ve uluslararası standartlarda hizmet verebilecek deneyim elde edilmiştir. Ancak, panelistlerin seçimi sürecinin daha objektif ve şeffaf bir şekilde yürütülmesine yönelik çalışmalara ihtiyaç devam etmektedir. Bu çalışmada, hangi projelerin değerlendirileceği önceden belirlenmiş bir panel için en uygun panelistlerin atanmasına yardımcı olacak bir karar destek sistemi olan PaneLIST, geliştirilmiştir. Çalışma, panelist adaylarının proje önerileri için ne kadar uygun olduğuna yönelik bir ölçüğün geliştirilmesi ve hesaplanan skorlar üzerinden en uygun panelist kompozisyonunun oluşturulması amacıyla, paneldeki mevcut panelistleri de dikkate alacak şekilde, dinamik aday listeleri oluşturulması aşamalarında literatüre ve pratiğe önemli katkılar sunmaktadır. Bu dinamik yapı, TÜBİTAK panellerinin literatürdeki benzer problemlerden ayrıştığı en önemli hususlardan birisi olan tüm panelistlerin oy kullanma zorunluluğu nedeniyle, proje önerilerinin değerlendirme seviyelerinde mümkün olduğunca az sapmanın olması hedefini önemli ölçüde sağlamaktadır. PaneLIST sonuçları, kesin çözüm veren doğrusal ve doğrusal olmayan tam sayılı program sonuçları ile kıyaslanmış ve hem skorlar toplamında hem de dengelik hedefinde en iyi çözümlere yakın çözümler elde edilmiştir.

Çalışmanın algoritma bağlamında geliştirmeye açık yönleri kısıtlı olsa da, bundan sonraki çalışmaların uygunluk

skorlarının daha iyi belirlenmesine odaklanması önemlidir. Bu husus, önemli ölçüde güvenilir veri teminine bağlıdır. TÜBİTAK da bu ihtiyacı öngörmüş ve bu doğrultuda çalışmalarına devam etmektedir. En önemli kısıtlardan birisi olan beyana bağlı veriden, doğrulanmış verilere geçiş amacıyla YÖK, Web of Science vb. paydaşlarla işbirliklerinin kapsamı genişletilmektedir. Ayrıca, özellikle veri madenciliği ve makine öğrenmesi kapsamında gerçekleşen gelişmelerle birlikte, uygunluk skorlarının hesaplanmasına yönelik çok daha kapsamlı yaklaşımlar oluşturulabilir.

Bir sonraki aşamada, doğrulanmış kaynaklardan gelen anahtar kelimelerin frekanslarının da uygunluk skoru hesaplamalarına entegre edilmesi planlanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada pilot olarak geliştirilen PaneLIST'in mevcut iş uygulama yazılımına entegrasyon çalışmaları da başlamıştır. Mevcut çalışma her ne kadar panellere odaklanmış olsa da; PaneLIST, herhangi bir uyarlamaya ihtiyaç duymadan, dış danışman değerlendirmelerinde ve akademik dergilerin hakem belirleme süreçlerinde de kullanılabilir kapsamda hazırlanmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için imkân sağlayan TÜBİTAK'a; değerli görüşleri ve katkılarından dolayı Serkan Üçer'e ve Prof. Dr. Lale Özbakır'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ma J., Xu W., Sun Y., Turban E., Wang S., Liu O., An Ontology-Based Text-Mining Method to Cluster Proposals for Research Project Selection, *IEEE Trans Syst Man, Cybern - Part A Syst Humans*, 42 (3), 784-790, 2012.
- ESF. European Peer Review Guide. Strasbourg; 2011.
- Janak S., Taylor M., Floudas C., Burka M., Mountziaris T., Novel and Effective Integer Optimization Approach for the NSF Panel-Assignment Problem: A Multiresource and Preference-Constrained Generalized Assignment Problem, *Ind Eng Chem Res.*, 45 (1), 258-265, 2006.
- Ceylan D., Saatçioğlu Ö., Sepil C., An algorithm for the committee construction problem, *Eur J Oper Res.*, 77 (1), 60-69, 1994.
- Karimzadehgan M., Zhai C., Integer linear programming for Constrained Multi-Aspect Committee Review Assignment, *Inf Process Manag.*, 48 (4), 725-740, 2012.
- Kuhn H., The Hungarian method for the assignment problem, *Nav Res Logist Q*, 2 (1-2), 83-97, 1955.
- Pentico D.W., Assignment problems: A golden anniversary survey, *Eur J Oper Res.*, 176 (2), 774-793, 2007.
- Dell'amico M., Martello S., Linear assignment in Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization, Editör: Martello S., Dell'amico M., Maffioli F., John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 1997.
- Bouajaja S., Dridi N., A survey on human resource allocation problem and its applications, *Oper Res.*, 17 (2), 339-369, 2017.
- Çavdur F., Sebatlı A., Köse Küçük M., A group-decision making and goal programming-based solution approach for the student project team formation problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 505-521, 2019.
- Gupta S., Punnen A., Minimum deviation problems, *Oper Res Lett.*, 7 (4), 201-204, 1988.
- Wang F., Chen B., Miao Z., A Survey on Reviewer Assignment Problem. *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, 718-727, 2008.
- Hartvigsen D., Wei J., Czuchlewski R., The Conference Paper-Reviewer Assignment Problem, *Decis Sci.*, 30 (3), 865-876, 1999.
- Yıldırım E., Aykanat C., Oruç A., Atmaca A., Kayaaslan E., Koca E., Geniş Kapsamlı Proje Değerlendirme ve Seçim Sistemi, TÜBİTAK, 2012.
- Xu Y., Ma J., Sun Y., Hao G., Xu W., Zhao D., A decision support approach for assigning reviewers to proposals. *Expert Syst Appl.*, 37 (10), 6948-6956, 2010.
- Daş G., Göçken T., A fuzzy approach for the reviewer assignment problem, *Comput Ind Eng.*, 72, 50-57, 2014.
- Hettich S., Pazzani M., Mining for proposal reviewers, in *Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining - KDD '06.*, ACM Press, New York, USA, 862-871, 2006.
- Fan Z., Chen Y., Ma J., Zhu Y., Decision support for proposal grouping: A hybrid approach using knowledge rule and genetic algorithm, *Expert Syst Appl.*, 36 (2), 1004-1013, 2009.
- Goldsmith J., Sloan R., The AI conference paper assignment problem, in *Proc. AAAI Workshop on Preference Handling for Artificial Intelligence*. Vancouver, Canada, 2007.
- Sun Y., Ma J., Fan Z., Wang J., A Hybrid Knowledge and Model Approach for Reviewer Assignment, in *40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'07)*, IEEE, 2007.
- Liu O., Wang J., Ma J., Sun Y., An intelligent decision support approach for reviewer assignment in R&D project selection, *Comput Ind*, 76, 1-10, 2016.
- Yunhong X., Xianli Z., A LDA model based text-mining method to recommend reviewer for proposal of research project selection, in *13th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, IEEE, 1-5, 2016.
- Protasiewicz J., Pedrycz W., Kozłowski M., vd., A recommender system of reviewers and experts in reviewing problems, *Knowledge-Based Syst*, 106, 164-178, 2016.
- Tayal D., Saxena P., Sharma A., Khanna G., New method for solving reviewer assignment problem using type-2 fuzzy sets and fuzzy functions, *Appl Intell*, 40 (1), 54-73, 2014.

25. Cook W.D., Golany B., Kress M., Penn M., Raviv T., Optimal allocation of proposals to reviewers to facilitate effective ranking, *Manage Sci.*, 51 (4), 655-661, 2005.
26. Yeşilçimen A., Yıldırım E., An alternative polynomial-sized formulation and an optimization based heuristic for the reviewer assignment problem, *Eur J Oper Res.*, 276 (2), 436-450, 2019.
27. Dumais S., Nielsen J., Automating the assignment of submitted manuscripts to reviewers, in *Proceedings of the 15th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 1992.
28. Garg N., Kavitha T., Kumar A., Mehlhorn K., Mestre J., Assigning Papers to Referees, *Algorithmica*, 58 (1), 119-136, 2010.
29. Zhao H., Tao W., Zou R., Xu C., Construction and Application of Diversified Knowledge Model for Paper Reviewers Recommendation, in *International Conference of Pioneering Computer Scientists, Engineers and Educators*, Springer, Singapore, 120-127, 2018.
30. Mungen A., Gundogan E., Alhajj R., Kaya M., A Novel Local Propagation Based Expert Finding Method, in *International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, IEEE, 1-7, 2018.
31. Liu X., Suel T., Memon N., A robust model for paper reviewer assignment, in *Proceedings of the 8th ACM Conference on Recommender Systems - RecSys '14*, ACM Press, New York, USA, 25-32, 2014.
32. Jin J., Niu B., Ji P., Geng Q., An integer linear programming model of reviewer assignment with research interest considerations, *Ann Oper Res.*, 1-25, 2018.
33. Karimzadehgan M., Zhai C., Belford G., Multi-aspect expertise matching for review assignment, in *Proceeding of the 17th ACM Conference on Information and Knowledge Management - CIKM '08*, ACM Press, New York, USA, 1113-1122, 2008.
34. Moawad M., Maher M., Awad A., Sakri S., MINARET: A Recommendation Framework for Scientific Reviewers, in *22nd International Conference on Extending Database Technology (EDBT)*, Lisbon, Portugal, 2019.
35. Nguyen J., Sánchez-Hernández G., Agell N., Rovira X., Angulo C., A decision support tool using Order Weighted Averaging for conference review assignment, *Pattern Recognit Lett*, 105, 114-120, 2018.
36. Üçer S., Bilimsel Değerlendirmeler için Performans Varisi Tabanlı Bir Değerlendirme Sistemi Geliştirilmesi. TÜBİTAK Uzmanlık Tezi, Ankara, 2011.
37. Selçuk Doğan G.H., Expert Finding in Domains with Unclear Topics, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
38. Aksop C. Akademik Makale Değerlendirmesi Kapsamında Hakem Atma Süreçlerinin İncelenmesi ve Yeni Bir Sistem Önerisi, TÜBİTAK Uzmanlık Tezi, Ankara, 2018.



Evaluation of the hygrothermal performance of external thermal insulation applications on the outer walls of existing buildings

Ayşegül Ekşi Kılıçaslan^{1*}, Hülya Kuş²

¹Faculty of Art Design and Architecture, Department of Architecture, Sakarya University, Sakarya, 54050, Turkey

²Faculty of Architecture, Department of Architecture, Istanbul Technical University, Istanbul, 34467, Turkey

Highlights:

- Field study on refurbishments with thermal insulation applications in Istanbul.
- Evaluation of the hygrothermal performance of the outer walls of the existing buildings via simulation.
- Comparison of simulation results of the outer walls which are uninsulated and insulated.

Keywords:

- Thermal Insulation
- ETICS
- Hygrothermal Performance
- WUFI 2D
- Simulation

Article Info:

Research Article
Received: 18.10.2019
Accepted: 15.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.634585

Correspondence:

Author: Ayşegül Ekşi Kılıçaslan
e-mail:
ayseguleksi@sakarya.edu.tr
phone: +90 506 415 0505

Graphical/Tabular Abstract

External thermal insulation composite system (ETICS) applications on the existing buildings in Istanbul Capa district were examined during construction phase in order to study their hygrothermal performance. In this region, it is observed that, on the existing external wall surfaces of buildings where thermal insulation is applied, impermeable coatings usually glass mosaic, ceramics and marble were used. In the façade refurbishment of these old buildings, boards mostly made of expanded polystyrene (EPS), and in some cases, extruded polystyrene (XPS) are preferred as thermal insulation material. Temperature and moisture changes with time for different wall types before and after refurbishment are presented comparatively and discussed.

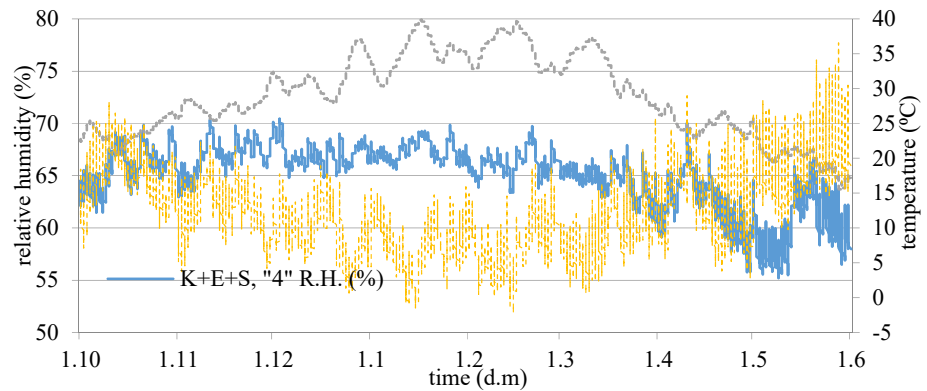


Figure A. An example for the changes in relative humidity rate of inner layers of the 2 different wall types insulated with EPS (E) and coated with external rendering (S) during one year. Control wall (K) has only cement based rendering on the outer surface before the insulation application. The other wall type (CM) has glass mosaic coating on the outer surface before the insulation application.

Purpose: This paper aims to indicate that thermal and moisture behavior of the building elements are two interrelated factors, and therefore it is not possible to obtain the expected performance of the envelope by keeping only one of them under control.

Theory and Methods:

In this study, sample wall types were determined and modelled in WUFI 2D 3.3 simulation tool based on the ETICS applications observed in the field study. Long-term hygrothermal performance of each wall type is evaluated by comparison of simulation results.

Results:

When thermal insulation materials are applied on impermeable coatings on the walls, the moisture amount in the wall layers may reach critical levels in winter because of the moisture arising from high relative humidity of interior space. In that case, insulation materials can get wet and thus thermal resistance properties impair in the long term. Moreover, high moisture levels can cause deteriorations and mold growth in the wall layers.

Conclusion:

In conclusion, thermal insulation applications need a holistic approach and expertise. Before implications, it is important to determine the specific needs of the buildings under refurbishment and the properties of the existing wall layers. Generated solutions and workmanship in this field should be qualified and appropriated for the standards and specifications.



Mevcut binaların dış duvarlarına yapılan dıştan ısı yalıtımı uygulamalarının ısı ve nemsel performansının değerlendirilmesi

Ayşegül Ekşi Kılıçaslan^{1*}, Hülya Kuş²

¹Sakarya Üniversitesi Sanat, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 34437, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- İstanbul'da yapılan dıştan ısı yalıtım uygulamalarının alanda araştırılması
- Mevcut binaların dış duvarlarının higrotermal performansının benzetimle değerlendirilmesi
- Isı yalıtım uygulaması yapılan ve yapılmayan dış duvarların higrotermal performanslarının karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 18.10.2019
Kabul: 15.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.634585

Anahtar Kelimeler:

Isı yalıtımı,
ETICS,
higrotermal performans,
ısı ve nemsel performans,
WUFI 2D,
benzetim

ÖZET

Dünyada gittikçe artan enerji tüketiminin çevreye verdiği zararları azaltabilmek için bina sektöründe alınan önlemlerden biri, binaların kullanım sürecinin enerji etkin bir şekilde tasarlanmasıdır. Binalarda enerji verimliliği sağlayabilmek amacıyla, bina kabuğunda gerçekleşen ısı kayıpları en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Türkiye'de son dönemlerde enerji verimliliği kapsamında getirilen yasal zorunlulukların ve konut ölçeğinde enerji tasarrufu sağlama ihtiyaçlarının etkisiyle, mevcut binalarda dıştan ısı yalıtım uygulamaları yaygınlaşmaktadır. Alanda gözlemlenen bazı uygulamalarda, uzun vadede duvarların ısı ve nemsel (higrotermal) performansını olumsuz etkileyebilecek uygulama sorunları dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, mevcut binaların dış duvarlarının higrotermal performansının dıştan ısı yalıtım uygulamalarından ne yönde etkilendiği araştırılmaktadır. İlk bölümde, alan çalışması kapsamında İstanbul Çapa semtinde dıştan ısı yalıtımlı kompozit sistem (ETICS) uygulamaları gözlemlenmiştir. Bu bölgedeki binaların mevcut duvar yüzeylerinde yaygın olarak cam mozaik gibi su geçirmez kaplamaların bulunduğu ve ısı yalıtım malzemelerinin kaplamalar sökülmeden doğrudan üzerlerine uygulandığı görülmüştür. İkinci bölümde, uygulama öncesi ve sonrası farklı duvar tiplerinin su içeriği, bağıl nem ve sıcaklık değerleri benzetim yöntemiyle hesaplanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, geçirimsiz kaplamalar üzerine yapılan uygulamaların duvar bünyesindeki nem miktarının kış döneminde yükselmesine ve uzun dönemde ısı yalıtım malzemelerinin ısı geçirimsizlik özelliklerini kaybetmelerine neden olabileceği görülmüştür. Bu nedenlerle, mevcut binalara sonradan yapılan ısı yalıtım uygulamalarının bütüncül bir yaklaşım ve uzmanlıkla ele alınması önem taşımaktadır.

Evaluation of the hygrothermal performance of external thermal insulation applications on the outer walls of existing buildings

H I G H L I G H T S

- Field study on refurbishments with external thermal insulation applications in Istanbul.
- Evaluation of the hygrothermal performance of the outer walls of the existing buildings via simulation.
- Comparison of simulation results of the outer walls which are uninsulated and insulated

Article Info

Research Article
Received: 18.10.2019
Accepted: 15.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.634585

Keywords:

Thermal insulation,
ETICS,
hygrothermal performans,
WUFI 2D,
simulation

ABSTRACT

One of the precautions taken in building industry in order to minimize the results of increasing energy consumption in the world is energy efficient design of the utilization process of the buildings. In order to ensure energy efficiency in buildings, heat loss through building envelope is tried to be minimized. In Turkey, recently, external thermal insulation applications have been proliferating with the effect of legal obligations and the needs of providing fuel preservation within residences. In this paper, it is researched how hygrothermal performance of the existing building walls would be affected by external thermal insulation applications. In the first chapter of this paper, external thermal insulation composite system (ETICS) applications observed in Istanbul Capa district are dealt with. In this region, it has been seen that there are impermeable coatings on the existing wall surface of buildings where external thermal insulation is applied. In the second chapter, changes in water content, relative humidity rate and temperature of different wall types are calculated via simulation method. According to the results, when thermal insulation materials are applied on impermeable coatings on the walls, the moisture amount in the wall layers may reach critical levels in winter and this situation can cause deteriorations in the wall layers in the long term. For these reasons, it is important to handle external thermal insulation applications on existing buildings with a holistic approach and expertise.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ayseguleksi@sakarya.edu.tr, kushu@itu.edu.tr / Tel: +90 506 415 0505

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de mevcut binaların ısı yalıtımı uygulamasıyla iyileştirilmesi, 2008 yılında Enerji Verimliliği Kanunu’na bağlı olarak yayımlanan Binalarda Enerji Performansı (BEP) yönetmeliğiyle zorunluluk haline gelmiştir [1]. Buna bağlı olarak, deprem riski bulunmayıp kentsel dönüşüme girmeyen önemli sayıda mevcut konut stokunun günümüz konfor şartlarına uygun ve enerji etkin yenilenmesi söz konusu olmuştur. Mevcut konut stokunun kullanıcıları hem yasal zorunlulukların etkisiyle hem de daha ekonomik ısıtma ve soğutma sağlamak amacıyla binalarının cephelerinde, mantolama olarak bilinen, dıştan ısı yalıtımı ile iyileştirme yaptırmaya başlamıştır. Dış duvarlardaki dıştan ısı yalıtımı ve üzeri sıva kaplamalı sistemler şeklindeki bu ısı yalıtım uygulamaları Avrupa’da ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems) olarak tanımlanmaktadır. 1940’larda İsveç’te geliştirilmiş olan dıştan ısı yalıtımlı kompozit sistemler (ETICS) Avrupa’da gerek mevcut bina stokunun enerji etkinliğini arttırmak ve hizmet ömrünü uzatmak amacıyla iyileştirmelerde, gerekse yeni yapılan binalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Türkiye’nin de üyesi olduğu Avrupa Teknik Onay Organizasyonu (EOTA - European Organisation for Technical Approvals) tarafından 2000 yılında yayımlanan Avrupa Teknik Onay Rehberi (ETAG) 004, dıştan ısı yalıtımlı ve sıva kaplamalı bir kompozit sistemin CE işareti alabilmesi için sağlaması zorunlu olan kriterleri içermektedir. ETAG 004’te dıştan ısı yalıtımlı kompozit sistemlerin bileşenleri, birleşimleri ve tespitleri ayrıntılı olarak ele alınmakta; uygulama sürecine ve testlerine yönelik esaslar belirtilmektedir [3].

Literatürde, ETICS uygulamaları ve genel olarak dış duvarların higrotermal performansının değerlendirilmesi üzerine yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. ETICS üzerine yapılan bu çalışmalarda, ağırlıklı olarak, sistemin dış duvarların ısı ve nemsel performansına etkisi, nemlenme ve yoğuşma riskleri, ısı köprüsü oluşumu, mekanik dayanımı ve durabilitesi gibi konular ele alınmaktadır. Dış duvarların higrotermal performansının değerlendirildiği çalışmalarda ise, duvar katmanlarının farklı malzemelerle yapılması ya da farklı sıralanması durumlarında oluşabilecek ısı ve nem kaynaklı bozulmalar, hasarlar gibi performans sorunları ile birlikte bu sorunları önlemeye yönelik çözümler ve öneriler üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu araştırmaların yöntemleri, genel olarak; (i) alanda gözlem, (ii) kullanım sırasında yerinde veya laboratuvar ortamında farklı ölçeklerdeki deney düzeneklerinde ölçme, (iii) bilgisayarlı benzetim ve sayısal hesaplama olarak sınıflandırılabilir. Bazı çalışmalarda birden fazla araştırma yönteminin bir arada kullanıldığı da görülmektedir.

ETICS ile ilgili uluslararası çalışmalar, genellikle, yapılan uygulamaların ETAG 004 rehberinde ayrıntılandırılan ve ölçme yöntemleri tariflenen performans gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığının araştırılması üzerinedir. Bu kapsamda, bu uygulamalarda kullanılan malzemelerin, cephe yönlenmesinin, yağmur ve rüzgar etkilerinin ve iç ortam kullanım koşullarının sistemin ısı yalıtım performansı, hizmet ömrü ve durabilitesi üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çeşitli çalışmalar

bulunmaktadır. Ayrıca, ETICS ısı yalıtım sisteminin ısı köprülerini engelleyecek şekilde bina kabuğuna entegre olması üzerine yapılmış çalışmalar da vardır. Malanho ve Veiga [4] seramik kaplamalı bir ETICS uygulamasında yaptıkları doğal ve yapay yaşlandırma testleriyle, ısı yalıtım malzemesinin duvar yüzeyine ve seramik kaplamanın yalıtım malzemesine yapışma/tutunma kuvvetini ölçmüşlerdir. Çalışmalarında, ETAG 004 uygulama rehberinde seramik kaplamanın ETICS ile ele alınmadığını ve performansının değerlendirilmesine yönelik bilgi verilmediğini belirtmişlerdir. Lujan vd. [5] Madrid’deki mevcut bir apartmanda yapılan ETICS uygulamalarının, binanın kuzey ve güney yönlerine bakan dış duvarlarının ısı performansına olan etkisini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, ısı yalıtım uygulamasından önce ve sonra duvarların iç ve dış yüzeylerine yerleştirdikleri sıcaklık sensörleriyle ölçme yapmışlardır. Silva ve Falorca [6] Portekiz’deki hatalı ETICS uygulamaları sonucu ortaya çıkan kusurları alanda gözlem yöntemiyle tespit ederek, ETICS’in durabilitesini ve yaşam dönemi performansını değerlendirmişlerdir. Tavares vd. [7] Portekiz’deki 378 adet ETICS uygulaması örneğinden yola çıktıkları çalışmalarında, iki farklı sayısal hesaplama yöntemiyle bu cephe sistemlerinin durabilitesini ve hizmet ömürlerini değerlendirerek bakım ve onarım maliyetlerini düşürecek uzun ömürlü, etkin tasarım ve uygulama çözümleri belirlemeyi amaçlamışlardır. Fernandes vd. [8] mevcut binaların yenilenmesinde pencere doğramalarının çevresinde ısı köprüsü oluşturmayacak farklı uygulama yöntemlerini araştırmışlardır.

Dış duvarların higrotermal performansının değerlendirilmesi konusunda yapılmış olan uluslararası çalışmalar, genellikle, farklı dış duvar katmanlaşmalarının ve yeni geliştirilmiş malzemelerin kullanımının dış duvarların ısı ve nemsel performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerinedir. Bu kapsamda, dış duvar sistemlerinde sıcaklık ve nem etkileriyle oluşan fiziksel ve kimyasal hasarlar, biyolojik bozulmalar, özellikle duvar sistemini oluşturan katmanların farklı buhar geçirgenliklere sahip olması ve doğru sıra ile uygulanmaması nedeniyle duvar bünyesinde oluşan sorunlar üzerine çalışmalar vardır. Bu alandaki çalışmaların önemli bölümünde, soğuk-nemli iklim bölgelerindeki ahşap yapıların dış duvarlarının higrotermal performansı araştırılmıştır [9-11]. Daha az çalışmada, ısı yalıtım uygulamasıyla iyileştirilmiş yığma/örme duvarların higrotermal performansı benzetim ve ölçme yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir [12, 13]. Bu çalışmalarda, dış duvarlara içten yapılan ısı yalıtımının iç ortamdan gelen nemin duvar bünyesinde soğuk bir noktada yoğuşmasına ve bu bölgede nem kaynaklı sorunlar oluşmasına neden olduğu belirtilmiş ve çözüm önerileri geliştirilmiştir. Özellikle, son yıllarda yapılan çalışmalar, duvarların iç yüzeylerine yapılan ısı yalıtım uygulamalarından kaynaklanan nem problemlerinin yeni geliştirilen ısı yalıtım malzemeleri ile önlenmesi üzerinedir. Finken vd. [14] Danimarka’da bulunan tarihi bir yurt binasının tuğla duvarlarına yapılacak olan içten ısı yalıtımının ısı ve nemsel performansını ve küflenme riskini kapiler özellikleri farklı olan üç ısı yalıtım malzemesi üzerinden benzetim yöntemiyle değerlendirmişlerdir.

İbrahim vd. [15] Fransa’da yaptıkları çalışmada ETICS benzeri olarak geliştirilmiş aerogel esaslı kompozit sistemin içten ve dıştan uygulandığı kuzey yönüne bakan iki betonarme test duvarının higrotermal performansını ölçme ve benzetim yöntemleriyle araştırmışlardır.

ETICS uygulamalarının higrotermal performans üzerindeki etkilerini değerlendiren bazı çalışmalarda ETICS’in ısı yalıtımı katmanında ve son kat kaplamasında sıcaklık ve nem etkisiyle oluşan fiziksel hasarlar ve biyolojik bozulmalar araştırılmaktadır. Zirkelbach vd. [16] Avrupa’nın farklı iklim koşullarında yapılan ETICS uygulamalarında kullanılan mineral yün esaslı ısı yalıtım malzemesinde sıcaklık ve nem etkisi altında oluşan gerilmeleri benzetim yöntemiyle hesaplayarak, malzemenin yüzeyden kopma olasılığını araştırmışlardır. Barreira ve de Freitas [17] ETICS’teki kaplama yüzeyinde nemli ortam şartlarıyla oluşan biyolojik bozulmaları Portekiz’deki bir binayı bir yıl boyunca gözlemleyerek incelemişlerdir. Pereira vd. [18] seramik, doğal taş, sıva ve boya kaplamalı duvar tipleriyle, sıva kaplamalı ETICS uygulaması yapılmış veya çıplak beton olarak bırakılmış duvar tiplerinin dış yüzeylerinde oluşan nem kaynaklı bozulmaları ve bunların nedenlerini araştırmışlardır. Nem etkisiyle oluşan bozulmaların en fazla ETICS uygulanmış duvarların dış yüzeyinde görüldüğünün belirtildiği çalışmada; yanlış tasarım, hatalı detaylandırma, malzeme seçiminin iklimle uyumsuzluğu ve düşük işçilik kalitesi bu bozulmaların nedeni olarak gösterilmiştir. Lourenço vd. [19] Portekiz’de yaptıkları test çalışmasında, kaplama malzemesi olarak seramik uygulanmış ETICS’teki ve seramik kaplamalı tuğla bir duvardaki kaplamalarda dış iklim etkileriyle meydana gelen bozulmaları termal kamerayla gözlemleyerek araştırmışlardır. Xiong vd. [20] ise ince bir sıvadan oluşan geleneksel ETICS kaplamalarının sıcaklık ve nem etkisiyle kolay çatlayıp bozulmaya uğradığını belirterek, metal panel kaplamalı ETICS alternatifleri üzerine çalışmışlardır.

Türkiye’de dıştan ısı yalıtımlı kompozit sistemlerin (ETICS) gittikçe yaygınlaşmasına karşın, bu konuda yapılan bilimsel araştırmalar ülkemizde hala sınırlı sayıdadır. Özellikle, higrotermal performansa yönelik az sayıda çalışma bulunmaktadır. ETICS konusunda ulusal literatürde bulunan çalışmalar, sistemlerin dürabilitesinin, hizmet ömrünün, ısı yalıtım performansının, ısı yalıtımı ve son kat kaplama malzemelerinin mekanik direncinin ve yangın dayanımının değerlendirilmesi üzerinedir. Edis ve Türkeri [21] İstanbul’da XPS ve EPS ısı yalıtım malzemesi kullanılarak ETICS uygulaması yapılmış binaların rüzgarla itilen yağmur suyu ve güneş ışınımı etkilerine en fazla maruz kalan cephelerini gözlemleyerek, sistemlerin uzun dönem performansını ve dürabilitesini değerlendirmişlerdir. Türkmen [22] İstanbul’da alanda gözlemediği 19 adet ısı yalıtım uygulama örneğinden yola çıkarak, uygulama aşamasındaki sorunları ısı performansının etkinliği açısından değerlendirmiş ve uzun dönemde oluşabilecek olası performans sorunlarını genel olarak tartışmıştır. Uygunoğlu vd. [23] Türkiye’de ETICS uygulamalarında yaygın olarak kullanılan farklı ısı yalıtım malzemelerinin sıva kaplama ile adezyonunu ve yangın

performansını iyileştirmek için gerekli olan optimum sıva kalınlığını araştırmışlardır.

Higrotermal performans konusunda ulusal literatürde bulunan çalışmalar, farklı dış duvar tiplerinin ve katmanlaşmalarının ısı ve nemsel açıdan değerlendirilmesi ve nem kaynaklı sorunların araştırılması üzerinedir. Umaroğulları vd. [24] Edirne’de bulunan, kuzey yönüne bakan 1 m yüksekliğindeki bir duvarın farklı ısı yalıtımı ve gövde malzemeleriyle inşa edilmesi durumundaki higrotermal performansını benzetim yöntemiyle değerlendirmişlerdir. Edis ve Kus [25], İstanbul iklim etkileri altında bulunan pomza agregalı beton bloklarla örülmüş bir duvarın ısı yalıtımı ve kaplama varlığına göre çeşitlendirilen alternatiflerinin higrotermal performansını benzetim yöntemiyle araştırmışlardır. Sarıtabak [26] İstanbul’da bulunan binaların dış duvarlarında ve duvarların ara kesitlerinde ısı köprüsü, hava sızıntısı, dış ve iç ortam koşullarının etkisiyle oluşan nem ve yoğunlaşma sorunlarını kızılötesi termografi ile değerlendirmiştir.

Bu çalışma, Türkiye’de mevcut binalara sonradan uygulanan ETICS sistemlerinin, mevcut araştırmalardan farklı olarak, özellikle alan araştırması ile yapım sırasında yerinde gözlemlenerek incelenmesiyle belirlenen gerçek durumların veya sorunların WUFI bilgisayarlı benzetim yöntemiyle higrotermal performans açısından ele alınarak değerlendirilmesini kapsamaktadır. Çalışmanın ilk bölümünü oluşturan İstanbul’daki alan araştırmasında, yapım sırasında gözlemlenerek incelenen ETICS uygulamalarında, ısı yalıtımının binaların dış duvarlarına pratik uygulamalarda “BTB” olarak bilinen cam mozaik, mermer taş, seramik gibi özellikle geçirimsiz olarak tanımlanabilecek cephe kaplamalarının, çoğunlukla sökülmeksizin ve herhangi bir iyileştirme yapılmaksızın, doğrudan üzerlerine uygulandığı tespit edilmiştir [27]. Bu ve benzer kaplamalar veya katmanlar üzerine uygulanan ETICS sistemlerinin higrotermal performansının değerlendirildiği bu çalışma, bu durumun belirli bir dönemde Türkiye’de yaygın olarak kullanılmış olan cam mozaik (BTB) kaplamalı cephe tipolojisine özgü olması ve yurtdışında benzer uygulamaların (yaygın olarak) bulunmaması nedeniyle ulusal ve özellikle uluslararası çalışmalarda bu konu kapsamında araştırılan malzemelerden ve uygulamalardan farklılaşan özgün bir çalışmadır. Bu nedenlerle, Türkiye’de son yıllarda oldukça yaygınlaşan bu tür hatalı mantolama uygulamalarının uzun dönemdeki higrotermal performansının araştırılması, literatürdeki bu eksikliği doldurması ile birlikte, enerji etkinliğin sağlanmasında, dolaylı olarak da ekonomiye yansımada, olası olumsuz etkilere dikkat çekmesi açısından önemli bir konu olarak görülmektedir.

2. ALAN ÇALIŞMASI (FIELD STUDY)

Son dönemlerde gittikçe yaygınlaşan dıştan ısı yalıtım uygulamalarının dış duvarların higrotermal performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla, öncelikle, belirlenen bir bölgede mevcut binalar ve devam etmekte olan

ısı yalıtım uygulamaları incelenerek durum tespiti yapılmıştır.

2.1. Çalışma Bölgesi ve Mevcut Binalar ile İlgili Genel Özellikler

(Research District and General Characteristics of Existing Buildings)

Alan çalışmasının yapıldığı Çapa bölgesi, İstanbul genelinde yaygın olarak görülen bina tipolojisini de oluşturan, 1960-1980 dönemlerinde inşa edilmiş konut binalarından oluşmaktadır. Yoğun bir yapılaşmanın bulunduğu bu bölgede sokak aralarında ısı yalıtımı uygulamaları çok hızlı bir şekilde ve art arda yapılmaktadır. Bundan dolayı, alan araştırması sırasında cadde ve sokak aralarında bulunan mevcut binalarda çok sayıda ısı yalıtımı uygulaması gözlemlenebilmiştir.

Bölgedeki binalar genellikle üç, dört veya beş katlı olup; bitişik nizamdadır. Cadde üzerindeki karşılıklı binaların arasında kaldırım ve yol genişlikleri ile birlikte yaklaşık 12 m mesafe bulunurken, sokak üzerinde bulunan binaların arasındaki mesafe 6 m'ye kadar düşebilmektedir ve bu nedenle karşılıklı binaların özellikle zemin katları günün büyük bir bölümünde gölgede kalmaktadır. Binaların yola bakan cephelerinin saydamlık oranları, yönlendirmelerinden bağımsız olarak, %20 ile %50 arasında değişmektedir. Bazı binaların yan cepheleri de açıktır, ancak bu cepheler genellikle sağır duvarlardan oluşmaktadır. Binaların çoğunun dış duvarlarına, aynı dönemde İstanbul'da inşa

edilen birçok binada da görülen, delikli tuğla üzerine cam mozaik (BTB) cephe kaplaması uygulanmış olup, bazılarında da çimento esaslı sıva üzerine boya yapılmıştır. Sıva üzeri boya kaplama ve cam mozaik (BTB) kaplama daha çok bina cephesinin üst katlarında, seramik kaplama ve mermer kaplama cephenin zemin kat bölümünde yaygın olarak kullanılmıştır (Şekil 1).

2.2. Mevcut Bina Cephelerine Yapılan Isı Yalıtım Uygulamaları

(Thermal Insulation Applications on the Outer Walls of Existing Buildings)

Alandaki mevcut uygulamalarda ısı yalıtım malzemelerinin genellikle rastgele seçilip boyutlandırıldığı ve uygulamaların mevcut kaplamanın sökülmesi çok işçilik gerektirdiğinden, genellikle cam mozaik kaplamalar sökülmeden üzerine yapıldığı görülmüştür. Ayrıca, yıllar içinde kirlenme, çatlama, aşınma ve malzeme kaybı gibi çeşitli bozulmalara uğrayan bu mevcut kaplama yüzeylerinin ısı yalıtımından önce temizlenip iyileştirilmediği gözlemlenmiştir. Bazı durumlarda, özellikle zemin katlardaki mermer ve seramik kaplamalar sökülmüş ve ısı yalıtımı uygulamasından sonra yeniden seramik kaplama uygulaması yapılmıştır. Şekil 2'de cam mozaik bir yüzey üzerine doğrudan ısı yalıtımı uygulaması yapıldığı görülmektedir. Dış duvar yüzeylerinde çoğunlukla EPS ısı yalıtım levhaları kullanılırken, pencere kenarlarına genellikle XPS levhaların uygulandığı gözlemlenmiştir. Köşe profili kullanılmak için pencere kenarlarında darbe dayanımı yüksek olan XPS levhaların



Şekil 1. Mevcut dış duvar kaplamaları (Outer wall coatings in existing situation)



Şekil 2. Mevcut cam mozaik kaplama yüzeyi üzerine doğrudan EPS ısı yalıtımı levhasının uygulanması
(Application of EPS insulation boards directly to the wall which has glass mosaic surface coating in existing situation)

tercih edildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, ön-üretimli ısı yalıtımlı kaplama paneli, kat silmesi ve söve kullanımı yaygın olan uygulamalardandır. Geçirimsiz yüzey üzerine doğrudan yapıştırıcı harçla uygulanan bu ön-üretimli kaplama malzemelerinin tespitinde dübel kullanılmaması, derzlerinin yağmur ve rüzgar etkilerine maruz kalması, böylece duvarların uzun dönem performansını olumsuz etkileyecek bir durum oluşturması olasılıkları yüksektir. İncelenen binaların çoğunda ısı yalıtım malzemesi olarak uygulayıcıların ellerinde mevcut bulunan binisiz ve küçük parçalı EPS levhaların uygulandığı ve bu nedenle levhalar arasında ısı köprülerine neden olacak çok sayıda ve geniş derz boşluklarının kaldığı görülmüştür. Ayrıca, ısı yalıtım levhalarının duvara tespitinde kullanılan yapıştırıcı harcın rastgele sürüldüğü, dübellerin sayısının ve düzeninin standartlardaki gerekliliklere uymadığı gözlemlenmiştir (Şekil 2).

3. DIŞ DUVARLARDA HİGROTHERMAL PERFORMANSIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF THE HYGROTHERMAL PERFORMANS OF OUTER WALLS)

Bina bileşenlerinin belirli bir zaman dilimindeki higrotermal performansının çalışıldığı araştırmalarda ısı ve nem analizlerini yapmak üzere çeşitli benzetim yazılımları kullanılmaktadır [28]. Alt bölümlerde ayrıntıları verilen bu çalışmada, benzetim yazılımı WUFI 2D kullanılarak, alanda gözlemlenen uygulamalardan sorunlu olduğu ön görülen bazı dıştan ısı yalıtımlı duvar tiplerinin higrotermal performansı araştırılmıştır.

3.1. Mevcut ve Uygulama Sonrası Dış Duvar Tipleri (Wall Types in Existing and After Application Situations)

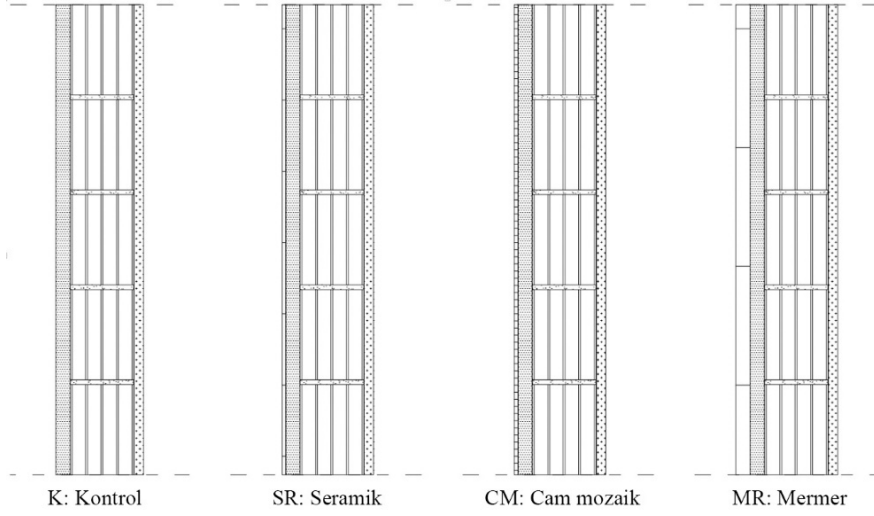
Alan çalışması kapsamında gözlemlenen farklı duvar tipleri WUFI 2D benzetim yazılımında karşılaştırma amaçlı mevcut duruma ve dıştan ısı yalıtımı uygulaması sonrası duruma göre modellenmiştir. Mevcut durumdaki duvarlar, aralarında 1 cm kalınlığında harç tabakası bulunan 5 sıra düşey delikli tuğla bloktan oluşmaktadır ve bütün duvarlarda iç sıva kalınlığı 2 cm alınmıştır. Farklı dış kaplama malzemelerine göre mevcut duvar tipleri Şekil 3'te verilmiştir. "K" ile

kodlanan sistem kontrol duvarına aittir ve bu duvarda tuğla bloklar üzerinde sadece dış sıva katmanı vardır. "SR" kodlu duvar sisteminde dış sıva üzerinde seramik kaplama, "CM" kodlu duvar sisteminde dış sıva üzerinde cam mozaik kaplama ve "MR" kodlu duvar sisteminde dış sıva üzerinde mermer kaplama bulunmaktadır. Kaplama derzlerinin geçirimsiz olduğu kabul edilmiştir. Benzetimle hesaplama yapmak amacıyla dört mevcut duvar tipinin 2 farklı ısı yalıtımı malzemesi ve 2 farklı kaplamalı alternatifleri ile birlikte toplam 20 farklı duvar tipi oluşturulmuştur. Modellenerek analiz edilen duvar tiplerinin ayrıntıları Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 4'te mevcut ve üzerine EPS levha ile sıva kaplama (ETICS) uygulanmış duruma göre oluşturulan 8 farklı duvarın benzetim sonuçlarından elde edilen bir karşılaştırma grafiği bulunmaktadır. Cam mozaik, seramik ve mermer malzemeler aynı çevresel etmenlere maruz kaldığında, benzer karakteristik özelliklerinden dolayı benzer bir davranış gösterdiğinden grafikte birbirine yakın eğriler oluşturmuştur. Bu nedenle bu yazıda, sadece mevcut durumda sıva kaplamalı olan kontrol duvarı ve cam mozaik kaplamalı olan duvar tiplerine ait sonuçlar sunulmaktadır.

Çalışmada kullanılan mevcut ve üzerine ETICS uygulanmış duruma göre modellenen duvar sistemleri, katmanlaşma malzemeleri ve kalınlıklarına göre Şekil 5'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Çalışılan duvar tiplerinde hesaplama yapılan bölgeler, iç sıvada "1", tuğla duvar gövdelerinde "2" ve "3", dış sıvada "4", ısı yalıtımında "5" numaralı noktalar olarak ifade edilmiştir.

3.2. Benzetim Modelinin Oluşturulması ve Katman Malzemelerinin Özelliklerinin Belirlenmesi (Forming Simulation Model and Determining Material Properties of the Wall Layers)

WUFI 2D benzetim yazılımı sonlu elemanlar yöntemiyle çalıştığı için hesaplamalarda kullanılacak bir ağ modelinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada, seçilen bir duvar tipi için farklı ağ modelleri ile hesaplama yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak hesaplama süresi ve hassasiyeti açısından optimum sonucu veren ağ modeline karar verilmiştir.



Şekil 3. Mevcut durumda farklı dış yüzey kaplamalı duvar tipleri
(the wall types with different outer surface coatings in existing situation)

Tablo 1. Mevcut duruma ve ısı yalıtımı sonrası duruma göre modellenerek analiz edilen duvar tipleri
(The wall types which are modelled according to the situations before and after application and analyzed)

Mevcut duruma göre oluşturulan duvar tipleri	Isı yalıtımı (ETICS) uygulaması sonrası duruma göre oluşturulan duvar tipleri			
	EPS ısı yalıtımı levhası+sıva kaplama uygulaması	XPS ısı yalıtımı levhası+sıva kaplama uygulaması	EPS ısı yalıtımı levhası+seramik kaplama uygulaması	XPS ısı yalıtımı levhası+seramik kaplama uygulaması
K (sıva kaplamalı)	K+E+S	K+X+S	K+E+SR	K+X+SR
CM (cam mozaik kaplamalı)	CM+E+S	CM+X+S	CM+E+SR	CM+X+SR
SR (seramik kaplamalı)	SR+E+S	SR+X+S	SR+E+SR	SR+X+SR
MR (mermer kaplamalı)	MR+E+S	MR+X+S	MR+E+SR	MR+X+SR

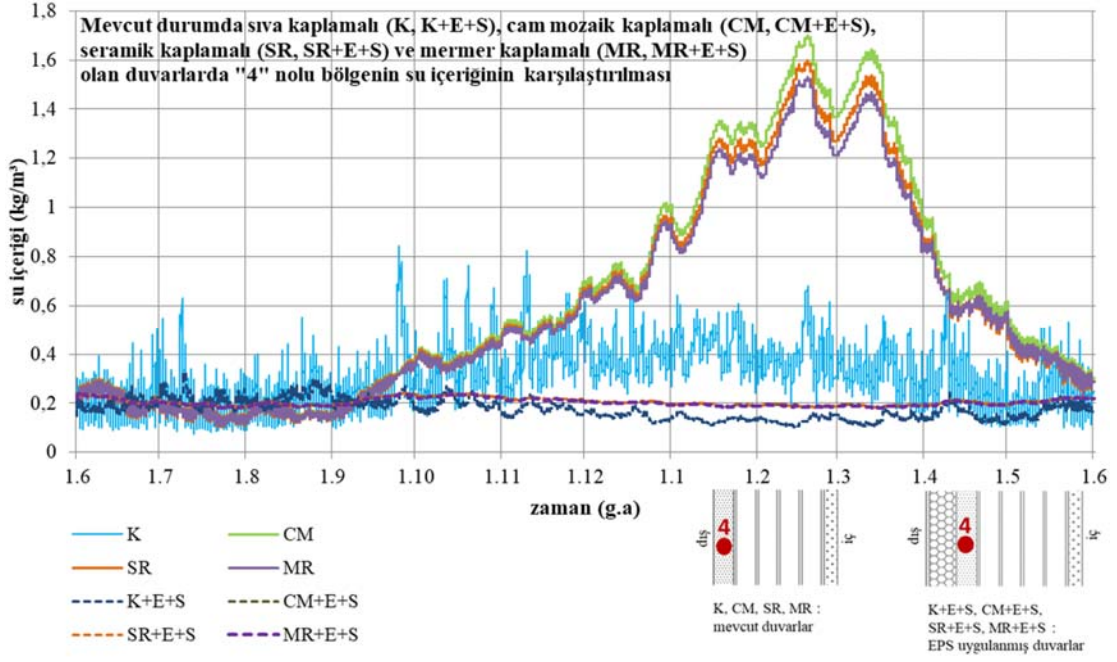
Hesaplamalarda kullanılmak üzere duvar gövdesindeki tuğla bileşenlerin özellikleri için WUFI 2D yazılımının kütüphanesinden alandaki uygulamalarda kullanılan tuğlanın özelliklerine en yakın/en uygun değerlerde olanları seçilmiştir. Çimento-kireç iç sıva, EPS ve XPS ısı yalıtım levhaları, cam mozaik, mermer ve seramik kaplamanın teknik özellikleri yine uygulamalarda kullanılan malzemelere uygun olacak şekilde standartlardan yararlanılarak yazılıma ayrıca elle girilmiştir [29, 30].

3.3. Benzetim için Başlangıç ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi (Determining Initial and Boundary Conditions for Simulation)

Higrotermal performans analizi için benzetim yazılımında alınacak başlangıç tarihine bağlı olarak malzemelerin etkisi altında bulunduğu dış ortam şartlarının (başlangıç koşullarının) belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, cam mozaik, seramik ve mermerin buhar difüzyon direnci yüksek olduğu için, nemlilik durumları kuru kabul edilmiştir.

Isı yalıtımı üzerine yaş uygulama olarak yapılan sıva katmanının bağıl nem değerine, inşa neminin de etkisiyle, yüksek bir nem oranı girilmiştir. Sıcaklık için yazılımda tanımlı olan ortalama değerler kullanılmıştır.

Sınır koşullarının belirlenmesi adımında duvar sistemlerinin dış ve iç yüzeyleri ile temas eden sırasıyla dış ve iç ortam şartları yazılıma girilmiştir. Duvarların alt ve üst yüzeyleri ısı iletmez (adiabatic) seçilirken, dış ortamla temas eden yüzeyler için Meteororm'dan alınan ve 1996-2005 zaman aralığındaki sıcaklık verilerinden elde edilen ortalama bir referans yıla dayanan İstanbul iklim verileri kullanılmıştır. Bu iklim verileri bulutluluk oranı, hakim rüzgar yönü, rüzgar hızı, hava basıncı ve bağıl nem bilgilerini de içermektedir. Yönlenme için WUFI 2D yazılımı tarafından bu veriler kullanılarak oluşturulan yağış grafiğine göre rüzgarla itilen yağmur suyunun İstanbul'da en etkili olduğu kuzeybatı yönü tercih edilmiştir. Güneş ışınımı ve rüzgarla itilen yağmurla ilgili ek bilgiler için WUFI 2D ile İstanbul iklim verileri kullanılarak olumsuz koşullar altında hesaplama yapılan



Şekil 4. K, CM, SR, MR, K+E+S, CM+E+S, SR+E+S, MR+E+S kodlu duvar tiplerinin dış sıva katmanlarının su içeriği (Water content of the external plaster (4) layers of the walls which are coded as K, CM, SR, MR, K+E+S, CM+E+S, SR+E+S, MR+E+S)

benzer bir çalışmanın verilerinden yararlanılmıştır [25]. İç ortam koşulları için WUFI 2D kütüphanesinden seçilen EN 15026 standardına göre dış ortam sıcaklığı 20°C 'nin üzerine çıktığında, iç ortamdaki sıcaklık 25°C ve bağıl nem %60 olarak sabitlenmektedir. Dış ortamdaki sıcaklık 0°C 'in altına düştüğünde ise, iç ortamdaki sıcaklık 20°C 'de sabit kalmakta ve bağıl nem %30'a kadar azalmaya devam etmektedir.

3.4. Hesaplamanın Başlatılması, Hesaplama Süresi ve Sıklığı

(Initiating the Calculation, Calculation Duration and Frequency)

Çalışmada 8760 saatlik (1 yıl) süre boyunca duvar kesitlerinde seçilen bölgenin noktasal veya alansal olarak sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), bağıl nemi (%) ve su içeriği (kg/m^3) miktarındaki değişimler hesaplanmıştır. Benzetim yazılımı hesaplama sonuçlarını grafik olarak ya da sayısal olarak saatlik ortalama değerler şeklinde vermektedir. Elde edilen sayısal sonuçlar sonradan Excel'de işlenerek higrotermal açıdan karşılaştırmalı grafikler oluşturularak değerlendirilmiştir. Mevcut duvar tiplerinde dört ve uygulama sonrası duvar tiplerinde beş olmak üzere farklı katmanlardaki bölgelerden sonuçlar alınmıştır (Şekil 5). Bu yazıda ağırlıklı olarak mevcut geçirimsiz kaplamanın arkasındaki sıva katmanı (4) ve ısı yalıtımı (5) gibi özellikle yüksek riskli bölgelere ait sonuçlar sunulmaktadır.

4. Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

(Evaluation of the Results of Simulation)

Benzetim sonuçları mevcut duruma ve ısı yalıtım uygulaması sonrası duruma göre karşılaştırılmak üzere iki ayrı alt başlıkta ele alınmaktadır. Uygulama sonrası durumda

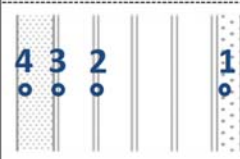
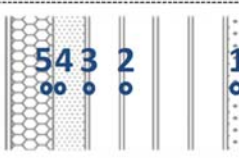
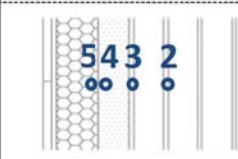


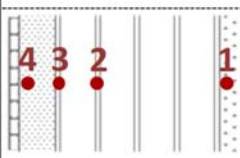
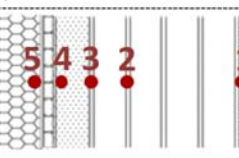
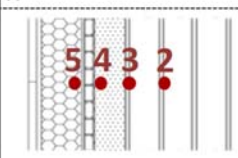


ısı yalıtım malzemelerinin ve son kat kaplama malzemelerinin farklılaşmasının higrotermal performans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

4.1. Mevcut Duruma göre Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

(Evaluation of the Results of Simulation According to the Existing Situation)

Mevcut durumdaki, yalıtımsız duvarlarda cam mozaik kaplamalı duvar tipinin (CM) "4", "3", "2" ve "1" no'lu bölgelerinin ve sıva kaplamalı duvar tipinin (K) "4", "2" ve "1" no'lu bölgesinin bağıl nem miktarındaki bir yıllık değişimi Şekil 6'daki grafikte verilmektedir. Kışın ısıtma yapılan Kasım-Mayıs ayları arasındaki dönemde CM kodlu duvar tipinde cam mozaik kaplama altında kalan "4" no'lu bölgenin, K kodlu duvar tipindeki "4" no'lu bölgeye göre daha yüksek nem içerdiği görülmektedir. Bu durumdan, CM kodlu duvar tipinde iç ortam neminin cam mozaik kaplamanın geçirimsiz olması nedeniyle dış ortama çıkamayıp kaplama arkasındaki bölgede biriktiği ve yaz aylarında dış hava sıcaklığının artmasıyla birlikte duvar bünyesine ve iç ortama doğru kuruduğu sonucu çıkarılabilir. CM kodlu duvar tipinin tuğla katmanında bulunan içeriye doğru sırasıyla "3" ve "2" no'lu bölgelerin bağıl nem oranlarının Nisan ayında başlayan kuruma döneminde "4" no'lu bölgeyle yaklaşık aynı değerlere ulaşması bu çıkarımı doğrulamaktadır.

Ayrıca, K kodlu duvar tipinin bağıl nem değerlerinde yıl boyunca gece-gündüz farklılığının çok fazla olduğu ve mevsimsel farklılığın az olduğu görülmektedir. Diğer yandan, CM kodlu duvar tipinin bağıl nem değerlerinin yaz-

	Mevcut duvar tipleri		Uygulama sonrası duvar tipleri			
	Isı yalıtımı uygulaması öncesi duvar kaplamalarına göre		EPS(E)+Sıva Kaplama(S)	XPS(X)+Sıva Kaplama(S)	EPS(E)+Seramik Kaplama(SR)	XPS(X)+Seramik Kaplama(SR)
Bileşen kodu	K		K+E+S	K+X+S	K+E+SR	K+X+SR
Bileşen Katmanları	(D) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)		(D) sıva kaplama (4 mm) ısı yalıtım levhası (40 mm) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)	(D) sıva kaplama (4 mm) ısı yalıtım levhası (40 mm) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)	(D) seramik kaplama (8 mm) ısı yalıtım levhası (40 mm) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)	(D) seramik kaplama (8 mm) ısı yalıtım levhası (40 mm) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)
Bileşen Kesiti						
Bileşen kodu	CM		CM+E+S	CM+X+S	CM+E+SR	CM+X+SR
Bileşen Katmanları	(D) cam mozaik kaplama (8 mm) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)		(D) sıva kaplama (4 mm) ısı yalıtım levhası (40 mm) cam mozaik kaplama (8 mm) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)	(D) sıva kaplama (4 mm) ısı yalıtım levhası (40 mm) cam mozaik kaplama (8 mm) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)	(D) seramik kaplama (8 mm) ısı yalıtım levhası (40 mm) cam mozaik kaplama (8 mm) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)	(D) seramik kaplama (8 mm) ısı yalıtım levhası (40 mm) cam mozaik kaplama (8 mm) çimento dış sıva (30 mm) tuğla duvar (135 mm) çimento+kireç sıva (20 mm) (İ)
Bileşen Kesiti						
Hesaplama Bölgeleri	dış sıva (4) tuğla (2,3) iç sıva (1)		ısı yalıtımı (5) dış sıva (4) tuğla (2,3) iç sıva (1)	ısı yalıtımı (5) dış sıva (4) tuğla (2,3) iç sıva (1)	ısı yalıtımı (5) dış sıva (4) tuğla (2,3) iç sıva (1)	ısı yalıtımı (5) dış sıva (4) tuğla (2,3) iç sıva (1)

Şekil 5. Uygulama sonrasına göre modellenen duvar tipleri ve duvar kesitlerindeki hesaplama bölgeleri
(The wall types which are modelled according to the situation after application and calculation areas on the wall sections)

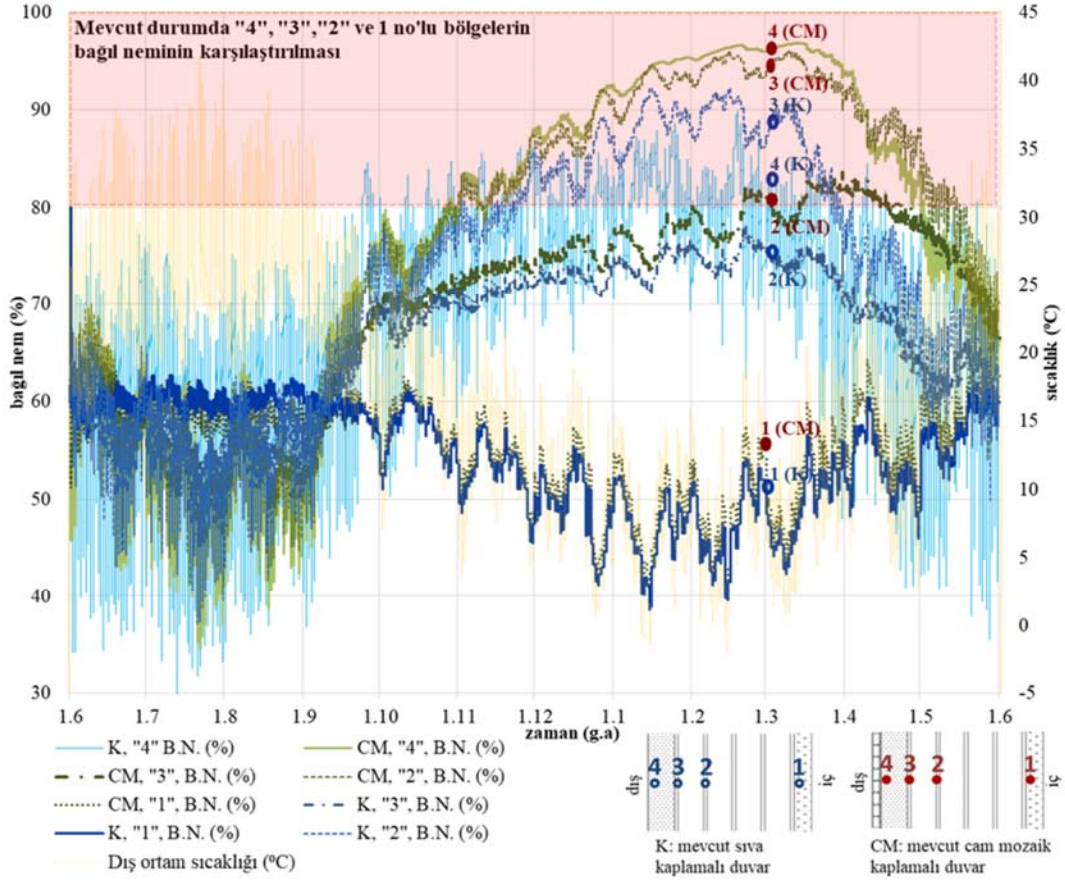
kış farklılığı çok yüksekken, gece-gündüz farklılığı oldukça düşüktür. Bu duvar tipinde gece-gündüz farklılığının en düşük seviyelere indiği Kasım-Nisan ayları arasında “4” ve “3” no’lu bölgelerde yoğuşmaya bağlı ıslanma olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bu duvarların kuzeybatı yönüne bakmasından dolayı cephe yüzeyinde pek fazla güneşlenme olmayacağından kuruma olasılığının düşük olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

International Energy Agency tarafından hazırlanan bir rapora göre bağıl nem oranının %80’e ulaşması durumunda küf gelişimi riski oluşmaktadır [31]. CM kodlu duvar tipinde Kasım-Mayıs ayları arasında “4” ve “3” nolu bölgelerin bağıl nem oranlarının %80’in üzerinde olması nedeniyle bu dönemde CM kodlu duvar tipindeki bu bölgelerde küf oluşumu riski yüksektir. K kodlu duvar tipinin “4” no’lu bölgesinde de kış döneminde %80’in üzerine çıkan nem

oranları yoğuşmaya ve küflenmeye yol açabilir ancak bu duvar tipinde nem oranı zaman zaman düştüğü için risk daha azdır. Yüksek nem oranlarının ve kış mevsiminin düşük sıcaklıklarının etkisiyle iki duvar tipinde de “4” no’lu bölgede donma-çözünmeye bağlı hasar oluşabilir. Ayrıca, CM kodlu duvarda cam mozaik kaplamada bozulmalar öngörülebilir.

4.2. Uygulama Sonrası Isı Yalıtımlı Duruma göre Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of the Results of Simulation According to the Situation After Applications of Thermal Insulation)

EPS ısı yalıtım levhası ve sıva kaplama uygulaması yapılmış olan mevcut durumda sıva kaplamalı olan duvar (K+E+S) tipindeki “4” no’lu bölgenin ve cam mozaik kaplamalı duvar (CM+E+S) tipindeki “4”, “3” ve “2” no’lu bölgelerin bağıl



Şekil 6. K ve CM kodlu duvar tiplerinin çimento dış sıva (4) ve tuğla (3, 2) ve iç sıva (1) katmanlarının bağıl nemi (Relative humidity of the external plaster (4) and hollow brick (3,2) and internal plaster (1) layers of the walls which are coded as K and CM)

nem miktarının Ekim-Haziran ayları arasındaki değişimi Şekil 7'deki grafikte verilmektedir. Nem açısından en riskli durumların görüldüğü bu zaman aralığında, iki duvarda da bağıl nem oranları mevcut duruma göre daha düşüktür. Isı yalıtımı uygulaması ile ısı kaybına karşı korunmuş olan bu duvarlarda yoğuşma riskinin ısı yalıtımsız duruma göre daha az olduğu anlaşılmaktadır. K+E+S kodlu duvar tipinde "4" no'lu bölgenin bağıl nem miktarı kış dönemi boyunca %70'in altındayken, CM+E+S kodlu duvar tipinde "4" no'lu bölgenin bağıl nem miktarı Ocak-Mart ayları arasında %80'e ulaşmaktadır. Buna göre, kış döneminde iç ortamdan gelen nemin dış ortama doğru kuruyamayarak cam mozaik kaplamanın altında bulunan bölgede biriktiği söylenebilir. CM+E+S kodlu duvar tipinde cam mozaik kaplamanın arkasında, ısı yalıtımı uygulaması yapılsa bile, yüksek nemlilik oranı ve kış döneminde düşen sıcaklığın etkisiyle yoğuşma olasılığı vardır.

4.2.1. Isı yalıtım malzemelerine göre benzetim sonuçlarının değerlendirilmesi

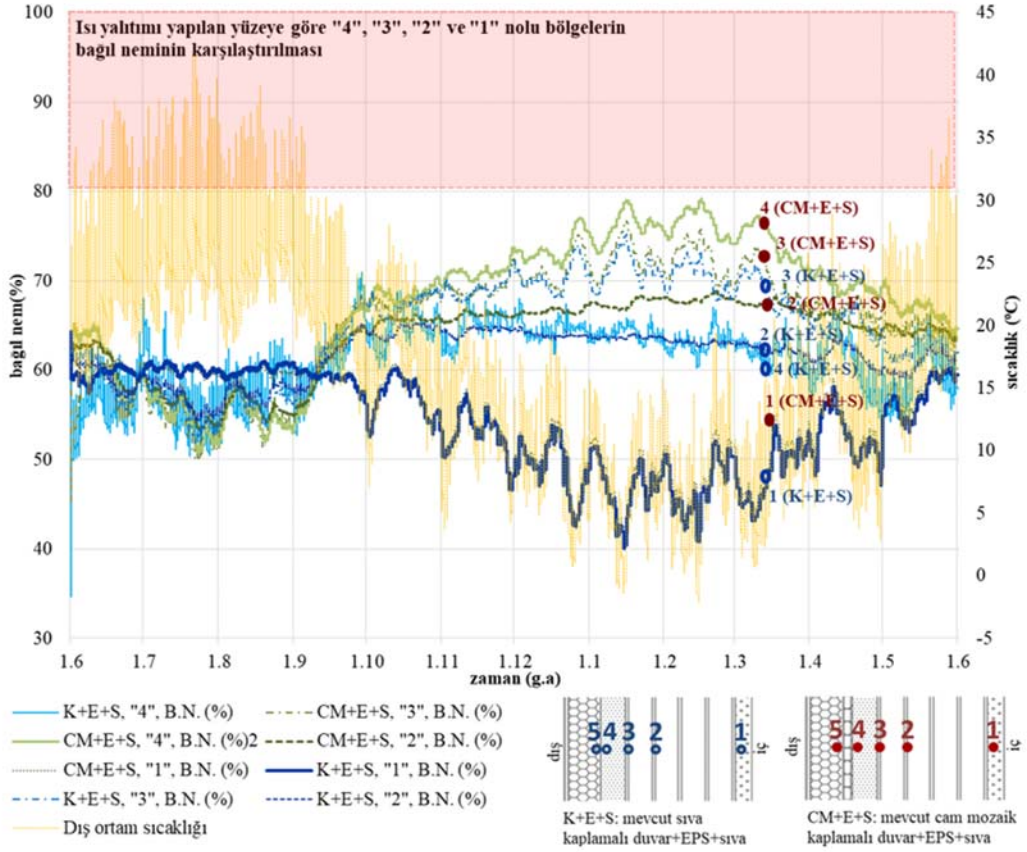
(Evaluation of the results of simulation according to the thermal insulation materials)

EPS veya XPS ısı yalıtım levhası ve sıva kaplama uygulaması yapılmış olan mevcut durumda sıva kaplamalı

olan (K+E+S ve K+X+S) ve cam mozaik kaplamalı olan duvar tiplerinin (CM+E+S ve CM+X+S) ısı yalıtım katmanlarının (5 no'lu bölge) su içeriğinin Ekim-Haziran tarihleri arasındaki değişimi Şekil 8'deki grafikte verilmektedir. K+X+S kodlu duvardaki XPS levhanın kış dönemindeki su içeriği miktarı, K+E+S kodlu duvardaki EPS levhaya göre daha yüksektir. XPS'in su buharı difüzyon direncinin yüksek olması nedeniyle, iç ortamdan gelen nemin dış ortama doğru kuruyamadığı ve XPS'in yapıstırıldığı yüzeyde yoğuşmaya bağlı ıslanmaya yol açmış olduğu anlaşılmaktadır.

CM+X+S kodlu duvardaki XPS levhanın su içeriği miktarında, CM+E+S'deki EPS levhaya göre daha küçük farklılıklar görülmektedir. Bu durum, XPS'in yağmur suyundan ve dış ortamdaki nem hareketlerinden daha az etkilenmesiyle açıklanabilir. CM+E+S kodlu duvardaki EPS levhanın su içeriğinde ise, daha yüksek farklılıklar görülmektedir. Buna göre EPS'nin yağmurdan etkilenerek çabuk ıslandığı ve sonrasında çabuk kurduğu söylenebilir.

Suyun, havadan ya da yalıtım malzemesinin içinde yer alan başka bir gazdan daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması nedeniyle, nemli bir yalıtım malzemesinin ısıl iletkenliği artmaktadır. Ayrıca, kontrol edilmeyen nem; ısı yalıtım



Şekil 7. K+E+S ve CM+E+S kodlu duvar tiplerinin çimento dış sıva (4) ve tuğla (3, 2) ve iç sıva (1) katmanlarının bağıl nemi (Relative humidity of the external cement plaster (4) and hollow brick (3,2) and internal plaster (1) layers of the walls which are coded as K+E+S ve CM+E+S)

malzemesinin yaşlanma süresini, boyutlarını, stabilitesini ve teknik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, ısı yalıtım malzemesinin kullanım ömrü kısalmaktadır [32]. Buna bağlı olarak, en riskli durumun görüldüğü K+X+S duvar tipinde XPS ısı yalıtım malzemesinin iç ortam neminin dışarıya çıkmasını engelleyerek ısı yalıtımının duvara tespit edildiği yüzeyde birikmesine neden olacağı ve uzun dönemde nem kaynaklı hasarlara uğrayarak duvardan ayrılacağı ya da işlevini yitireceği söylenebilir.

Benzetim çalışmasında cam mozaik kaplamadaki çatlak ve aşınmalardan kaynaklanan su ve hava sızıntıları dikkate alınmadığı için, CM+E+S ve CM+X+S duvarlarının ısı yalıtım katmanlarında iç ortam neminin etkisi görülmemektedir. Gerçek durumda bu sonuçların farklı olabileceği düşünülmektedir.

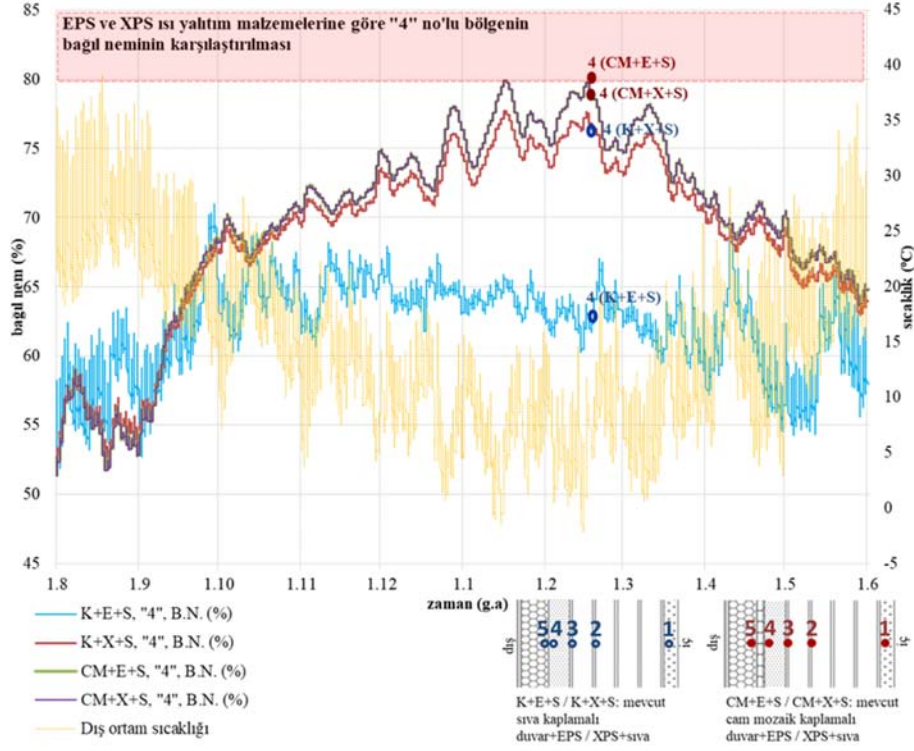
4.2.2. Dış kaplama malzemelerine göre benzetim sonuçlarının değerlendirilmesi

(Evaluation of the results of simulation according to the external coating materials)

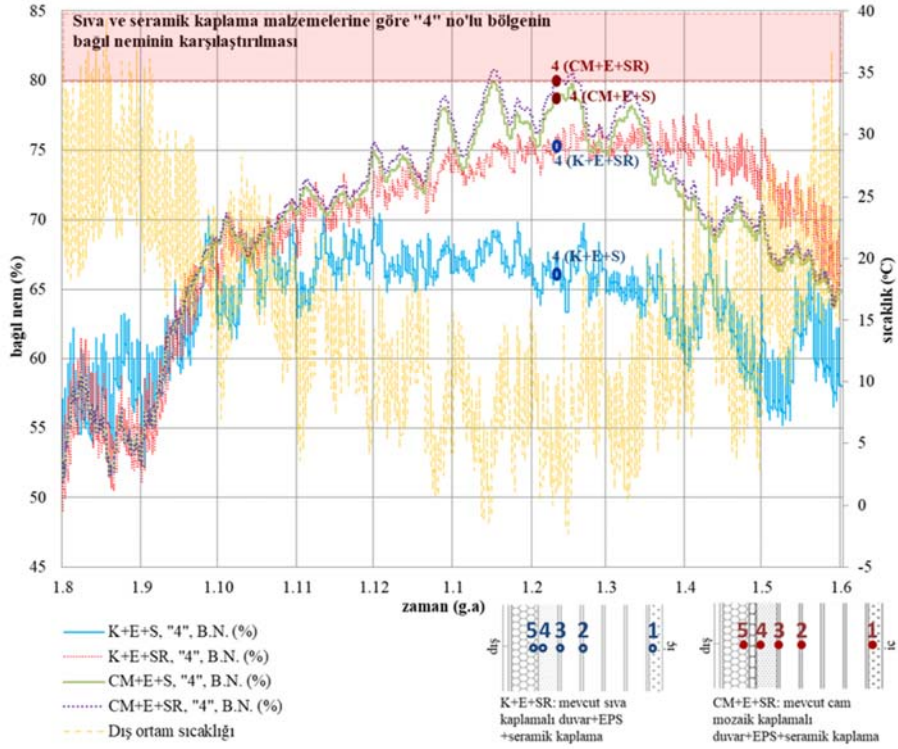
EPS ısı yalıtım levhası ve sıva ya da seramik kaplama uygulaması yapılmış olan mevcut durumda sıva kaplamalı

duvar tipleri (K+E+S ve K+E+SR) ve cam mozaik kaplamalı duvar tiplerindeki (CM+E+S ve CM+E+SR) “4” no’lu bölgenin bağıl nem miktarının Ağustos-Haziran tarihleri arasındaki değişimi Şekil 9’daki grafikte verilmektedir. CM+E+S ve CM+E+SR kodlu duvar tiplerinde cam mozaik kaplamanın iç ortam neminin dışarıya doğru kuruyamayarak dış sıva katmanında birikmesine neden olmasından dolayı, bu iki duvarın kış dönemindeki bağıl nem oranı çok yüksek ve birbirine çok yakındır.

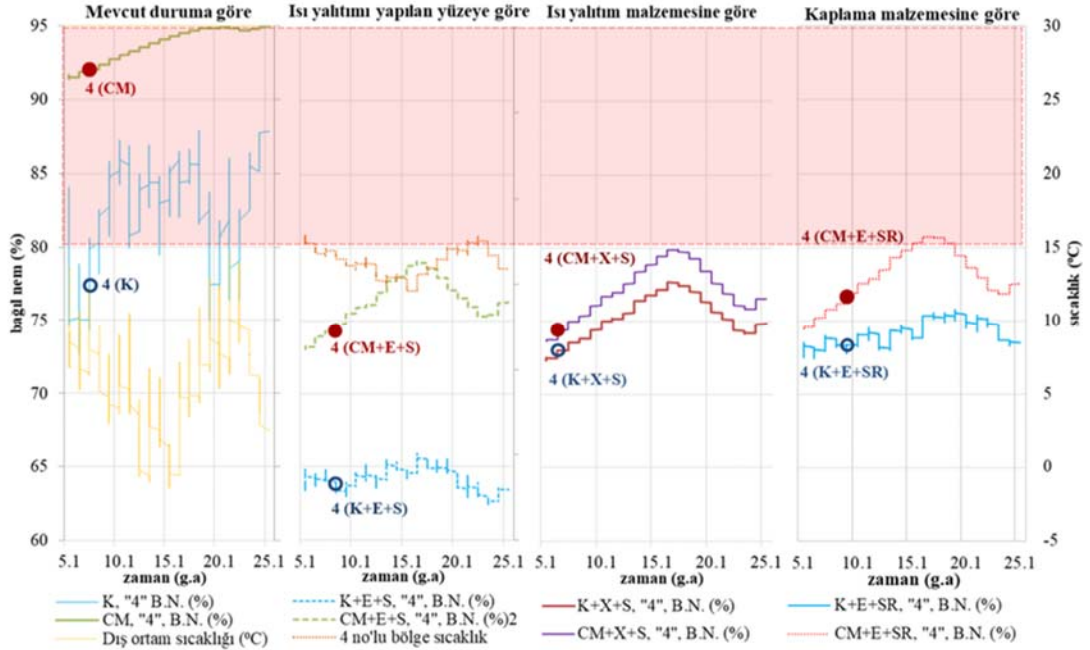
K+E+SR kodlu duvar tipinin “4” no’lu bölgesinin bağıl nem miktarı, K+E+S kodlu duvar tipine göre çok daha yüksektir. Bu katmandaki bağıl nem artışı kış dönemi boyunca devam etmekte ve Mart ayında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Nisan ayından itibaren K+E+SR duvar tipinin “4” no’lu bölgesinin bağıl nemi, grafikteki tüm duvar alternatifleri arasında en yüksek değerleri göstermektedir. Bu durum, K+E+SR duvarında bulunan seramik kaplamanın iç ortamdaki gelen nemi, dışarıya çıkmasını önleyerek, seramik kaplama arkasında bulunan ısı yalıtımı ve dış sıva katmanlarında birikmesine neden olmasıyla açıklanabilir. Bu bölgedeki nem artışı ısı yalıtım malzemesinin uzun dönemde ve mevcut şartlar altındaki dayanımını olumsuz yönde etkileyerek ısı performansının azalmasına neden olabilir ve duvar bünyesinde yoğuşmaya yol açabilir.



Şekil 8. Dıştan EPS ya da XPS ve sıva uygulaması yapılmış duvarlar tiplerinin dış sıva katmanlarının (4 no'lu bölge) bağıl nemi (Relative humidity of the external plaster (4) layer of the walls which are insulated with EPS or XPS and coated with plaster)



Şekil 9. Dıştan EPS ve sıva ya da seramik kaplama uygulaması yapılmış duvar tiplerinin dış sıva katmanlarının (4 no'lu bölge) bağıl nemi (Relative humidity of the external plaster (4) layer of the walls which are insulated with EPS and coated with plaster or ceramic)



Şekil 10. Karşılaştırılan bütün duvar tiplerinin dış sıva katmanlarının (4 no'lu bölge) 5 Ocak-25 Ocak tarihleri arasındaki bağıl nemini (Relative humidity of all wall types which have been compared to each other between the dates of 5 January and 25 January)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu yazıda, sıva kaplamalı ve cam mozaik kaplamalı duvar tiplerinin mevcut yalıtımsız durumdaki ve ısı yalıtımı uygulaması yapıldıktan sonraki durumda ısıl ve nemsel performansları benzetim yöntemiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme yapılan dört farklı durumda duvar tiplerinin mevcut dış sıva katmanında nem oranının kritik seviyelere ulaştığı 5 Ocak-25 Ocak tarihleri arasındaki sonuçlar Şekil 10'daki grafikte verilmektedir. Bu sonuçlara göre dış hava sıcaklığının $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'in altına düştüğü bu dönemde ısıl ve nemsel performans açısından en riskli durumlar mevcut durumda cam mozaik kaplamalı olan ve mevcut cam mozaik kaplama sökülmeden üzerine ısı yalıtımı uygulaması yapılan duvar tiplerinde görülmektedir.

Mevcut duruma göre, ısı yalıtımı yapılan yüzeye göre, ısı yalıtım malzemesine göre ve dış kaplama malzemesine göre yapılan karşılaştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki maddelerde ayrı ayrı değerlendirilmektedir:

- Mevcut durum için yapılan higrotermal performans değerlendirmesine göre; cam mozaik kaplamalı olan duvarların bünyelerinde, yüksek miktardaki iç ortam neminin ve sıcaklık değişimlerinin etkisiyle, donma-çözünme, yoğuşma ve küflenme gibi sorunlar ve bu sorunlara bağlı hasarlar söz konusudur.
- Farklı tüm yüzeylere uygulanan ısı yalıtımının etkisine göre yapılan değerlendirmede; ısı yalıtımı uygulaması sonrası duvar bünyesindeki nem oranının ısı yalıtımı yapılmayan mevcut duruma göre bir miktar azaldığı görülse de, yine de buhar geçirimine izin veren bir duvara göre çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca,

böyle nemli bir duvar iç ortama doğru kuruyacağı için iç ortam konfor koşulları da bu durumdan olumsuz etkilenebilir.

- Farklı ısı yalıtım malzemeleri için yapılan değerlendirmede; buhar difüzyon direnci EPS'ye göre daha yüksek olan XPS'in neme karşı davranışının bina cephesindeki geçirimsiz kaplamalarla benzer olduğu sonucuna varılmıştır. XPS ısı yalıtım malzemesi mevcut durumda sıva kaplamalı olan duvara uygulandığında, iç ortam neminin dışarıya doğru kurumasına izin vermemekle ısı yalıtım malzemesinin arkasında birikmesi ve bu bölgenin ıslanması riski vardır.
- Farklı son kat kaplama malzemeleri için yapılan değerlendirmede; mevcut durumda sıva kaplamalı olan bir duvara ısı yalıtımı sonrası seramik kaplama uygulanması durumunda, iç ortam neminin dışarıya doğru kuruyamayarak seramik kaplamanın arkasındaki katmanlarda birikeceği görülmüştür. Buna bağlı olarak, uzun dönemde ısı yalıtım malzemesinin ısıl direnç özelliğini kaybetme riski bulunmaktadır. Ayrıca, az sayıda dübelle ve yetersiz harçla duvara tespit edilen ısı yalıtım malzemelerinin ve üzerine uygulanan seramik kaplamalarının uzun süre yüksek nem koşullarına maruz kalması sonucu duvardan koparak ayrılmaya neden olabileceği ön görülmektedir.

Benzetim sonuçlarından yola çıkılarak yapılan genel değerlendirmeye göre, alanda gözlemlenen ısı yalıtım uygulamaları ilk bakışta ekonomik görünse de, uzun dönemde çevresel yararlılık, ısı korunum değeri ve ekonomik yarar açısından istenilen performansı göstermesi tartışmalıdır. Bu nedenle, ısı yalıtımı uygulamalarının uzmanlar tarafından yapılması, binanın özelliklerine ve dış

duvarları oluşturan katmanların bütününe göre çözüm üretilmesi, standartlardaki gerekliliklerin yerine getirilmesi ve uygulamaların etkinliğinin denetlenmesi gerekmektedir.

Isı yalıtımı uygulaması yapılan mevcut duvar yüzeylerindeki bozulmalar, hatta bina yaşına bağlı eskime oranları ve uygulamalardaki işçilik hataları ile teknik yetersizlikler benzetim yazılımında modellenemediğinden hesaplamalarda dikkate alınamamıştır. Ayrıca, yazılım referans bir yıla dayanan iklim verilerini kullandığı için, duvarların referans yıldaki değerlerden daha sert iklim koşullarına maruz kalması halinde ortaya çıkabilecek problemleri hesaplayamamaktadır. İklim verilerinin saatlik ortalama değerlerden oluşmasının da hesaplama sonuçlarının gerçek durumdan farklı olmasına neden olmuş olabileceği düşünülebilir. Bu nedenlerle, yapılan hesaplamaların sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Alandaki hatalı uygulamaların gözlemlenmesi hesaplama sonuçlarının daha doğru yorumlanmasına yardımcı olmuştur.

Dış duvarların higrotermal performansının hesaplandığı benzetim araçları, doğru ve etkin kullanılmak şartıyla, pratikte yapılan iyileştirme uygulamalarının uzun dönem performansının değerlendirilmesinde kullanışlı olabilmektedir. Benzetim alanında yapılan araştırmalarla ve yazılımların güncellenerek eksikliklerinin giderilmesiyle, daha karmaşık modeller üzerinde çalışılabilir ve daha etkin sonuçlar alınabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. BEP, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2008
2. Amaro, B., de Brito, J., Flores Colen, I., Inspection and diagnosis system of ETICS on walls, *Construction and Building Materials*, 47, 1257-1267, 2013.
3. ETAG 004, Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with Rendering, EOTA, Brussels, 2013.
4. Malanho, S., Veiga, M. D., Performance of external thermal insulation composite systems (ETICS) with finishing ceramic tiles, XII DBMC - International Conference of Durability of Building Materials and Components, Porto, 2011.
5. Luján, S. V., Arrebola, C.V., Sánchez, A. R., Benito, P. A., Cortina, M. G., Experimental comparative study of the thermal performance of the façade of a building refurbished using ETICS, and quantification of improvements, *Sustainable Cities and Society*, 51, 101713, 2019.
6. Silva, J. A., Falorca, J. G., Advances in ETICS behaviour analysis and consequences for planning maintenance, CIB World Building Congress, Cape Town, 2007.
7. Tavares, J., Silva, A., de Brito, J., Computational models applied to the service life prediction of external thermal insulation composite systems (ETICS), *Journal of Building Engineering*, 27, 100944, 2020.
8. Fernandes, C., Brito, J. d., Cruz, C. O., Architectural integration of ETICS in building rehabilitation. *Journal of Building Engineering*, 5, 178-184, 2016.
9. Kalamees, T., Vinha, J., Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures. *Building and Environment*, 38 (5), 689-697, 2003.
10. St-Hilaire, A. T., Derome, D., Comparison of experimental and numerical results of wood-frame wall assemblies wetted by simulated wind-driven rain infiltration, *Energy and Buildings*, 39 (11), 1131-1139, 2007.
11. Fedorik, F., Illikainen, K., HAM and mould growth analysis of a wooden wall, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2 (1), 19-26, 2013.
12. Johansson, P., Geving, S., Hagentoft, C. E., Jelle, B. P., Rognvik, E., Kalagasidis, A. S., Time, B., Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations, *Building and Environment*, 79, 31-45, 2014.
13. Nizovtsev, M. I., Belyi, V. T., Sterlygov, A. N., The facade system with ventilated channels for thermal insulation of newly constructed and renovated buildings, *Energy and Buildings*, 75, 60-69, 2014.
14. Finken, G. R., Bjarløv, S. P., Peuhkuri, R. H., Effect of façade impregnation on feasibility of capillary active thermal internal insulation for a historic dormitory – A hygrothermal simulation study, *Construction and Building Materials*, 113, 202-214, 2016.
15. Ibrahim, M., Sayegh, H., Bianco, L., Wurtz, E., Hygrothermal performance of novel internal and external super-insulating systems: In-situ experimental study and 1D/2D numerical modeling, *Applied Thermal Engineering*, 150, 1306-1327, 2019.
16. Zilkelbach, D., Holm, A., Künzle, H., Influence of temperature and relative humidity on the durability of mineral wool in ETICS, 10. DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, 2005.
17. Bareira, E., Freitas, V. P., Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS), *Building and Environment*, 63, 31-39, 2013.
18. Pereira, C., de Brito, J., Silvestre, J. D., Contribution of humidity to the degradation of façade claddings in current buildings, *Engineering Failure Analysis*, 90, 103-115, 2018.
19. Lourenço, T., Matias, L., Faria, P., Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography, *Construction and Building Materials*, 148, 419-428, 2017.
20. Xiong, H., Xu, J., Yuan, K., Experimental study on the temperature field of ETICS cladding system with finishing colorful steel plate, *Journal of Building Engineering*, 18, 438-447, 2018.
21. Edis, E., Türkeri, N., Durability of external thermal insulation composite systems in Istanbul Turkey, *A|Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, 9 (1), 134-148, 2012.

22. Türkmen, M., Bina kabuğunda ısı yalıtımı uygulamalarının yapısal performansı ve etkinliğinin İstanbul'da bir alan çalışması ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
23. Uygunoğlu, T., Özgüven, S., Çalış, M., Effect of plaster thickness on performance of external thermal insulation cladding systems (ETICS) in buildings, *Construction and Building Materials*, 122, 496-504, 2016.
24. Umaroğulları, F., Mihlayanlar, E., Zorer Gedik, G., Hasan, S., Dış duvarlarda sıcaklık, su ve nem performansının incelenmesi, 1.Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi, 309, İstanbul, 2014.
25. Edis E., Kuş H., Determination of hygrothermal performance of building envelope by computer simulation, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (2), 311-320, 2014.
26. Sarıtabak, E., Bina kabuğunun dış duvarları ve ara kesitlerinde ısı ve nemsel performansın kızılötesi termografi ile değerlendirilmesi üzerine bir alan çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
27. Ekşi, A., Mevcut binaların cephelerindeki dıştan ısı yalıtımı uygulamalarının İstanbul'da bir alanda araştırılması ve higrotermal performansın benzetimle değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
28. EN 15026, Hygrothermal performance of building components and building elements — Assessment of moisture transfer by numerical simulation, EN - European Standards, 2007.
29. TS 825, Binalarda ısı yalıtım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, 2013.
30. ISO 10456, Building materials and products — Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values, ISO - International Organization for Standardization, 2007.
31. International Energy Agency, Guidelines&Practices, Energy Conservation in Building And Community Systems Programme Annex XIV: Condensation and Energy, 2, 22, 1990.
32. Sandberg, P.I., Effects of moisture on the thermal performance of insulating materials, *Moisture Control in Buildings : The Key Factor in Mold Prevention*, H. Trechsel, & M. Bomberg, ASTM International, Baltimore, 38-53, 2009.



Development of an artificial neural network using parametric correlation technique for the determination of machined torsional spring stiffness

Bariş Sabuncuoğlu^{1*}, Oğuz Demirtaş^{1,2}

¹Department of Mechanical Engineering, Hacettepe University, Ankara, 06800, Turkey

²TUBITAK SAGE, Ankara, 06261, Turkey

Highlights:

- Development of artificial neural network for helical machined springs
- Utilization of Parametric Correlation Technique
- Confirmation of ANN results with FEA and Torsional tests

Keywords:

- Machine torsional spring
- Finite element method
- Parameter correlation analysis
- Artificial neural network

Article Info:

Research Article
Received: 05.11.2019
Accepted: 15.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.641491

Correspondence:

Author: Bariş Sabuncuoğlu
e-mail: barissabuncuoğlu@hacettepe.edu.tr
phone: +90 553 408 5146

Graphical/Tabular Abstract

Development of an artificial neural network (ANN) for the determination of the spring constant of machined helical springs, which may be preferred over conventional springs due to their high performance and operating efficiency, is presented. Initially, finite element analyses were performed with various dimensional parameters and the obtained spring constant values were verified with the tests performed with the designed test setup. Parametric correlation analysis was performed using the confirmed finite element results and the effect of each spring dimensional parameter on the spring constant was determined. The parameters required for ANN training was determined according to the this correlation result. The spring constant results obtained from the developed ANN was compared with the finite element results confirmed by the tests and it was determined that the ANN was successful in the determination of the spring constant. The importance of parametric correlation analysis has been revealed in the development of ANN.

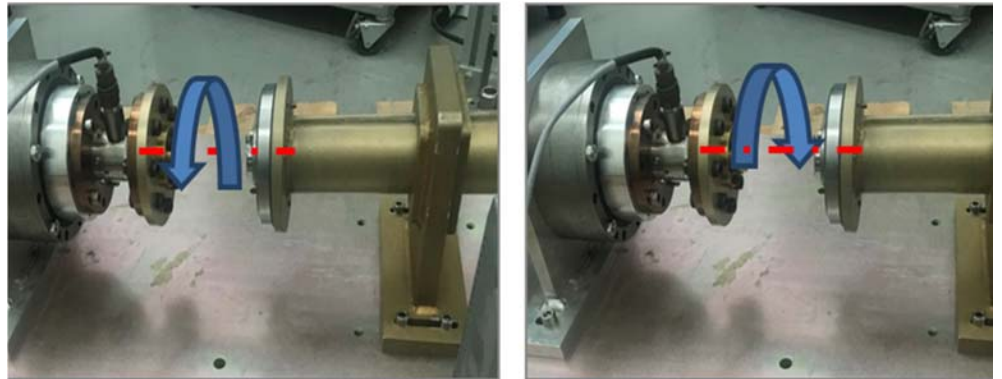


Figure A. (Movement directions of the test setup)

Purpose: The main purpose of this study is; To determine the effects of the design parameters of machining springs working under angular displacement on spring stiffness and stress by experimental and numerical methods, Verifying numerical approaches by experimental methods, To develop an artificial neural network that enables us to quickly obtain the torsion spring constant value depending on the processing spring design parameters.

Theory and Methods: Torsion spring constants of different sizes of machining springs were determined by experimental and numerical methods.

Results: In the results of this study; A maximum of 1.6% difference between the parameters in ANN training data set and finite element results and a maximum of 8% in intermediate values were observed. Considering the differences between the test and finite element analysis, this difference was observed to be at an acceptable level. The results obtained with the values selected outside the database set show an increase in% difference values. It is concluded that this developed ANN model is not suitable to be used for values outside the database.

Conclusion: As a result of this study; An artificial neural network (ANN) based on parameter correlation was developed to determine the spring constants of the machined springs that are frequently used in the aviation industry.



Helisel işleme yay sabitinin belirlenmesi amacıyla parametrik korelasyon tekniğini kullanarak bir yapay sinir ağı geliştirilmesi

Barış Sabuncuoğlu^{1*}, Oğuz Demirtaş^{1,2}

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, 06800, Beytepe, Ankara, Türkiye

²TÜBİTAK-SAGE, 06261, Mamak, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- İşleme helisel yay için yapay sinir ağı geliştirilmesi
- Parametrik korelasyon tekniğinin uygulanması
- YSA sonuçlarının sonlu eleman ve burulma testleriyle doğrulanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 05.11.2019
Kabul: 15.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.641491

Anahtar Kelimeler:

İşleme helisel yay,
sonlu eleman yöntemi,
parametre korelasyon
analizi,
yapay sinir ağı

ÖZET

Yüksek performans ve çalışma verimliliği ile geleneksel yaylara göre tercih edilebilen işleme helisel yayların yay sabitinin belirlenmesi için bir yapay sinir ağı (YSA) geliştirme yöntemi sunulmuştur. YSA eğitimi için ilk olarak çeşitli boyutsal parametrelerle sonlu eleman analizleri yapılmış ve elde edilen yay sabiti değerleri tasarlanan deney düzeneğinde gerçekleştirilen testlerle doğrulanmıştır. Doğrulan sonlu eleman sonuçları ile parametrik korelasyon analizi yapılmış ve her yay boyutsal parametresinin yay sabiti üzerindeki etkisi belirlenmiştir. YSA eğitimi için gerekli parametreler ve sayıları bu korelasyon sonucuyla belirlenmiştir. Geliştirilen YSA ile elde edilen yay sabiti sonuçları, deneylerle doğrulan sonlu eleman sonuçlarıyla kıyaslanmış ve YSA'nın yay sabitinin belirlenmesinde oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir. YSA geliştirilmesinde parametrik korelasyon analizinin yapılmasının önemi ortaya çıkarılmıştır.

Development of an artificial neural network using parametric correlation technique for the determination of machined torsional spring stiffness

H I G H L I G H T S

- Artificial neural network development for machined torsional spring
- Utilization of parametric correlation technique
- Confirmation of ANN results with FEA and torsional tests

Article Info

Research Article
Received: 05.11.2019
Accepted: 15.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.641491

Keywords:

Machine torsional spring,
finite element method,
parameter correlation
analysis,
artificial neural network

ABSTRACT

Development of an artificial neural network (ANN) for the determination of the spring constant of machined helical springs, which may be preferred over conventional springs due to their high performance and operating efficiency, is presented. Initially, finite element analyses were performed with various dimensional parameters and the obtained spring constant values were verified with the tests performed with the designed test setup. Parametric correlation analysis was performed using the confirmed finite element results and the effect of each spring dimensional parameter on the spring constant was determined. The parameters required for ANN training was determined according to the this correlation result. The spring constant results obtained from the developed ANN was compared with the finite element results confirmed by the tests and it was determined that the ANN was successful in the determination of the spring constant. The importance of parametric correlation analysis has been revealed in the development of ANN.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: barissabuncuoğlu@hacettepe.edu.tr, oguz.demirtas@tubitak.gov.tr / Tel: +90 553 408 5146

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Helisel yaylar, sanayi devriminden beri tasarımlarda sıkça kullanılan bir makine elemanıdır. Tel sarım yöntemi ile üretilen geleneksel tipteki helisel yaylar; bağlantı arayüzleri ile tek bir bütün olmamaları, malzeme seçeneklerinin sınırlı olması gibi nedenlerden dolayı günümüzdeki modern makinaların ihtiyacını karşılamakta yetersiz kalabilmektedirler. Bunun yanında geleneksel tipteki yaylara göre daha yüksek performans ve daha fazla fonksiyon elde etmek için tercih edilen işleme helisel yaylar, dolu malzemenin talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi sonucunda elde edilmektedirler. Kullanılacakları yere uygun bağlantı arayüzü ile bir bütün halinde olmaları en büyük özellikleridir. Geleneksel yaylara göre daha küçük alanlarda çalışma imkanı sunan bu yaylar, havacılık, uzay, savunma ve medikal gibi birçok sektörde tercih edilmektedirler. [1-3]. Şekil 1'de farklı kullanım alanları için üretilmiş işleme yaylar gösterilmiştir [2].



Şekil 1. Farklı tiplerdeki helisel işleme yaylar
(Different types of helical machined springs) [2]

Yapısal olarak gereksinimleri karşılayacak tasarımların yapılabilmesi için yük aktarımında kritik öneme sahip helisel yayların mekanik davranışının bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu yaylarla ilgili literatürde numerik ve deneysel birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak helisel işleme yaylarla ilgili çalışmalar sınırlı sayıdadır. Salwiski ve Michalczyk [4], işleme yaylarda sonlu elemanlar yöntemleriyle gerilme analizi yapmış ve geleneksel yaylarla kıyaslamışlardır. Teorik formüllerden elde ettikleri gerilmeler, gerçek gerilmelerden daha küçük çıkmıştır. Bunun sebebinin analizlerde yayların yalnızca burulma gerilmelerinden etkilendiğini ve simetrik yüklendiğini kabul etmeleri olduğunu belirtmişlerdir. Ahmed vd. [5], sonlu elemanlar yöntemini kullanarak üç ve dört kanallı iki farklı işleme yayının statik ve dinamik karakteristik özelliklerini belirleyip birbirleriyle kıyaslamıştır. Bu çalışmanın sonucunda, dört kanallı yayın üç kanallı yaydan daha yüksek

katılık ve daha yüksek doğal frekans değerleri gösterdiği sonucuna ulaşmıştır. Nama [6], dikdörtgen kesite sahip helisel yaylarda, Solidworks programını kullanarak maksimum gerilme, maksimum deformasyon ve doğal frekans değerlerini araştırmıştır. Zeydan [7], işleme basma yaylarda; basma yükü altında helis açısının yay uç kısımlarındaki deformasyona etkisini incelemiştir. Bu çalışmanın sonucunda helis açısı arttıkça yay uç kısımlarındaki deformasyonun arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Literatürde bu yaylarla ilgili bazı analitik çalışmaların da yapıldığını görmekteyiz. Krzysztof [8], işleme yaylarda maksimum gerilmeyi hesaplamak için bir matematik modeli önermiştir. Bu model, gerilme yığılma katsayısı ve gerilme dağılımı katsayısının maksimum gerilme üzerindeki etkisini içermektedir. Ahmed vd. [9], işleme yayların katılığı üzerinde analitik ve teorik çalışmalar yürütmüştür. Bunun sonucunda, yaydaki kanal sayısı arttıkça yayın katılığının ve doğal frekansının arttığını ortaya koymuştur. Calderon ve Perez [10], işleme yaylar ile tel sarım yayları, avantaj ve verimlilik bakımından kıyaslamışlardır. İşleme yayların özel tasarımlar için daha avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Nama [11], dikdörtgen kesite sahip işleme yaylarda, helis açısının yay uzama miktarına ve yay üzerinde oluşan kesme gerilmelerine etkisini incelemiştir. Helis açısının artması sonucunda, yay uzama miktarının arttığı ve yaydaki kesme gerilmelerinin azaldığı sonucuna ulaşmıştır.

Parametrelerin sistem cevabına etkilerini belirlemek için son yıllarda yapay sinir ağı (YSA) geliştirme çalışmalarının oldukça yaygınlaştığını görmekteyiz. YSA, sistem parametrelerinin değişmesi ile sistemin vereceği cevabı öngören matematiksel fonksiyonları ifade eder. YSA üzerine mühendislik uygulamalarının yanı sıra [12-15], sağlık ve sosyal alanlarda da birçok araştırmalar yapıldığını görülmektedir [16,17]. Bu çalışmada, tork aktarımında kullanılan işleme yayların tasarımındaki boyutsal parametrelerin burulma yüklemeleri altındaki burulma direngenliğine etkileri gözönüne alınarak bir YSA geliştirilmiştir. YSA'nın oluşturulmasında, sonlu eleman yöntemleriyle elde edilen işleme yay parametrik analiz sonuçları kullanılmıştır. YSA'nın doğru bir şekilde yay sabiti tahmini yapabilmesi için veri tabanında kullanılan bu parametrik analiz sonuçlarının doğruluğunun irdelenmesi gereklidir. Bu nedenle çalışmada, ilk olarak sonlu elemanlar yöntemi ile dört farklı tip işleme yay için burulma analizleri, ardından da aynı yaylar için işleme yay burulma test düzeneği tasarlanarak burulma testleri yapılmıştır. Sonuçlar birbirleriyle kıyaslanarak analizlerin gerçekçiliği doğrulanmıştır. Analizlerde ek olarak yay üzerindeki gerilmeler de incelenerek uygulanan yük altında yay üzerindeki kritik bölge ve kalıcı deformasyon olup olmadığı belirlenmiştir. Ardından, YSA geliştirme çalışmalarının etkin bir şekilde yapılabilmesi için işleme yay ebatlarını belirleyen boyutsal parametrelerin burulma yay sabiti üzerindeki etki şiddetleri korelasyon tekniği ile belirlenmiştir. Son olarak bu teknik ile belirlenen parametreler ile YSA geliştirilmiştir.

2. BURULMA TESTLERİ (TORSIONAL TESTS)

2.1. Test Düzeneği Tasarımı ve Test Numuneleri (Test Setup Design and Test Specimens)

İşleme yayların burulma yüküne bağlı açılmal hareketini belirlemek için bir test düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzeneğinin tasarımında; açılmal hareketi sağlayan yüksek kesinlikli Kollmorgen marka servo motor [18], servo motorun kontrolünü sağlayabilmek için motor sürücüsü, hassas pozisyonlama için harmonik redüktör [19], tork ölçümü yapabilmek için tork sensörü [20] ve sinyal yükseltici, elde edilen verilerin toplanması ve bilgisayara aktarımı için veri toplama kartı ve deney sistemi için gerekli gücü sağlayan 24 V DC güç adaptörü kullanılmıştır. Deney düzeneği görünümü Şekil 2a'da verilmiştir. Deneylerde, dört farklı geometrik ebata sahip helisel işleme yaylar kullanılmıştır. Numuneler, yüksek alaşımlı Maraging C350 çeliğinden üretilmişlerdir. Numunelerin görünümü Şekil 2b'de verilmiştir. Testlerde kullanılan numunelere ait boyutsal parametreler; Radyal et kalınlığı (t), eksenel et kalınlığı (b), helis boyu (L), kanal boşluğu (h) ve ortalama çap (D_m) Tablo 1'de verilmiştir.

2.2. Test Yöntemi (Test Method)

Test numuneleri, oluşturulan deney düzeneği ile burulma yüklemelerine maruz bırakılmışlardır. Numunelerin burulma testleri, sabit açılmal deplasman ve değişken açılmal deplasman profilleri ile yapılmıştır. Yay sabitinin uygulanan açılmal deplasmana göre değişimi olup olmadığının belirlenmesi

için dört farklı yükleme senaryosu uygulanmıştır. Sonuçların doğruluğunu arttırmak için her bir test, aynı ebattaki iki farklı numune ile tekrarlanmıştır. Profiller, pozitif ve negatif yönlerde de uygulanarak hem açma hem de kapama yönü için testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Açılmal yer değiştirme profilleri Şekil 4'de verilmiştir. Her bir test numunesi için 1000 Hz frekansında işleme yay üzerinde oluşan tepki momenti verileri toplanmıştır. Elde edilen sonuçlarla test numunelerine ait tork-zaman grafikleri elde edilmiş, ham verilerdeki gürültülerin temizlenmesi için filtreleme uygulanmıştır. Filtrelenen verilerle her bir veri için ayrı ayrı yay sabitleri ve bu sabitlerin ortalaması alınarak ortalama yay sabiti (k) hesaplanmıştır. Yay sabiti (k)'nın hesaplanmasında Eş. 1 kullanılmıştır.

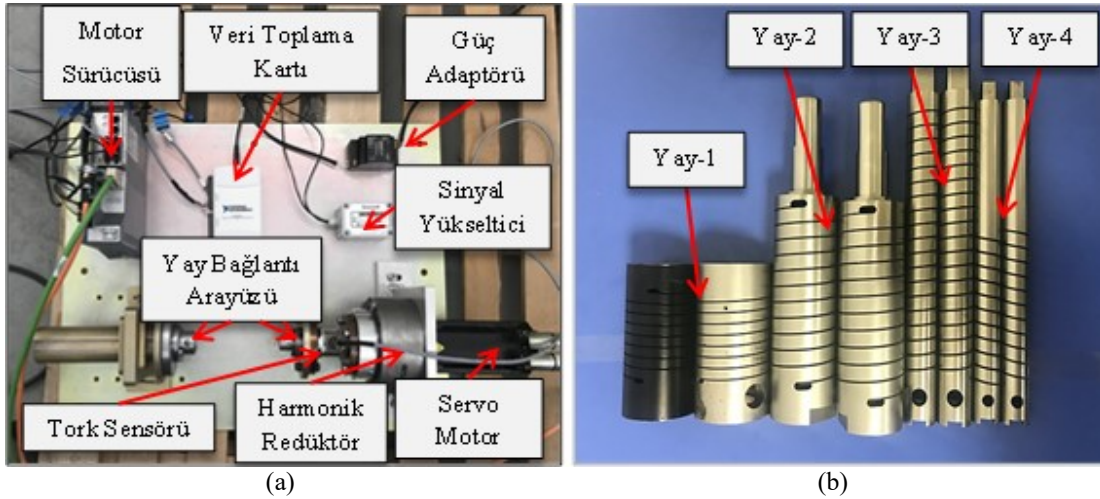
$$k = \frac{T}{\theta} \quad (1)$$

Bu formülde;

T : Tork [N.m]
 θ : Açılmal yer değiştirme [°]
k : Yay sabiti [N.m/°] ifade etmektedir.

3. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ (FINITE ELEMENT ANALYSIS)

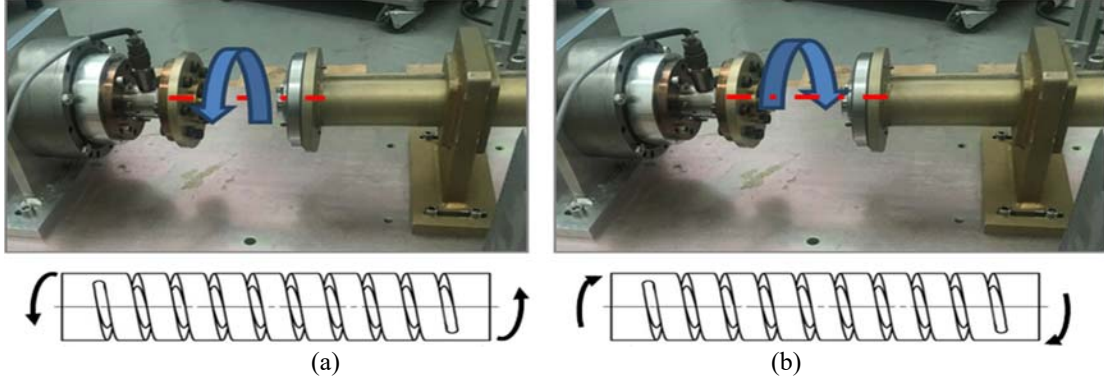
YSA girdilerini oluşturacak olan sonlu eleman analizlerinin gerçekçiliğini belirlemek için burulma testleri yapılan 4 farklı geometrik ebattaki işleme yay için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve testlerle kıyaslanmıştır .



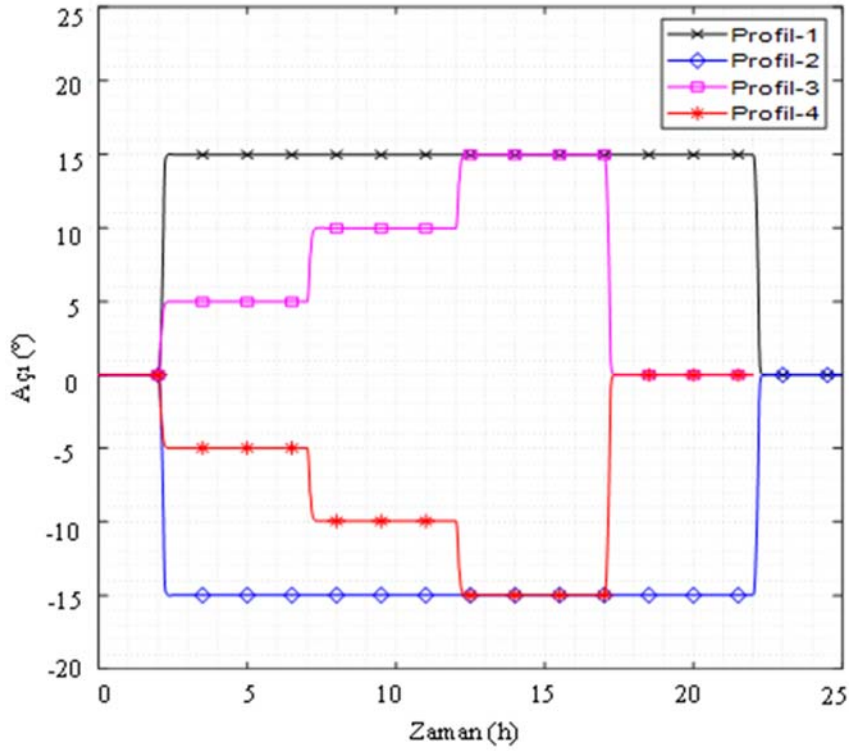
Şekil 2. (a) Deney düzeneği genel görünümü (b) Test numuneleri ((a) General view of the test setup (b) Test Specimens)

Tablo 1. Test numunelerinin boyutsal parametre değerleri (Dimensional parameter values of test specimens)

Yay İsmi	Radyal Et Kalınlığı	Eksenel Et Kalınlığı	Helis Boyu	Kanal Boşluğu	Ortalama Çap
Yay No.	t [mm]	b [mm]	L [mm]	h [mm]	D_m [mm]
1	5,5753	3,81	35,4	0,635	28,435
2	7,5	6,2	74,1	0,635	22,5
3	5,019	5,08	119,7	0,635	10,48
4	4,66	4,572	67,6	0,635	7,85



Şekil 3. Test düzeneği hareket yönleri (a) Açma yönü (pozitif) (b) kapama yönü (negatif)
(Movement directions of the test setup (a) Opening direction (positive) (b) closing direction (negative))



Şekil 4. Açısal deplasman profilleri (Angular displacement profiles)

İşleme yaylara ait katı modeller, Ansys Workbench [21] programına aktarılmıştır. Katı model, yükleme ve sınır koşulları Şekil 5’de gösterilmiştir. Modellerin bir ucundan sabitlenerek diğer ucundan 15° açısal yer değiştirme uygulanmıştır. Açısal yer değiştirmenin uygulandığı bölüme tanımlanan mafsala dönme ve eksenel ötelenme yönünde serbestlik verilerek test düzeneğine benzer koşul tanımlanmıştır. Analizlerde oldukça güvenilir sonuçlar veren altı düğüm noktalı ikinci derece tetrahedral elemanlar kullanılarak modellerin ağ yapısı oluşturulmuştur. Modellerde kullanılan örnek ağ yapısı ve özellikleri, sırasıyla Şekil 6 ve Tablo 2’de verilmiştir. C350 çeliğin analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. Uygulanan açısal yer değiştirme miktarı oldukça büyük olduğu için büyük deformasyon durumu analiz çözüm tipine dahil edilmiştir. Her analiz sonucunda, analiz

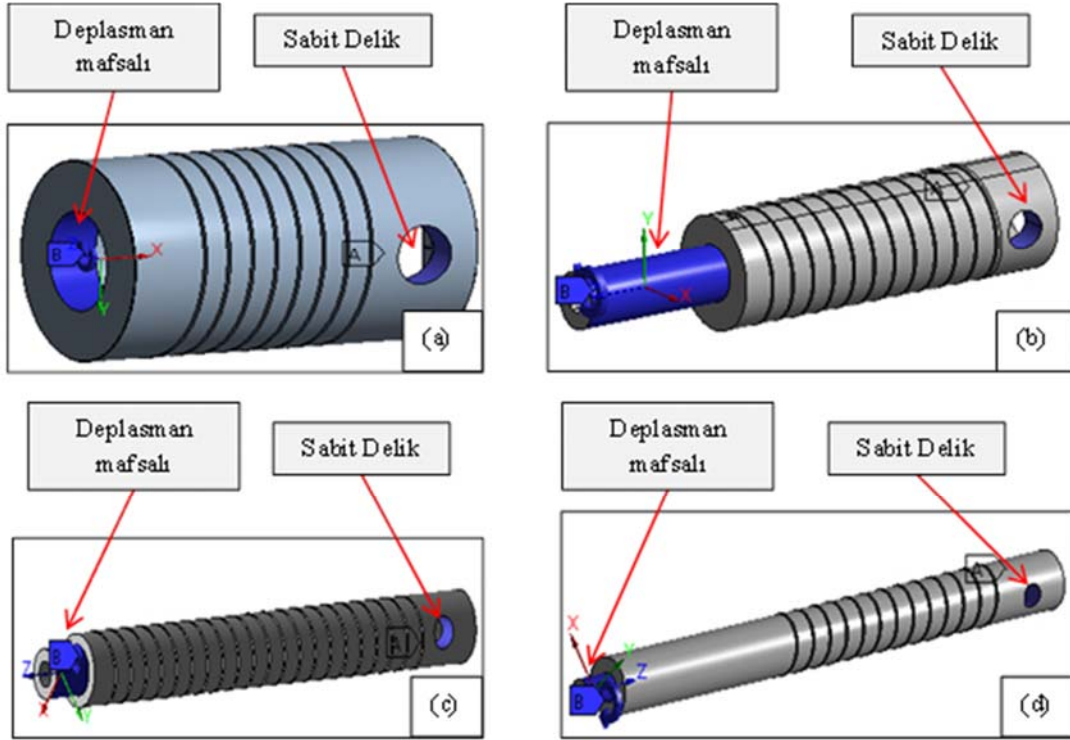
modellerinde tanımlanan mafsallardan tepki momenti değerleri okunmuş ve Eş. 1 ile yay sabiti hesaplanmıştır. Elde edilen bu yay sabitleri testler ile kıyaslanarak modelin gerçekliği belirlenmiştir. Buna ilaveten her analiz sonucunda gerilme dağılımı incelenerek yaylarda bir kalıcı deformasyon olup olmadığı da belirlenmiştir.

4. DENEYSEL VE SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARI

(EXPERIMENTAL RESULTS AND FINITE ELEMENT ANALYSIS RESULTS)

4.1. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Belirtilen dört farklı tip işleme yay için kapama ve açma yönlerinde uygulanan dört farklı yükleme profili sonucunda



Şekil 5. İşleme yaylar için yükleme ve sınır koşulları (a) Yay-1 (b) Yay-2 (c) Yay-3 (d) Yay-4
(Loading and boundary conditions for machined springs (a) Spring-1 (b) Spring-2 (c) Spring-3 (d) Spring-4)

elde edilen açılmalık yer değiştirmeye bağlı yaylar üzerinde oluşan tork değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; açılmalık yer değiştirmeye bağlı olarak yayların direngenlik sabitlerinde, aynı yöndeki yüklemelerde büyük bir değişikliğin olmadığı görülmüştür. Bunun yanında tüm yayların doğrusala yakın bir burulma direngenliği sergiledikleri görülmüştür. Bu da testlerin yeterli hassasiyetle gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Farklı yükleme profilleri için Eş. 1'den yararlanılarak elde edilen yay sabitleri Tablo 4'de verilmiştir. Açma ve kapama yönleri için ayrı ayrı verilen ortalama yay sabitleri ise Tablo 5'de görülmektedir. Bu yayların asıl çalışma yönü olan kapama yönü yay sabitlerinin, açma yönü yay sabitlerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. İşleme yaylar kapama yönünde çalışması amacıyla tasarlandıkları için açma yönündeki yay sabiti göz önüne alınmamış ve yapay sınır ağı sadece kapama yönü yay sabitine göre geliştirilmiştir.



Şekil 6. Analiz modelleri örnek ağ yapısı
(Mesh structure of analysis models)

Tablo 2. Ağ yapılarının özellikleri (Mesh features)

Yay No.	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
1	104937	178991
2	171251	285956
3	141172	238943
4	168159	275734

Tablo 3. Malzeme özellikleri (Material properties) [22]

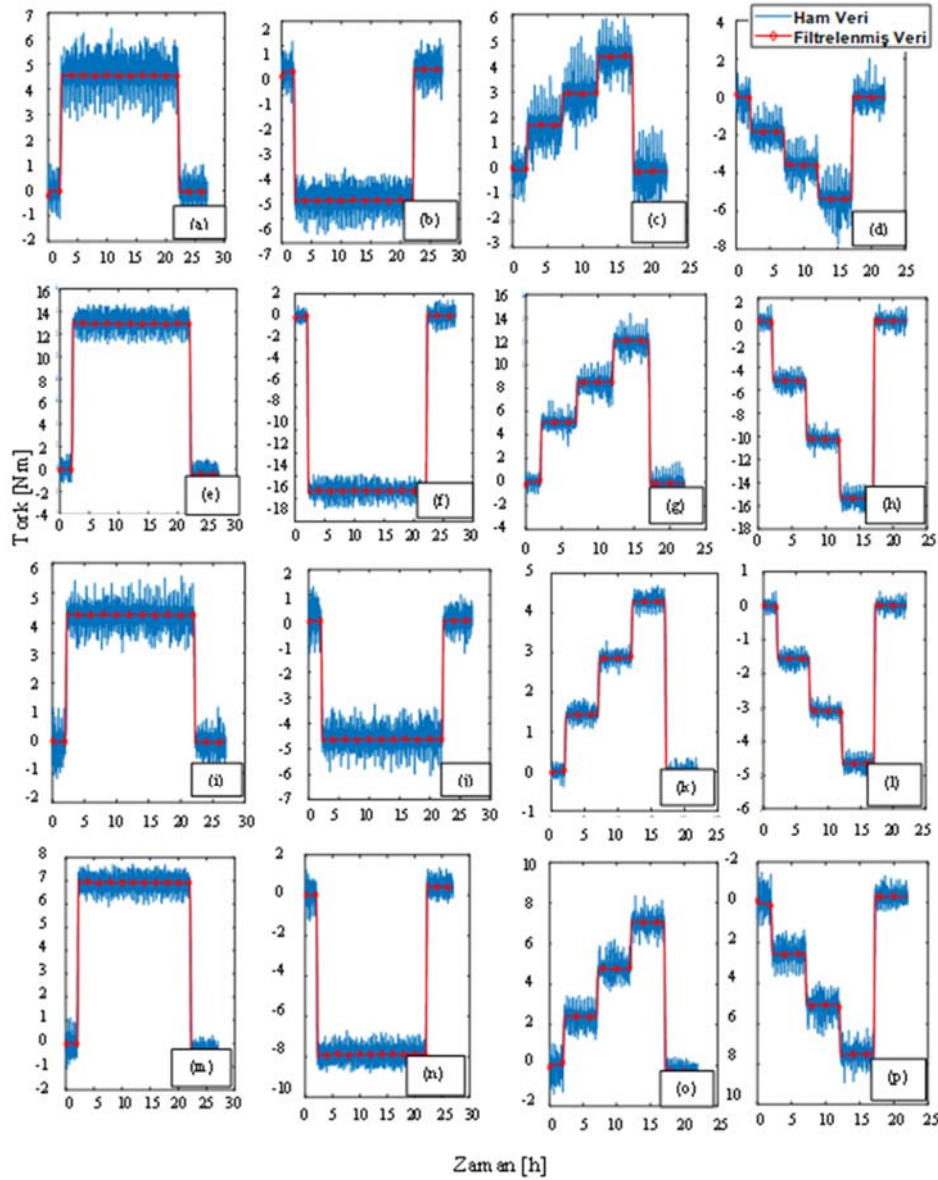
Malzeme	Elastisite Modülü (GPa) (E)	Poisson Oranı (ν)
C350 Çelik	200	0,3

Tablo 4. Test numuneleri yay sabiti sonuçları
(Spring constant results of test specimens)

Yükleme Profili	Ortalama (k) Sabiti [N.m ⁻¹]			
	Yay-1	Yay-2	Yay-3	Yay-4
1	0,3041	0,8432	0,2564	0,3901
2	0,3479	1,0170	0,3091	0,5272
3	0,3139	0,8512	0,2598	0,4055
4	0,3573	1,0291	0,3105	0,5023

4.2. Sonlu Eleman Analizi Sonuçları (Finite Element Analysis Results)

Yapılan analizler sonucunda; işleme yaylara ait von Mises gerilme dağılımları, Şekil 8'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, en büyük gerilmelerin şekilde gösterilen helis bitiş bölgelerinde, küçük bir bölgede olduğu ve C350 çelik akma dayanımının (2033 Mpa [22]) çok altında olduğu



Şekil 7. Tork-Zaman grafikleri (a) Yay-1 Profil-1 (b) Yay-1 Profil-2 (c) Yay-1 Profil-3 (d) Yay-1 Profil-4 (e) Yay-2 Profil-1 (f) Yay-2 Profil-2 (g) Yay-2 Profil-3 (h) Yay-2 Profil-4 (i) Yay-3 Profil-1 (j) Yay-3 Profil-2 (k) Yay-3 Profil-3 (l) Yay-3 Profil-4 (m) Yay-4 Profil-1 (n) Yay-4 Profil-2 (o) Yay-4 Profil-3 (p) Yay-4 Profil-4
(Torque-time graphics (a) Spring-1 Profile-1 (b) Spring-1 Profile-2 (c) Spring-1 Profile-3 (d) Spring-1 Profile-4 (e) Spring-2 Profile-1 (f) Spring-2 Profile-2 (g) Spring-2 Profile-3 (h) Spring-2 Profile-4 (i) Spring-3 Profile-1 (j) Spring-3 Profile-2 (k) Spring-3 Profile-3 (l) Spring-3 Profile-4 (m) Spring-4 Profile-1 (n) Spring-4 Profile-2 (o) Spring-4 Profile-3 (p) Spring-4 Profile-4)

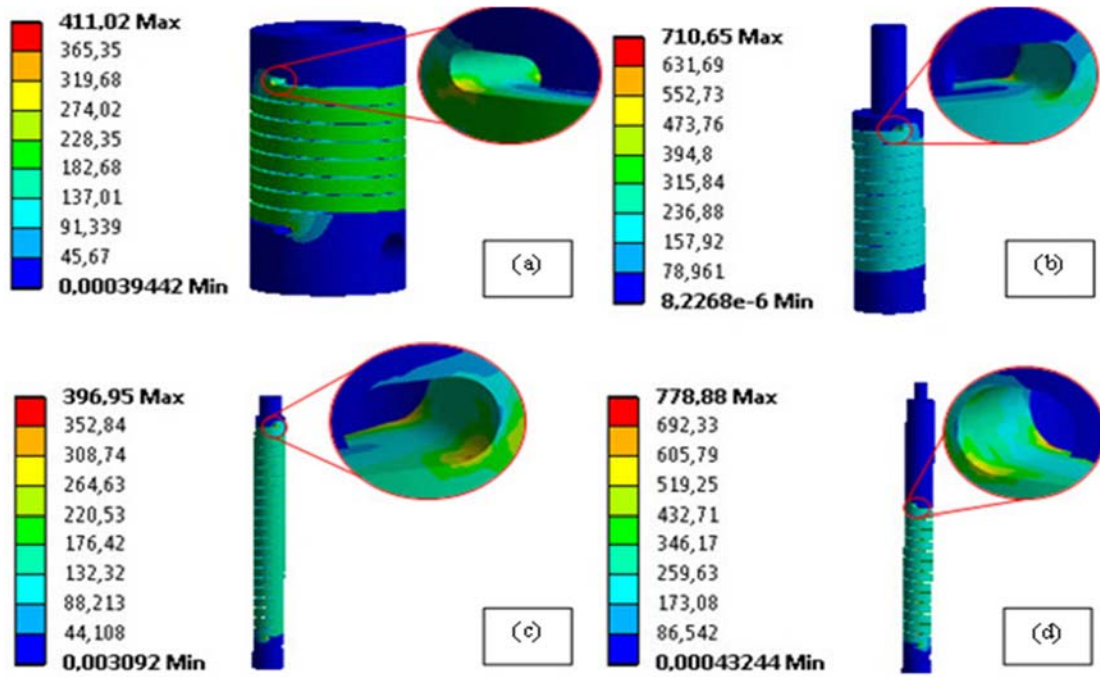
gözlenmiştir. Bu nedenle yaylarda bir kalıcı deformasyon beklenmemektedir. Elde edilen tork değerleri ve hesaplanan yay sabiti değerleri (k_s) Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. İşleme yay ortalama (k) sabitleri özet tablosu
(Average spring constants summary table of machined springs)

Yay İsmi	Açma Yönü (k) Sabiti [N.m/°]	Kapama Yönü (k) Sabiti [N.m/°]
Yay-1	0,3545	0,3059
Yay-2	1,015	0,8437
Yay-3	0,3112	0,2641
Yay-4	0,5105	0,3953

Tablo 6. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen tork (T) ve yay sabiti (k_s) değerleri
(Torque and spring constant values obtained from finite element analysis)

Model No.	$\theta=15^\circ$ Kapama Yönü		$\theta=15^\circ$ Açma Yönü	
	Moment [N.m]	k_s [N.m/°]	Moment [N.m]	k_s [N.m/°]
1	4,485	0,2990	5,184	0,3456
2	12,343	0,8229	14,795	0,9863
3	3,880	0,2587	4,563	0,3042
4	5,826	0,3884	7,508	0,5005



Şekil 8. Yay-1 von-Mises gerilme dağılımı (a) Yay-1 (b) Yay-2 (c) Yay-3 (d) Yay-4
(von-Mises stress distribution (a) Spring-1 (b) Spring-2 (c) Spring (3) (d) Spring (4))

4.3. Deneysel ve Sonlu Eleman Sonuçlarının Kıyaslanması (Comparison of the Experimental and Finite Element Results)

Testlerden vesonlu eleman analizinden elde edilen kapama yönündeki yay sabiti değerleri Tablo 7’de karşılaştırılmıştır. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde, sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan analiz modellerinden elde edilen yay sabitlerinin test değerlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, yapay sinir ağı eğitiminde kullanılan sonlu eleman sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 7. İşleme yay burulma direngenliklerinin karşılaştırılması
(Comparison of torsional stiffness of machined springs)

Yay Model No.	Deneysel Yay Sabiti k_d [N.m/°]	SayısalYay Sabiti k_s [N.m/°]	Sayısal Sonuçların Farklılığı [%]
1	0,3059	0,2990	2,26
2	0,8437	0,8229	2,46
3	0,2641	0,2587	2,37
4	0,3953	0,3884	1,75

5. YAPAY SİNİR AĞI GELİŞTİRİLMESİ (DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK)

5.1. Parametre Korelasyon Çalışması (Parameter Correlation Study)

Sonlu eleman analizlerinin deneylerle doğrulanmasından sonra her parametrenin tasarım üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla parametrik korelasyon çalışması

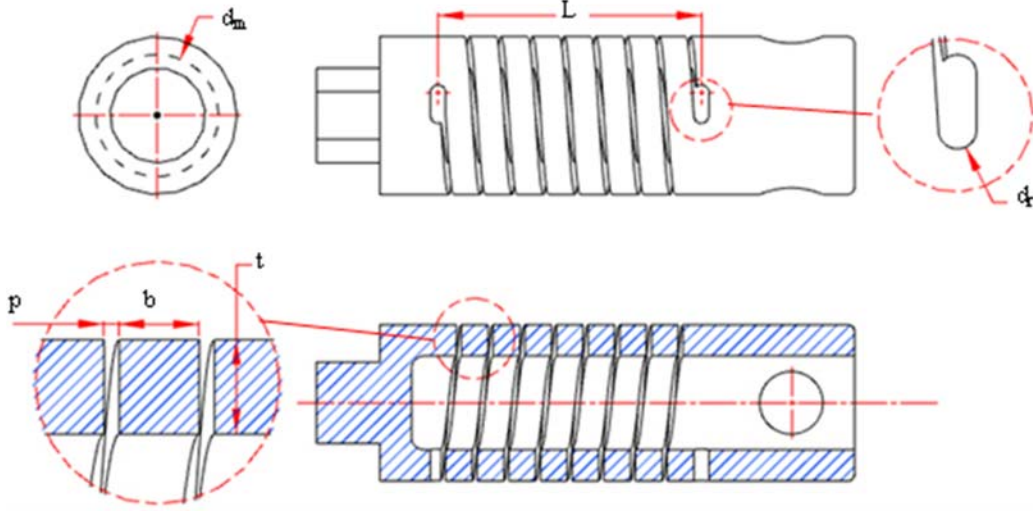
yapılmıştır. Bu işlemin amacı, yapay sinir ağı için gerekli analiz sayısını ve parametrelere tanımlanacak değer aralıklarını belirlemektir.

Parametre korelasyon çalışmalarında yaygın olarak iki farklı korelasyon tipi kullanılmaktadır. Bunlar, Pearson ve Spearman korelasyonlarıdır. Pearson korelasyonu doğrusal bir korelasyon tipidir. İki sayısal ölçüm arasında ilişki olup olmadığını araştırır [23]. Bu metodun sonucunda, “-1” ile “1” aralığında değişen bir değer elde edilir. Bu değer, girdi parametresi ile çıktı parametresi arasındaki ilişkiyi gösteren sayısal bir değerdir. Yani, girdi parametresinin çıktı parametresi üzerindeki etkisini ifade eder. Diğer yaygın olarak kullanılan korelasyon tipi ise Spearman rank korelasyonudur. Bu metod, Pearson korelasyonuna göre daha kapsamlıdır. Doğrusal olmayan ilişkiye sahip çalışmalar için tercih edilir. Lineer olmayan durumlarda da geçerli bir yöntemdir. Bu yöntem sonucunda da Pearson metoduna benzer şekilde “-1” ile “1” aralığında değişen sonuç elde edilir. Sonuç “1” değerine yaklaştıkça veriler arasındaki ilişki değeri aynı yönde artar, sonuç “-1” değerine yaklaştıkça veriler arasındaki ilişki değeri ters yönde artar. Korelasyon çalışmaları için Pearson yöntemine göre daha kapsamlı bir metod olan Spearman rank korelasyonu tercih edilmiştir.

Parametrik analiz çalışması, bir analiz paketinden oluşmaktadır. Bu analiz paketinde, Şekil 9’da belirtilen geometrik girdi parametreleri Tablo 8’de belirtilen aralıkta değiştirilerek 100 farklı model oluşturulmuştur. Bu aralıklar; uygulamalarda kullanılan bir işleme yayının ebatlarına bakılıp, üretimden kaynaklanan alt ve üst sapma değerlerine göre belirlenmiştir.

Bu değerler tanımlandıktan sonra, ANSYS uygulamasında "Parameters Correlation" modülü kullanılarak 100 farklı model için analizler çözdürülmüş ve korelasyon sonuçları elde edilmiştir. Şekil 10'da verilen renklerle ifade edilmiş matriste, her bir geometrik girdi parametresinin çıktı parametreleri üzerindeki etki şiddetleri gösterilmiştir. Tablo 9'da verilen matris ise aynı sonuçların sayısal olarak ifade edilmiş halidir. Herhangi bir girdi parametresinin herhangi bir çıktı parametresi üzerindeki etki şiddeti ve yönü incelenmek istenildiğinde, o girdi ve çıktı parametrelerinin

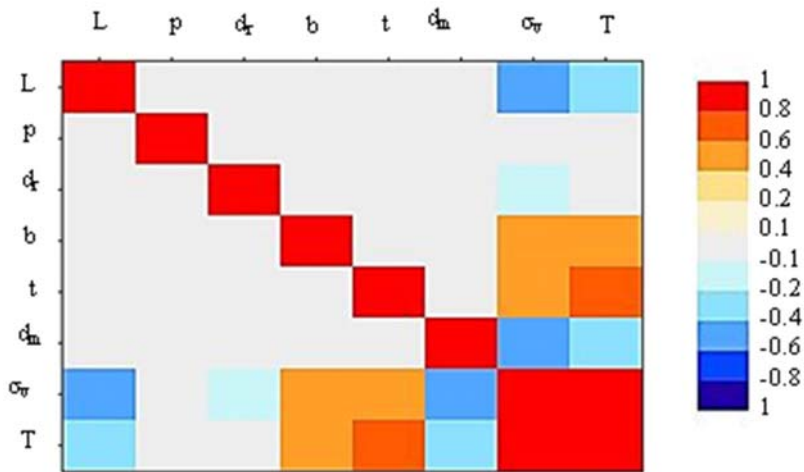
bulduğu satır ve sütunların kesişimindeki bloğun rengine bakılarak etki şiddeti ve yönü anlaşılabilir. Renkler kırmızıya yaklaştıkça korelasyon değeri "1" değerine yaklaşır. Yani bloğun bulunduğu satır ve sütundaki parametreler arasında doğru yönde korelasyon değeri artar. Matristeki renk tonları, mavi rengine yaklaştıkça korelasyon değeri "-1" değerine yaklaşır. Yani matristeki renk maviye yaklaştıkça, bloğun bulunduğu satır ve sütundaki parametreler arasında ters yönde korelasyon değeri artar. Korelasyon değerinin sıfıra yakın olması satır ve sütundaki



Şekil 9. İşleme yayların boyutsal parametreleri (Dimensional parameters of machining springs)

Tablo 8. Geometrik girdi parametrelerinin nominal, alt sınır ve üst sınır değerleri (Nominal, lower limit and upper limit values of geometric input parameters)

Girdi Parametreleri	Açıklamalar	Nominal Değer	Alt sınır Değeri	Üst Sınır Değeri
t	Radyal et kalınlığı	5	4,5	5,5
b	Eksenel et kalınlığı	5	4,5	5,5
L	Helis boyu	30	27	33
d _m	Ortalama çap	25	22,5	27,5
d _r	Slot çapı	1,8	1,62	1,98
p	Kanal boşluğu	0,5	0,45	0,55



Şekil 10. Renklerle ifade edilmiş korelasyon matrisi (Correlation matrix expressed in colors)

parametrelerdeki korelasyonun az olduğunu ve bu parametrelerdeki değişimin birbirini etkilemediğini gösterir. Şekil 10 ve Tablo 9 incelendiğinde girdi parametrelerinin yay torku üzerindeki etki sıralamasının; $t > b > L > d_m > d_r > p$ şeklinde olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelerden d_m ve L 'nin artışı aynı yay sabitini elde etmek için gerekli momenti azaltırken, diğer parametrelerin artışı, bu torku arttırmaktadır. Yay radyal (t) ve eksenel (b) et kalınlığının yayın kesit özelliklerini belirlemesi nedeniyle moment üzerinde daha etkili olması beklenen bir durumdur. Benzer şekilde slot çapı (d_r) küçük bir bölgede olduğundan ve kanal boşluğu (p) da bu sadece yaya daha kompakt bir yapı kazandırma amacı olduğundan bu parametrelerinin etkilerinin düşük olmasına yol açmıştır. Tablo 9'da ek olarak işleme yay tasarımcılarına ışık tutması amacıyla bu parametrelerin eşdeğer gerilme üzerindeki etkileri de sunulmuştur. Bu korelasyon sonuçlarına göre yapay sinir ağı çalışmasındaki girdi parametrelerin değer sayısı belirlenmiştir. YSA eğitimi sırasında etkisi daha yüksek olan parametrelerin değer sayıları büyük tutulurken, etkisi düşük olan girdi parametrelerinin değer sayıları ise daha küçük tutulmuştur. Değerlerin, testleri ve analizleri yapılan işleme yayların geometrilerini kapsayacak şekilde seçilmesine özen gösterilmiştir. Girdi parametrelerine ait değer sayısı ve değer aralıkları Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 10'da belirtilen parametreler ile ($5 \times 4 \times 2 \times 3 \times 3 \times 2 \times 1 = 720$) adet analiz modeli oluşturulmuş ve bu modeller, YSA eğitiminde kullanılmıştır.

5.2. Yapay Sinir Ağı Eğitimi (Artificial Neural Network Training)

YSA geliştirilmesinde, Matlab Neural Network Fitting (NNF) aracı kullanılmıştır [24]. NNF'te dört ana sinir ağı araç çubuğu bulunmaktadır. İlk araç çubuğu, fonksiyon uydurma araç çubuğudur. Bu araç çubuğunda yapay sinir ağı, girilen veri tabanını kullanarak en uygun fonksiyonu oluşturur. Bir diğer araç çubuğu ise örüntü tanımlama araç çubuğudur. Bu araçta çubuğunda, girdi parametreleri istenilen özelliklere göre kategorize edilir. Üçüncü araç çubuğu, veri kümelendirme araç çubuğudur. Burada veriler benzer özelliklerine göre kümelendirilmektedir. Dördüncü araç çubuğu, zamana bağlı analizdir. Bu araç çubuğunda ise bir sisteme ait geçmişteki verilere bakılarak gelecekteki davranışları tahmin edilir [25]. Bu çalışmada, fonksiyon uydurma araç çubuğu kullanılmıştır. Bunun sebebi eldeki veri kümesi ile bir fonksiyon oluşturulup bu fonksiyona bağlı olarak istenilen yay sabiti tahmini yapılabilmesidir.

Yukarıda da belirtildiği gibi parametre korelasyonu çalışması sonucunda elde edilen 720 adet parametrik analiz sonucu, yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılmıştır. Yapay sinir ağına girdi olarak işleme yay tasarımında gerekli boyutsal parametreler, çıktı olarak ise, burulma yay sabiti (k) değeri elde edilmiştir. (Tablo 11). Sonrasında bu veriler, bir matris halinde "MATLAB Neural Fitting (nftool)" araç çubuğuna aktarılmıştır [24].

Tablo 9. Korelasyon matrisi (Correlation matrix)

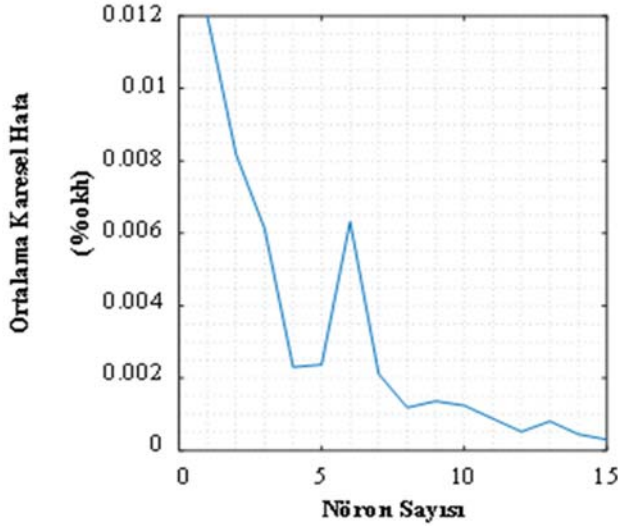
Parametreler	L	p	d_r	b	t	d_m	σ_v	T
L	1,000	-0,009	-0,010	0,004	0,008	0,013	-0,477	-0,283
p	-0,009	1,000	0,001	0,013	-0,010	0,024	0,071	0,033
d_r	-0,010	0,001	1,000	-0,009	-0,007	0,010	-0,138	0,018
b	0,004	0,013	-0,009	1,000	0,000	0,010	0,522	0,477
t	0,008	-0,010	-0,007	0,000	1,000	-0,010	0,480	0,780
d_m	0,013	0,024	0,010	0,010	-0,010	1,000	-0,425	-0,240
σ_v	-0,477	0,071	-0,138	0,522	0,480	-0,425	1,000	0,883
T	-0,283	0,033	0,018	0,477	0,780	-0,240	0,883	1,000

σ_v : Von Mises gerilme

Tablo 10. YSA eğitimi için girdi parametrelerinin sayıları ve değerleri
(Numbers and values of input parameters for ANN training)

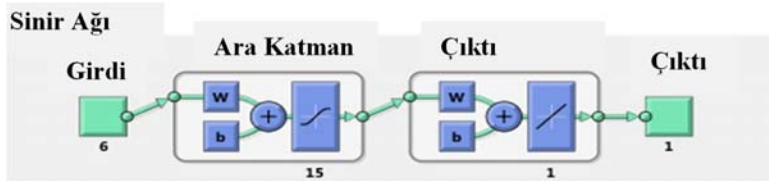
Girdi Parametreleri	Açıklamalar	Değer Sayısı	Girdi 1 [mm]	Girdi 2 [mm]	Girdi 3 [mm]	Girdi 4 [mm]	Girdi 5 [mm]
t	Radyal et kalınlığı	5	4,5	5,25	6	6,75	7,5
b	Eksenel et kalınlığı	4	3,5	4,5	5,5	6,5	-
L	Helis boyu	3	35	75	125	-	-
d_m	Ortalama çap	3	7,8	21,8	35,8	-	-
d_r	Slot çapı	2	1	1,5	-	-	-
p	Kanal boşluğu	2	0,635	0,8	-	-	-

YSA çalışmalarında nöron sayısının artırılması, aşırı optimizasyon ve çözümlene süresinde artış gibi dezavantajlara sebep olur. Ancak bu sayının az tutulması da çözüm sonucunda hesaplanan eğitimin yetersiz olmasına, yani çözüm sonucundaki hedef çıktı ile elde edilecek çıktı arasındaki sapma miktarını gösteren Ortalama Kareysel Hata (OKH)'nın yüksek olmasına sebep olabilir. Bu değer, ifade etmektedir. Uygun nöron sayısını belirlemek için diğer parametreler sabit tutularak farklı nöron sayıları ile çözümlenmeler yapılmıştır. Şekil 11'de nöron sayısına bağlı olarak elde edilen OKH miktarları verilmiştir. Elde edilen hata miktarları incelendiğinde 15 adet nöron kullanımında OKH'nın %0.0005'in altına indiği görülmüş ve bu hata miktarının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Genel yaklaşıma göre 15 adet nöron sayısı oldukça yüksektir. Ancak yapılan çözümlenelerde YSA eğitim sürelerinin dakika mertebelerinde olduğu görüldüğünden bu nöron sayısı ile çözümlenmelere devam edilmiştir.



Şekil 11. Nöron sayısına bağlı OKH değişimi (MSE change due to the number of neurons)

Sinir ağı gizli katmanlarda bulunan transfer fonksiyonu çözümlenmeleri için tan sigmoid tipi fonksiyon seçilmiştir. Şekil 12'de oluşturulan yapay sinir ağı yapısının görünümü verilmiştir. Burada; girdiler, ara katmanlar ve çıktı görülmektedir. Yapay sinir ağı 6:15:1 şeklindeki yapıya sahiptir. Bu yapı, 6 adet girdi, 15 adet nörona işlenerek 1 adet çıktı olduğunu ifade etmektedir. YSA eğitiminde kullanılan veriler; eğitim seti, değerlendirme seti ve test seti olmak üzere 3'e bölünmektedir. Eğitim setinde bulunan veriler, yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılan verilerdir.



Şekil 12. Yapay sinir ağı yapısı (Artificial neural network structure)

Değerlendirme setinde bulunan veriler, yapay sinir ağı eğitim aşamasında eğitim performansının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Burada kullanılan veriler eğitim setine dahil edilmez. Test setindeki veriler ise yapay sinir ağı tamamlandıktan sonra sistemin test edilmesi için kullanılan verileri oluşturmaktadır. Bu kısım da yapay sinir ağı eğitiminden bağımsızdır. %70 Eğitim Seti, %15 Değerlendirme Seti, %15 Test Seti şeklinde bölünen oranların literatürde varsayılan değerler olduğu bilinmektedir. Eğitim setinde kullanılacak veri sayısını en yüksekte tutarak daha doğru sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır. Eğitiminde sonlu eleman analizi kullanılan benzer bir çalışmada bu oranların; %90 Eğitim seti, %5 Değerlendirme seti, %5 Test seti alınarak başarılı sonuçların elde edildiği görülmüş ve bu çalışmada da veri seti aynı şekilde bölünmüştür [25].

Şekil 13'de, yapay sinir ağı eğitim performansını gösteren bir grafik verilmiştir. Eğitim sonucunda en iyi eğitim performansı, $3,62 \times 10^{-4}$ ortalama karesel hata miktarıyla elde edilmiştir. Bu değer eğitimin oldukça başarıyla yapıldığını gösteren küçük bir değerdir. Eğitim sürecinde toplamda 2986 adet iterasyon yapılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi iterasyon artışıyla, ortalama karesel hata miktarı değeri bir düşüş gözlenmediği için eğitim tamamlanmıştır.

Tablo 11. Veri tabanındaki parametreler (Parameters in the database)

Girdi Parametreleri	Çıktı Parametresi
Radyal et kalınlığı (t), Eksenel et kalınlığı (b), Helis boyu (L), Kanal boşluğu (h), Ortalama çap (d_m), Slot Capı (d_r)	Burulma Yay sabiti (k)

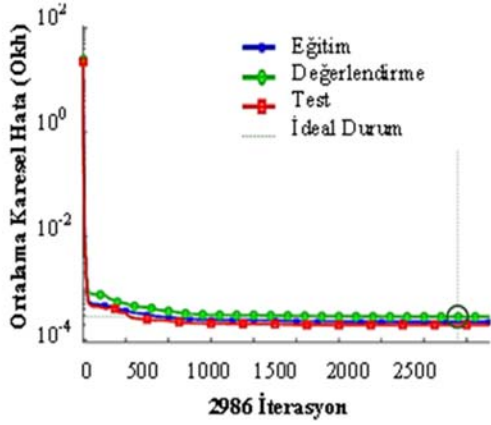
Test sonuçlarına ait doğrusal regresyon grafiği Şekil 14'de verilmiştir. Bu grafikte dikey ve yatay eksenler sırasıyla yapay sinir ağı test verileri ve parametrik sonlu elemanlar analiz çalışması sonucunda elde edilen çıktıları temsil etmektedir. 45° eğimle çizilmiş kesikli çizgi ideal regresyon eşleşmesini ifade etmektedir. Grafikteki mavi çizgi ise teste ait regresyon çizgisini temsil etmektedir. Şekil 14 incelendiğinde bu iki çizginin örtüştüğü, dolayısıyla YSA performansının başarılı olduğu gösterilmiştir.

5.3. YSA Sonuçları (ANN Results)

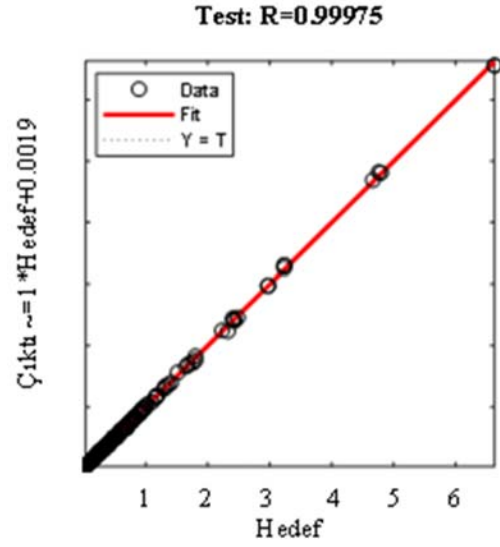
Geliştirilen YSA ile çeşitli boyutsal parametrelerle yay sabiti sonuçları elde edilmiştir. Sonuçların doğruluğunu test etmek

İçin üç farklı test grubu oluşturulmuştur. Birinci test grubunda, yapay sinir ağı eğitim veri tabanında bulunan 5 farklı yay modeline ait girdi ve çıktı değerleri alınmıştır. İkinci test grubunda ise; parametrik analiz girdi veri tabanını oluşturan değerlerin aralarında kalan değerler seçilerek 5 farklı yay modeli oluşturulmuştur. Üçüncü test grubunda ise yapay sinir ağı girdi parametrelerini oluşturan veri tabanı kümesi dışında kalan değerler seçilerek 5 farklı işleme yay modeli oluşturulmuştur. Elde edilen bütün sonuçlar Tablo 12’de verilmiştir.

En İyi Değerlendirme Performansı=0.00036247 (2836. İterasyon)



Şekil 13. Yapay sinir ağı eğitim performansı grafiği
(Artificial neural network training performance chart)



Şekil 14. YSA test performansına ait regresyon grafiği
(Regression graph of ANN test performance)

Sonuçlar incelendiğinde YSA eğitim veri kümesi içerisinde yer alan parametrelerle sonlu eleman sonuçları arasında maksimum %1,6, ara değerlerde ise maksimum %8 farklılık elde edildiği görülmüştür. Test ile sonlu eleman analizleri arasındaki farklar düşünüldüğünde bu farklılığın kabul edilebilir seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Veri tabanı kümesi dışında seçilen değerlerle elde edilen sonuçlarda % farklılık

Tablo 12. YSA eğitim test sonuçları (ANN training test results)

Grup No.	Yay No.	L [mm]	h [mm]	B [mm]	t [mm]	D _{mean} [mm]	d _r [mm]	k _s [N.m/°]	k _n [N.m/°]	Hata [%]
1	1	35	0,8	3,5	5,25	7,8	1	0,7283	0,7204	1,084
	2	35	0,8	4,5	4,5	35,8	1	0,1636	0,1662	1,589
	3	75	0,635	3,5	6,75	21,8	1	0,2576	0,2589	0,504
	4	125	0,635	5,5	6,75	7,8	1,5	0,9692	0,9559	1,372
	5	75	0,8	4,5	7,5	21,8	1,5	0,5843	0,5913	1,198
2	1	37,02	0,662	4,17	5,68	30,79	1,014	0,3351	0,3213	4,118
	2	42,52	0,661	4,04	6,24	24,25	1,486	0,4502	0,4314	4,175
	3	53,09	0,777	6,36	7,38	27,72	1,404	1,2621	1,2152	3,71
	4	63,04	0,640	5,73	6,01	34,48	1,249	0,3668	0,3366	8,23
	5	77,20	0,712	3,98	6,96	29,79	1,323	0,2632	0,2849	8,24
3	1	32,55	0,504	3,97	4,00	41,43	0,950	0,0896	0,0878	2,008
	2	30,48	0,543	4,01	3,72	36,69	0,913	0,0904	0,0812	10,176
	3	32,27	0,575	3,66	3,63	38,15	0,997	0,0634	0,0537	15,299
	4	33,21	0,525	3,75	4,27	36,34	0,977	0,1078	0,0976	9,462
	5	21,437	0,857	3,41	3,22	37,03	1,564	0,0694	0,0612	11,81

değerlerinde artış görülmektedir. Geliştirilen bu YSA modelinin veri tabanı dışındaki değerler için kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında; havacılık sektöründe sıkça kullanılan işleme yayların yay sabitlerini belirlemek için parametre korelasyonu bazlı yapay sinir ağı (YSA) geliştirilmiştir. İlk olarak YSA veri tabanını oluşturan analizlerin doğruluğunu belirlemek için dört farklı tip yayın testi yapılmıştır. Bu amaçla oldukça hassas sonuçlar verebilen bir burma test düzeneği tasarlanmıştır. Aynı numunelerin sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve test sonuçları ile başarıyla doğrulanarak analizlerin YSA eğitiminde kullanılabileceğine karar verilmiştir. Ardından parametrik korelasyon çalışması ile boyutsal parametrelerin etki derecesi belirlenmiş ve bu doğrultuda YSA eğitiminde kullanılacak parametre değer aralıkları ve analiz sayısı belirlenmiştir. Eğitim sonucunda yay sabitini tahmin edebilen bir YSA geliştirilmiştir. Geliştirilen YSA fonksiyonu, eğitim veri kümesi içinde yer alan parametreler ile yay sabitinin elde edilmesi amacıyla güvenle kullanılabilir.

Çalışma sürecinde ayrıca işleme yayların açma yönündeki yüklemelerde daha yüksek moment verdiği belirlenmiştir. Boyutsal parametrelerin işleme yay burulma direngenliğine etki şiddeti, $t > b > L > d_m > d_r > p$ şeklinde elde edilmiştir. Yani yay eksenel ve radyal et kalınlıklarının yay sabiti üzerinde etkisi diğer parametrelere göre fazladır. İşleme yay tasarımı yapılırken bu sıralamanın bilinmesi, tasarımcı için büyük kolaylık sağlayacaktır.

Bu çalışmanın devamı olarak, açılmal yüklemeler altındaki gerilme değerlerini de tahmin edebilen bir sinir ağı geliştirilebilir. Bunun yanında işleme yaylarının burulma dışında basma ve çekme yüklemeleri altındaki davranışları da incelenerek daha gelişmiş bir YSA oluşturmak mümkündür. İleride bu YSA için kullanıcı arayüzü geliştirmek tasarımcıların ürün geliştirme sürecine oldukça katkı sağlayacaktır. YSA eğitim performansının geliştirilmesi amacıyla, n kat çapraz doğrulama tekniği gibi farklı eğitim tekniklerin çalışılması mümkündür. Ayrıca Lineer Regresyon, Destek Vektör Makinaları, Karar Ağacı gibi farklı yöntemler çalışılarak elde edilecek sonuçlar, mevcut YSA sonuçları ile karşılaştırılabilir. Farklı yöntemlerle elde edilen bütün sonuçların kıyaslanması ile literatüre oldukça zengin bilgiler katılması mümkündür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın tamamı TÜBİTAK-SAGE tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Calderon J.D.D., Perez C., On The General Characterization of Machined Springs and Their Manufacturing Processes, ASME 2013 International

- Mechanical Engineering Congress and Exposition, USA, 2013.
2. H.P. Company, The spring for the 21st century, 2016.
 3. Gary L., Boehm P., Wire Wound vs. Machined Springs A Comparison, Helical Products Company, 2016.
 4. Salwinski J., Michalczyk K., Stress analysis in helical springs with closed end coils machined from cylindrical sleeves, Mechanics / AGH University of Science and Technology, 25 (4), 169-172, 2006.
 5. Razooqi A.I., Ameen H.A., Mashloosh K.M., Static and Dynamic Characteristics of Slotted Cylinder Spring, International Journal of Engineering Research & Technology, 2, 2013.
 6. Nama S.A., Modeling and Analysis of a Helical Machined Springs, The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, 15 (2), 2015.
 7. Zeydan E., Analytical Investigation of Parameters Affecting Stiffness of Helical Springs of Arbitrary Shapes Under Compression, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova University, 2006.
 8. Krzysztof M., Stress Analysis in Slotted Springs, Mechanics, 25 (3), 131-134, 2006.
 9. Ahmed I.R., Hani A.A., Kadhim M.M., Compression and Impact Characterization of Helical and Slotted Cylinder Springs, Int. J. Eng. & Tech., 3, 268-278, 2014.
 10. Calderon J.D.D., On the general characterization of machined springs and their manufacturing processes, Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013.
 11. Nama S.A., Effect of Pitch Angle on Static Characteristics of a Helical Machined Spring The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, 15(3), 2015.
 12. Sebatlı A., Çavdur F., Analysis of relief supplies distribution operations via simulation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 2079-2096, 2019.
 13. Kılıç M., Eyecioğlu Ö., Özdemir Z., Alkan Ü., Estimation of dielectric parameters of LDPE/PANI composite films depending on temperature and PANI additive concentration by GRNN, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 1077-1088, 2020.
 14. Bin Younis H., Kamal K., Sheikh M., Hamza A., Zafar T., Prediction of fatigue crack growth rate in aircraft aluminum alloys using radial basis function neural network, 2018 Tenth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI), Xiamen-China, 29-31 March, 2018.
 15. Koçyiğit M., Akay H., Estimation of potential flash flood risk in a basin using morphometric parameters: A case study of Akçay Basin, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1321-1332, 2018.
 16. Aydın F., Aslan Z., Diagnosis of neuro degenerative diseases using machine learning methods and wavelet transform, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (3), 749-766, 2017.

17. Bulut M., Başoğulu B., Development of a hybrid system based on neural networks and expert systems for short-term electricity demand forecasting, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2), 1129-1140, 2017.
18. Kollmorgen, AC Synchronous Servo Motor, <https://www.kollmorgen.com/en-us/products/catalogs/kollmorgen-akm-servomotor-selection-guide/>, Erişim tarihi Ocak 02, 2019.
19. Sumitomo, Fine Cyclo Zero Backlash Precision Gearboxes <https://sumi-entermediadb.appno.net/assets/emshare/views/modules/asset/downloads/originals/2018/11/60/7e050117f/Fine%20Cyclo%20Catalog.pdf>, Erişim tarihi şubat 03, 2019.
20. Honeywell, Flanged Reaction Torque Sensor, www.sensing.honeywell.com/honeywell-test-and-measurement-model-2110-2116-reaction-torque-datasheet-008799-2-en.pdf, Erişim tarihi şubat 03, 2019.
21. ANSYS Workbench, Versiyon: 19.2.0.
22. VascoMax Catalogue, www.dynamicmetals.net/VascoMaxCatalog.pdf, Erişim tarihi Ocak 06, 2019.
23. Emerson W.R., Causation and Pearson's Correlation Coefficient, Journal of Visual Impairment & Blindness, 36 (3), 242-244, 2015.
24. MATLAB, Version : R2018b (9.5.0.944444), 2018.
25. Yıldırım A., Development Of Bolted Flange Design Tool Based On Finite Element Analysis And Artificial Neural Network, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, 2015.



Process optimisation of HMDSO polymerisation in PVD vacuum medium by numerical analysis for automotive industry

İbrahim Emrah Sözer^{1*}, Serkan Geçim², Gökmen Kıdık³, Mustafa Cemal Çakır¹

¹Department of Mechanical Engineering, Uludağ University, Bursa, 16059, Turkey

²Department of Chemical Engineering, Bursa Technical University, Bursa, 16330, Turkey

³Department of Mechanical Engineering, İstanbul Technical University, İstanbul, 34467, Turkey

Highlights:

- HMDSO monomer salınım sisteminin numerik analizi,
- CFD simülasyonuna deneysel yaklaşım,
- PVD HMDSO polimerizasyonu için proses parametre optimizasyonu.

Keywords:

- PVD
- Physical Vapor Deposition
- HMDSO Polymerization
- Thin Film Layer
- Metallization

Article Info:

Research Article
Received: 06.12.2019
Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.656258

Correspondence:

Author: İbrahim Emrah Sözer
e-mail:
ibrahimemrahsozer@gmail.com
phone: +90 535 747 7251

Graphical/Tabular Abstract

In this study, HMDSO monomer releasing system that is used to form a protective film layer on the automotive headlight reflective surfaces in the PVD coating processes, has been optimized to equally distribute through the releasing pipeline in vacuum condition by using finite volumes method. In addition, for uniform distribution of the HMDSO monomer release before polymerization into the vacuum medium, the substrate's jig rotation mechanics were analyzed by CFD simulations and the results were verified by experimental applications.

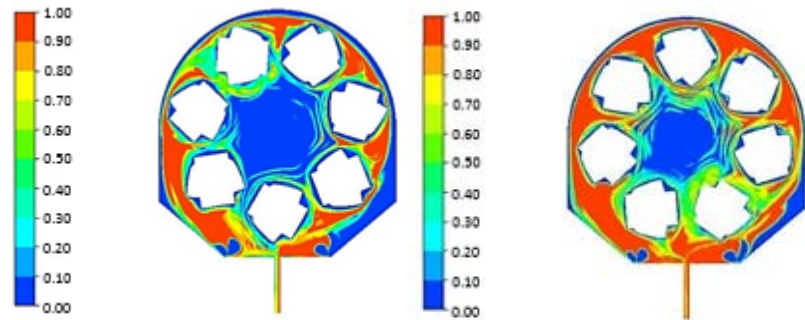


Figure A. Cross-sectional view of the vacuum chamber, at respectively $t=10$ s and $t=20$

Purpose: The aim of the study is to obtain the optimized PVD HMDSO polymerization process conditions and parameters for automotive industry

Theory and Methods:

First HMDSO pipeline were analyzed by numerical methods and equal distribution is achieved by improving the pipe dimensions. Then vacuum medium's central rotation and substrate's rotation were analyzed in order to achieve better contact duration between parts and the monomer (HMDSO). The simulation results were verified by Taguchi experimental design.

Results:

According to simulation and experimental results, low and high rotational speeds effect monomer distribution negatively. The substrates rotational speed should be 7 rev/min for better penetration of the monomers to the part surface.

Conclusion:

It is proved that the simulation studies can lead to PVD process optimization for practical process and part problems. It is significantly observed that the thickness of the thin film layer of HMDSO is increased on the part surface homogeneously after the study.



PVD vakum ortamında HMDSO polimerizasyonunun otomotiv endüstrisi için nümerik olarak incelenmesi ve proses optimizasyonu

İbrahim Emrah Sözer^{1*}, Serkan Geçim², Gökmen Kıdık³, Mustafa Cemal Çakır¹

¹Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, Bursa, Türkiye

²Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 16310, Yıldırım, Bursa, Türkiye

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34467, Ayazağa, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- HMDSO monomer salınım sisteminin nümerik analizi,
- CFD simülasyonuna deneysel yaklaşım,
- PVD HMDSO polimerizasyonu için proses parametre optimizasyonu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.12.2019

Kabul: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.656258

Anahtar Kelimeler:

PVD,
fiziksel buhar biriktirme,
HMDSO polimerizasyonu,
ince film kaplama,
metalizasyon

ÖZET

Far yansıtıcı yüzeyleri içeren alt parçaların çevresel faktörlere dayanımının sağlanması için Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) proseslerinde alüminyum kaplama üzerine koruyucu film tabakası oluşturulmaktadır. Bu çalışmada, PVD proseslerinde koruyucu film tabakası oluşturmak için kullanılan Heksametildisiloksan (HMDSO) monomeri salınım hattının Sonlu Hacimler Yöntemi kullanılarak, vakum çanı içerisinde hat boyunca homojen salınım olacak şekilde optimizasyonu sağlanmıştır. Bununla birlikte vakum çanına salınan HMDSO monomerinin polimerizasyon öncesi eşit dağılımı için parça altlıkları dönüş mekanikleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonları ile analiz edilmiş ve deneysel uygulamalar ile sonuçlar doğrulanmıştır. Çalışma öncesinde vakum çanı içerisinde farklı bölgelerdeki parçaların Sodyum Hidroksit (NaOH) dayanım süreleri 350-550 saniye arasında iken, çalışma sonrasında dayanım süreleri tüm bölgeler için 1000 saniye üzerine taşınmıştır. Bu sayede parça nihai ömrü uzatılmış ve parçanın çevresel faktörlere karşı dayanımı artırılmıştır. Bu çalışma sayesinde 2,84 m³ hacmindeki vakum çanında kaplanan parçalarda istenilen kalite gereksinimi çan içerisindeki farklı bölgelerdeki tüm parçalar için sağlanmıştır. Tek altlıklı, 1,13 m³ hacme sahip vakum çanı olan yeni makinelere ihtiyaç kalmamış, büyük çana sahip makineler ile ise 2 katı fazla üretim çıktısı alınmıştır. Gerek literatürde gerekse tedarikçi firmalar tarafından yürütülen çalışmalarda bu makalede gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Process optimisation of HMDSO polymerisation in PVD vacuum medium by numerical analysis for automotive industry

H I G H L I G H T S

- Numerical Analysis of HMDSO monomer releasing system
- Experimental approach to CFD simulations,
- Optimization of process parameter for PVD HMDSO polymerization

Article Info

Research Article

Received: 06.12.2019

Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.656258

Keywords:

PVD,
physical vapor deposition,
HMDSO polymerization,
thin film layer,
metallization

ABSTRACT

A protective film layer is formed over aluminum coating with Physical Vapor Deposition (PVD) processes to ensure the resistance to environmental factors of the sub-components that include headlight reflective surfaces. Increasing endurance of the sub-components to environmental factors is demanded with the development of automotive quality demands. In this study, Hexamethyldisiloxane (HMDSO) monomer releasing system that is used to form a protective film layer in PVD processes, has been optimized for releasing homogeneously through the pipeline to the vacuum chamber by using finite volumes method. In addition, for uniform distribution of the HMDSO monomer release before polymerization into the vacuum medium, the substrate's jig revolution mechanics were analyzed by Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and the results were verified by experimental applications. The Sodium Hydroxide (NaOH) resistance of parts in various regions of the vacuum chamber was between 350-550 seconds before the study. However, it has been carried to over 1000 seconds for all regions after the optimisation process. Thus, ultimate life of the part and parts' resistance to environmental factors are increased. Thanks to this study, the desired quality requirement for the sub-components that are coated in the vacuum chamber with a volume of 2,84 m³ was provided for all parts in different regions within the chamber. There is no need for new single planet machines with 1,13 m³ volume vacuum chamber and production output that was obtained with the bigger chamber machine is doubled. No similar works have been found that are carried out by suppliers or in the literature.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ibrahimemrahsozer@gmail.com, serkan.gecim@gmail.com, kidik.gokmen@gmail.com, cemal@uludag.edu.tr / Tel: +90 535 747 7251

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

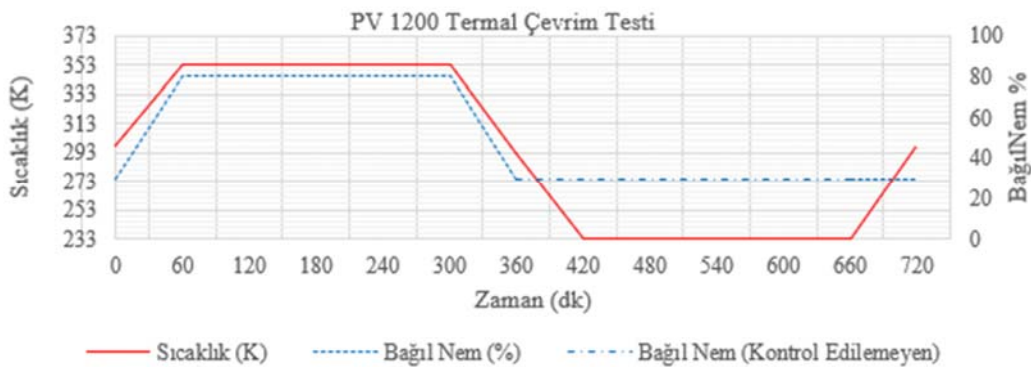
Polimerik malzemeler üretilebilirlik, düşük maliyet, düşük yoğunluk ve esnekliği açısından öne çıksa da; bazen yüzey özellikleri, parlaklık, ıslanabilirlik, çizilmeye karşı direnç ya da sürtünme direnci istenilen seviyede olmayabilir. Yüzey işlem uygulamaları ile polimerik malzemenin karakteristik özellikleri değiştirilmeksizin, yüzey özellikleri istenilen seviyeye getirilebilir [1].

Otomotiv aydınlatma sektöründe, yansıtıcı yüzey oluşturmak veya estetik zenginlik katmak için, fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ile alüminyum kaplanmaktadır. Alüminyum kaplama sonrası koruyucu film tabakası oluşturulmaz ise çevresel etkilere karşı alüminyum direnci müşteri beklentilerini karşılamamaktadır. Mikro-elektronik uygulamalar ve optik yüzeylerin kaplanmasında silikon oksit filmler yaygın olarak kullanılmaktadır [2-4]. Bu sebeple Tetraetoksilan (TEOS) ya da heksametildisiloksan (HMDSO) silisyum-oksit film, biriktirme amacıyla, polimerizasyon reaksiyonu için besleme hammaddesi olabilir [5]. Alüminyum kaplı parça üzerine HMDSO monomer buharının polimerizasyonu ile silikon oksit koruyucu katman buharı biriktirilerek parça ömrü ve kalitesi artırılmaktadır. Parça tasarımı, kullanılan hammadde cinsi ve ortam koşulları, optik ve ısıl test sonuçlarının yanısıra kimyasal dayanım test sonuçlarını da etkilemektedir. Ancak kimyasal direnç için özellikle koruyucu film tabakasını oluşturan plazma polimerizasyon kalitesi daha önemlidir. Reaktör tipi, parça geometrisi, gaz kompozisyonu ve akışı, uygulanan gerilim miktarı, ortam sıcaklığı ve basıncı plazma polimerizasyonunu doğrudan etkilemektedir [6].

Gelişen ana sanayi ihtiyaçları sonrası yeni standartlar yayınlanmaktadır. Alüminyum kaplı parçalar için dayanım talepleri yenilenmiştir. Kaplamanın kalitesi, yeni projeler için, VW (Volkswagen - TL 207) test standartlarına ve bu standardın şart koştuğu optik, termal, kimyasal test sonuçlarına göre değerlendirilmektedir. VW şartnamesinde yer alan PV1200 termal çevrim testi bu alanda geçilmesi gereken en önemli testlerden biridir. PV1200 termal test

şartını anlatan grafikler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 1). İklimlendirme kabineine atılan alüminyum kaplı bitmiş ürün ve alt parçalar, yaklaşık 298 K (oda sıcaklığı) ve %30 bağıl nem ortam koşulundan 60 dakika içerisinde 353 K sıcaklık ve %80 bağıl nem ortam koşuluna getirilmektedir. Parçalar 240 dakika bu şartlara maruz bırakıldıktan sonra 120 dakika içerisinde ortam koşulları 233 K sıcaklık ve %0 bağıl nem (nemsiz) ortam koşuluna getirilmektedir. Bu şartlarda 240 dakika bırakılan parçalar sonrasında 60 dakika içerisinde oda sıcaklığına soğutulurak test sonuç ölçütlerine göre değerlendirilmektedir.

6 altlıklık, 2,84 m³ hacmindeki vakum çanında kaplanan tüm parçalar PV1200 testini geçememiş, test sonrası alüminyum kaplı yüzeylerde bozulma ve oksitlenmeler meydana gelmiştir (Şekil 2). Testin geçer ölçütü alüminyum kaplı yüzeyde hiç bozulma olmamasıdır. NaOH kimyasal test sonuçlarında ise çan içerisinde farklı bölgelerdeki parçalar için değişkenlik görülmektedir (Şekil 2). Aynı dayanım sürelerinin elde edilebilmesi ancak koruyucu film tabaka kalınlıklarının eşit oluşturulabilmesi halinde gerçekleşecektir. Tabaka kalınlığındaki farklılıklar polimerizasyon esnasında homojen salınımın ve çan içerisindeki her bölgeye eşit dağılımın gerçekleşmediğini ispatlamaktadır. Çan içerisinde altlıkların konumlandırılması Şekil 2 de gösterilmiştir. Literatürde birden fazla altlıklık ve büyük hacimdeki vakum çanında homojen monomer dağılımı optimizasyonu üzerine çalışmaya rastlanmamıştır. Tedarikçi firma ile fikir alışverişinde bulunulmuş ancak önerilen deneme parametreleri ile de sonuç alınamamıştır. Bu sebeple elimizdeki makineler ile müşteri şartlarının karşılanması için analiz çalışmalarının yapılması şart olmuştur. HMDSO beslenmesi sırasında ortam basıncının 2 Pa kadar düşük olması ile birlikte HMDSO monomeri vakum çanı içerisine girer girmez gaz fazına geçmektedir. Polimerizasyon levhası ile ortamda bulunan gazlar (hava ve HMDSO monomeri) 13,56 MHz frekans RF güç kaynağı kullanılarak uyarılmış hale getirilmekte, serbest radikaller oluşturularak polimerizasyon tamamlanmakta ve sonrasında parça üzerinde biriktirmektedir.



Şekil 1. PV1200 termal test ortam koşulları sırasıyla sıcaklık ve bağıl nem –zaman grafikleri [7]
(PV1200 thermal test conditions respectively temperature and relative humidity - time graphics [7])

Vakum çanında farklı yerlerde monomer yoğunlaşması gerçekleşebilir ya da salınan monomerin parçaya ulaşmadan vakum ağzından emilimi de söz konusu olabilir. Homojen salınım ve eşit dağılım ile monomerin parçaya yakın yerlerde yoğunlaşması ya da parça ile birlikte sürüklenmesi aktif plazma alanına girildiğinde daha fazla monomerin polimerizasyonuna fırsat sağlayacaktır. Bu da polimer uzunluğunun artmasına katkı verecektir. Bunun dışında özellikle plazma aktif alanına yakın kısımlarda monomer yoğunlaşması kaynaklı kısmi basınç artışı plazma etki alanını küçültmektedir. Uygulanan voltaj arttıkça polimer film kalınlığı artmakta, aksi hallerde voltaj düşmesi ile film kalınlığının azalması tetiklenmektedir [8]. Monomer yoğunlaşması arttıkça ortam boğulmakta, monomer başına düşen enerji miktarı azaldığı için polimerleşme sonlanarak parça üzerine birikme oranı azalmaktadır [9].

2 Pa basınçta vakum çanına monomer beslenmektedir. Monomer konsantrasyonun lokal olarak artması ve basıncın kısmi olarak 133 Pa üzerine çıkması halinde toz şeklinde polimer oluşumu tetiklenmektedir. "Gaz Faz Modeli" olarak adlandırılan bu model tercih edilmemektedir [10-12].

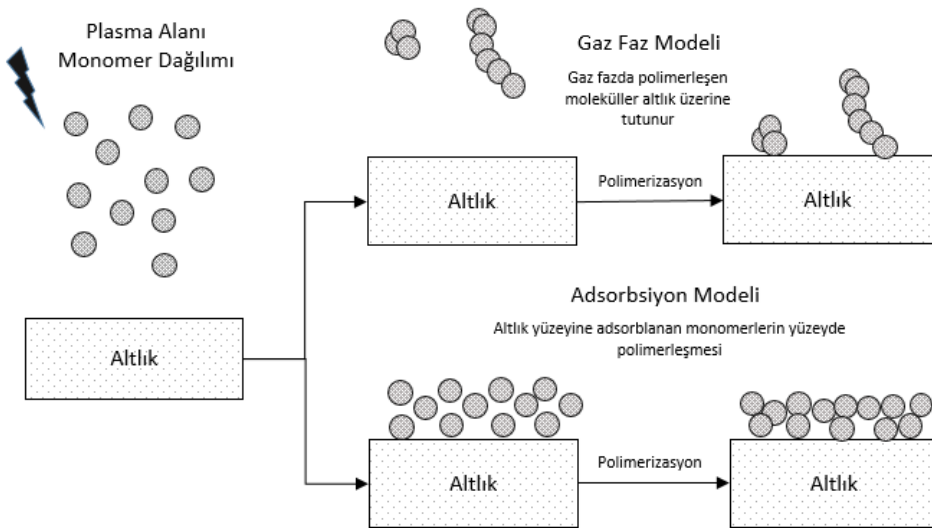
Polimerizasyonun oldukça düşük basınçlı ortamda olması; monomerin kat ettiği Ortalama Serbest Yol 'u arttırdığı ve gaz fazında daha düşük çarpışma oranları olduğu için "Adsorbsiyon Modeli" ile adlandırılan mekanizma tercih edilmektedir (Şekil 3) [13, 14]. Bu model ile daha uzun polimerizasyon zinciri oluşumu sağlanmaktadır. Yapılan çalışmada bu modele uyacak şekilde, vakum çanı içerisine, hat boyunca homojen monomer salınımı ve altlıklara polimerizasyon öncesi eşit nüfuziyet sağlanması hedeflenmiştir.

HMDSO film tabakasının kalınlığına ve polimerizasyon reaksiyon mekanizmasına göre koruyucu tabakanın kimyasala dayanımı değişmektedir. Bu çalışmada, HMDSO besleme borusu boyutları HMDSO monomerinin sisteme en homojen şekilde giriş yapmasını sağlayacak şartlarda optimize edilecektir. Proses noktasına etki edecek yukarıda belirtilmiş tüm esaslar göz önünde bulundurularak monomerin çan içerisindeki altlık hareketlerine göre davranışları incelenecektir. Monomerin parçaya yakın yerlerde yoğunlaşması ya da parça ile birlikte sürüklenmesi durumunun yakalanması hedeflenmektedir. Aktif plazma



Şekil 2. Sırasıyla PV1200 termal test - NaOH testi sonrası bozulmuş parçalar ve çan içerisinde altlıkların konumlandırılması

(Deformed part after PV1200 thermal test –NaOH test sincerely and 2 planets positioning in the PVD chamber)



Şekil 3. Plazma polimerizasyon mekanizması gaz fazı ve adsorbsiyon modeli [12]

(Gas phase and adsorption layer model for plasma polymerization)

alanında daha fazla monomeri üzerinde barındıran parça için voltaj düşümüne fırsat verilmeden uygun polimerizasyon koşullarının sağlanması ile daha uzun polimer zinciri elde edilecektir. Kimyasal direnç artışı ve neme karşı dayanımı deneysel doğrulamalar ile ispatlanacaktır.

2. DENEY DÜZENEĞİ VE KABULLER (EXPERIMENTAL SETUP AND ASSUMPTIONS)

Bu çalışma seri üretimde kullanılan 6 altlıklı, 2,84 m³ hacminde vakum çanına sahip Arzuffi MF 1700 PVD kaplama makinesinde yapılmıştır. HMDSO tank sıcaklığı 310 K olarak ayarlanmıştır. Monomer vakum çanı içerisine girer girmez gaz fazına geçmekte, bu buharlaşma sebebi ile sıcaklık 308 K 'e düşmektedir. Deneylerde ortam basıncı 2 Pa olarak ayarlanmıştır.

Çalışmada HMDSO salınımının iyileştirilmesi için birbirlerine bağlı iki farklı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Öncelikle HMDSO salınım hattı optimizasyonu, sonrasında ise altlık devir sayısı analizi ANSYS Fluent 15.1 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir [15]. Analizi yapılacak olan HMDSO besleme boru hattı paralel bağlı iki kol üzerinden vakum çanına malzeme salınımı yapmaktadır. Çapı 1,75 mm olan 13 adet deliğe sahiptir (Şekil 4). Başlangıç koşullarında ana boru iç çapı 7,0 mm'dir.

Analizlerde kullanılan diğer kabuller ve sınır koşullar aşağıdaki gibidir;

- HMDSO monomeri boru içerisinde tamamen sıvı fazındadır ve sisteme giriş sıcaklığı 308 K'dir
- Deliklerden çıkan monomer 2 Pa basıncındaki ortama akmaktadır.
- Kullanılan monomerin sıvı fazdaki yoğunluğu 764 kg/m³'tür.
- Akışkanın kinematik viskozitesi 0,65 x 10⁻⁶ m²/s'dir.
- 120 mL/min debiyi sağlayacak şekilde sisteme kütle girişi sağlanmıştır.
- Tek fazlı zamandan bağımsız bir model kullanılmıştır.

- K-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır [16, 17].

Sonlu hacimler yöntemi ile çözümü gerçekleştirilen süreklilik ve momentum denklemleri Eş. 1 ve Eş. 2'de belirtilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

HMDSO monomeri yaklaşık 7,64 x 10⁻⁹ kg/s debi ile vakum çanına girmektedir. Kullanılan monomerin gaz fazındaki yoğunluğu 1,2473 x 10⁻⁴ kg/m³, havanın çalışma koşullarındaki (vakum altındaki) yoğunluğu 2,225 x 10⁻⁵ kg/m³'tür. Hesaplar esnasında her iki gazın da viskozitesi standart hava viskozitesi kabul edilmiştir. Analizler problemin çözümünü daha pratik hale getirmek için çeşitli adımlarla yapılmıştır. Zamandan bağımsız tek fazlı 3D ve 2D analizler yapıldıktan sonra elde edilen bilgiler ışığında zamana bağlı çift fazlı akış analizi yapılmıştır. Zamana bağlı çift fazlı akış analizinde VOF (Volume of Fluid) modeli kullanılmıştır [18]. Sonlu hacimler yöntemi ile çözümü gerçekleştirilen süreklilik ve momentum denklemleri Eş. 3ve Eş. 4'deki gibidir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \rho \vec{g} + \vec{T} \vec{T}_\sigma \quad (4)$$

ρ : karışım yoğunluğu, $\rho = \sum a_q \rho_q$

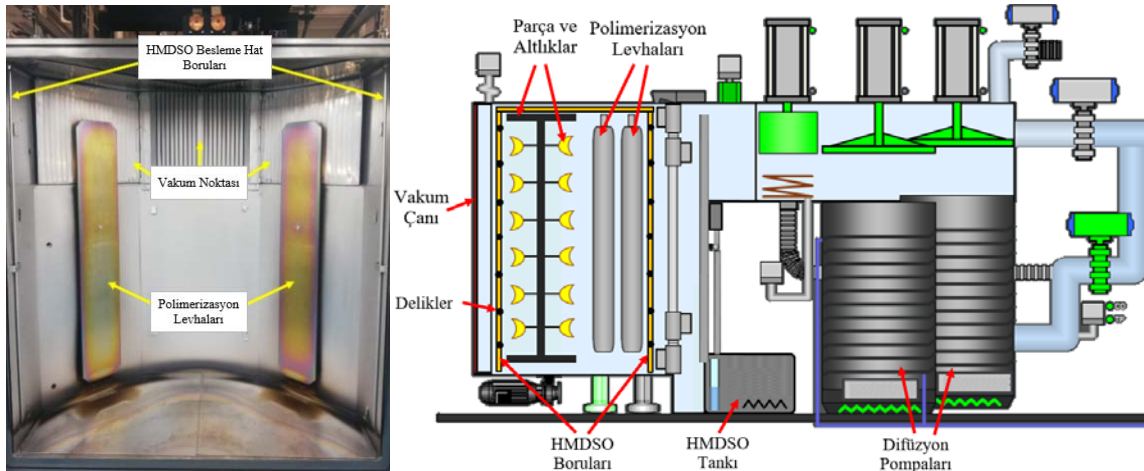
μ : karışım viskozitesi, $\mu = \sum a_q \mu_q$

\vec{v} : karışım hızı, $\vec{v} = \frac{1}{\rho} \sum_{q=1}^n a_q \rho_q \vec{v}_q$

\vec{T}_σ : faz arayüzündeki yüzey gerilim kuvveti

a_σ : q fazının hacimsel oranı

$0 < a_q < 1$ ve $\sum_{q=1}^n a_q = 1$



Şekil 4. Çan içi polimerizasyon levhası - HMDSO boru hattı gerçek ve şematik görüntüleri
(Vacuum Chamber Polymerization plate - HMDSO pipeline actual and schematic views)

μ_q : q fazının viskozitesi
 \vec{v}_q : q fazının hızı

3. GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZLER VE TARTIŞMA (ANALYSIS CONDUCTED AND DISCUSSION)

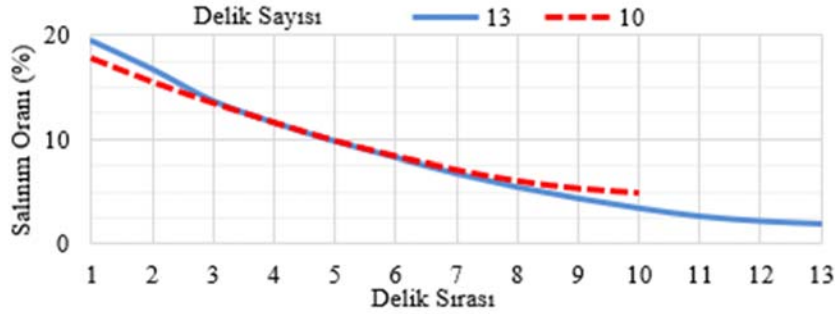
3.1. HMDSO Hattı Optimizasyon Analizi (HMDSO Line Optimization Analysis)

HMDSO vakum çanı içerisinde besleme boru hattı ile salınmaktadır. Tüm deliklerden homojen salınım sağlanabilmesi için önce mevcut durumda delikler arasında oluşan salınım oranı farkı analiz edilmiştir. Mevcut durumda 1. ve 13. delik arasındaki fark %18 seviyelerindedir (Şekil 5). Delik çapları değiştirilmeden önce delik sayısının azaltılmasının, salınım oranına etkisi incelenmiştir. Delik sayısı 13'den 10'a düşürüldüğünde delikler arasında oluşan salınım oranı farkının %13'lere düştüğü tespit edilmiştir.

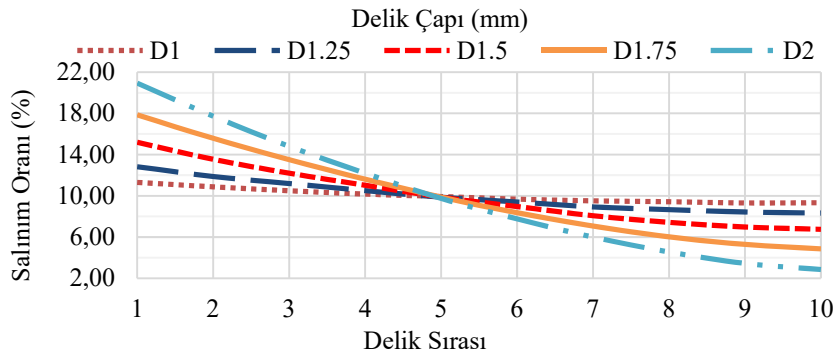
Mevcut durumda en üst ve en alt deliğin proses aktif alanında yer almaması sebebiyle iptal edilmeleri kararlaştırılmıştır. Bu delikler parça bulunan bölgede değildir, HMDSO salınım noktası parça konumlarına göre daha üstte ya da daha altta yer almaktadır. Parçaya direk ulaşmamaktadır. Kalan delikler arası mesafeler de artırılarak 1 deliğin daha iptali ile analiz sonuçlarına paralel durum sağlanmış olacaktır. Sonraki analizlerin tümü 10 delik üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ana boru çapı değiştirilmeden önce delik çaplarının sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. 10

delik ve ana boru iç çapı ölçüsü 7 mm olacak şekilde sabit tutularak analizde delik çapları değiştirilmiştir. Delik çapları küçüldükçe 1. ve 10. delik arasındaki salınım oranı farkı azalmakta, fark belirgin şekilde %2'lere kadar düşmektedir (Şekil 6). Sonraki analizlerde salınım oranı farkı en az olan 3 delik çapı (1 - 1,25 - 1,5 mm) dikkate alınmış ve ana boru çapı değiştirilmiştir. Ana boru çapı 7 mm'den; sırasıyla 10 mm ve 15 mm'ye çıkarıldığında 1. ve 10. delik arasındaki salınım oranı farkının azaldığı gözlemlenmektedir. En iyi sonuç ana boru çapının 15 mm ve delik çapının 1 mm alındığı analizde alınmıştır. 1. ve 10. delik arasındaki salınım oranı farkının %0,2'nin altına düştüğü, maksimum ve minimum değerler arasındaki farkın yine en düşük seviyeye geldiği ve ayrıca dalgalanmanın da daha az seviyede olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7).

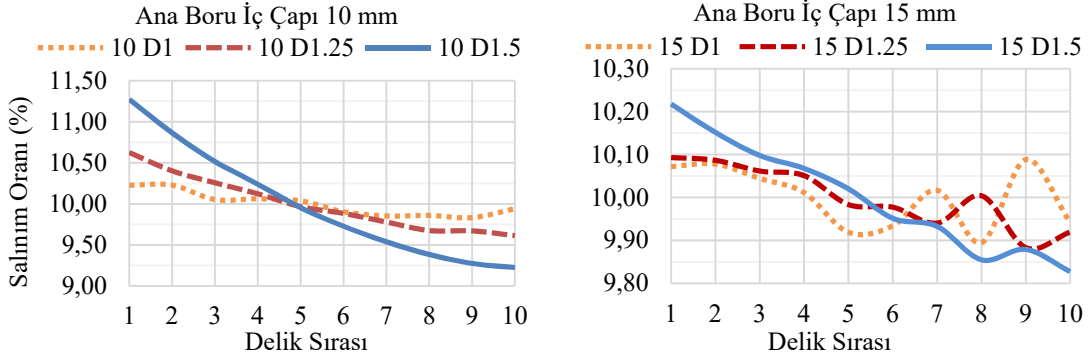
Özetle; delik sayısının azaltılması, ana hattın çapının artırılması ve delik çapının azaltılması ile boru hattı boyunca basınç kayıpları ve delikler arasındaki basınç dağılımındaki sapmalar azalmıştır. Bunun sonucunda boru hattındaki her bir delikten birbirine yakın oranda salınım sağlanabilmektedir (Şekil 8). Deneysel doğrulama faaliyetlerinin yürütüleceği makinede HMDSO boru hattı 10 delik, her delik çapı 1 mm ve boru iç çapı 15 mm olacak şekilde revize edilmiştir. 2,84 m³ hacimdeki PVD vakum çanı boru hattından eşit salınım sağlanarak kinematik analizler için olgun ortam sağlanmıştır. Bu şekilde kinematik analizler sonrasında alınan sonuçların doğrulanması ve yeterliliğin sağlanması mümkün olmuştur.



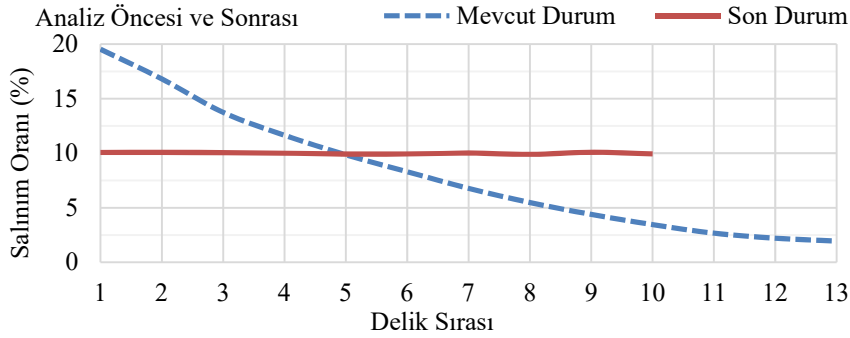
Şekil 5. 13 ve 10 delikli HMDSO hattı için salınım oranı karşılaştırması
(Flow difference comparison for 13 and 10 hole HMDSO line)



Şekil 6. Farklı delik çaplarında HMDSO hattı için salınım oranı karşılaştırması
(Flow difference comparison for HMDSO line with different hole diameters)



Şekil 7. Farklı iç çapta HMDSO hattı ve farklı delik çapları ile salınım oranı karşılaştırması
(Flow difference in comparison with different internal diameters and different hole diameters of HMDSO line)



Şekil 8. Mevcut durumun ve analizler ile gelinen son durumun karşılaştırması
(Comparison of current situation and the latest situation after analysis)

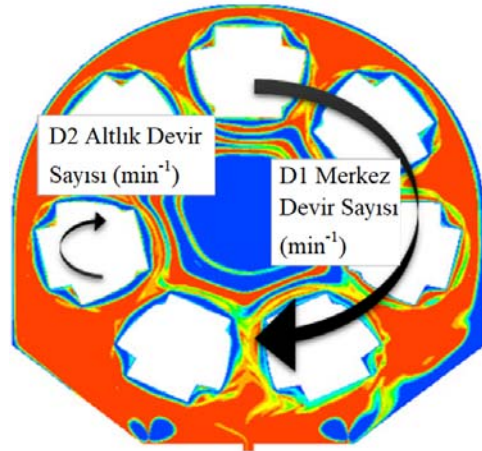
3.2. Altlık Devir Sayısı Optimizasyon Analizi (Substrate Revolution Value Optimization Analysis)

Çalışmanın ilk aşamasında HMDSO besleme hattı optimizasyonu ile akışkanın sisteme homojen şekilde giriş yapması (çan yüksekliği boyunca sabit kabul edilebilir seviyeye gelmesi) sağlanmıştır. Bu sayede parça hızının etkisinin ve optimum devir sayısının belirlenmesi için vakum çanı içerisinde 2 ve 3 boyutlu analizlerin gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur. Parçaların takıldığı altlıkların hareketlerinin HMDSO'nun vakum çanı içerisinde kaplama uygulanacak yüzeylere ulaşmasına olan etkisi incelenmiş, yüzey temasının en fazla gerçekleşeceği devir sayısı belirlenmiştir. Analizlerde Arzuffi 1700 MF PVD makine ölçüleri birebir kullanılmıştır. Vakum çanına salınan HMDSO monomerinin parça devir hızlarına bağlı olarak ortalama yayılımı, zamandan bağımsız ve zamana bağımlı olacak şekilde incelenmiştir. D1 değeri altlıkların çan merkezinde dakikada yaptığı devir sayısını (min^{-1}), D2 değeri ise altlıkların kendi eksenleri etrafında dakikada yaptığı devir sayısını (min^{-1}) temsil etmektedir (Şekil 9).

3.2.1. Zamandan bağımsız tek fazlı 3 boyutlu analiz (Time independent single phase 3 dimensional analysis)

İlk olarak 3 boyutlu zamandan bağımsız çözüm yapılmıştır. Bu çözümde sadece tek faz kullanılmıştır. Amaç sistemdeki akış karakteristiğini ortaya koymaktır. Merkez devri (D1) ve altlık devri (D2) değerleri değiştirilerek parçaların

bağlandığı altlıkları içine alacak hayali bir silindir etrafındaki hız büyüklükleri ve bu hızların kapladığı bölgedeki hacimsel değerler hesaplanmıştır. D1 ve D2 birbirine göre zıt yönde döndüklerinden, birbirlerine göre bağlı hız D2'nin etrafındaki akışkanın hızını etkilemektedir. D2'nin artışı ile ortalama hızın arttığı görülmektedir. Bununla birlikte D1 değerinin artışı da genel olarak ortalama hızı artırmaktadır (Şekil 10).



Şekil 9. Vakum çanının yataydaki kesit görüntüsü D1 merkez - D2 altlık devir sayısı
(Horizontal cross-sectional view of vacuum chamber D1 center - D2 jig revolution)

3.2.2. Zamandan bağımsız tek fazlı 2 boyutlu analiz (Time independent single phase 2 dimensional analysis)

Bu bölümde analizlerde iki boyutlu uygun bir kontrol hacmi ele alınmış ve elde edilen sonuçlar 3 boyutlu durum ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde yine zamandan bağımsız tek fazlı durum ele alınmıştır. Giriş hızı olarak 100 m/s alınmıştır. 3 boyutlu analizde giriş hızı 104 m/s'dir.

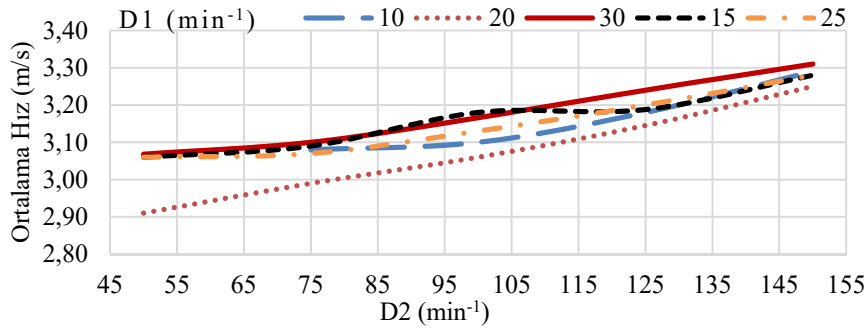
Şekil 11'de devir sayısı ile ortalama hız arasındaki ilişkiyi veren grafik görülmektedir. Üç boyutta olduğu gibi burada da devir sayılarının artışı ile ortalama hız artmaktadır. Tek fazlı analizlere göre kaplanacak parçanın bağlı hızının artması etrafındaki akışkanın daha hızlı hareket etmesine sebep olmaktadır. Bu durumun parçanın daha fazla akışkan ile temas etmesine olanak sağlaması beklenmektedir. Hava ve HMDSO monomerinin oluşturduğu aktif plazma alanında monomer ile parça arasındaki temas miktarının artması halinde polimer zincirinin uzaması sağlanacak ve parça üzerinde oluşturulan koruyucu tabaka kalınlığı, dolayısıyla parçanın dış etkenlere dayanımı artırılmıştır. Parça ile birlikte sürüklenen ya da çan içerisinde asılı halde olan ve o an yüzeye yakın diğer monomerlerin de yakalanması polimerizasyonu ayrıca kuvvetlendirecektir.

3.2.3. Zamana bağlı çift fazlı analiz (Time dependent dual phase analysis)

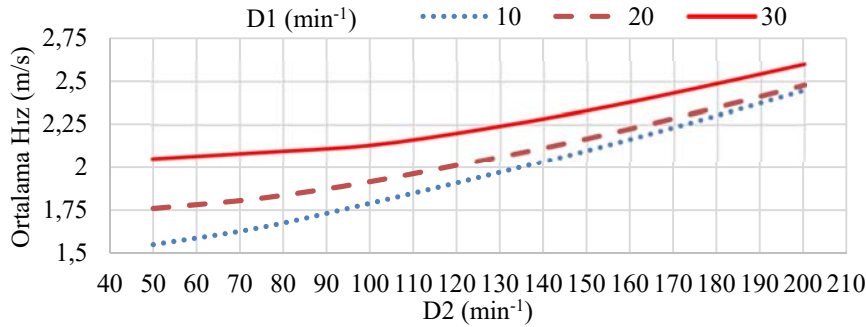
Bu bölümde zamana bağlı olarak monomer ve havanın akış karakteristiği belirlenmiştir. Bir önceki bölümde hız artışının

kaplanacak parçanın daha fazla akışkana temas etmesine imkân sağladığı ortaya konulmuştur, fakat çalışma esnasında sistem her ne kadar vakum ortamında da olsa HMDSO vakum çanına salındığı anda kaplanacak olan parçaların etrafında eser miktarda hava bulunmaktadır. Zamanla hava fazının yerini HMDSO fazı alacaktır. Bu sebepten ötürü devir sayısının artması veya azalması, HMDSO'nun hava fazının içinden geçmesi ya da yer değiştirerek proses parçasına ulaşmasında farklı etkiler yaratacaktır. Analizler ilk 20 saniyelik durum için ele alınmıştır. Yüzeye temas eden HMDSO monomerinin hacimsel oranının devir sayılarına ve zamana göre değişimi incelenmiştir.

Çan merkezinden ve parçaların takıldığı altlıkların devir sayısının, HMDSO yüzey temas oranına etkisi D1 devir hızı sabit tutularak, farklı D2 devir hızları için incelenmiştir. X eksenini zamanı, Y eksenini ise tüm yüzeye monomerin temas oranını normalize edilmiş olarak göstermektedir. Analizler farklı D1 (4-7-10 min⁻¹) hızları için tamamlanmış, 3 farklı analizden çıkan grafikler aşağıda paylaşılmıştır (Şekil 12-Şekil-14). Şekil 12'de D1'den bağımsız olarak D2 devir sayısının düşük olmasının, HMDSO yüzey temas oranını arttığı gözlemlenmiştir. Daha önceki tek fazlı analizlerde ise D2 devir sayısı artışı HMDSO yüzey temas oranını arttırmaktaydı. D2 devir sayısının düşük olması daha doğrudur, çünkü önce parçaya temas halinde olan havanın HMDSO ile yer değişmesi gerekmektedir. Monomerin düşük basınçta Ortalama Serbest Yol miktarının yüksek olması altlık yüzeyine tutunma olasılığını arttırmaktadır. Polimerizasyon süreci, Gaz Faz Modelinde olduğu gibi



Şekil 10. 3 boyutlu analizde merkez ve altlık devirlerinin akışkan hızı ile ilişkisi
(Relation of center and jigs revolutions with fluid velocity in 3D analysis)



Şekil 11. 2 boyutlu analizde merkez ve altlık devirlerinin akışkan hızı ile ilişkisi
(Relation of center and jigs revolutions with fluid velocity in 2 dimensional analysis)

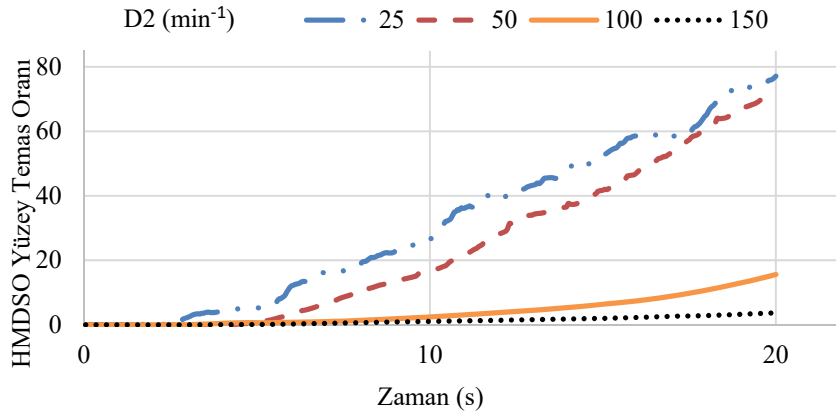
(parça yüzeyinden uzak çan içerisinde herhangi bir yerde) değil de altlık yüzeyine adsorblanan monomer kökleri üzerinden ilerler ise daha homojen ve daha uzun polimerizasyon zinciri oluşturmaktadır [19].

Sistemde ilk başta akışkan olarak havanın olması ve monomerin sisteme girmeden önce havanın bir bağıl hızının olması monomerin parça yüzeyi üzerine nüfuziyetini zorlaştırmaktadır. Monomerin parçaya difüzyonu esnasında, altlık hızının artması monomerin parçaya olan kütle transferini olumsuz yönde etkilemekte, altlık hızının difüzyon gerçekleşme hızından daha hızlı olması değişimin gerçekleşmesini engellemektedir.

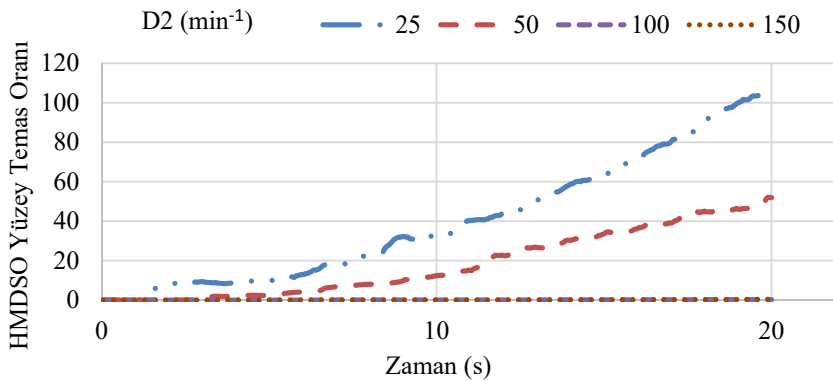
Şekil 13'te D2 devir sayısının düşük olmasının yine HMDSO yüzey temas oranını arttırdığı gözlemlenmektedir. D1'in 4 min^{-1} 'den 7 min^{-1} 'e artırılması ile daha iyi yüzey temas oranı sağlanmıştır. Sistemde ilk başta altlık etrafında bulunan hava katmanının daha çabuk kırıldığı (parça etrafında olan bağıl hızının daha çabuk azaldığı) ve monomer difüzyonunun daha hızlı sağlandığı tespit edilmiştir. Şekil 14'te de D2 devir sayısının düşük olması, HMDSO yüzey temas oranını arttırmıştır. Ancak, D1'in 7 min^{-1} 'den 10 min^{-1} 'e artırılması ile daha kötü yüzey temas

oranı sağlanmıştır. Bu ise şöyle açıklanabilir: sistemde ilk başta altlık etrafında bulunan hava katmanı daha çabuk kırılmasına rağmen girdap etkisi başlamakta ve bu etki herhangi akışkanı altlıktan uzaklaştırmaktadır. Süreç başında hava yüksek devir etkisi ile altlıktan uzaklaşmakta, sonrasında vakum çanı içerisinde konsantrasyonu yüksek monomer ile difüzyonu (yer değişimi) gerçekleşmekte, ancak yine yüksek devir etkisi ile monomerin parçaya yaklaşması engellenmektedir. Altlık bağıl hızının difüzyon gerçekleşme hızından daha yüksek olması parçaya temas oranını azaltmaktadır.

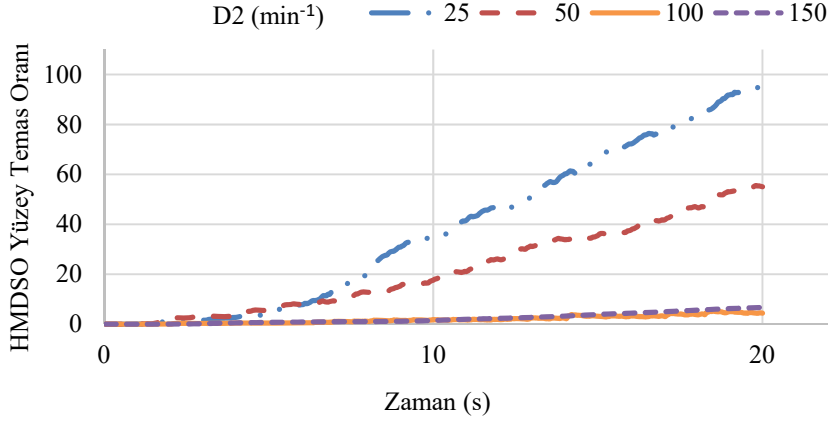
Grafiklere ek olarak akışkanın sistem içinde nasıl davrandığını göstermek amacıyla monomerin daha önce analiz edilen devir sayılarındaki gaz fazı oranları görüntülenmiştir. Y eksenindeki değer normalize edildiği için 100 değeri tüm yüzeye monomerin temas ettiği anlamına gelmemektedir. Şekiller 10. ve 20. saniyeler arasındaki yüzey temas oranlarının karşılaştırılmasıdır. Daha önce elde edilen sonuçlarda D2 devir sayısının düşük olması, HMDSO yüzey temas oranını arttırdığı için çan kesit görüntüleri yalnız D2'nin 25 min^{-1} olduğu haller için paylaşılmıştır (Şekil 15-Şekil 17). Şekil 15 kesit görüntüsü incelendiğinde hem 10. saniye hem de 20. saniye için HMDSO yüzey temas



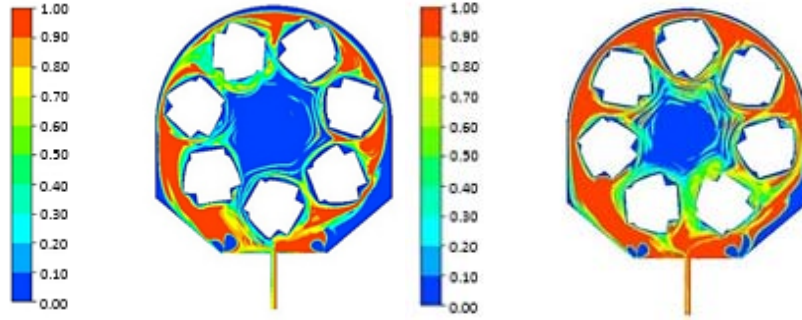
Şekil 12. D1 4 min^{-1} sabit tutularak D2 farklı devir hızlarının HMDSO yüzey temas oranına etkisi
(The effect of different revolution speeds of D2 and keeping D1 4 min^{-1} constant on HMDSO surface contact ratio)



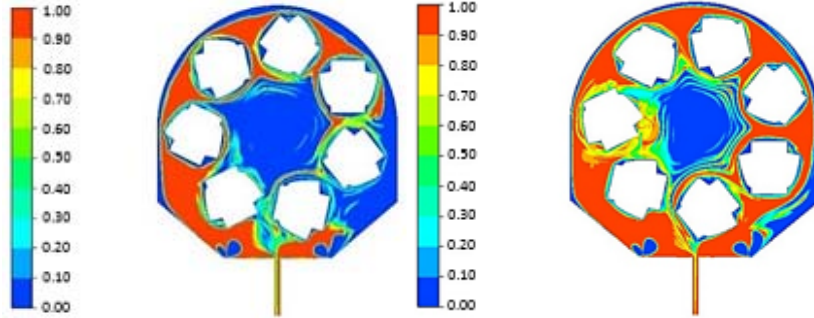
Şekil 13. D1 7 min^{-1} sabit tutularak D2 farklı devir hızlarının HMDSO yüzey temas oranına etkisi
(The effect of different revolution speeds of D2 and keeping D1 7 min^{-1} constant on HMDSO surface contact ratio)



Şekil 14. D1 10 min⁻¹ sabit tutularak D2 farklı devir hızlarının HMDSO yüzey temas oranına etkisi
(The effect of different revolution speeds of D2 and keeping D1 10 min⁻¹ constant on HMDSO surface contact ratio)



Şekil 15. D1=4 min⁻¹ D2=25 min⁻¹ için HMDSO yüzey temas oranı sırasıyla t=10 s ve t=20 s
(HMDSO surface contact ratio at D1=4 min⁻¹ D2=25 min⁻¹ for t=10 s and t=20s respectively)

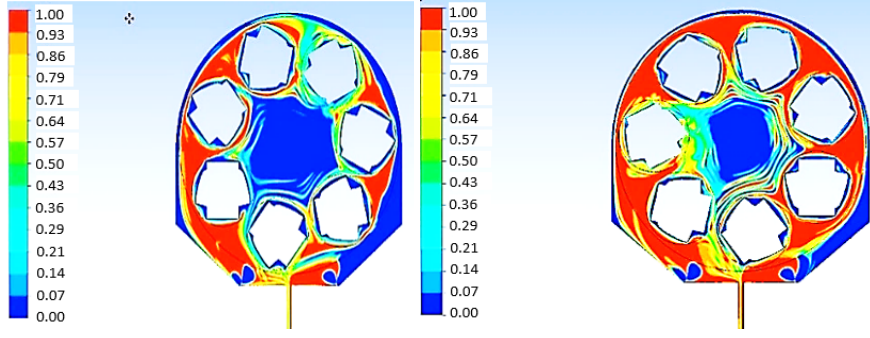


Şekil 16. D1=7 min⁻¹ D2=25 min⁻¹ için HMDSO yüzey temas oranı sırasıyla t=10 s ve t=20 s
(HMDSO surface contact ratio at D1=7 min⁻¹ D2=25 min⁻¹ for t=10 s and t=20s respectively)

oranının daha az gerçekleştiği altlıkların fazlalığı dikkat çekmektedir. Altlıklar etrafında konsantrasyonun en düşük seviyede olduğunu belirleyen mavi rengin daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 16'daki kesit görüntüsü incelendiğinde 4 min⁻¹'e göre HMDSO yüzey temas oranının 7 min⁻¹'de daha fazla gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Altlıklar etrafında konsantrasyonun en düşük seviyede olduğunu gösteren mavi renkli bölgeler mikro ölçekte incelendiğinde özellikle 20. saniye sonrasında mavi rengin sarı ve yeşile döndüğü tespit edilmiştir. Başka bir deyişle altlık çevresindeki hava ile monomer uygun şekilde harmanlanmaya başlamıştır. Monomerin yüzey teması ve

oksijen ile düzgün karışımı için uygun sonuç alınmıştır. Altlıkların ortasında bulunan çan ortasındaki kısım karşılaştırıldığında, orta kısma 4 min⁻¹'de 7 min⁻¹'e göre daha fazla monomerin eriştiği gözlemlenmiştir. Özellikle D1 devrinin artmasıyla, vakum ağzının sağ ve solundan salınan monomerin çanın orta kısmına erişimi engellenmektedir. Ancak, bu durum yüzey temas oranına olumsuz etkide bulunmamaktadır.

Şekil 17'deki kesit görüntüsü incelendiğinde HMDSO yüzey temas oranının 10 min⁻¹'de, 7 min⁻¹'e göre daha az gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Altlıklar etrafında



Şekil 17. $D1=10 \text{ min}^{-1}$ $D2=25 \text{ min}^{-1}$ için HMDSO yüzey temas oranı, sırasıyla $t=10 \text{ s}$ ve $t=20 \text{ s}$ (HMDSO surface contact ratio at $D1=10 \text{ min}^{-1}$ $D2=25 \text{ min}^{-1}$ for $t=10 \text{ s}$ and $t=20 \text{ s}$ respectively)

konsantrasyonun en düşük olduğunu gösteren mavi renklerin 4 min^{-1} 'de olduğu gibi daha fazla olduğu görülmektedir. Altlıkların ortasında bulunan çan ortasındaki kısma 10 min^{-1} 'de en az sayıda monomer erişmiştir.

Tüm analizler karşılaştırıldığında özellikle $D1$ 'in 7 min^{-1} olduğu durumda tüm altlıkların etrafında yüzey temas oranı en yüksek olmaktadır (Şekil 16).

Çift fazlı analizlerde devir sayılarının artışı sistem üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Bu durum bir önceki bölümde elde edilen sonuçlarla çelişki göstermektedir. Sistemde tek bir akışkan olması halinde devir sayılarını artırmak akışkanın yüzeye temas etmesi açısından pozitif etki yaratmaktadır. Diğer taraftan sistemde iki farklı akışkan olduğunda, bu etki başlangıçta hakim olan hava akışkanının belirli bir bağıl hızının olmasından dolayı farklılık göstermektedir. Sisteme salınan HMDSO monomerinin parça üzerindeki hava tabakasının yerini alması tek fazlı proseslere kıyasla daha uzun sürmektedir. Bu sebeple olabilecek en düşük $D2$ devrinin elde edilebilmesi için merkez devri ile altlıklar arasındaki hareket aktarımını sağlayan dişli oranı değiştirilerek, $D2$ devrinin $26,2 \text{ min}^{-1}$ olması sağlanmıştır. Deneysel doğrulama faaliyetlerinin yürütüleceği makinede dişli oranı değişimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca merkez devir sayısının teorik olarak optimum değeri 7 min^{-1} olarak belirlenmiş ve deneysel faaliyetler bu parametreler ile yapılmıştır.

4. ANALİZ SONUÇLARININ DOĞRULANMASI İÇİN DENEYSEL TASARIM (DESIGN OF EXPERIMENTS FOR THE VERIFICATION OF ANALYSIS RESULTS)

Analiz sonuçlarına göre imal edilen HMDSO besleme borusu, sağ ve sol 2 kol üzerinden vakum çanına besleme yapmaktadır. Boru dış çapı 16 mm, iç çapı 15 mm'dir. Üzerinde toplam 10 sağ ve 10 sol olmak üzere 20 delik bulunmaktadır. Her deliğin çapı 1 mm'dir. HMDSO tank sıcaklığı 310 K olarak ayarlanmıştır. Monomer vakum çanı içerisine girer girmez gaz fazına geçmekte, bu buharlaşma sebebi ile sıcaklık 308 K 'e düşmektedir. Doğrulama çalışmaları, belirlenen parametre değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Vakum çanı içerisine, parça pozisyonu her çevrimde aynı olacak şekilde, en üst, orta ve en alt

yuvaya yükleme yapılmıştır. Şekil 18'de çan içerisindeki altlık konumları gösterilmiştir. Deneylerde ortam basıncı 2 Pa olarak ayarlanmıştır.



Şekil 18. Parçanın altlık üzerindeki pozisyonu (Parts positioning on the jig)

Çift fazlı analizler göz önüne alındığında optimum devir sayısı $D1$ için 7 min^{-1} iken $D2$ devir sayısı düştükçe temas oranı artmaktadır. Bu sebeple olabilecek en düşük $D2$ devri için $26,2 \text{ min}^{-1}$ değeri kullanılmıştır.

Denemeler esnasında HMDSO salınım süresi, valf açıklığı, merkez eksen devir sayısı parametrelerinde değişiklikler yapılarak 1M NaOH çözeltisinin kaplamayı aşındırma süreleri incelenmiştir. 1M NaOH çözeltisine dayanım süresinin artması kaplama kalitesinin arttığını göstermektedir [20]. Deneysel doğrulama çalışmasında Taguchi ortogonal L16 deneysel tasarımı kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Proses parametreleri ve seviyeleri (Process parameters and levels)

Proses Parametreleri	Level-1	Level-2	Level-3	Level-4
Salınım Süresi (s)	30	60	90	120
Valf Açıklığı (mL/min)	40	80	120	160
Merkez Devir (min^{-1})	4	7	9	11

Yapılan çalışmada deneysel tasarım modeline bağlı kalınarak toplamda 16 deneme yapılmıştır. Test sonuçlarının güvenilirliğini arttırmak ve bölgesel değişkenliği tespit edebilmek amacıyla her parçada Şekil 19'da belirtilen 3 ayrı noktaya ve aynı planet üzerinde toplam 3 parçaya (en üst, orta ve en alt yuvalara) test yapılmıştır (Tablo 2). Her çevrim sonrasında toplam 3 parçanın belirlenen 9 farklı noktasına test uygulanmıştır. Sonuç kısmına farklı noktalara uygulanmış NaOH testinden çıkan 9 dayanım süresi değerlerinin ortalaması girilmiştir.



Şekil 19. Parça test ölçüm noktaları ve planet dönüş yönü
(Part's test measurement points and revolution direction)

4.1. Teorik beklentiler (Theoretical expectations)

HMDSO salınım süresinin artması polimerizasyon süresinin de artması anlamına gelmektedir. Bu duruma bağlı olarak, parça üzerine kaplanan PDMS (Polidimetilsiloksan) tabakası kalınlığının artmasıdır [21]. Bununla birlikte uygulanan birim zamanda salınan HMDSO monomer miktarının artması ile serbest radikal oluşum ihtimalinin yükselmesi ve PDMS film kalınlığının da artması beklenmektedir [22]. Kaplama kalınlığının artması ile NaOH çözeltisine karşı direnç artacağından dayanım sürelerinin uzaması beklenmektedir.

Monomer konsantrasyonun lokal olarak artması ve basıncın vakum çanı içerisinde kısmi olarak 133 Pa üzerine çıkması halinde toz şeklinde polimer oluşumu tetiklenmektedir. Bunun dışında kısmi basınç artışı plazma etki alanını küçültmektedir. Polimer film kalınlığı uygulanan voltaj arttıkça artmakta, aksi hallerde voltaj düşmesi ile film

kalınlığının azalması tetiklenmektedir [8]. Bu sebeple kısmi basınç artışlarından kaçınılmıştır. Korumacı film kalınlığının artması ile alüminyum kaplama üzerinde yer alan mikro çatlaklar ve gözeneklerin kapanması ve gaz permabilitesinin azalması beklenmektedir [23].

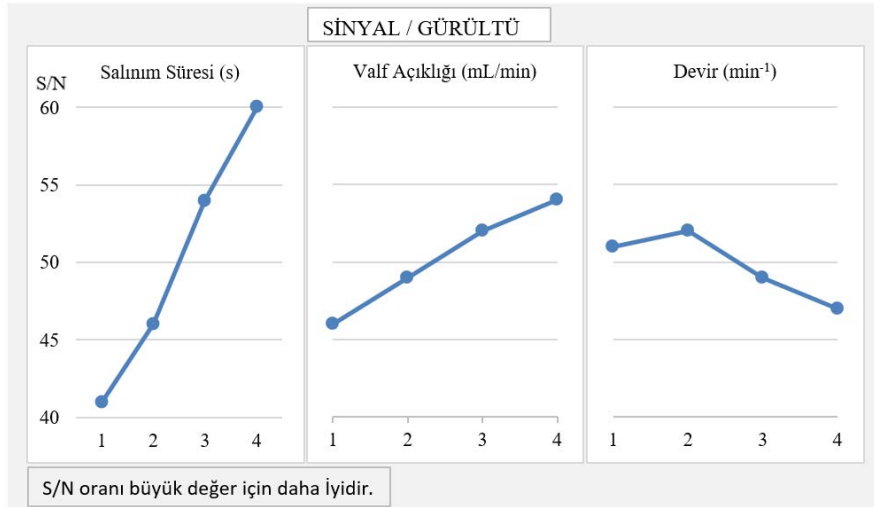
Tablo 2. Taguchi deneysel tasarım modeli ve sonuçları
(Taguchi experimental design model and results)

Deney	Salınım Süresi (s)	Valf Açıklığı (mL/min)	Merkez Devir (min ⁻¹)	Sonuç (s)
L-1	30	40	4	105,0
L-2	30	80	7	122,3
L-3	30	120	9	124,9
L-4	30	160	11	117,6
L-5	60	40	7	160,9
L-6	60	80	4	158,4
L-7	60	120	11	197,2
L-8	60	160	9	309,3
L-9	90	40	9	217,1
L-10	90	80	11	310,6
L-11	90	120	4	803,6
L-12	90	160	7	1315,1
L-13	120	40	11	418,1
L-14	120	80	9	1083,3
L-15	120	120	7	1201,2
L-16	120	160	4	1528

4.2. Taguchi deneysel tasarım sonuçlarının değerlendirilmesi

(Evaluation of Taguchi experimental design results)

Çözümleme için MiniTab analiz programı kullanılmıştır. Doğrulama sonuçları teorik beklentilerimiz ile örtüşmektedir. Sinyal/gürültü (S/N) oranı en yüksek değer en iyi değer yaklaşımı belirlenmiştir [24]. Şekil 20'de görüldüğü üzere salınım süresi ve HMDSO valf açıklık seviyelerinin artması NaOH çözeltisine karşı direnci lineer



Şekil 20. MiniTab programı yardımı ile optimum parametrelerin belirlenmesi
(Determining optimum parameters by the help of MiniTab)

olarak arttırmaktadır. Fakat merkez devir seviyesi en iyi sonucu 2. seviyede 7 min⁻¹ değerinde vermektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Otomotiv kalite taleplerinin ilerlemesi ile alt parçaların çevresel faktörlere dayanımının artırılması talep edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan 6 altlıklı, 2,84 m³ hacmindeki vakum çanında kaplanan parçalarda istenilen kalite gereksinimi çan içerisindeki farklı bölgelerdeki parçalar için sağlanamamaktadır. Bu sebep ile tek altlıklı, 1,13 m³ hacme sahip vakum çanı olan yeni makineler tercih edilmekte, büyük çana sahip makineler 2 katından fazla üretim çıktısına rağmen atıl duruma düşmektedir. Bu çalışma sayesinde yaygın olarak kullanılan 2,84 m³ hacmindeki çan içerisinde kaplanan parçalarda istenilen kalite gereksinimi farklı bölgelerdeki tüm parçalar için sağlanmış, tek altlıklı, 1,13 m³ hacme sahip vakum çanı olan yeni makinelere ihtiyaç kalmamıştır.

Mevcut şartlarda vakum çanı içerisindeki tüm parçalar Volkswagen PV1200 dayanım testlerini geçememekte iken durumun iyileştirilmesi amacıyla bu makalede bahsi geçen optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışma sonrasında belirlenen; 120 s dozaj süresi, 120 mL/min valf açıklığı, 7 min⁻¹ merkez devir, 26,2 min⁻¹ altlık devir parametreleri ve 10 delik, delik çapı 1 mm, boru iç çapı 15 mm olan HMDSO besleme hattı kullanılarak üretilen parçaların tamamı testlerden geçmiştir. Parça nihai ömrü uzatılarak, parçanın çevresel faktörlere karşı dayanımı artırılmıştır. Çalışma öncesinde vakum çanı içerisinde testi geçmeyen farklı bölgelerdeki parçaların NaOH dayanım süreleri 350-550 saniye arasında iken, çalışma sonrasında dayanım süreleri tüm bölgeler için 1000 saniye üzerine taşınmıştır.

Polimerizasyon levhaları HMDSO besleme boru hattına yakın kısımda çan gövdesi duvarında yer almaktadır. Bu haliyle aktif plazma alanı çanın yarısına hükmetmektedir. Bu levhalar çan orta kısmına konumlandırılır ise aktif plazma alanı tüm çana yayılacak ve bu sayede polimerizasyonun daha da kuvvetlenmesi sağlanacaktır. Sonraki çalışmalarda polimerizasyon levhasının konum değişikliğinin parça üzerindeki etkisi incelenecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hegemann D., Brunner H., Oehr C., Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 208, 281-286, 2003.
- Engel A.K., Yoden T., Sanui K. and N. Ogata, Synthesis of aromatic Schiff base oligomers at the air/water interface, Journal of American Chemical Society (J. Am Chem. Soc.), 107, 8308-8310, 1985.
- Kakimoto M., Suzuki M., T. Konishi, Imai Y., Iwamoto M. and Hino T., Preparation of mono- and multilayer films of aromatic polyimides using Langmuir-Blodgett technique, CSJ Journals Chemistry letters, 15 (5), 823-826, 1986.
- Kubono A., Higuchi H., Umemoto S. and Okui N., Molecular orientation of alkyl-aromatic polyimide thin films prepared by vapour deposition polymerization, Thin Solid Films, 229 (1), 133-136, 1993.
- Ebihara K., Fujishima T., Kojyo D. and Murata M., Silicon oxide film preparation by RF plasma-enhanced MOCVD using hexamethyldisiloxane, Plasma Sources Science and Technology, 2 (1), 14, 1993.
- Hegemann D., Brunner H., Oehr C., Evaluation of deposition conditions to design plasma coatings like SiO_x and a-C:H on polymers, Surface and Coating Technologies, 174-175, 253-269, 2003.
- VW PV1200 Testing of Resistance to Environmental Cycle Test (+80/-40) °C
<https://www.testxchange.com/standard/pv-1200/> Erişim Tarihi: 04.05.2020.
- Pandiyaraj K., Kumar A.A., Ramkumar M.C., Kumar U.S., Gopinath P., Cools P., Geyter De N., Morent R., Bah M., Shah I.S., Su P., Deshmukh R.R., Effect of processing parameters on the deposition of SiO_x-like coatings on the surface of polypropylene films using glow discharge plasma assisted polymerization for tissue engineering applications, Vacuum, 143, 412-422, 2017.
- Freidrich J., Mechanisms of Plasma Polymerization – Reviewed from a Chemical Point of View, Plasma Processes and Polymers, 8 (1), 783-802, 2011.
- Vasile, M. J., Smolinsky G., Organosilicon films formed by an RF plasma polymerization process Journal of the Electrochemical Society 119 (4), 451-455, 1972.
- Yasuda H., Lamaze C. E., Polymerization in an electrodeless glow discharge. II. Olefinic monomers Journal of Applied Polymer Science, 17 (5), 1519-1531, 1973.
- Yasuda H., Lamaze C. E., Polymerization in an electrodeless glow discharge III. Organic compounds without olefinic doublebond Journal of Applied Polymer Science, 17 (5), 1533-1544, 1973.
- Mearns A. M., Insulator thin films formed by glow discharge and radiation techniques, Thin Solid Films, 3 (3) 201-228 1969.
- Hollahan J. R., Rare gas plasma polymerization of benzene at -196°, Macromolecular Chemistry and Physics, 154 (1), 303, 1972.
- Ansys Inc., ANSYS FLUENT theory guide, Canonsburg, PA, Release 15.0, 2-6, 2013.
- Wilcox D.C., Turbulence modeling for CFD, DCW industries, Vol. 2. La Canada, CA, 137-140, 1998.
- Sobachkin, A. and Dumnov G., Numerical basis of CAD-embedded CFD, NAFEMS World Congress, 7-11, 2013.
- Ranade V., Computational Flow Modelling for Chemical Reactor Engineering, Academic Press, Ch. 20 (5), 1-108, 2001.
- Lamendola R., D'Agostino R, Fracassi F, Thin film deposition from hexamethyldisiloxane fed glow discharges, Plasmas and Polymers, 2 (3), 147-164, 1997.
- Schwarz J., Schmidt M. and Ohl A., Synthesis of plasma-polymerized hexamethyldisiloxane (HMDSO)

- films by microwave discharge, *Surface and Coating Technology*, 98 (1-3),859-864, 1998.
21. Morent R., Geyter N.D., Vlierberghe S.V., Dubruel P., Leys C. and Schacht E., "Organic-inorganic behaviour of HMDSO films plasma-polymerized at atmospheric pressure", *Surface and Coating Technology*, 203 (10-11), 1366-1372, 2009.
 22. Zajickova L., Bursikova V., Perina V., Mackova A., Subedi D., Janca J., Simirnov S., Plasma modification of polycarbonates, *Surface and Coating Technology*, 142-144, 449-454, 2001.
 23. Jamieson E.H.H. and Windle A.H., "Structure and oxygen-barrier properties of metallized polymer film", *Journal of Material. Sciences*, 18 (1),64-80, 1983.
 24. İç Y.T. ve Yildırım S. ,Improvement of a product design using multi criteria decision making methods with Taguchi method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 447-458, 2012.



Investigation of solvent type effect on the structural properties of bio-polyol-based carbon foam

Adife Şeyda Yargıç*^{ID}, Rahmiye Zerrin Yarbay Şahin^{ID}, Nurgül Özbay^{ID}

Chemical Engineering Department, Bilecik Seyh Edebali University, Bilecik, 11210, Turkey

Highlights:

- Bio-polyol production via solvolytic liquefaction of hornbeam tree sawdust
- Investigation of the usability of tar as an alternative solvent to phenol
- Multi-layer graphene structured carbon foam synthesis with adjustable properties

Keywords:

- Hornbeam sawdust
- Carbon foam
- Pyrolysis
- Solvolytic liquefaction

Graphical/Tabular Abstract

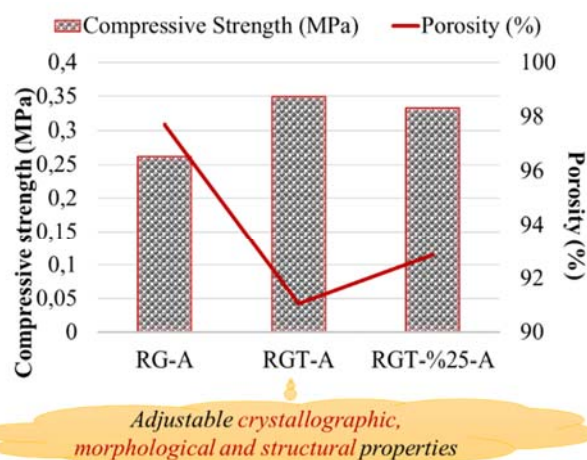
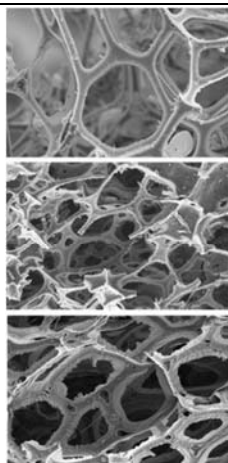


Figure A. Multi-layer graphene structured carbon foam characteristics

Article Info:

Research Article

Received: 12.01.2020

Accepted: 13.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.673657

Acknowledgement:

The authors would like to thank Scientific Research Projects Coordination Unit of Bilecik Şeyh Edebali University for support to the project of 2018-01.BŞEÜ.03-10.

Correspondence:

Author: Adife Şeyda Yargıç

e-mail:

seyda.guler@bilecik.edu.tr

phone: +90 228 214 1244

Purpose: Within the scope of the study, solvolytic liquefaction of hornbeam tree sawdust obtained as industrial waste was carried out in order to prepare carbon foam from low cost and renewable materials. The effect of solvent type (phenol and phenol + tar mixture) on the structure of carbon foams was investigated in the solvolytic liquefaction process.

Theory and Methods:

Firstly, the sawmill waste of hornbeam tree sawdust was characterized and pyrolyzed at 400 °C with a heating rate of 10 °C/min. The carbon content of the tar was determined by elemental analysis, besides FT-IR, GC/MS and ¹H-NMR analyses were performed. By the conventional solvolytic liquefaction process, bio-polyol is produced from hornbeam shavings and used as a precursor for carbon foam production. The utilization of pyrolysis liquid product instead of phenol used as a solvent in the liquefaction process was investigated. The foams produced after resinification, curing and carbonization processes have been characterized by various methods. Structural properties of carbon foams from liquefied hornbeam tree sawdust was highlighted by using elemental analysis, x-ray diffraction, nitrogen adsorption/desorption isotherms, scanning/transmission electron microscopy, porosity and compressive strength tests.

Results:

In the present study, mesoporous carbon foams containing multi-layer graphene-like structures having a bulk density of ~0.02 g/cm³, a reticulated arrangement and a relatively high surface area (> 300 m²/g) than pitch-based foams were produced. As a result, it is deduced that biomass-based carbon foams with alterable crystallographic, morphological and structural properties can be synthesized by modifying the solvent type and the amount of surfactant.

Conclusion:

By valorization of the liquid product rich in phenolic compounds obtained from the pyrolysis of biomass as a solvent in the solvolytic liquefaction process, the development of sustainable technology contributed to the production of valuable materials such as carbon foam.



Biyo-poliol-esaslı karbon köpüğün yapısal özellikleri üzerinde çözücü türü etkisinin incelenmesi

Adife Şeyda Yargıç*^{ID}, Rahmiye Zerrin Yarbay Şahin^{ID}, Nurgül Özbay^{ID}

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 11210 Bilecik, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Gürgen ağacı talaşının solvolitik sıvılaştırılması ile biyo-poliol üretimi
- Katranın fenole alternatif çözücü olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi
- Ayarlanabilir özelliklere sahip çok-katlı grafen yapıları karbon köpük sentezi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.01.2020

Kabul: 13.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.673657

Anahtar Kelimeler:

Gürgen talaşı,
karbon köpük,
piroliz,
solvolitik sıvılaştırma

ÖZET

Günümüzde teknolojinin geliştirilmesi üzerindeki çalışmaların artışı, yeni malzemelerin üretimini ve özelliklerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Doğal/endüstriyel/pirolitik grafit, grafit/karbon köpükler, elmas, grafen, karbon nanotüp/nanofiber ve karbon kompozitler elektronik aletlerin üretiminde ve ısı yönetim uygulamalarında kullanılan karbonlu malzemelerdir. Petrol kaynakları giderek azalmaya başlarken, biyokütlenin sıvılaştırılması biyokütle kullanımının yeni bir alanı olarak yaygınlaşmaktadır. Biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemleri içerisinde doğrudan sıvılaştırma prosesinin bir kolu olan solvoliz sıvılaştırma işlemi kullanılarak biyomalzemeler elde edilmektedir. Biyokütlenin yapısında bulunan selüloz, lignin ve hemiselüloz çok sayıda hidroksil grubu içermektedir. Hidroksil grupları sayesinde sıvılaştırılmış biyokütlenin biyopolimerlere dönüşümü gerçekleşmektedir. Bu çalışma kapsamında, düşük maliyetli ve yenilenebilir malzemelerden karbon köpük hazırlanması amacıyla endüstriyel atık olarak temin edilen gürgen ağacı talaşının solvolitik sıvılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Solvolitik sıvılaştırma yönteminde reaktif türünün (fenol ve fenol+katran karışımı) karbon köpüklerin yapısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Katranın sentez ortamına eklenmesi sonucu köpük yapısında meydana gelen düzensizliklerin üstesinden gelinmesi amacıyla, yüzey aktif madde miktarı artırılarak işlemler tekrar edilmiştir. Karbon köpüklerin karakterizasyonu için elementel analiz, taramalı/geçirimsiz elektron mikroskopi, azot sorpsiyon ve x-ışını kırınım analizleri uygulanmış, ayrıca basma dayanımı ve yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon verilerine göre, çözücü türü ve yüzey aktif madde miktarı değiştirildiğinde ayarlanabilir kristalografik, morfolojik ve yapısal özelliklere sahip biyokütle-esaslı karbon köpüklerin üretilbileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Investigation of solvent type effect on the structural properties of bio-polyol-based carbon foam

H I G H L I G H T S

- Bio-polyol production via solvolytic liquefaction of hornbeam tree sawdust
- Investigation of the usability of tar as an alternative solvent to phenol
- Multi-layer graphene structured carbon foam synthesis with adjustable properties

Article Info

Research Article

Received: 12.01.2020

Accepted: 13.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.673657

Keywords:

Hornbeam sawdust,
carbon foam,
pyrolysis,
solvolytic liquefaction

ABSTRACT

Nowadays, the increase in studies about the improvement of technology has enabled the development of new materials and their properties. Natural/industrial/pyrolytic graphite, graphite/carbon foams, diamond, graphene, carbon nanotube/nanofibers and carbon composites are carbonaceous materials used in the production of electronic devices and thermal management applications. As oil resources are beginning to diminish, the liquefaction of biomass is becoming a new area of biomass usage. In thermochemical conversion processes of biomass, biomaterials are obtained by using solvolysis liquefaction process, which is a subsection of direct liquefaction process. Cellulose, lignin and hemicellulose in the biomass structure contain a large number of hydroxyl groups. Conversion of liquefied biomass to biopolymers takes place through hydroxyl groups. Within the scope of the study, solvolytic liquefaction of hornbeam tree sawdust obtained as industrial waste was carried out in order to prepare carbon foam from low cost and renewable materials. The effect of solvent type (phenol and phenol + tar mixture) on the structure of carbon foams was investigated in the solvolytic liquefaction process. In order to overcome the irregularities in the foam structure as a result of the addition of tar to the synthesis medium, the processes were repeated by increasing the amount of surfactant. Elemental analysis, scanning/transmission electron microscopy, nitrogen sorption, and x-ray diffraction analyses were performed for the carbon foam characterization, compression strength and density measurements were also carried out. According to the characterization data, it is concluded that biomass-based carbon foams with adjustable crystallographic, morphological and structural properties can be produced by changing the solvent type and the amount of surfactant.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: seyda.guler@bilecik.edu.tr, zerrin.yarbay@bilecik.edu.tr, nurgul.ozbay@bilecik.edu.tr /

Tel: +90 228 214 1244

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İleri malzemeler içerisinde en önemlilerinden biri karbonlu malzemelerdir. Son yıllarda ultra hafif gözenekli karbonlu malzemelerin hazırlanması dünya çapında ilgi çekmiştir. Karbon köpük; geniş dış yüzey alanı, düşük yoğunluk (0,2-0,8 g/cm³), yüksek mekanik basma dayanımı (20 MPa'a kadar), grafitik yapıya uygunluk, yüksek ısı iletkenlik (180 W/m.K), gözenekli yapı, yüksek elektrik iletkenliği (20-1250 S/cm), yüksek sıcaklıklara dayanıklılık (3273 K), düşük fiyat, kullanılacağı alana göre şekil alabilme [1] ve açık hücre yapısı gibi avantajlı özelliklere sahip sünger benzeri bir malzemedir. Düşük yoğunluklu mikro hücreli karbon köpükler katalizör destekleri, sıvı veya gazların saflaştırılmasında adsorbanlar [2], gözenekli elektrotlar ve pil bileşenleri [3] olarak kullanılmaktadır. Karbon köpüklerin yüksek yüzey alanlarına ve yapısal kararlılığa, düşük yoğunluğa ve iyi ısı iletkenliğe sahip olması atıksudaki boyarmadde, yüzey aktif madde veya ilacı adsorpsiyon ile ayırma [4], kataliz reaksiyonu için altlık olarak kullanıma, yüksek sıcaklık ısı yalıtımı, ısı soğutan malzeme, elektromanyetik etkileşim kalkanı, titreşim sönümlenme, gemi inşaatı için hafif yangına dayanıklı yapılar, elektrotlar [5] ve katalizör destekleri gibi yaygın uygulama alanlarında değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Örneğin, düzenli mezogözenekli karbon malzemelerin sentezinde resorsinol:formaldehit oranının değiştirilmesi ve jelin yaşlandırma süresinin optimizasyonu üzerinde çalışmalar bulunmaktadır [6]. Bir başka çalışmada, lignoselülozik biyokütlenin bazik ortamda gliserol ile sıvılaştırılması sonucu üretilen poliölün ve poliüretan köpüğün özellikleri üzerinde ham gliserolün yapısındaki organik safsızlıkların etkisi incelenmiştir [7]. Jana vd. [8] yaptıkları çalışmada dolgu maddesi olarak pullu grafiti kullanarak tanen-esaslı reçineden 0,11-3,65 W/mK ısı iletkenliğe ve 3,6-6,9 MPa basma dayanımına sahip karbon köpükler üretmiştir.

Doğal malzemelerin sınırlı olması ve özelliklerinin hızla gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını karşılayamaması nedeni ile son yıllarda malzeme bilimi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar önem kazanmıştır [9]. Gelişmiş karbonlu malzemeler özel mikro yapıları, eşsiz özellikleri ve çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamaları nedeniyle dünya çapında büyük ilgi görmektedir. Katalizör olarak baz veya asit kullanılarak fenollerin ve aldehitlerin çeşitli kombinasyonlarından elde edilen fenolik reçine; camsı karbonlar, karbon fiberler, gözenekli karbonlar, karbon nanotüpler ve karbon membranlar gibi gelişmiş karbonlu malzemelerin üretimi için öncü madde olarak kullanılmaktadır. Ancak, fosil türevli kaynaklar kullanılırken sera gazlarının emisyonundan kaynaklanan hava kirliliği ve iklim değişikliği tehdidi söz konusudur [10]. Daha rekabetçi karbon malzemelerin geliştirilmesi amacıyla, karbon malzemelerin yenilenebilir kaynaklardan geliştirilmesinin dikkate alınması gereklidir. Hayvansal/tarımsal ürün ve atıkları kapsayan tek yenilenebilir karbon kaynağı olan biyokütle [11], düşük

kükürt ve azot içeriği ile çevre dostu olmasının ve karbon nötrlüğünün çarpıcı özellikleri nedeniyle son zamanlarda alternatif ve önemli bir kaynak olarak büyük ilgi görmektedir [12]. Son yıllarda, kimyasallar ve biyo-yakıtlar için hammadde olarak biyokütle kullanımı biyokimyasal (metan ve alkol fermentasyonu gibi) ve termokimyasal dönüşüm teknolojileri ve süreçleri ile gerçekleştirilmektedir [13]. Bu yöntemler arasında termal sıvılaştırma işlemi düşük molekül ağırlıklı sıvı, gaz yakıt ve katı elde etmek için en umut verici yöntemdir. Termal sıvılaştırma dönüşüm yöntemleri arasında, piroliz ve solvoliz işlemleri biyokütlenin daha yararlı kimyasallara ve yakıtlara dönüşümünü temel almaktadır [14]. Bugüne kadar yüzlerce farklı biyokütle kullanılarak piroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, pirolizin yüksek çalışma sıcaklığı (673-1273 K) katranın yapısındaki hidrokarbonlar ve aromatikler arasında çapraz bağlanma reaksiyonuna neden olabilmekte, böylece yapının bozunmasını zorlaştırmaktadır [15]. Solvoliz işlemi ise birçok avantaja sahiptir, örneğin *i*) çözücünün varlığı ürünün konsantrasyonunu seyrelterek çapraz bağlı reaksiyonları ve ters reaksiyonları önler, *ii*) piroliz ve gazlaştırma ile karşılaştırıldığında daha düşük sıcaklık (daha az enerji tüketimi) gerektirir [16]. Çözücü türlerinin biyokütle sıvılaşması üzerinde dikkate değer bir etkisi vardır. Sıvılaştırma işlemi, siklik karbonatlar, fenol, iyonik sıvılar, hidrojen-verici çözücüler ve polihidrik alkoller gibi çok sayıda çözücü kullanılarak gerçekleştirilmektedir [17]. Farklı çözücülerin yardımıyla gerçekleşen sıvılaştırma işlemi ile lignoselülozik bileşenler yakıt ve kimyasal hammadde olarak kullanılabilen yüksek reaktiviteye sahip düşük molekül ağırlıklı bileşiklere dönüştürülmektedir [12]. Günümüzde, yeni karbonlu malzemeler olan karbon köpükler petrol, kömür ve mezofaz zift kullanılarak yüksek basınç ve sıcaklıkta üretilmektedir. Buna alternatif olarak biyokütlenin pirolizi ve solvolitik sıvılaştırılmasıyla daha ekonomik olarak karbon köpük üretimi ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmada, karbon köpüğün mezofaz ziftten elde edilen karbon köpüklere alternatif olarak *biyokütle* kullanılarak geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Köpük öncü maddesi olan biyo-poliölün üretildiği solvolitik sıvılaştırma yönteminde, iki farklı çözücü türü (fenol ve fenol+katran karışımı) kullanılmış ve üretilen karbon köpüklerin yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çözücü türü etkisinin incelenmesi amacıyla, gürgen talaşının yavaş pirolizinden elde edilen sıvı ürün solvolitik sıvılaştırma reaksiyonunda kullanılmıştır.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Hammadde Karakterizasyonu (Characterization of Raw Material)

Karbon köpük üretiminde hammadde olarak kullanılan gürgen talaşı (GT) Eskişehir'de (Türkiye) bulunan kereste işleme fabrikasından temin edilmiş ve laboratuvar ortamında kurutulmuştur. Öncelikle, öğütücü kullanılarak (Armfield FT-7A) hammadde parçacık büyüklüğü küçültülmüş ve ortalama parçacık büyüklüğü 0,497 mm olarak

hesaplanmıştır. GT 'nin bileşen analizi ve kısa analizi yapılarak nem miktarı, kül miktarı, uçucu madde miktarı, sabit karbon miktarı, ekstraktif madde miktarı, holoselüloz miktarı, lignin miktarı, hemiselüloz miktarı ve selüloz miktarı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra hammaddenin ısı bozunma davranışını incelemek amacıyla termogravimetrik analizi (TGA) gerçekleştirilmiştir. Hammaddenin kalorifik değeri elementel analiz (Leco CHN628, S628) ve yapısındaki fonksiyonel gruplar ise Zayıflatılmış Toplam Yansıma-Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (ATR-FTIR, Perkin Elmer Spektrumu 100) yardımı ile $4000-400\text{ cm}^{-1}$ aralığında, 100 taramadan sonra çözünürlüğü 4 cm^{-1} olan spektrum alınarak tespit edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM, Zeiss Supra VP 40) ile hammaddenin yüzey morfolojisi incelenmiştir.

2.2. Piroliz İşlemi ve Katran Karakterizasyonu (Pyrolysis Process and Tar Characterization)

Piroliz deneyleri ısıtma hızı $10^\circ\text{C}/\text{dk}$ olmak üzere statik ortamda 400°C 'de gerçekleştirilmiştir. Gürge talaşının yavaş pirolizinde 316 paslanmaz çelikten yapılmış reaktör ve reaktörü çevreleyen rezistanslı fırın kullanılmıştır. Reaktör sıcaklığı, fırının üst kısmından reaktörün içine yerleştirilen ısı-çift ile kontrol altında tutulmuştur. Yavaş pirolizde, hammaddenin 15 g tartılarak sabit yataklı reaktörün içine yerleştirilmiş, reaktör ve sıvı toplama kapları birbirine bağlanmıştır. Çalışma sıcaklığı ve ısıtma hızı kontrolörden ayarlanmış, istenilen piroliz sıcaklığına ulaşıldıktan sonra tepkimenin tamamlanması için 20 dakika boyunca beklenmiş, deney sonlandırılmış ve reaktör soğumaya alınmıştır. Piroliz işlemi sonunda, tuzaklarda toplanan katran-su karışımı, diklorometan ile çözümlenip ayırma hunisine aktarılmış, fazlar ayrılarak su miktarı ölçülmüştür. Sıvı ürün (katran) sodyum sülfattan geçirilerek ayırma hunisinden gelebilecek su tutulmuş, çözücü döner buharlaştırıcı kullanılarak ayrılmış ve sıvı ürün verimi hesaplanmıştır. Reaktör içindeki çar tartılarak verimi hesaplanmıştır. Toplam kütle denkliği kullanılarak gaz ürün verimi bulunmuştur. Piroliz deneyleri sonucunda elde edilen sıvı ürünün ($GT_{@400^\circ\text{C}}$) yapısının incelenmesi amacıyla Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi (FT-IR, Perkin Elmer Spectrum 100), nükleer manyetik rezonans spektrometresi ($^1\text{H-NMR}$, Varian Mercury 300 MHz) ve gaz kromatografisi/kütle spektroskopisi (GC/MS, Shimadzu GC-2010 Plus) cihazları kullanılmış olup, ısı değerleri ise elementel analiz (Leco CHN628, S628) sonuçlarına göre belirlenmiştir. Solvoliz sıvılaştırma işlemi için kullanılacak katrandaki aromatik bileşenlerin fazla olması istenmektedir.

2.3. Biyokütlenin Solvolitik Sıvılaştırılması ile Karbon Köpük Üretimi ve Karakterizasyon İşlemleri (Carbon Foam Production by Solvolytic Liquefaction of Biomass and Characterization Procedures)

Biyokütlenin solvolitik sıvılaştırılması ile karbon köpük üretiminde Wang'ın çalışmasındaki [18] deneysel yöntem izlenmiş ve iki farklı çözücü ortamında sentezler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, öncelikle kullanılacak biyokütle örnekleri öğütülmüş ve parçacık boyutu

$0,25 < d_p < 0,85\text{ mm}$ aralığında olacak şekilde elenmiştir. Grafen benzeri yapılar içeren karbonlu malzemelerin üretimi için ilk olarak geleneksel fenolik reçine üretimi amacıyla sıvılaştırma işleminde çözücü olarak fenol kullanılmıştır. İkinci yöntemde ise, sıvılaştırma işleminde yararlanılan fenole alternatif olarak katranın kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, reaksiyonlarda ilave edilen fenol yerine "fenol+katran" karışımı çözücü olarak kullanılmıştır. Solvolitik sıvılaştırma, reçineleştirme, köpükleşme ve 800°C 'de karbonizasyon işlemleri sonucunda elde edilen karbonlu malzemeler karakterize edilmiştir. Elde edilen reçine köpük RG ve karbon köpük $RG-A$ olarak adlandırılmıştır. Katran kullanılarak karbon köpük üretimi için geleneksel fenolik reçine üretim yönteminin aynısı uygulanmıştır. Sıvılaştırma basamağında kullanılan fenol miktarı ağırlıkça %40'ı oranında katran ile yer değiştirilmiştir. Elde edilen reçine köpük gürge talaşı RGT , karbonize edilen karbon köpük ise $RGT-A$ olacak şekilde kodlanmıştır. Solvolitik sıvılaştırma işleminde fenole ek olarak katranın eklenmesiyle örneğin köpükleşmediği belirlenmiş, gözeneklerin açılması amacıyla yüzey aktif madde miktarı %25 oranında artırılarak köpükleşme işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen reçine köpük $RGT\text{-}\%25$, karbonize köpük ise $RGT\text{-}\%25\text{-}A$ olarak kodlanmıştır.

Karbon köpüklerin yapısındaki karbon, hidrojen, oksijen ve azot bileşiminin incelenmesi amacıyla elementel analiz (Leco CHN628, S628) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen reçine/karbonize köpüklerin yüzey morfolojileri (parçacık boyutları, şekilleri ve dağılımları) taramalı elektron mikroskobunda (Zeiss Supra VP 40) ve geçirimli elektron mikroskobunda (JEOL 1220 JEM, 80 keV) incelenmiştir. Köpüklerin kristal yapılarının belirlenmesi, atomik örgü içindeki tabakalar arası uzaklık değerlerinin hesaplanması ise x-ışını kırınım cihazı (PANalytical Empyrean) ile $\text{CuK}\alpha$ ışınması (dalga boyu $0,15406\text{ nm}$) kullanılarak belirlenmiştir. Hazırlanan köpüklerin BET yüzey alanları (S_{BET}), gözenek hacmi ve gözenek boyut dağılımları Micromeritics ASAP 2020 cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Karbon köpüklerin basma dayanımları SHIMADZU AG-IC 100KN çekme/basma cihazında, gerçek yoğunlukları ise helyum gaz piknometresi (Micromeritics, ACCUPYC II 1340) ile belirlenmiştir. Ayrıca, karbon köpüklerin yığın yoğunlukları ölçülerek %porozite değerleri hesaplanmıştır. Gözeneklilik oranı değerinin belirlenmesi için Eş. 1'de yer alan formül dikkate alınmıştır. Eş. 1 kapsamında, P değeri %Porozite, V_t ve V_a sırasıyla karbon köpüğün teorik ve gerçek hacmi olarak tanımlanmaktadır [19].

$$P = (V_t - V_a)/V_t \quad (1)$$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Biyokütle Özelliklerinin İncelenmesi (Investigation of Biomass Properties)

Yığın yoğunluğu $0,26\text{ g}/\text{cm}^3$ olan gürge talaşının temel analizi ve yaklaşık analizine ait sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Gürge talaşının %30,92 olmak üzere yüksek

lignin içeriğine sahip olması yapısındaki fenolik bileşiklerin fazla olduğunun bir göstergesidir.

Tablo 1. Temel ve yaklaşık analiz sonuçları
(The results for ultimate and proximate analyses)

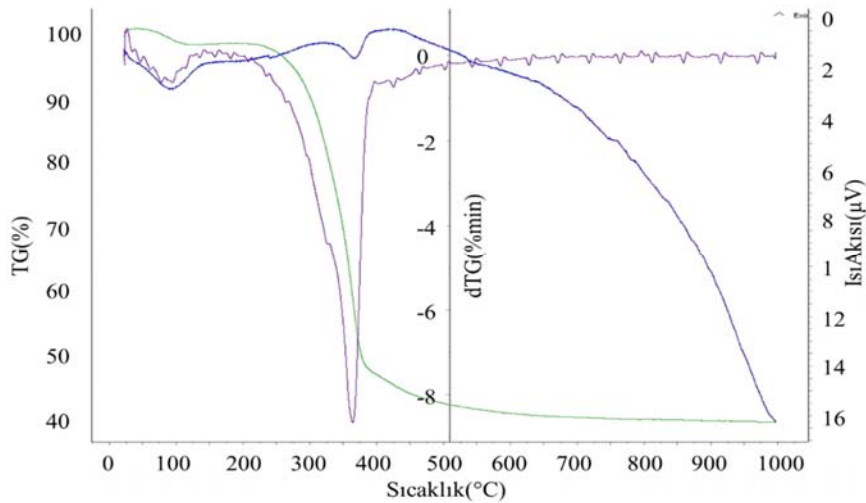
Temel Analiz		
	GT	GT _{@400°C}
Bileşen (%)		
C	45,99	59,94
N	4,58	4,56
H	5,97	6,97
O ^a	43,46	28,53
Molar gösterim	CH _{1,56} N _{0,08} O _{0,71}	-
H/C	1,56	1,40
O/C	0,71	0,36
HHV (MJ/kg)	16,33	24,82
GT'nin Yaklaşık Analizi		
Kısa analiz	%ağ.	
Nem	5,72	
Kül	0,45	
Uçucu Madde	85,21	
Sabit Karbon ^a	8,62	
Bileşen analizi	%ağ.	
Holoselüloz	67,92	
Hemiselüloz	32,58	
Ekstraktif Madde	0,72	
Lignin	30,92	
Selüloz ^a	35,34	

^a Farktan hesaplanmıştır.

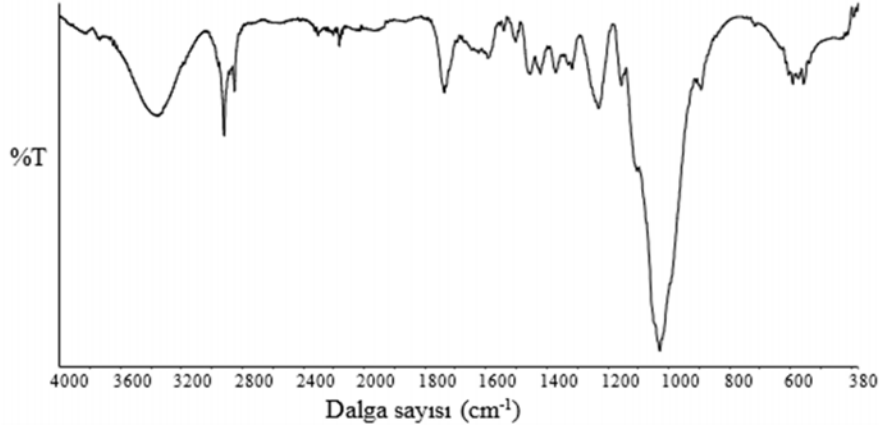
Hammaddenin ısı ve pirolitik davranışını belirlemek için termogravimetrik analiz gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Biyokütlelerin ısı bozunmaları kimyasal bileşimine ve yapısına bağlıdır ve genel olarak biyokütlenin ısı bozunma eğrisi üç ana bölüme ayrılabilir. 80-120°C arasında görülen birinci kütle kaybı hammaddede bulunan nemin giderilmesi sonucunda oluşur. İkinci bölüm ise piroliz reaksiyonlarının oluştuğu ve hammaddenin kütle kaybının en fazla olduğu kısımdır. Genellikle 150°C'den başlayan kütle kaybı 400°C'ye kadar devam eder. Son bölümde ise kütle kaybı

giderek azalır ve neredeyse sabit bir hal alır. Bu şekilde ifade edilebilen kütle kaybının daha detaylı açıklanması için biyokütlenin esas olarak selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluştuğu göz önüne alınır. Her bir bileşen için yapılan termogravimetrik analiz deneyleri bu bileşenlerin bozunma sıcaklıkları hakkında bilgi verir. Hemiselüloz 250-350°C arasında, selüloz 325-400°C arasında ve lignin 200-720°C arasında bozunur [20]. Şekil 1'de verilen ısı bozunma eğrileri incelendiğinde, hammaddenin içeriğindeki nem uzaklaştırıldıktan sonra piroliz reaksiyonunun gerçekleştiği ve artan sıcaklıkla birlikte uçucuların uzaklaştığı TG eğrisinden görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, 100°C civarında hammaddenin yapısındaki nemin ayrılması ile ilk ağırlık kaybı oluşmuştur. Piroliz reaksiyonunun 200°C civarında başladığı ve burada kütle kaybının hızlı bir şekilde gerçekleştiği belirlenmiştir. Uçucu bileşiklerin oluşumundan sorumlu olan selüloz ve hemiselüloz polimerleri parçalanarak ortamdan uzaklaşırlar. Ani kütle kayıplarının 450°C civarında sonlandığı bulunmuştur. Bu sıcaklıktan sonra kütle kaybı yavaşlamış ve 550°C civarında neredeyse sabitlenmiştir. Bu yavaş bozunmanın lignine ait olduğu bilinmektedir. Lignin bileşenler içinde en son bozunandır ve katı ürün oluşumunda etkilidir. Isıl işlem sonunda kalan kalıntı, kül ve bozunmayan karbonun miktarını vermektedir.

Hammaddenin kimyasal yapısının aydınlatılması amacı ile incelenen FT-IR spektrumlarına (Şekil 2) göre, alkol/fenol veya karboksilik asitlerin bulunduğu işaret eden 3600-3300 cm⁻¹ civarındaki geniş ve yayvan -OH bandı [21]; alifatik yapıların varlığını ve asimetrik/simetrik C-H titreşimlerini belirten 2950-2800 cm⁻¹ aralığında görülen pikler tespit edilmiştir. Aromatik yapılarıdaki olefinik C=C titreşimleri ve C=O titreşimlerinin göstergesi olan 1770-1500 cm⁻¹ civarındaki şiddetli pikler esterler, ketonlar, karboksilli asitler ve aldehitlerin varlığına işaret etmektedir [11]. 1480-1420 cm⁻¹ civarındaki pikler alifatik yapılarıdaki C-H eğilme titreşimlerini belirtmektedir. 1430-1200 cm⁻¹ bant aralığındaki pikler ise -OH bükülme ve C-O gerilim titreşimlerini belirtmekte olup, doymamış eterlerin ve fenollerin varlığının kanıtıdır. 1060-1020 cm⁻¹ civarındaki



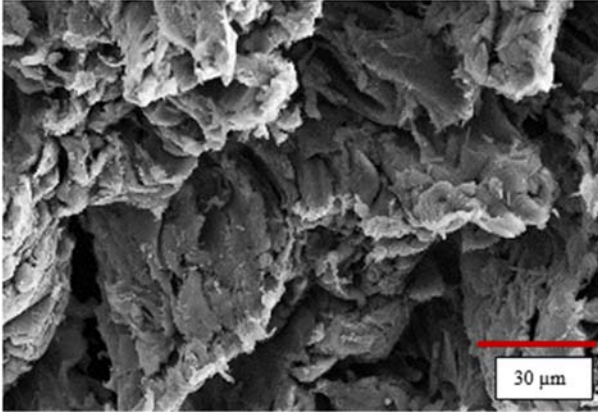
Şekil 1. GT'nin termogravimetrik analizi (Thermogravimetric analysis of GT)



Şekil 2. GT'nin FT-IR spektrumu (FT-IR spectrum of GT)

şiddetli pikler biyokütlenin yapısındaki ligninin varlığını gösteren C-O gerilim bandını ifade etmektedir [22].

Hammaddenin fiziksel morfolojisi ve yüzey özelliklerinin incelenmesinde taramalı elektron mikroskobu tekniği kullanılmıştır (Şekil 3). 5000x büyütme oranında alınan görüntüye göre, GT'nin gözenekli olmayan lifli bir morfolojiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. GT'nin SEM görüntüsü (SEM image of GT)

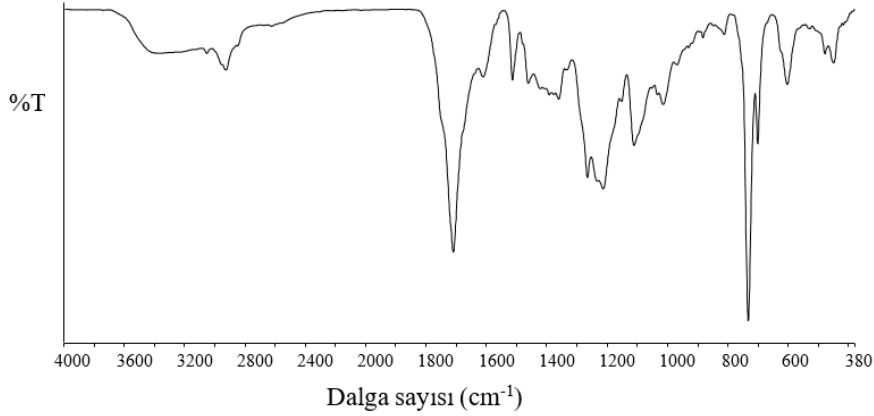
3.2. Piroliz Ürün Verimleri ve Katran Karakterizasyonu (Pyrolysis Product Yields and Tar Characterization)

Gürgen talaşının 400°C'de gerçekleştirilen pirolizi sonucunda %30,32 katı, %19,95 sıvı ve %22,37 gaz ürün olacak şekilde bozunmanın gerçekleştiği belirlenmiştir. Hammaddenin yapısında bulunan lignin selüloz ile kıyaslandığında daha yüksek sıcaklıklarda bozunmaktadır. Bu nedenle lignin içeriğinin yüksek olması halinde, piroliz sonucu elde edilen katı ürün veriminin de fazla olduğu bilinmektedir. Katranın elementel analiz sonucu ve hesaplanan ısı değeri Tablo 1'de verilmiştir. Elementel analiz sonucuna göre, katranın ısı değeri ve karbon içeriğinin hammaddeye kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Biyokütle yapısında bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin nedeniyle, piroliz sonucu elde edilen sıvı ürün farklı yapıda organik bileşikler içerir.

Fonksiyonel grupların belirlenmesi amacıyla çekilen FT-IR spektrumuna (Şekil 4) göre, katranın 3600-3300 cm⁻¹ arasında sahip olduğu -OH gerilim titreşimleri hidroksil gruplarının varlığını göstermektedir [23]. Alifatik yapıların (alkanların) işareti olan C-H gerilim titreşimleri 2950-2800 cm⁻¹ aralığında bulunmaktadır. 1770-1500 cm⁻¹ civarındaki pikler olefinik C=C titreşimleri ve C=O titreşimlerinden kaynaklanmakta ve ester, keton, karboksilli asit ve aldehitlerin varlığına işaret etmektedir [24]. 1470-1310 cm⁻¹ civarındaki C-H eğilme titreşimleri aromatik halkaların bulunduğunu göstermektedir. 1275-1200 cm⁻¹ bant aralığındaki pikler ise -OH bükülme ve C-O gerilim titreşimlerini belirtmekte olup, birincil/ikincil/tersiyer alkollerin ve fenollerin varlığının kanıtıdır. Aromatik yapının (alkenler) bulunduğunu gösteren bir diğer band ise 900-700 cm⁻¹ aralığında olup C-H eğilme titreşimlerine işaret etmektedir.

Solvolitik sıvılaştırma işlemi için kullanılacak katranın ¹H-NMR analizine göre, spektrumdan belirlenen farklı hidrojen türlerinin kimyasal kayma değerleri Tablo 2'de verilmiştir. ¹H-NMR spektrumu proton türlerinin kimyasal kaymasına bağlı olarak aromatik, olefinik ve alifatik olmak üzere üç ana bölgeye ayrılmıştır [25]. 9-6 ppm aralığındaki pikler aromatik hidrojenleri, 6-4 ppm aralığındaki pikler alken hidrojenlerini, 3,0-0,5 ppm aralığındaki pikler alkan hidrojenlerini ifade etmektedir [26]. 1,0-1,5 ppm aralığında elde edilen yüksek fraksiyon, katranlardaki aromatik halkaya bağlı γ veya daha uzak konumdaki alkil gruplarının (CH₃) ve parafinik CH₃ gruplarının varlığını göstermektedir [27]. Halka bağlayan metilen, metil ve metoksi protonları spektrumda 3,0-4,0 ppm bölgesinde gözlenmektedir. ¹H-NMR spektrumuna göre, sıvılaştırma işlemi için fenole alternatif olarak kullanılacak katranın aromatik fraksiyonunun %16,45 olduğu tespit edilmiştir.

Lignoselülozik esaslı hammaddelerin pirolizi sonucu elde edilen katranların içeriğinde fenolik bileşikler, aldehitler, ketonlar, karboksilik asitler olmak üzere benzer bileşikler bulunmaktadır. Karbohidratlar, hammaddenin temel bileşenleri olan selüloz ve hemiselülozun bozunması ile ortaya çıkmaktadır. Hidroksifenoller, gayakoller ve



Şekil 4. $GT_{@400^{\circ}C}$ katranının FT-IR spektrumu (FT-IR spectrum of $GT_{@400^{\circ}C}$ tar)

Tablo 2. $400^{\circ}C$ 'de elde edilen katranın 1H -NMR sonucu (1H -NMR result of tar obtained at $400^{\circ}C$)

Kimyasal kayma aralığı, δ (ppm)	Hidrojen tipi	$GT_{@400^{\circ}C}$
0,5-1,0	Aromatik halkaya γ veya daha uzak konumdaki CH_3 ve parafinik CH_3	3,50
1,0-1,5	Aromatik halkaya β konumundaki CH_3 , CH_2 ve CH	8,51
1,5-2,0	Naftenlere bağlı CH_2 ve CH	8,96
2,0-3,0	Aromatik halkaya α konumundaki CH_3 , CH_2 ve CH	30,80
0,5-3,0	TOPLAM ALİFATİKLER	51,77
3,0-4,0	Hidroksiller, halka bağlayan metilen, metil ve metoksi	10,87
4,0-6,0	Fenoller, konjuge olmayan olefinler	20,10
6,0-9,0	Aromatikler, konjuge olefinler	16,45
9,0-12,0	Aldehitler ve/veya karboksilik asitler	0,81

siringoller ise yapıdaki ligninin bozunmasıyla açığa çıkan bileşiklerdir [20]. Gürgeç talaşının pirolizinden elde edilen katran kromatogramında (Şekil 5) dikkat çeken piklerin (alanları %10'un üzerinde olanlar) fenolik bileşikler olduğu belirlenmiştir. Gürgeç talaşı katranının temelindeki fenolik bileşikler fenol; 2-metil-fenol; 2-etil fenol; 3-etil-fenol; 2,4-dimetil fenol; 4-metil-fenol; 4-propil-fenol; 3-etil-5-metil-fenol; 3,4,5-trimetil-fenol olarak sıralanabilmektedir. Ayrıca furfural bileşiklerinin yüksek oranda bulunduğu görülmüştür. Hammadde lignoselülozik yapıya sahip olduğu için ligninden türemiş olan furan bileşikleri katranın yapısında bulunmaktadır.

3.3. Karbon Köpüklerin Karakterizasyonu (Characterization of Carbon Foams)

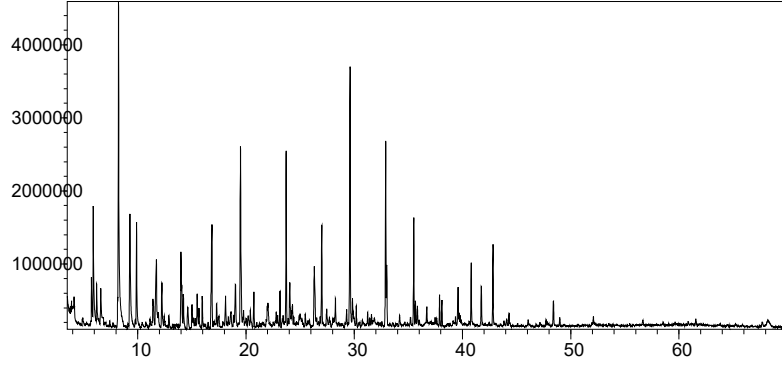
3.3.1. Elementel analiz (Elemental analysis)

Çözücü türü ve yüzey aktif madde miktarının karbon köpük yapısındaki H/C ve O/C oranları üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen elementel analiz sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Çözücü olarak sadece fenolün kullanılması ile üretilen köpüğün karbon içeriği ve üst ısı değeri sırasıyla %80,8 ve 32,47 MJ/kg olarak belirlenmiştir. Karbon köpüğün sentezi sırasında piroliz sıvı ürünü kullanıldığında, katranın yüksek oksijen içeriği (%28,53) nedeniyle ve katranın yapısındaki metoksi,

karbonil ve hidroksi gruplarının katkısıyla köpüğün O/C oranı yükselmiştir [28]. Sentez ortamına katran eklendiğinde üretilen köpüğün karbon içeriği ve üst ısı değeri sırasıyla %77,4 ve 25,97 MJ/kg olarak belirlenmiştir. Çözücü türü etkisi sonuçları ile kıyaslandığında, köpük hazırlanırken sentez ortamına daha fazla yüzey aktif madde eklendiğinde elde edilen köpüğün karbon içeriğinin arttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, yüzey aktif madde oranı arttıkça sentezlenen karbon köpüğün oksijen içeriğinin önemli derecede düştüğü gözlemlenmiştir.

3.3.2. SEM ve TEM analizleri (SEM and TEM analyses)

Solvolitik sıvılaştırma yöntemi sonrasında polimerleşme ve köpükleşme işlemleri ile elde edilen reçine köpük ve karbonize edilmiş karbon köpüklerin SEM görüntüleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen köpüklerin yapısında oluşan bal peteği görünümüne boşlukların düzensiz beşgen ve altgenler içerdiği görülmüştür. Karbonizasyon sırasında reçine köpüğün daralması nedeniyle, karbon köpükler reçine köpüklerden daha küçük ortalama hücre boyutlarına ve daha düzgün hücre yapısına sahip olmaktadır. Bununla birlikte, sıcaklık yükseldikçe hücreler arasında bulunan ince tabakaların incelip daha belirgin hale geldiği, malzemenin yüzeyinin daha pürüzsüz olduğu ve tabakaların kırılması ile bazı kapalı hücrelerin açıldığı bilinmektedir [18]. SEM görüntüleri incelendiğinde, katran kullanılmadan üretilen



Şekil 5. $GT_{@400^{\circ}C}$ katranının GC/MS kromatogramı (GC/MS chromatogram of $GT_{@400^{\circ}C}$ tar)

Tablo 3. Karbon köpüklerin elementel analiz sonuçları (Elemental analysis results of carbon foams)

Köpük adı	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	HHV (MJ/kg)	H/C	O/C
<i>RG-A</i>	80,811	5,106	12,332	1,751	32,473	0,76	0,11
<i>RGT-A</i>	77,412	2,349	19,977	0,262	25,967	0,36	0,19
<i>RGT-%25-A</i>	80,723	3,028	15,220	1,029	28,924	0,45	0,14

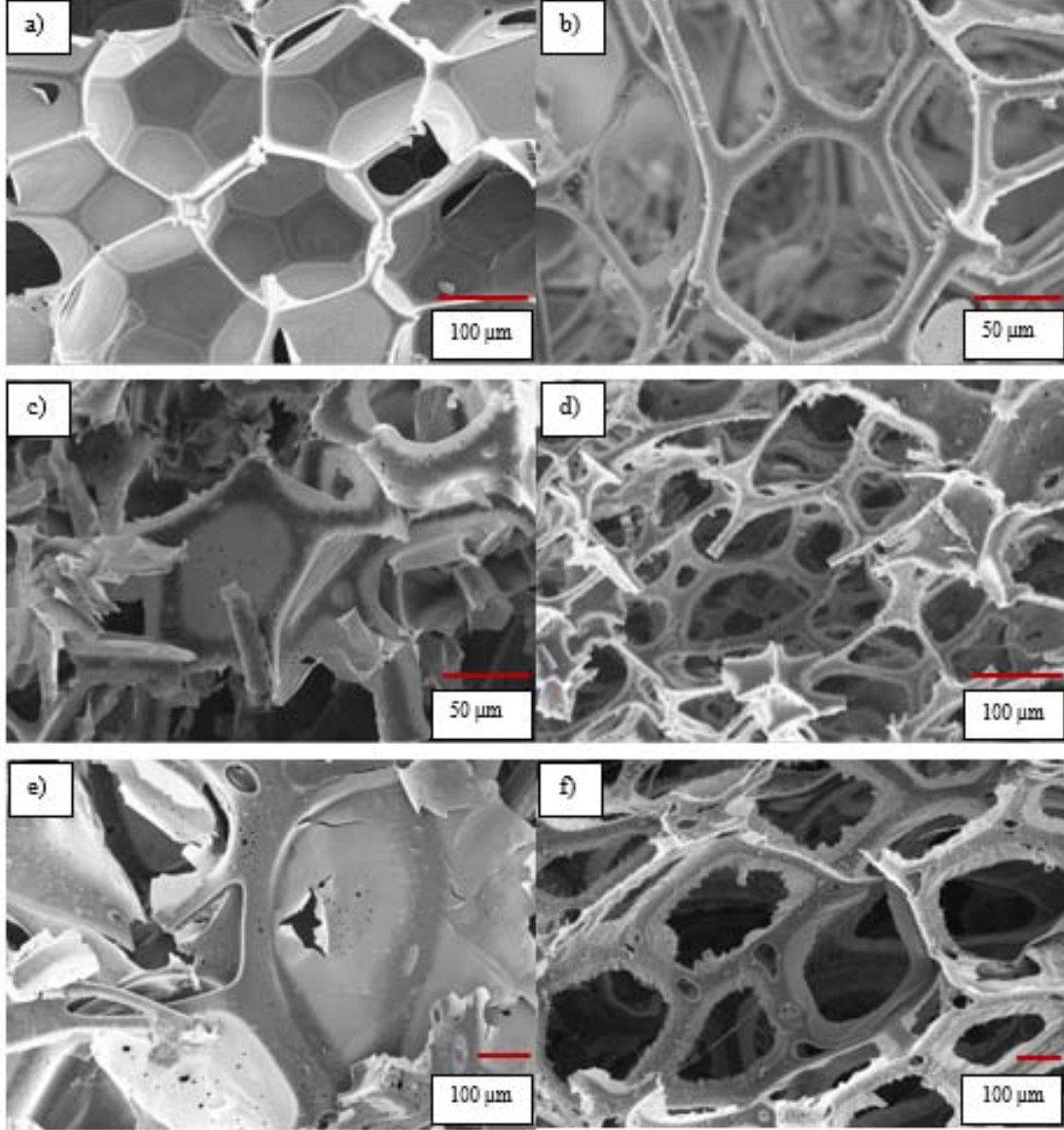
karbon köpüklerin açık gözenek yapısına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6b). Hazırlanan köpüklerin hücre yapılarının çoğunda bitişik hücre, bağ doku ve boğum noktası oluşumu gözlenirken; çözücü olarak fenol+katran karışımı kullanıldığında bu yapıların net bir şekilde oluşmadığı ve yüzeyin daha gözeneksiz bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 6c-d). 30-100 μm gözenek boyutlarına sahip gözenekli *RG-A* ve *RGT-A* karbon köpüklerinin üretildiği, gözeneklerin ligament ve boğum noktalarında 2-10 μm boyutlarında küçük gözeneklerin olduğu belirlenmiştir. Katran kullanılmadan üretilen karbon köpüklerin yapılarının aksine, sentez ortamına katran eklendiğinde daha heterojen ve daha düzensiz hücre şekillerine ve daha çok kapalı gözenek yapısına sahip sert köpükler üretildiği görülmektedir. Bu olgunun açıklaması, katranın yapısındaki kompleks bileşenler nedeniyle sentez ortamına eklenen ve reaksiyon sırasında polimer matrisinden uzaklaşması gereken köpüklenme ajanlarının yapıyı terk edememesidir. Reçine köpüklerin termoset yapıya sahip olması nedeniyle, aktivasyon işlemi sonrasında köpüklerin ilk yapıları korunmuştur. Boşluk büyüklüğü katran kullanıldığında azalmıştır, dolayısıyla köpüklenme derecesi düşmüştür [29]. Şekil 6c-d göz önüne alındığında, köpük yapısında gözenek oluşumunun iyileştirilmesi amacıyla yüzey aktif madde miktarı artırıldığında, reçine köpüklerin yapısında kapalı gözeneklerin oluştuğu belirlenmiştir. Aktivasyon işlemi sonucu yapı değiştirilerek bağ doku ve boğum noktası içeren daha büyük gözeneklerin gelişmesi sağlanmıştır [30]. Yüzey aktif madde miktarı artırıldığında elde edilen köpüklerin boşluk ve hücre boyutları 5-250 μm aralığındadır.

Şekil 7'de verilen TEM görüntülerine göre, karbon köpüklerin amorf gözenekli yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Ayrıca, SEM ve XRD analizleri ile uyumlu olarak grafen katmanlarının üst üste gelmesi sonucu oluşan grafitik karbon bölgelerinin varlığı da dikkat çekmektedir.

3.3.3. XRD analizi (XRD analysis)

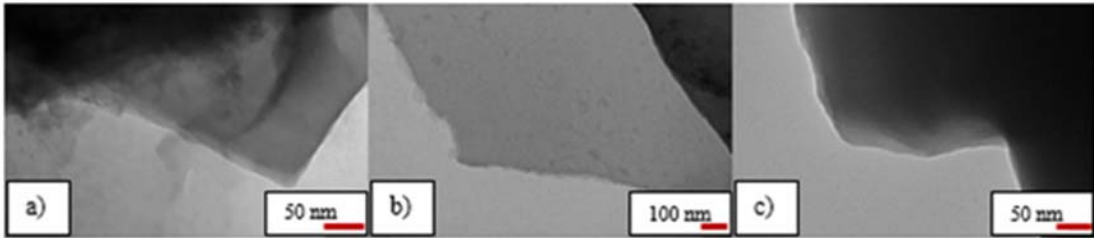
Karbon köpüklerin kristal yapıları hakkında bilgi edinmek için alınan x-ışınları kırınım desenleri Şekil 8'de verilmiştir. XRD desenlerinde çeşitli 2θ değerlerinde konumlanan pikler hegzagonal karbon, ortorombik grafit ve hegzagonal grafit yapısına aittir [31]. Karbonize edilen karbon köpüklerin kırınım desenlerinde 23° ve 43° civarında gözlenen pikler, düzensiz olarak yığılmış grafen tabakalarının (0 0 2) ve (1 0 0) piklerine karşılık gelmektedir [32]. Bu pikler sıvılaştırılmış huş ağacı talaşından [18], karaçam ağacı talaşından [33] üretilen karbon köpüklerin ve poli(furfuril alkol)/poli(etilen glikol) karışımlarının pirolizi ile elde edilen mezogözenekli karbon membranların XRD desenlerinde bulunmaktadır.

XRD desenleri incelendiğinde, *RG* ve *RGT* reçine köpüklerinin 23° ve 31° civarında (0 0 2) kırınım pikleri bulunmadığı için amorf bir yapıya sahip oldukları belirlenmiştir (Şekil 8a-b). Reçine köpüklerin kırınım desenlerinde (1 0 0) pikinin bulunmaması, bu köpüklerin kristal yapıda olmadığını göstermektedir. Sentez ortamına eklenen yüzey aktif madde miktarı artırıldığında, reçine köpüklerin kırınım desenlerinde pik oluşumu gözlemlendiği, dolayısıyla kristal yapının oluşmaya başladığı saptanmıştır (Şekil 8c). *RG-A* ve *RGT-%25-A* karbon köpüklerinin XRD desenlerinde 25° civarında hegzagonal grafit ve hegzagonal karbon, $30-37^{\circ}$ aralığında ortorombik grafit, 47° civarında hegzagonal karbon, 54° civarında ortorombik grafit yapısını belirten piklerin varlığı tespit edilmiştir. *RGT-A* karbon köpüğünün yapısında ise *RG-A* ve *RGT-%25-A*'daki piklere ek olarak 44° civarında ortorombik grafit ve hegzagonal grafit, 58° ve 64° civarında ortorombik grafit yapısına ait pikler gözlemlenmiştir. Tablo 4'de verilen d_{002} ve d_{100} değerleri incelendiğinde, 23° civarında elde edilen d_{002} değerlerinin 0,3767-0,3921 nm aralığında değiştiği belirlenmiştir. 23° 'de elde edilen d_{002} değeri yüksek olduğunda yapının daha



Şekil 6. Gürgeç talaşından üretilen (a) *RG* (b) *RG-A* (c) *RGT* (d) *RGT-A* (e) *RGT-%25* ve (f) *RGT-%25-A* köpüklerinin SEM görüntüleri

(SEM images of (a) *RG* (b) *RG-A* (c) *RGT* (d) *RGT-A* (e) *RGT-25%* and (f) *RGT-25%-A* foams produced from hornbeam sawdust)

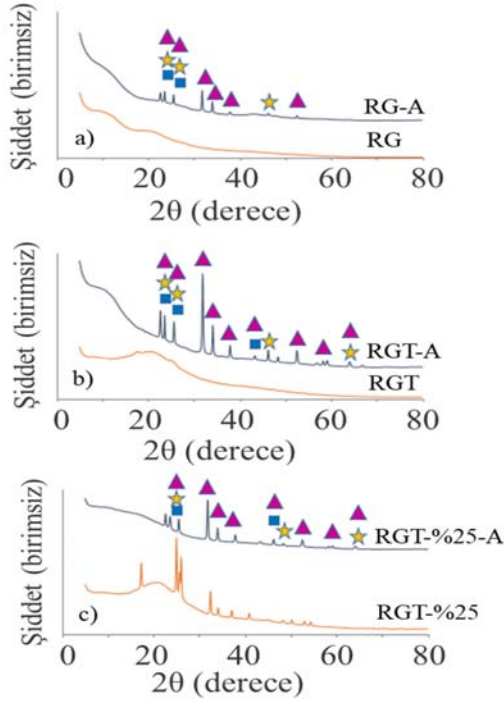


Şekil 7. Gürgeç talaşından üretilen karbon köpüklerin TEM görüntüleri: (a) *RG-A*, (b) *RGT-A* ve (c) *RGT-25%-A*

(TEM images of carbon foams produced from hornbeam sawdust: (a) *RG-A*, (b) *RGT-A* and (c) *RGT-25%-A*)

düzensiz olduğu belirtilebilmektedir. Bu değerler grafit için bulunan 0,3350 nm değerinden [34] daha yüksek olup, grafitize olmayan karbon yapısını ifade etmektedir [18]. Aromatik katmanlar arasındaki boşluk değerini ifade eden

d_{002} değeri, kömürün ısı muamelesinin karbon yapısı üzerindeki etkisinin incelenmesi [33] ve biyokütle esaslı granüler aktif karbonların kristal yapılarının aydınlatılması ile ilgili çalışmalarda da göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 8. Reçine köpük ve karbon köpük XRD desenleri (a) geleneksel sentez (b) alternatif yöntem (c) yüzey aktif madde miktarı etkisi (▲: ortorombik grafit, ★: hegzagonal karbon, ■: hegzagonal grafit)
(Resin foam and carbon foam XRD patterns (a) conventional synthesis (b) alternative method (c) surfactant amount effect (▲: orthorhombic graphite, ★: hexagonal carbon, ■: hexagonal graphite))

3.3.4. Yapısal analiz (Structural analysis)

800°C'de karbonize edilen karbon köpüklerin benzer eğilim gösteren azot adsorpsiyon/desorpsiyon izotermi ve gözenek boyut dağılım grafikleri sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da sunulmuştur. Karbon köpüklerin yapılarında mezo ve mikro gözenekler içeren katılara ait olan IV. tip izoterme sahip olduğu belirlenmiştir. İzotermilerin $P/P_0 < 0,1$ bağıl basıncında yavaş yavaş artmaya başlaması, karbon köpüklerin bu bölgede mikro gözeneklere sahip olduğunu göstermiştir. İzotermelere göre, bağıl basıncın $0,01 < P/P_0 < 0,30$ aralığında adsorplanan hacimde gözlenen artış, yapılarda mezo gözenek dağılımının düzenli olduğunu ifade etmektedir. Karbon köpükler için $P/P_0 > 0,9$ bölgesinde adsorplanan hacimde (V_{ads}) gözlenen artış, köpüklerin yapısında makro gözeneklilik bulunduğunu ifade etmektedir. Genel olarak adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerinde oluşan histeris bölgesi, karbon köpüklerin yapısındaki gözenek şekillerinin homojen olmadığını göstermektedir.

Tablo 5 incelendiğinde, geleneksel yöntem ve alternatif yöntem için yüzey alanı değerleri sırasıyla $467,5 \text{ m}^2/\text{g}$ ve $303,6 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak bulunmuştur. Solvolitik sıvılaştırma işlemine çözücü olarak fenolün yanı sıra katran eklendiğinde yüzey alanının azaldığı, buna ek olarak yüzey aktif madde daha fazla eklendiğinde köpükleşmenin gerçekleşmesine

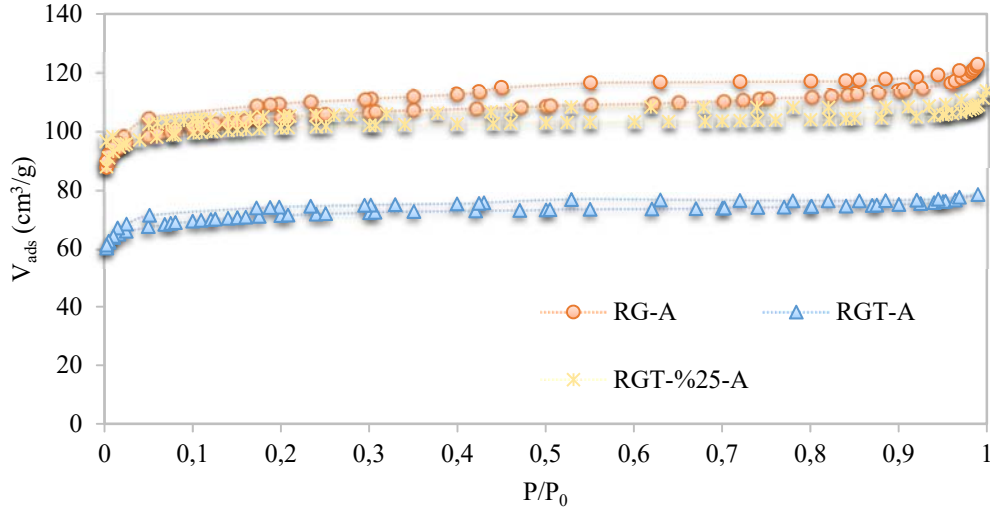
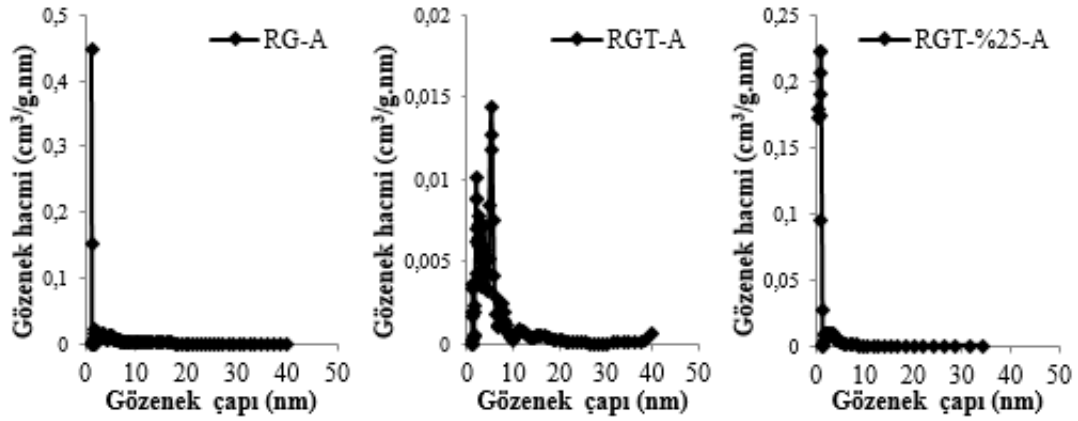
bağlı olarak yüzey alanının da iyileştiği gözlenmiştir. Ayrıca ortalama gözenek çapı (nm) değerlerine göre, köpüklerin yapısındaki gözeneklerin mezo yapıda oldukları belirlenmiştir ($D_p > 2 \text{ nm}$). Sentez ortamına katran eklenmesi ile yüzey alanının azalması ortalama gözenek boyutlarının artması ile doğrudan ilişkilidir. Literatürde karaçam talaşı ve huş ağacı talaşının solvolitik sıvılaştırılması sonucu elde edilen karbon köpüklerin yapısal özellikleri incelenmiştir. Buna göre, sıvılaştırma yöntemi ile üretilen köpüklerin yüzey alanlarının $225\text{-}1918 \text{ m}^2/\text{g}$, toplam gözenek hacimlerinin $0,15\text{-}0,93 \text{ cm}^3/\text{g}$ ve ortalama gözenek çapı değerlerinin $1,93\text{-}2,60 \text{ nm}$ aralıklarında olduğu belirtilmiştir. Örneğin, huş ağacı talaşının sıvılaştırılması ile üretilen karbon köpüklerin $534\text{-}555 \text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanı, $\sim 1,93 \text{ nm}$ gözenek çapı ve $\sim 0,26 \text{ g/cm}^3$ toplam gözenek hacmi değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir [18]. Benzer şekilde, karaçam ağacı talaşının sıvılaştırılması ile üretilen karbon köpüğün yüzey alanı ve gözenek hacmi sırasıyla $1580 \text{ m}^2/\text{g}$ ve $0,885 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak verilmiştir [33]. Karbon köpüğün KOH ile aktivasyonu sonucu yüzey alanının $1918 \text{ m}^2/\text{g}$ değerine ulaştığı bildirilmiştir [35].

3.3.5. Yoğunluk, porozite ve basma dayanımı testleri (Density, porosity and compressive strength tests)

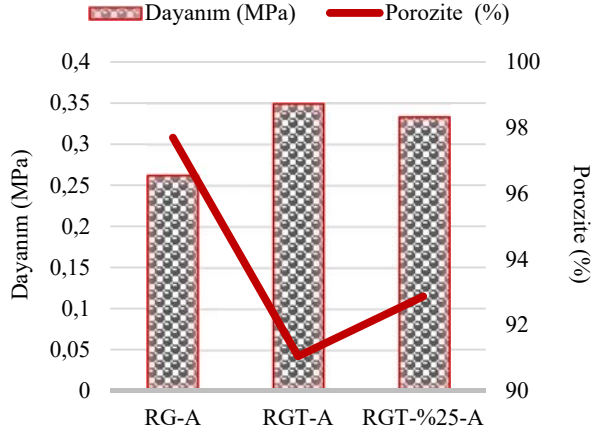
Literatürde farklı ağaç türlerinden üretilen karbon köpüklerin yığın yoğunluklarının $\sim 0,02 \text{ g/cm}^3$ civarında olduğu göz önünde bulundurulduğunda, geleneksel yöntem ile sentezlenmiş gürgen talaşı esaslı karbon köpüğün yığın yoğunluğunun ($0,0248 \text{ g/cm}^3$) literatürde yer alan çalışmalar ile uyum gösterdiği görülmektedir. Benzer şekilde huş ağacı ve karaçam ağacı talaşlarının sıvılaştırılmasından üretilen karbon köpüğün yığın yoğunlukları $0,0210\text{-}0,0229 \text{ g/cm}^3$ [18] ve $0,020\text{-}0,035 \text{ g/cm}^3$ [33] aralıklarında, zeytin çekirdeğinin pirolizinden elde edileninki ise $0,2\text{-}0,3 \text{ g/cm}^3$ [29] olarak verilmiştir. Çözücü olarak fenolün yanı sıra katran eklendiğinde yığın yoğunluğun $0,1292 \text{ g/cm}^3$ 'e çıktığı, fazla miktarda yüzey aktif madde eklenmesi ile $0,0848 \text{ g/cm}^3$ 'e düştüğü belirlenmiştir. Karbon köpüklerin yığın yoğunluklarının düşük olması, yapılarındaki bağdoku, boğum noktası ve hücreler arası tabakalarda var olan mikro ve mezo gözeneklerden kaynaklanmaktadır. Gerçek ve yığın yoğunluk değerleri incelendiğinde; standart yüzey aktif madde miktarı ile çalışıldığında sentez ortamına katran eklendiği takdirde bu değerlerin arttığı, dolayısıyla %porozitenin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 11). Köpüklerin yoğunluklarında meydana gelen artış, yüzey alanı ve porozite değerlerinin azalması ile doğrudan ilişkilidir. Bununla birlikte, polimer içindeki düşük çapraz bağlanma, geniş hücre boyutu ve dolayısıyla zayıf hücre duvarlarının basma dayanımında düşüşe neden olduğu bilinmektedir [36]. Karbon köpüklerin basma dayanımları $0,262\text{-}0,349 \text{ MPa}$ aralığında değişmektedir. Bu değerler geleneksel fenolik köpüklerin basma dayanımları ($0,14\text{-}0,62 \text{ MPa}$) ile karşılaştırıldığında literatür ile uyum içindedir [37]. Sonuç olarak, katran kullanıldığında daha dayanıklı köpükler üretildiği, yüzey aktif madde miktarı arttırıldığında ise gözenekliliğin artmasına bağlı olarak dayanımı daha az olan köpükler üretildiği görülmüştür.

Tablo 4. Karbon köpüklerin XRD parametreleri (XRD parameters of carbon foams)

Köpük adı	2θ (002) (°)	d ₀₀₂ (nm)	2θ (100) (°)	d ₁₀₀ (nm)
RG-A	23,60 ve 31,82	0,3767 ve 0,2810	43,03	0,2100
RGT-A	22,67 ve 31,90	0,3919 ve 0,2803	43,34	0,2086
RGT-%25-A	22,66 ve 31,82	0,3921 ve 0,2810	46,28	0,1960

**Şekil 9.** Karbon köpüklerin N₂ adsorpsiyon/desorpsiyon izotermeleri (N₂ adsorption/desorption isotherms of carbon foams)**Şekil 10.** Karbon köpüklerin gözenek boyut dağılımı grafikleri (Pore size distribution profiles of carbon foams)**Tablo 5.** Solvolitik sıvılaştırma yöntemi ile üretilen karbon köpüklerin yapısal özellikleri (Structural properties of carbon foams produced by solvolytic liquefaction method)

Köpük adı	S _{BET} (m ² /g)	V _{toplam} (cm ³ /g)	V _{mikro} (cm ³ /g)	V _{mezo} (cm ³ /g)	D _p (nm)
RG-A	467,5	0,2657	0,1520	0,1137	2,27
RGT-A	303,6	0,1826	0,0970	0,0856	2,41
RGT-%25-A	310,5	0,1671	0,0730	0,0941	2,76



Şekil 11. Karbon köpüklerin basma dayanımı ve porozite ilişkisi (Compressive strength and porosity relationship of carbon foams)

4. SİMGELER (SYMBOLS)

d_p	: Biyokütle parçacık boyutu (mm)
D_p	: Ortalama gözenek çapı (nm)
d_{002}	: (0 0 2) düzlemine ait düzlemler arası mesafe (nm)
d_{100}	: (1 0 0) düzlemine ait düzlemler arası mesafe (nm)
GT	: Gürge talaşı
$GT_{@400^\circ C}$	: 400°C'de piroliz sonucu elde edilen katran
HHV	: Üst ısı değeri (MJ/kg)
RG	: Reçine köpük (çözücü:fenol)
RG-A	: Karbon köpük (çözücü:fenol)
RGT	: Reçine köpük (çözücü:fenol+katran karışımı)
RGT-A	: Karbon köpük (çözücü:fenol+katran karışımı)
RGT-%25	: Reçine köpük (çözücü:fenol+katran karışımı, %25 fazla yüzey aktif madde)
RGT-%25-A	: Karbon köpük (çözücü:fenol+katran karışımı, %25 fazla yüzey aktif madde)
S_{BET}	: Yüzey alanı (m ² /g)
V_{mikro}	: Mikro-gözenek hacmi (cm ³ /g)
V_{mezo}	: Mezo-gözenek hacmi (cm ³ /g)
$V_{toplaml}$	: Toplam gözenek hacmi (cm ³ /g)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Son yıllarda, fosil kaynakların tükenmekte olması ve daha ekonomik öncü maddelerin değerlendirilebilmesi amacıyla alternatif kaynaklardan karbon malzemelerin üretilmesi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Bu nedenle, yenilenebilir hammadde kaynaklarının bu amaç doğrultusunda kullanılabilmesi için çalışmalar hızla sürmektedir. Piroliz işlemi organik atıkların organik ürünlere dönüşümünü sağlayan, biyokütle gibi fazla miktarda oluşan atıkların atık yükünün azaltılması ve aynı zamanda enerji içeriklerinin geri kazanılması için uygulanan bir yöntemdir. Piroliz sonucu elde edilen ürünler çeşitli endüstrilerde hammadde olarak ya da geleneksel yakıtlar yerine enerji üretiminde

kullanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, gürge talaşının sıvılaştırılması ile ayarlanabilir özelliklere ve çok katmanlı grafen yapısına sahip karbon köpüklerin üretilmesi belirlenmiştir. Sıvılaştırma sürecinde kullanılan çözücü türünün köpüğün elementel içeriği, morfolojik yapısı, kristalografik özellikleri üzerinde önemli etkisinin olduğu görülmüştür. 400°C'de üretilen pirolitik katranın aromatik fraksiyonunun yüksek olması nedeniyle, sıvılaştırma işleminde fenole alternatif olarak kullanılabileceği ve köpük üretilabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, katranın çözücü olarak eklenmesiyle oluşan düzensiz gözenek yapısının yüzey aktif madde miktarı katkısı yapılarak iyileştirilebileceği ve uygulama alanına göre istenilen özelliklere sahip karbon köpük üretilabileceği kanıtlanmıştır.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar 2018-01.BŞEÜ.03-10 projesine verdiği destek için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kyotani, T., Control of Pore Structure In Carbon, Carbon, 38(2), 269-286, 2000.
2. Wu Z., Zhao D., Ordered Mesoporous Materials as Adsorbents, Chem. Commun., 47 (12), 3332-3338, 2011.
3. Zhou J., Yuan X., Xing W., Si W.J., Zhuo S.P., Mesoporous Carbons Derived from Citrates for Use in Electrochemical Capacitors, New Carbon Mater., 25 (5), 370-375, 2010.
4. Sánchez-Martín J., Beltrán-Heredia J., Delgado-Regana A., Rodríguez-González M.A., Rubio-Alonso F., Optimization of Tannin Rigid Foam As Adsorbents For Waste Water Treatment, Ind. Crops Prod., 49, 507-514, 2013.
5. Lin M., Huang C., Lo M., Mou C., Well-Ordered Mesoporous Carbon Thin Film With Perpendicular Channels: Application To Direct Methanol Fuel Cell, J. Phys. Chem. C., 112 (3), 867-873, 2008.
6. Gao P., Wang A., Wang X., Zhang, T., Synthesis of Highly Ordered Ir-Containing Mesoporous Carbon Materials By Organic-Inorganic Self-Assembly, Chem. Mater., 20 (5), 1881-1888, 2008.
7. Hu S., Li Y., Polyols and Polyurethane Foams From Base-Catalyzed Liquefaction of Lignocellulosic Biomass By Crude Glycerol: Effects of Crude Glyc-Erolimpurities, Ind. Crops Prod., 57, 188-194, 2014.
8. Jana P., Fierro V., Pizzi A., Celzard A., Biomass-Derived, Thermally Conducting, Carbon Foams For Seasonal Thermal Storage, Biomass Bioenergy, 67, 312-318, 2014.
9. Yagmur S., Kurt A., Seker U., Evaluation and mathematical modeling of delamination and cutting forces in milling of carbon fiber reinforced composite (CFRP) materials, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 457-465, 2020.
10. Tran M.H., Lee E., Development and optimization of solvothermal liquefaction of marine macroalgae

- Saccharina japonica biomass for biopolyol and biopolyurethane production, *J. Ind. Eng. Chem.*, 81, 167-177, 2020.
11. Bag O., Tekin K., Production and characterization of hydrothermal carbon from waste lignocellulosic biomass, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 1063-1076, 2020.
 12. Shi Y., Xia X., Li J., Wang J., Zhao T., Yang H., Jiang J., Jiang X., Solvolysis kinetics of three components of biomass using polyhydric alcohols as solvents, *Bioresour. Technol.*, 221, 102-110, 2016.
 13. Isa K.M., Abdullah T.A.T., Ali U.F.M., Hydrogen donor solvents in liquefaction of biomass: A review, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 81, 1259-1268, 2018.
 14. Lin L., Yao Y., Yoshioka M., Shiraishi N., Liquefaction Mechanism of Cellulose In The Presence of Phenol Under Acid Catalysis, *Carbohydr. Polym.*, 57 (2), 123-129, 2004.
 15. Liu Z., Zhang F., Effects of Various Solvents on the Liquefaction of Biomass To Produce Fuels and Chemical Feedstocks, *Energy Convers. Manage.*, 49 (12), 3498-3504, 2008.
 16. Fan S.P., Zakaria S., Chia C.H., Jamaluddin F., Nabihah S., Liew T.K., Pua, F.L., Comparative Studies of Products Obtained From Solvolysis Liquefaction of Oil Palm Empty Fruit Bunch Fibres Using Different Solvents, *Bioresour. Technol.*, 102 (3), 3521-3526, 2011.
 17. Wang Y., Wang H., Lin H., Zheng Y., Zhao J., Pelletier A., Li K., Effects of solvents and catalysts in liquefaction of pinewood sawdust for the production of bio-oils, *Biomass Bioenergy*, 59, 158-167, 2013.
 18. Wang R., Li W., Liu S., A Porous Carbon Foam Prepared from Liquefied Birch Sawdust, *J. Mater. Sci.*, 1977-1984, 2012.
 19. Ning F., Cong W., Hu Y., Wang H., Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties, *J. Compos. Mater.*, 51 (4), 451-462, 2017.
 20. Apaydın-Varol E., Farklı Biyokütlelere Değişik Isıl İşlemler Uygulanması ve Elde Edilen Ürün Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.
 21. Inal I., Gurten I., Gokce Y., Yagmur E., Aktas Z., Investigation of supercapacitor performance of the biomass based activated carbon modified with nitric acid, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University.*, 35 (3), 1243-1255, 2020.
 22. Yargıç A.Ş., Karbon Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi-Anadolu Üniversitesi Ortak Protokol, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 2017.
 23. Köysüren H.N., Köysüren Ö., Preparation of polyvinyl alcohol composite nanofibers and solid-phase photocatalytic degradation of polyvinyl alcohol, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1411-1418, 2018.
 24. Büyükada M., Kinetic and thermodynamic investigation of removal of different model dyes using hazelnut shells, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2033-2044, 2019.
 25. Özbay N., Apaydın-Varol E., Uzun B., Pütün, A., Characterization of Bio-Oil Obtained from Fruit Pulp Pyrolysis, *Energy*, 33, 1233-1240, 2008.
 26. Uzun B.B., Apaydın-Varol E., Ateş F., Özbay N., Pütün A.E., Synthetic Fuel Production from Tea Waste: Characterisation of Bio-Oil and Bio-Char, *Fuel*, 89, 176-184, 2010.
 27. Özbay N., Pamuk Çiğidi Pres Küspesinin Pirolyzi ve Sıvı Ürünlerinin Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1998.
 28. Araújo R., Pasa V., Melo B., Effects of Biopitch on the Properties of Flexible Polyurethane Foams, *Eur. Polym. J.*, 41 (6), 1420-1428, 2005.
 29. Rios R., Martinez-Escandell M., Molina-Sabio M., Rodriguez-Reinoso F., Carbon Foam Prepared by Pyrolysis of Olive Stones Under Steam, *Carbon*, 1448-1454, 2006.
 30. Lee S., Teramoto Y., Shiraishi N., Resol-Type Phenolic Resin From Liquefied Phenolated Wood and Its Application To Phenolic Foam, *J. Appl. Polym. Sci.*, 84, 468-472, 2002.
 31. Ozbay N., Yargic A.S. Carbon foam production from bio-based polyols of liquefied spruce tree sawdust: Effects of biomass/solvent mass ratio and pyrolytic oil addition, *J. Appl. Polym. Sci.*, 136 (11), 47185, 2019.
 32. Strano M.S., Zydney A.L., Barth H., Wooler G., Agarwal H., Foley H.C., Ultra-Filtration Membrane Synthesis by Nanoscale Templating of Porous Carbon, *J. Membr. Sci.*, 198 (2), 173-186, 2002.
 33. Li W., Huang Z., Wu Y., Zhao X., Liu S., Honeycomb Carbon Foams With Tunable Pore Structures Prepared from Liquefied Larch Sawdust By Self-Foaming, *Ind. Crops Prod.*, 64, 215-223, 2014.
 34. Takagi H., Maruyama K., Yoshizawa N., Yamada Y., Sato Y., XRD Analysis of Carbon Stacking Structure in Coal During Heat Treatment, *Fuel*, 83 (17-18), 2427-2433, 2004.
 35. Liu S., Huang Z., Wang R., A Carbon Foam With A Bimodal Micro-Mesoporous Structure Prepared From Larch Sawdust For The Gas-Phase Toluene Adsorption, *Mater. Res. Bull.*, 2437-2441, 2013.
 36. Septevani A.A., Evans D.A.C., Chaleat C., Martin D.J., Annamalai P.K., A Systematic Study Substituting Polyether Polyol with Palm Kernel Oil Based Polyester Polyol in Rigid Polyurethane Foam, *Ind. Crops Prod.*, 66, 16-26, 2015.
 37. Dos-Santos C., Costa M., De Moraes W., Pasa V., Phenolic Foams From Wood Tar Resols, *J. Appl. Polym. Sci.*, 115, 923-927, 2010.



Investigation of infill wall modelling techniques on a substandard reinforced concrete frame

İsmail Durğut*^{ID}, Onur Tunaboyu^{ID}, Özgür Avşar^{ID}

Department of Civil Engineering, Eskişehir Technical University, Eskişehir, 26555, Turkey

Highlights:

- Behavior of reinforced concrete frame
- Infill wall modelling techniques
- Nonlinear force displacement relationship of infill wall

Keywords:

- Infill wall modelling
- Pushover analysis
- Substandard
- Reinforced concrete
- Shear damage

Article Info:

Research Article
Received: 16.01.2020
Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.673866

Correspondence:

Author: İsmail Durğut
e-mail:
ismail.durgut@suyapi.com.tr
phone: +90 536 969 7871

Graphical/Tabular Abstract

An analytical study was conducted for investigating the effectiveness of infill wall modelling techniques to estimate the realistic behavior of infilled RC frames.

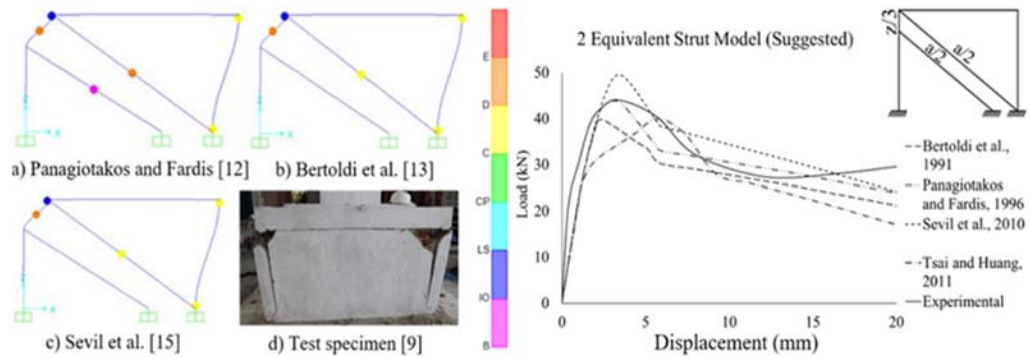


Figure A. Analysis results of a RC frame with infill wall modelled with the proposed two equivalent strut models and 4 different constitutive models

Purpose: The aim of this study is to identify an effective infill wall modelling technique, which can best represent the actual behavior of a substandard reinforced concrete frame with infill walls constructed with high strength mortar, plaster and bricks commonly encountered in the existing building stock.

Theory and Methods:

Experimental response of a substandard reinforced concrete frame with infill walls were used to investigate the effect of infill wall modelling techniques by comparing with the analytically obtained response of the tested frame. The comparisons were made in terms of hysteretic response obtained under reversed cyclic lateral load and structural damages observed at the boundary columns. Four different force-displacement relations and six different geometric modelling techniques, one of which is proposed in this study, are used for the analytical modelling of infill walls.

Results:

The experimentally obtained hysteretic curve is more consistent with the analytically obtained capacity curve both by the proposed two strut model and the existing three parallel strut model. Apart from these two models, the results of the pushover analysis obtained by other geometric modeling methods differ significantly from the experimental results obtained for the test specimen. In addition to the geometric modelling of the infill wall, it is seen that the force-displacement relation employed for the infill wall can result in significant differences in the analytical behavior of the RC frame.

Conclusion:

Boundary columns of the infilled RC frames without any openings can be exposed to shear damage, which is similar to the behaviour of short column failure. Therefore, it is highly crucial to consider the effect of infill walls in the analytical model properly to reproduce the seismic behavior of substandard RC frames with infills realistically. It has been found out that the proposed two parallel strut model in this study and three parallel strut model in the literature are more effective modelling techniques in this respect. Moreover, the force-displacement relation employed for the infill wall plays a critical role in achieving the actual behaviour of the infilled RC frame.



Dolgu duvar modelleme tekniklerinin standart-altı betonarme bir çerçeve üzerinde irdelenmesi

İsmail Durğut*^{ID}, Onur Tunaboyu^{ID}, Özgür Avcı^{ID}

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Betonarme çerçevenin davranışı
- Dolgu duvar modelleme teknikleri
- Dolgu duvarın doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.01.2020

Kabul: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.673866

Anahtar Kelimeler:

Dolgu duvar modelleme,
itme analizi,
standart-altı,
betonarme,
kesme hasarı

ÖZET

Dolgu duvarlar genellikle kirişlerin üzerindeki yayılı yük olarak betonarme hesaplara dahil edilmektedir. Ancak, dolgu duvarların betonarme çerçevelerin davranışına etkilerinin olduğu birçok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır. İyi dayanımlı boşluksuz dolgu duvarlar deprem sırasında kenar kolonlarda gevrek kesme hasarları oluşturabilmektedir ve bu hasar betonarme yapının tamamen göçmesine dahi sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, gerçekçi yapı davranışının elde edilebilmesi için dolgu duvarların analitik modele dahil edilmesi büyük önem arz etmektedir. Dolgu duvar modelleme yöntemi ile çerçeve kenar kolonlarda neden olacağı iç kuvvetlerin gerçeğe yakın bir şekilde hesaplanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada laboratuvar ortamında test edilmiş dolgu duvarlı standart-altı betonarme bir çerçevenin tersinir tekrarlı yükler altında elde edilen kapasite eğrisi ve çerçeve kolonlarında oluşan yapısal hasarları literatürde kullanılan dolgu duvar modelleme yöntemleriyle analitik olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda dört farklı dolgu duvar kuvvet-deplasman ilişkisi ile altı farklı geometrik modelleme tekniği kullanılmıştır. Test edilen dolgu duvarlı betonarme çerçevenin davranışına en yakın sonucu veren dolgu duvar modelleme yöntemi belirlenmiştir. Ayrıca, yeni bir dolgu duvar modelleme tekniği olarak paralel iki basınç çubuklu dolgu duvar modeli önerilmiştir.

Investigation of infill wall modelling techniques on a substandard reinforced concrete frame

H I G H L I G H T S

- Behavior of reinforced concrete frame
- Infill wall modelling techniques
- Nonlinear force displacement relationship of infill wall

Article Info

Research Article

Received: 16.01.2020

Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.673866

Keywords:

Infill wall modelling,
pushover analysis,
substandard,
reinforced concrete,
shear damage

ABSTRACT

Infill walls are mostly considered as distributed load only on the beams in the design and assessment of RC buildings. However, it has been emphasized by many researchers that the infill walls have a considerable impact on the seismic behavior of reinforced concrete frames. The infill walls can cause brittle shear damages at the ends of the boundary columns during the earthquake. The column shear damage can even lead to total collapse of reinforced concrete buildings. Therefore, considering the infill walls in analytical models is essential for achieving realistic structural design and assessment. Hence the infill wall modeling method should satisfactorily reproduce the internal forces that are developed in the frame columns. In this study, the experimental results of an infilled RC frame were used to investigate the effectiveness of infill wall modeling techniques by comparing with the analytically obtained cyclic response of the tested frame. Analytical modelling of infill walls was made by considering four different force-displacement relations and six different geometric modelling techniques. The most appropriate modelling technique is sought through the investigated ones that has the closest results with the cyclic response of the tested frame. Moreover, a parallel two-strut model was proposed as an original infill wall modelling technique.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ismail.durgut@suyapi.com.tr, onurtunaboyu@eskisehir.edu.tr, ozguravcar@eskisehir.edu.tr /

Tel: +90 536 969 7871

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dolgu duvarlar, taşıyıcı sistemde genellikle çerçeve düzlemi içerisinde kirişler üzerinde bulunmaktadır ve taşıyıcı sisteme olan etkisi betonarme hesaplarda genellikle kirişlerin üzerinde olan yayılı yük olarak dikkate alınmaktadır. Dolgu duvarların dayanım ve rijitliğe katkıları ile yapısal davranış etkileri genellikle hesaba katılmamaktadır. Gerek ve Soyluk [1] ile Çiftçi vd. [2]. Ancak, bugüne kadar birçok araştırmacı gerek analitik gerekse deneysel olarak yaptıkları çalışmalarla dolgu duvarların taşıyıcı sisteme olumlu ve olumsuz etkilerinin olduğunu vurgulamışlardır. Tunaboyu ve Avşar [3]. Özellikle, dolgu duvarlar kendisini sınırlayan çerçeve elemanları ile etkileşim içinde oldukları için çerçeve elemanlarının davranışına etkilerinin olması kaçınılmazdır. Deprem yer hareketi nedeniyle dolgu duvarlarda meydana gelen ezilme, çatlama ve yatay derz kayması gibi hasarlar, duvarların betonarme çerçeve ile etkileşimde olduklarını ve deprem etkilerine karşı yapının dayanım ve rijitliğine katkı sağladıkları anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, gerçekçi betonarme davranışının elde edilebilmesi için dolgu duvarların sayısal modellere dahil edilmesi gerekmektedir.

Analitik çalışmalarda dolgu duvarları modelleyebilmek için eşdeğer basınç çubuklu modelleme yöntemi ve sonlu elemanlar metodu araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodunun uygulanabilirliğinin zor olması, eşdeğer basınç çubuklu modellerin daha çok kullanılmasına yol açmıştır. Dolgu duvarlar yatay yük etkisinde çerçevenin duvara temas ettiği köşelerde aksel basınç altında çalışan eşdeğer diyagonal basınç çubukları ile idealize edilmektedir. Dolgu duvarlar tekli eşdeğer basınç çubuğuyla modellenebileceği gibi ikili, üçlü ve beşli (çoklu) eşdeğer basınç çubuklarıyla da modellenmektedir. Dolgu duvarları tekli eşdeğer basınç çubuğuyla modellemek oldukça basit bir yöntem olmasına rağmen, çerçeve elemanlarında oluşan iç kuvvetleri (eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri) yansıtmakta çoklu eşdeğer basınç çubuklu modellere göre yetersiz kalmaktadır. Dolgu duvarları tekli veya çoklu eşdeğer basınç çubuklarıyla modellemenin yanı sıra, doğrusal elastik olmayan gerçekçi kuvvet-deplasman ilişkisinin belirlenmesi de büyük önem arz etmektedir.

Bugüne kadar birçok araştırmacı dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin gerçeğe en yakın modelleme yönteminin elde edilebilmesi için deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Crisafulli ve Carr [4] tekli, ikili ve üçlü eşdeğer basınç çubuğu modellerini kullanarak yaptıkları çalışmada, dolgu duvarı tekli eşdeğer basınç çubuğu ile modellemenin basit bir modelleme tekniği olmasına rağmen dolgu duvarlı çerçevenin rijitliğinin ve elemanlarda oluşan aksel yükün yeterli düzeyde tahmin edilebildiğini ama çerçeve elemanlarında oluşan eğilme momenti ve kesme kuvvetinin üçlü çubuk modeli ile daha doğru değerlerin bulunduğunu vurgulamışlardır. Kaushik vd. [5] tek katlı ve tek açıklıklı dolgu duvarlı 6 farklı analitik model ile (dolgu duvarsız betonarme çerçeve, tam ve kısmi dolu olan sonlu eleman modelleri ile oluşturulan dolgu duvarlı betonarme

çerçeveler, tekli ve üçlü diyagonal basınç çubuğu ile oluşturulan dolgu duvarlı betonarme çerçeveler) yapılan doğrusal analizlerin sonuçlarını kıyaslamışlardır. Üçlü basınç çubuklu modelin çerçeve elemanlarında oluşturduğu kuvvetler düşünüldüğünde, sonlu eleman modelleri ile oluşturulan dolgu duvarlı çerçeveye yakın sonuçlar verdiği ve uygulamasının daha kolay olduğu için dolgu duvarlı modeli tasarlamada daha iyi bir seçenek olduğu belirtilmiştir. Ghosh ve Kumar [6] 8 farklı geometri ile 7 farklı eşdeğer basınç çubuğunun doğrusal elastik olmayan kuvvet-deplasman ilişkisinin kombinasyonlarından oluşan toplam 56 adet dolgu duvarlı analitik model ile çalışma yapmışlardır. Çalışmada 35 adet tek katlı ve tek açıklıklı deneysel numunenin kuvvet deplasman ilişkisini analitik olarak elde etmeye çalışmışlardır. Oluşturulan 3 eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin dolgu duvarlı betonarme çerçevenin kuvvet-deplasman eğrisinin elde edilmesinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Timurağaoğlu vd. [7] tek katlı ve tek açıklıklı gaz beton dolgu duvarlı betonarme çerçeve modelini hem analitik hem de deneysel olarak yatay yük etkisinde incelemiştir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak tekli, ikili ve üçlü eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar çerçeve modelleri analiz edilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çoklu eşdeğer basınç çubuğu modellerinin çerçevenin genel davranışını tekli çubuk modeline göre daha iyi yansıttığını vurgulamışlardır. Üçlü basınç çubuğu modelinin dolgu duvar ve çerçeve arasındaki yük geçişini sağladığı, tekli basınç çubuğu modeli ile çerçevede oluşan iç kuvvetlerin doğru bir şekilde hesaplanmadığı ve dolgu duvar ile çerçeve arasındaki dayanım farkının çok düşük olduğu durumda kullanılabileceği belirtilmiştir. Trapani vd. [8] dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin modellenmesi hakkında yaptıkları geniş literatür taramasında sonlu elemanlar mikro modelleme yönteminin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini ama uygulamasının çok zahmetli olduğunu belirtmişlerdir. Tekli eşdeğer basınç çubuklu makro modelleme yönteminin daha kolay olduğunu ama yanıl yük etkisinde dolgu duvarlı çerçeve elemanlarda oluşan gerilmelerin gerçeği tam yansıtmadığını belirtmişlerdir. Çoklu eşdeğer basınç çubuklu modellerle kolon ve kiriş elemanlarında oluşan kesme kuvvetlerinin bulunabileceğini belirtmişlerdir. Hasar yapıcı depremlerin ardından, iyi dayanımlı boşluksuz dolgu duvarın çerçeve kolonlarının üst bölgelerinde ezilerek dökülmesi ile kolonların uçlarında boşluk oluşturduğu ve kısa kolon hasarına benzer kesme hasarlarına yol açtığı görülmüştür. Tunaboyu [9] çalışmasında, kısa kolon oluşması beklenmeyen boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçeve kolonlarında kısa kolon oluşumuna neden olan etmenleri deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmada, farklı malzeme ve geometrik özellikler ile oluşturulan 14 numune kullanmıştır. Çerçevelere tekrarlı tersinir yatay deplasman çevrimleri uygulamıştır ve hedef deplasmanındaki hasar tiplerini incelemiştir. Boy/en oranı 0,58 olan iyi ve orta dayanımlı harç ve sıva ile üretilen dolgu duvarlı kısa numunelerde kısa kolon hasarı oluşumuna benzer bir davranış gözlemlenmiş ve kısa kolon hasarı davranışının meydana gelmesinde harç ve

sıva dayanımının etkin bir rol üstlendiğini vurgulamıştır. Sattar vd. [10] Los Angeles ve California’da 1920’li yıllardaki sünek olmayan dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız 13 farklı mimari tasarıma sahip yapıların göçme performanslarını değerlendirmişlerdir. Dolgu duvarlı yapının yıkılma olasılığının dolgu duvarların kolonlarda oluşturduğu gevrek kesme kırılmasından dolayı, dolgu duvarsız yapıdan fazla olduğunu belirtmişlerdir. İyi dayanımlı dolgu duvarın yapının dayanım ve rijitliğini artırmasına rağmen, kolonlarda gevrek kesme kırılmasına neden olduğu belirtilmiştir. Zayıf dayanımlı dolgu duvarlı yapının performansının, dolgu duvarın daha az miktarda deprem kuvvetini komşu kolonlara aktarması nedeniyle kolonlarda oluşan kesme kırılmasını geciktirdiği için iyi dayanımlı dolgu duvarlı yapının performansından daha iyi olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, Mehrabi vd. [11] düşük dayanımlı betonarme çerçevelerde dolgu duvarların güçlü olması durumunda çerçeve elemanlarında gevrek kesme hasarlarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Depremlerden sonra boşluksuz dolgu duvarların çerçeve kolonlarında oluşturduğu gevrek kesme hasarları betonarme yapıların tamamen göçmesine neden olabilmektedir. Dolayısıyla, dolgu duvarları betonarme hesaplara dahil etmenin kaçınılmaz bir gereklilik olduğu görülmektedir. Ancak, bu durumda çerçeve kolonlarında oluşan iç kuvvetleri belirleyebilmek için analitik modellerde dolgu duvarları modelleme yöntemi büyük önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, Tunaboyu [9] tarafından deneysel çalışmada kullanılan tek katlı ve tek açıklıklı iyi dayanımlı harç ve sıva ile üretilen güçlü dolgu duvarlı betonarme çerçevenin analitik modeli oluşturulmuştur. Dolgu duvarları modellemek için 6 farklı geometriyle oluşturulan (literatürde kullanılan tekli, ikili, üçlü, ikili çapraz ve beşli eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modelleme yöntemleri ile bu çalışmada önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu model) eşdeğer basınç çubuklu analitik modeller ile eşdeğer basınç çubukların doğrusal olmayan 4 farklı kuvvet-deplasman ilişkileri kullanılmıştır. Çevrimsel deney sonucu elde edilen dolgu duvarlı betonarme çerçeve davranışına en yakın sonucu veren dolgu duvar modelleme yönteminin belirlenmesi için itme analizi yapılacak 24 adet analitik model oluşturulmuştur. Deney numunesinin tersinir tekrarlanır yükler altında elde edilen kuvvet-deplasman eğrisine en yakın kapasite eğrisi ve çerçeve elemanlarında oluşan yapısal hasarları tespit edebilen dolgu duvarlı analitik modeller elde edilmeye çalışılmıştır. Buna göre, mevcut yapı stokunda yaygın bir şekilde karşılaşılan iyi dayanımlı harç, sıva ve tuğla ile üretilmiş boşluksuz dolgu duvarlı standart-altı betonarme bir çerçevenin davranışını en iyi seviyede temsil edebilecek dolgu duvar modelleme tekniği belirlenecektir.

2. ANALİTİK ÇALIŞMA (ANALYTICAL WORK)

Tunaboyu [9] kısa kolon oluşması beklenmeyen boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçeve kolonlarında oluşan kesme kırılmalarının nedenlerini deneysel ve analitik olarak araştırmıştır. Boşluksuz dolgu duvarlı çerçevelerde oluşan kesme kırılmalarının kolonun üst bölgesinde bulunan dolgu

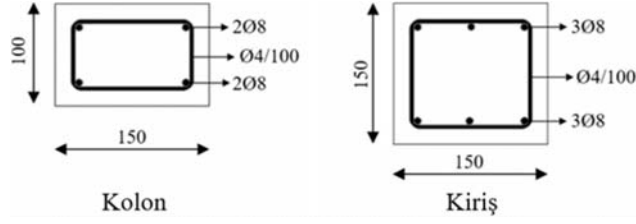
duvarın ezilerek boşluk oluşturmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Boşluksuz dolgu duvarın ezilerek kesme hasarına sebep olduğunu düşündüğü etmenleri deneysel olarak tek katlı, tek açıklıklı boşluksuz dolgu duvarlı 9 kısa numune ve 5 uzun numune olmak üzere 14 betonarme çerçeve üzerinde incelemiştir. Bu çalışmada, Tunaboyu [9]’da kullanılan boşluk oranı %42 olan tuğlalardan üretilen ve B sınıfı iyi dayanımlı harç ve sıva ile imal edilen dolgu duvar dayanımı en yüksek betonarme çerçeve numunesinden yararlanılmıştır. Literatürde kullanılan tekli, ikili, üçlü, ikili çapraz ve beşli eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modelleme yöntemleri ile bu çalışmada önerilen ikili eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modeli kullanılmıştır. Tunaboyu [9] tarafından test edilen numunenin kuvvet-deplasman eğrisi ile çerçeve elemanlarında oluşan yapısal hasarları analitik olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Analitik çalışmada, Panagiotakos ve Fardis [12], Bertoldi vd. [13], Tsai ve Huang [14] ve Sevil vd. [15] tarafından kullanılan eşdeğer basınç çubuğunun 4 farklı doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkileri ile 6 farklı geometriden oluşan tekli ve çoklu eşdeğer basınç çubuğu modellerinin kombinasyonlarından 24 modelleme yöntemi oluşturulmuştur.

2.1. Analitik Çalışmada Kullanılan Test Numunesinin Geometrik ve Malzeme Özellikleri (Geometric and Material Properties of the Test Specimen Used in Analytical Study)

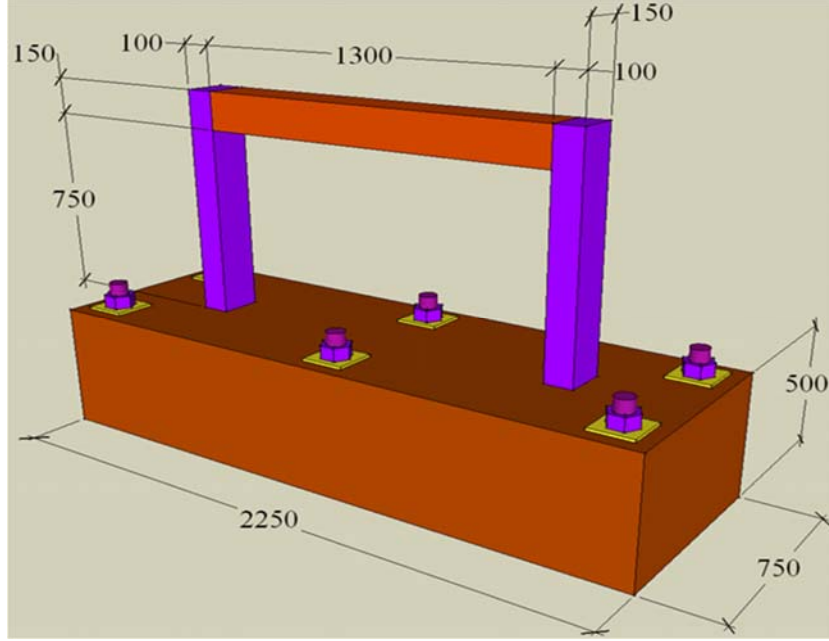
Analitik çalışmada kullanılan numunenin kesit boyutları ile kiriş ve kolonlardaki donatı düzenlemesi Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir. 1/3 ölçekli numunenin net kolon yüksekliği 750 mm, net kiriş açıklığı 1300 mm’dir. Kolonların boyutu 100 x 150 mm, kirişin boyutu ise 150 x 150 mm’dir. Kolon ve kirişlerde boyuna donatı olarak 8 mm çapında, etriye donatısı olarak ise 4 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Etriyelerin aralığı kolonlarda ve kirişlerde 100 mm ve uçları 90 derece kancalıdır. Kolon ve kirişlerde, etriye olarak kullanılan 4 mm çapındaki donatının akma dayanımı 600 MPa ve boyuna donatı olarak kullanılan 8 mm çapındaki donatının akma dayanımı ise 310 MPa’dır.

Test numunesinin ortalama beton basınç dayanımı 11 MPa’dır ve elastisite modülü ise ACI-318M [16]’te önerilen E_s 1 ile 16580 MPa olarak hesaplanmıştır. Duran vd. [17] çalışmalarında da vurgulandığı üzere mevcut bina stokundaki ortalama beton basınç dayanımı yönetmelik minimum değerlerinden çok düşük olduğu için bu çalışmada da düşük beton dayanımına sahip bir test numunesi seçilmiştir. Dayanım açısından iyi olan %42 boşluk oranına sahip tuğlanın aksel basınç dayanımı 17,2 MPa’dır. Dolgu duvarlarda, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik [18] kapsamında B grubu iyi dayanımlı harç ve sıva karışımı kullanılmıştır. Harç ve sıva basınç dayanımı 4,8 MPa olarak belirtilmiştir. Test numunesinin çevrimsel testlerinde çelik plakalar ile uygulanan sabit düşey yük, her bir kolona gelen aksel yük olarak analitik modelde tanımlanmıştır.

$$E_{fr} = 5000\sqrt{f_c} \quad (1)$$



Şekil 1. Numunenin kolon ve kiriş boyutları, mm [9] (Column and beam dimensions of the specimen)



Şekil 2. Test numunesinin boyutları, mm [9] (Dimensions of the test specimen)

2.2. Dolgu Duvarın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Mechanical Properties of the Infill Wall)

Dolgu duvarlar genellikle basınçta dayanıklı ama çekme ve kesmede zayıftır. Dolgu duvarı oluşturan harcın, tuğla bloklarına göre dayanımının az olması ve tuğla birimleri ile harcın aderansının yeterli olmamasından dolayı, duvara yatay yük uygulandığında ilk olarak çatlaklar harçta oluşmakta ve tuğla blokları ile harç arasında ayrılmalar oluşmaktadır. Dolayısıyla, dolgu duvarı oluşturan harç ve tuğla birimleri, duvarın basınç, çekme ve kesme dayanımı ile elastisite modülü gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bunlara ek olarak dolgu duvarın basınç dayanımı, duvarın sıvalı olması veya olmaması durumlarına göre de değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada betonarme çerçeve modelinde kullanılan iyi dayanımlı (B grubu) harç ve sıva karışımı ile % 42 boşluk oranına sahip tuğla bloklarının basınç dayanımları kullanılarak, analitik modellerde kullanılmak üzere dolgu duvarın mekanik özellikleri belirlenmiştir.

2.2.1. Dolgu duvarın basınç dayanımının belirlenmesi (Determination of compressive strength of the infill wall)

Dolgu duvarın basınç dayanımı (f'_m), dolgu duvar için en önemli parametrelerden biridir. Tuğla birimlerinin (f_b) ve

harcın (f_j) basınç dayanımları tasarım yönetmeliklerinden alınabilir veya basınç testlerinden elde edilebilir. Ancak, dolgu duvarın basınç dayanımı için her zaman basınç testi yapmak mümkün olmamaktadır. Kaushik vd. [19] çalışmalarında, 4 farklı fırından elde edilen toplam 40 tane tuğla numunesi ile zayıf, orta ve iyi dayanımlı toplam 27 harç numunesinin birleştirilmesi sonucu oluşan (4 tuğla ve 3 harç türü) toplam 84 adet numuneyle dolgu duvarın basınç dayanımları ve elastisite modülü arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir. Deneysel çalışmalarından elde ettikleri basınç dayanımlarını kullanarak yaptıkları regresyon analizleri sonucunda Eş. 2'de verilen bağıntıyı elde etmişlerdir. Bu çalışmada tuğla duvarın basınç dayanımı için Eş. 2'de verilen bağıntı kullanılmıştır. Betonarme çerçeve modelinde kullanılan %42 boşluk oranına sahip tuğla biriminin basınç dayanımı 17 MPa ve iyi dayanımlı (B grubu) harcın basınç dayanımı ise 4,8 MPa olarak Tunaboyu [9]'a ait deneysel çalışmadan alınmış ve tuğla duvarın basınç dayanımı 4,17 MPa bulunmuştur.

$$f'_m = 0,63 \cdot f_b^{0,49} \cdot f_j^{0,32} \quad (2)$$

Akansel [20] ve Baran [21] çalışmalarında sıvanın basınç dayanımının dolgu duvarın basınç dayanımını hesaplarken

modele dahil edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Tuğla duvarlı numune sıvalı olduğu için, dolgu duvarın basınç dayanımı Ezzatfar vd. [22] çalışmasındaki Eş. 3 ile belirlenmiştir. Tuğla duvarın kalınlığı 6 cm ve sıvanın kalınlığı ise duvarın her iki yüzünde ikişer cm olarak alınmıştır. Tuğla duvarın basınç dayanımı 4,17 MPa ve sıva basınç dayanımı 4,8 MPa olmak üzere sıvalı dolgu duvarın basınç dayanımı 4,42 MPa olarak hesaplanmıştır.

$$(f_m)_{\text{tuğla+sıva}} = \frac{f_m \cdot t_w + f_p \cdot t_p}{t_w + t_p} \quad (3)$$

2.2.2. Dolgu duvarın elastisite modülünün belirlenmesi (Determination of elasticity modulus of the infill wall)

Dolgu duvarın elastisite modülü için birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada dolgu duvarın elastisite modülü (E_m), FEMA 356 [23]'da verilen Eş. 4'e göre 2431 MPa olarak hesaplanmıştır.

$$E_{\text{inf}} = 550 \times f_m \quad (4)$$

2.2.3. Dolgu duvarın kesme dayanımının belirlenmesi (Determination of shear strength of the infill wall)

Begimgil [24] tuğla duvarlı modellerin kesme dayanımını belirleyebilmek için delikli tuğla ile beraber farklı harç karışımına sahip tuğla duvarların diyagonal basınç testini yapmıştır. Yapılarda kullanılan normal harç türü ile yapılan tuğla duvarların kesme dayanımı (τ) için Eş. 5 belirlenmiştir. Bu denklemde, 0,265 MPa basit kayma aderans gerilmesi ve 0,735 katsayısı ise tuğla ile harç arasındaki sürtünme katsayısıdır. Kakaletsis ve Karayannis [25] ise dolgu duvarın farklı yükseklik ve uzunluk oranına göre kesme dayanımı ile normal gerilmesi arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için çalışma yapmışlardır ve kayma aderans gerilmesi değeri zayıf dolgular için 0,267 MPa ve güçlü dolgular için 0,17 MPa olarak belirlemişlerdir.

$$\tau = 0,265 + 0,735\sigma \quad (5)$$

Bu çalışmada, dolgu duvarlı betonarme çerçevenin kesme dayanımının τ (f_{tp}) belirlenmesi için Eş. 5'te verilen bağıntı kullanılmıştır. Ancak, çalışmada kullanılan numune güçlü

dolgu duvar sınıfına girdiği için kesme aderans gerilmesi 0,17 MPa olarak alınmıştır. Düşey yük altındaki normal gerilmesi (σ) için ise, numunenin üzerinde herhangi bir yük olmadığı için kirişin kendi ağırlığının oluşturduğu aksel kuvvet değeri (0,731 kN) kullanılmıştır. Buradan, betonarme çerçeve numunesinin kesme dayanımı (f_{tp}) 0,175 MPa olarak belirlenmiştir.

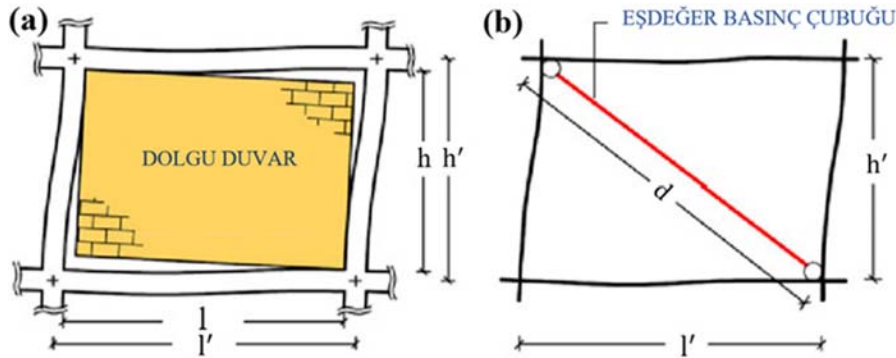
2.3. Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevenin Analitik Modelinin Oluşturulması

(Analytical Modeling of Reinforced Concrete Frame with Infill Wall)

Dolgu duvarların modellenmesinde genel olarak mikro ve makro modelleme yöntemleri kullanılmaktadır. Mikro modelleme yöntemi temel olarak sonlu elemanlar metoduna dayanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile dolgu duvarların modellenmesi gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesine rağmen modellenmenin karmaşık olması, analiz çok zaman alması ve yakınsama problemleri bu yöntemin kullanımını sınırlandırmaktadır. Mikro modelleme yöntemiyle dolgu duvar çerçeve etkileşiminin, çatlakların çerçeve ve dolgu duvardaki ilerleyişinin ve dolgu duvarlı çerçevenin yatay yük altındaki davranışının (yatay derz kayması vb.) daha iyi temsil edildiği Trapani vd. [8] tarafından belirtilmiştir. Dolgu duvarların diğer bir modellenme yöntemi ise makro modelleme yöntemidir. Makro modelleme yöntemi tekli veya çoklu eşdeğer diyagonal basınç çubuğu yöntemleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Makro modelleme yöntemi sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırıldığında daha az hassaslıkta gerçeğe yakın davranışlar elde edilmesine rağmen uygulanabilirliğinin basitliği sayesinde tercih edilen bir yöntemdir. Bu çalışmada dolgu duvarların modellenmesi için tekli ve çoklu eşdeğer basınç çubuklu modeller kullanılmıştır.

2.3.1. Tekli eşdeğer diyagonal basınç çubuğu modeli (Single equivalent diagonal strut model)

Tekli eşdeğer basınç çubuğu modelinde yatay yük etkisinde dolgu duvar ile çerçeve arasında çekme dayanımı olmadığı için Şekil 3'te gösterilen çekmedeki köşelerde temas kaybolmaya başlar. Yatay yük arttıkça çerçevenin dolgu duvara temas ettiği diğer köşelerde temas sınırlı kalır ve bu bölge eşdeğer basınç çubuğu modeli olarak belirlenir. Yatay



Şekil 3. Yatay yük etkisindeki dolgu duvarlı çerçeve ve basınca maruz kalan bölgenin tek çapraz çubukla idealize edilmesi [8] (Frame with infill wall at lateral load effect and idealization of compression-exposed area with single diagonal strut)

yükün zorladığı köşeleri eşdeğer diyagonal basınç çubuğu ile modelleyerek dolgu duvarın aksel basınç direnci idealize edilir. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun malzeme özellikleri ve kalınlığı dolgu duvar ile aynı alınır. Analitik modellerde dolgu duvarlar yerine kullanılacak eşdeğer basınç çubuğu genişliği, hem dolgu duvarın çevresindeki çerçeve elemanlarına hem de dolgu duvarın mekanik ve geometrik özelliklerine bağlıdır. Eşdeğer basınç çubuğunun genişliği için FEMA 356 [23]'da önerilen Eş. 6 ve Eş. 7'de yer alan denklemler kullanılmıştır.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_{inf} \cdot t_{inf} \cdot \sin 2\theta}{4 \cdot E_{fr} \cdot I_{col} \cdot h_{inf}}} \quad (6)$$

$$a = 0,175 (\lambda \cdot h_{col})^{-0,4} \cdot r_{inf} \quad (7)$$

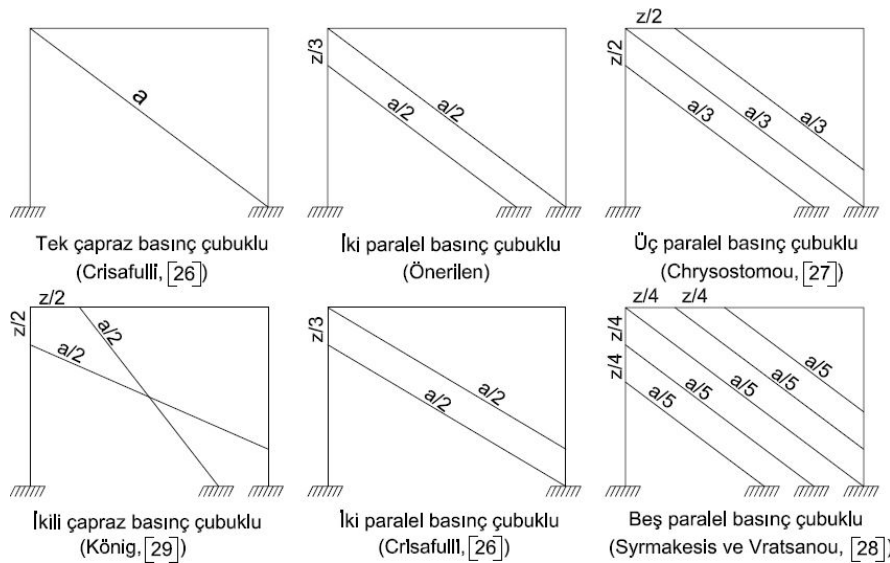
2.3.2. Çoklu eşdeğer basınç çubuğu modelleri (Multiple equivalent strut models)

Dolgu duvarların modellenmesinde kullanılan diğer bir makro modelleme yönteminde ise çoklu eşdeğer basınç çubukları kullanılmaktadır. Dolgu duvarlı çerçeveye çevrimsel veya dinamik yük etkisinde tekli eşdeğer diyagonal basınç çubuğu kullanılması durumunda çerçeve elemanlarında oluşan eğilme momenti ve kesme kuvveti gerçeği yansıtmamakta ve hasar tipleri ile hasar bölgeleri gerçek davranıştan önemli seviyede farklılaşabilmektedir. Dolayısıyla birçok araştırmacı, dolgu duvarlarla etkileşimde olan çerçeve elemanlarda oluşan iç kuvvetleri doğru tahmin edebilmek için farklı geometrilerle tanımlanmış çoklu eşdeğer basınç çubuklu modelleri kullanmışlardır. Crisafulli [26] yaptığı araştırmada dolgu duvarlı çerçeveyi tekli, ikili ve üçlü eşdeğer diyagonal basınç çubuklu 3 farklı geometriyle modelleyerek oluşturmuştur. Chrysostomou [27] her iki yönde üçlü eşdeğer diyagonal basınç çubuğu olmak üzere altılı basınç çubuklu modeli önermiştir. Syrmakesis ve Vratanou [28] her iki yönde beşli paralel

basınç çubuklu modeli dolgu duvarları modellemek için kullanmıştır. König [29] tarafından ikili çapraz basınç çubuklu model kullanılmıştır. Bu çalışmada, Tunaboyu [9] tarafından deneysel çalışmada kullanılan tek katlı ve tek açıklıklı iyi dayanımlı harç ve sıva ile üretilen güçlü dolgu duvarlı betonarme çerçevenin tekli, ikili, üçlü, ikili çapraz ve beşli eşdeğer basınç çubuklu analitik modelleri ile bu çalışmada öneri olarak sunulan iki eşdeğer basınç çubuklu analitik modeli oluşturulmuştur (Şekil 4).

Çoklu eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modelleme yöntemlerinde kenar basınç çubukların çerçeve elemanlarına bağlanacakları düğüm noktaları, Stafford Smith ve Carter [30] tarafından Eş. 8'de tanımlanan dolgu duvar çerçeve temas uzunluğu değerine göre belirlenmiştir. Crisafulli [26] kenar basınç çubuklarını çerçeve elemanları üzerine ikili eşdeğer basınç çubuklu analitik model için dolgu duvar çerçeve temas uzunluğu değerinin üçte birine eşit olarak konumlandırmıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen paralel iki eşdeğer basınç çubuklu modelde de Crisafulli [26]'de olduğu gibi eşdeğer basınç çubuğunun kolona bağlandığı nokta, kolon-kiriş düğüm noktasının z/3 mesafe ötesidir. Chrysostomou [27], Akansel [20] ve Öztürkoğlu [31] çalışmalarında üçlü eşdeğer basınç çubuklu modelin kenar basınç çubuklarının çerçeve elemanları üzerinde konumlandırılmasında dolgu duvar çerçeve temas uzunluğu değerinin yarısını kullanmışlardır. Bu çalışmada kenar basınç çubuklarının çerçeve elemanları üzerindeki düğüm noktalarının yerleri Şekil 4'te gösterilen dolgu duvar çerçeve temas uzunluğu değerlerine göre yapılmıştır. Çoklu eşdeğer çubuk modellerinin genişlikleri için ise, tekli eşdeğer basınç çubuğu için hesaplanan genişlik değeri çoklu eşdeğer basınç çubuğu modellerindeki çubuk sayısına bölünerek her bir basınç çubuğuna eşit olacak şekilde paylaştırılmıştır.

$$z = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_{fr} \cdot I_{col} \cdot h_{inf}}{E_{inf} \cdot t_{inf} \cdot \sin(2\theta)}} \quad (8)$$



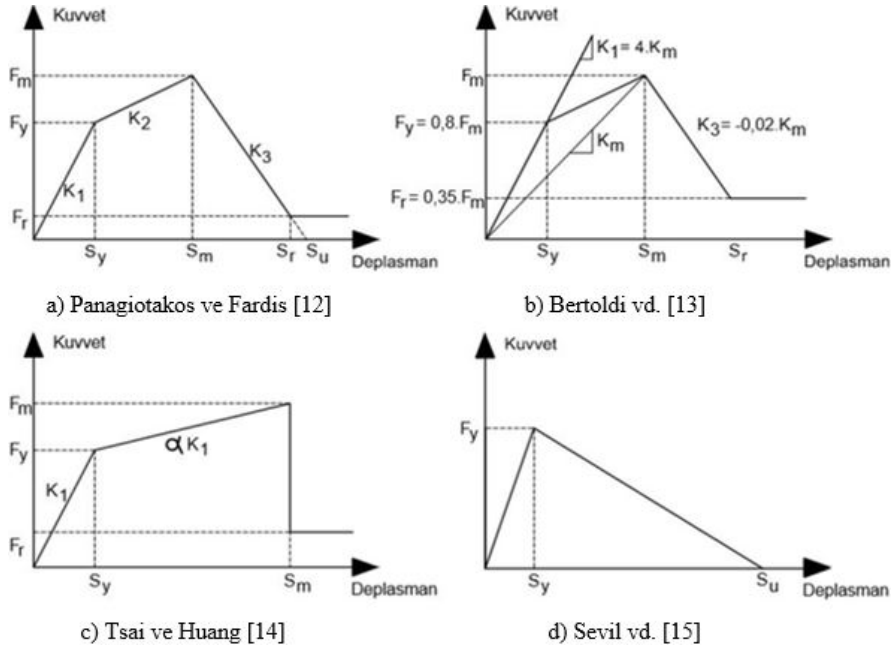
Şekil 4. Çalışmada kullanılan tekli ve çoklu eşdeğer basınç çubuklu betonarme çerçeve modelleri
(Single and multiple equivalent strut reinforced concrete frame models used in the study)

2.3.3. Dolgu duvarların doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkisinin modellenmesi (Modeling of nonlinear force displacement relationship of infill walls)

Dolgu duvarların gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için diğer bir önemli parametre, dolgu duvarların doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisinin belirlenmesidir. Dolgu duvarların doğrusal olmayan davranış modeli, oluşabilecek tüm göçme mekanizmalarını (diagonal çatlama, yatay derz kayması ve köşe ezilmesi) içermelidir. Dolgu duvarlar küçük yükler altında yapıya önemli seviyede rijitlik ve dayanım katkısı sağlarlar. Dolgu duvarlar üzerindeki yatay yük arttıkça hasar görmeye başlarlar, öncelikle ilk çatlağın oluştuğu anda akma dayanımına ulaşırlar. Daha sonra üzerine yük almaya devam ederek maksimum yük kapasitesine ulaşırlar ve bu noktadan sonra rijitliklerini önemli oranda kaybederek yatay yük taşıma kapasitelerini önemli oranda yitirirler. Bu çalışmada, dolgu duvarların doğrusal elastik olmayan kuvvet-deplasman ilişkisi için Şekil 5'te verilen 4 farklı doğrusal olmayan model kullanılmıştır.

Bu çalışmada, dolgu duvarın başlangıç (çatlamadan önceki) rijitliği K_1 , ilk çatlak oluştuğu andaki akma dayanımı F_y , akma dayanımına ulaştığı andaki yer değiştirmesi S_y , akma sonrası rijitliği K_2 , maksimum yükteki rijitliği K_m , maksimum yükü F_m , maksimum yüke karşılık gelen deplasman miktarı S_m , maksimum kapasiteye ulaştıktan sonraki azalma rijitliği K_3 , kalıcı yükü F_r , kalıcı yüküne karşılık gelen deplasman miktarı S_r ve sınır deplasmanı S_u ile ifade edilmektedir. α ise dolgu duvarın çatladıktan sonraki rijitliğinin başlangıçtaki rijitliğe oranı olmak üzere Tsai ve Huang [14] tarafından 0,2 olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan tek katlı, tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve SAP2000 [32] programında

modellenmiştir. Deney çerçevesinin düzlem dışı hareketi test esnasında kayar mesnetle engellendiğinden, analitik modelde de çerçevenin sadece düzlem içi davranışı incelenmiştir. Elastik ötesi davranış eleman uçlarında ve ortalarında tanımlanan plastik mafsallar yardımıyla modellenmiştir. 6 farklı geometrik model ile oluşturulan analitik modele atanan mafsallar Şekil 6'da gösterilmiştir. Kolon uç bölgelerine P-M₃ (moment-eksenel kuvvet etkileşimli) plastik mafsali ile orta bölgesine V₂ kesme mafsali tanımlanmıştır. Buna karşın, kiriş uç bölgelerine ise yalnızca M₃ moment plastik mafsali ve orta bölgesine V₂ kesme mafsali tanımlanmıştır. Kolon ve kiriş uç bölgelerine tanımlanan P-M₃ ve M₃ plastik mafsallarının kuvvet – deplasman ilişkisi kesit analizi yapılarak elde edilen moment-eğrilik ilişkisinden, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik [18]'de tanımlanan plastik mafsali boyu kullanılarak elde edilmiştir. Ancak, orta bölgeye tanımlanan kesme mafsali için ise kesitin kesme dayanımının doğrusal olarak azaldığı kabulü ile kesme dayanımı kapasitesinin %20'sine kadar lineer olarak azaltılmıştır. Kalıcı dayanım olarak en büyük dayanım değerinin %20'si, Tunaboyu ve Avşar [3] çalışmasında boşluklu dolgu duvarlı çerçevede kısa kolon hasarı oluşması durumunda gözlenen kalıcı dayanım değerinden elde edilmiştir. Kalıcı dayanım olarak, çerçevenin kapasitesinin %20'sinin benimsenmesi FEMA 356 [23]'de tanımlanan kalıcı dayanım değeri ile uyumludur. Dolgu duvarlar analitik modelde eşdeğer basınç çubukları olarak tanımlanmıştır. Eşdeğer basınç çubuklarının uç bölgelerine moment almaya çalışmaları sağlanmıştır. Ayrıca bu çubukların sadece basınç altında çalışmalarını sağlamak için SAP2000 [32] programında eşdeğer çubuk elemanlara "compression only" ataması yapılmıştır. Orta bölgesine ise dolgu duvarın doğrusal elastik olmayan 4 farklı kuvvet

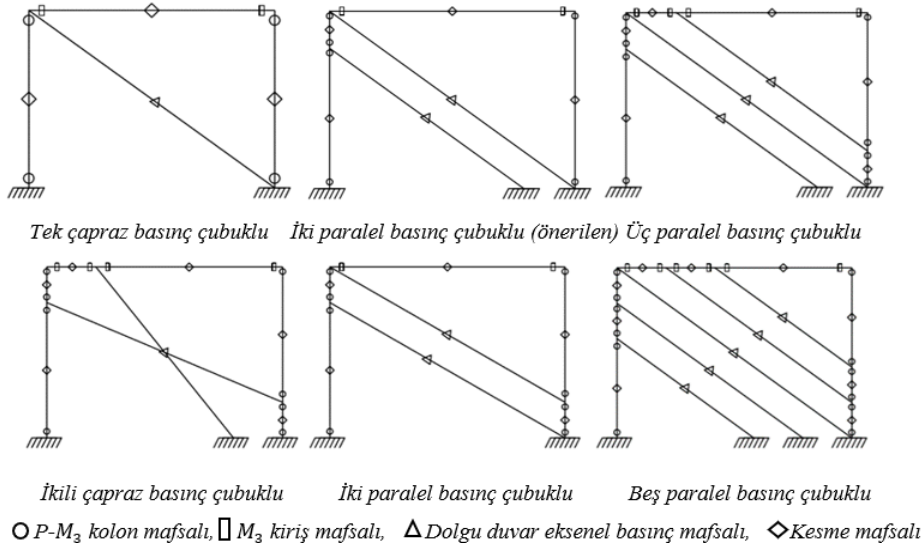


Şekil 5. Dolgu duvarların doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkileri (Nonlinear force displacement relationship of infill walls)

deplasman ilişkisi tanımlanmıştır. Panagiotakos ve Fardis [12] ile Bertoldi vd. [13] ait plastik mafsallı modellerinde dolgu duvarın rijitliğinin azalması için Akansel [20] çalışmasında güçlü dolgu duvarlar için önerilen $K_3 = 0,005 \times K_1$ değeri kullanılmış ve dolgu duvarın kalıcı yükü ise $F_r=0$ olarak kabul edilmiştir. Analitik modelde dolgu duvarların yerine kullanılan 6 farklı geometri ile tanımlanan basınç çubuğu modeli ile 4 farklı plastik mafsallı modellerinin kombinasyonlarından toplam 24 analitik model SAP2000 [32] programında oluşturulmuştur. SAP2000 [32] programında oluşturulan her bir basınç çubuklu çerçeve modeli için ayrı ayrı artımsal itme analizi yapılarak eşdeğer basınç çubuklu çerçevelerin kuvvet-yer değiştirme kapasite eğrileri belirlenmiştir. Eşdeğer basınç çubuklu çerçeveler için elde edilen kuvvet-yer değiştirme kapasite eğrileri ile çerçeve elemanlarında oluşan eğilme ve kesme hasarları, Tunaboyu [9] çalışmasındaki deney numunesinin test sonrası tespit edilen yapısal hasarları ile karşılaştırılmıştır.

2.4. Deney ve İtme Analizi Sonucu Elde Edilen Kapasite Eğrilerinin Karşılaştırılması (Comparison of Capacity Curves Obtained by Experiment and Pushover Analysis)

Dolgu duvarlı çerçevenin deney sonucundaki doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkisi, eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerle gerçekleştirilen itme analizleri sonucu elde edilen kapasite eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Deneyde, kullanılan numuneye %4 göreceli kat ötelemesi değerine kadar çevrimsel yük uygulanmış ve kısa kolon hasarı beklenmeyen tam dolu dolgu duvarlı çerçevede kesme hasarı gözlenmiştir. Özellikle kolon üst uç bölgesindeki dolgu duvar parçaları çevrimsel deplasmanların ilk adımlarında ezilerek devre dışı kalmıştır (Şekil 7). Bu bölgede boşalan dolgu duvar nedeniyle oluşan boşluk, kısa kolon oluşumuna neden olmuştur. Bu kısa kolonlar ise artan kesme talepleri karşısında yeterli dayanıma sahip olmadıklarından gevrek



Şekil 6. Kullanılan mafsalların çerçeve elemanları üzerindeki gösterimi (Plastic hinges defined on the frame members)



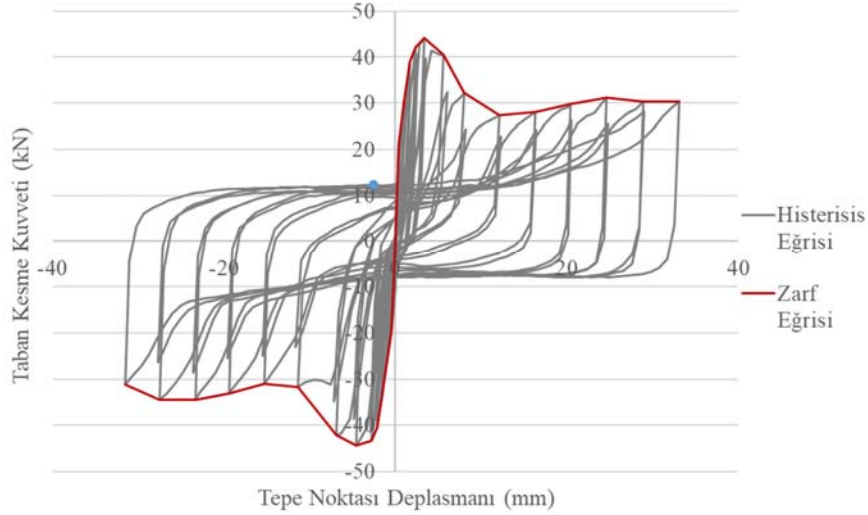
Şekil 7. Deney numunesinde oluşan hasar durumları [9] (Damages in the test specimen)

kesme hasarı meydana gelmiştir (Şekil 7). Deneysel numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Dolgu duvarlı betonarme çerçevenin, dolgu duvar modellenmesinde kullanılan 6 farklı geometrik modelleme ile 4 farklı doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisi kullanılarak 24 adet analitik modeli oluşturulmuştur. İtme analizi sonucu elde edilen kapasite eğrileri, deney sonucu elde edilen Şekil 8'deki zarf eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, Şekil 9'da tek çaprazlı, Şekil 10'da bu çalışmada önerilen iki paralel çaprazlı, Şekil 11'de ikili çapraz, Şekil 12'de iki paralel çaprazlı, Şekil 13'te üç paralel çaprazlı ve Şekil 14'te beş paralel çaprazlı analitik modellerden elde edilen kapasite eğrileri verilmiştir.

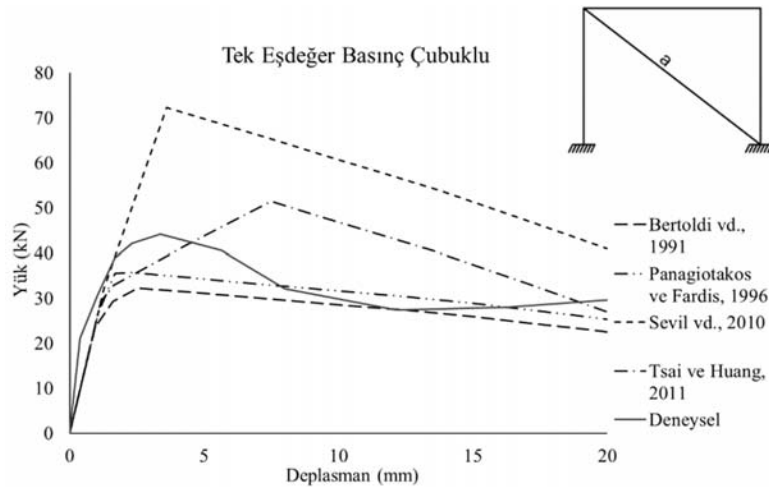
Bu şekillerde 4 farklı dolgu duvar kuvvet-deplasman modeli kullanılarak elde edilen kapasite eğrileri deney sonucu elde edilen zarf eğrisi ile kıyaslanmıştır. Deneysel elde edilen kapasite zarf eğrisi hem öneri olarak sunulan iki paralel çaprazlı (Şekil 10) hem de literatürde bulunan üç paralel

çaprazlı modeller (Şekil 13) ile elde edilen sonuçlarla daha çok uyumludur. Bu iki modelin dışında diğer geometrik modelleme yöntemleri ile elde edilen itme analizi sonuçları test numunesi için elde edilen deneysel sonuçtan önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu iki eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerden Panagiotakos ve Fardis [12] ve Bertoldi vd. [13]'a ait dolgu duvar kuvvet-deplasman ilişkisi ile tanımlanan plastik mafsalların kullanıldığı öneri olarak sunulan iki eşdeğer basınç çubuklu modellerde kapasite eğrileri deney sonucu elde edilen zarf eğrisine daha yakın elde edilmiştir. (Şekil 10).

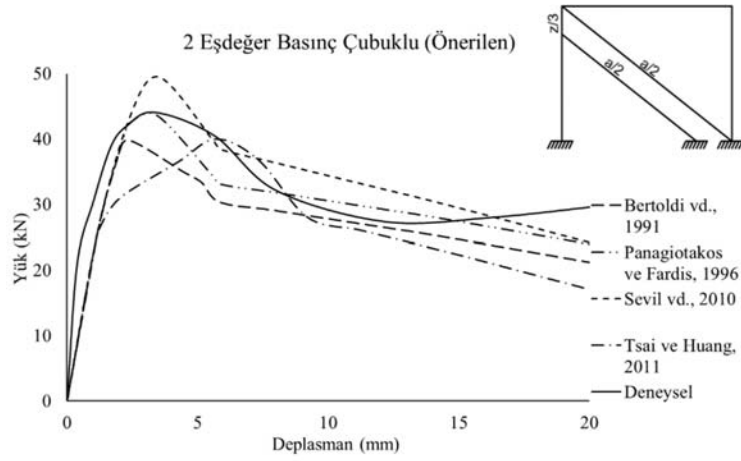
Dolgu duvarın geometrik modellemesinin dışında, seçilen dolgu duvar kuvvet-deplasman ilişkisinin de çerçevenin analitik olarak elde edilen davranışında önemli farklılıklara neden olduğu görülmektedir. İncelenen 4 farklı dolgu duvar kuvvet-deplasman ilişkisinin tanımlandığı önerilen 2 eşdeğer ve 3 eşdeğer basınç çubuklu model sonuçları deneysel elde edilen kapasite eğrisi ile kıyaslandığında Tsai



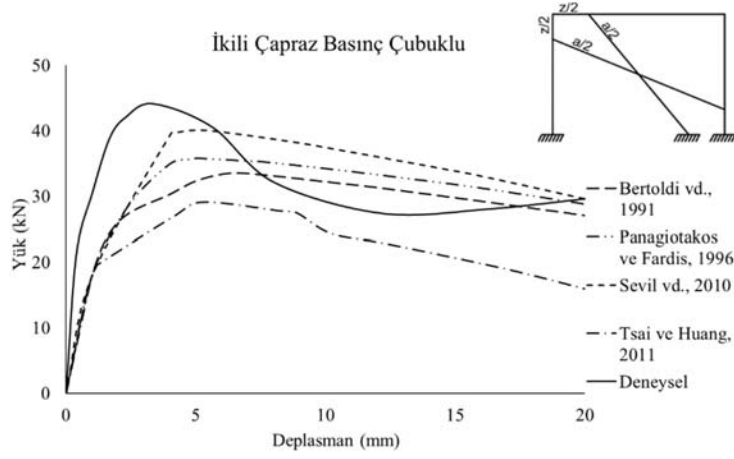
Şekil 8. Dolgu duvarlı deney numunesine ait histeresis yük-deplasman eğrisi ve zarf eğrisi [9]
(Hysteresis and envelope curves of the test specimen with infill wall)



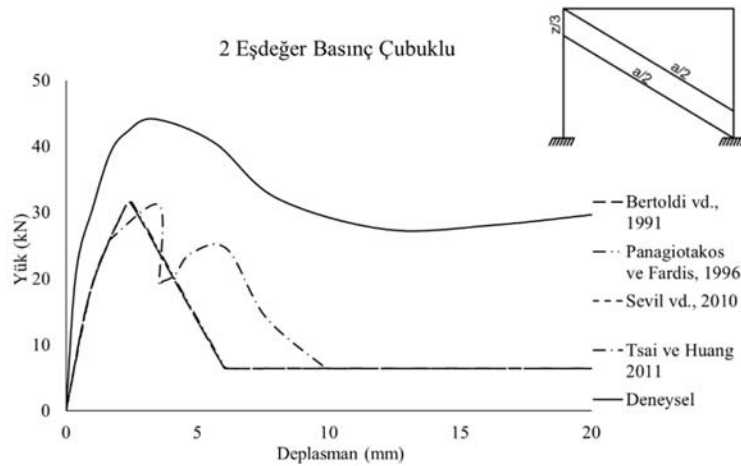
Şekil 9. Tek eşdeğer basınç çubuklu modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Crisafulli, [26])
(Comparison of pushover curves of single equivalent strut models)



Şekil 10. İki eşdeğer basınç çubuklu modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Önerilen)
(Comparison of pushover curves of two equivalent strut models, (Suggested))



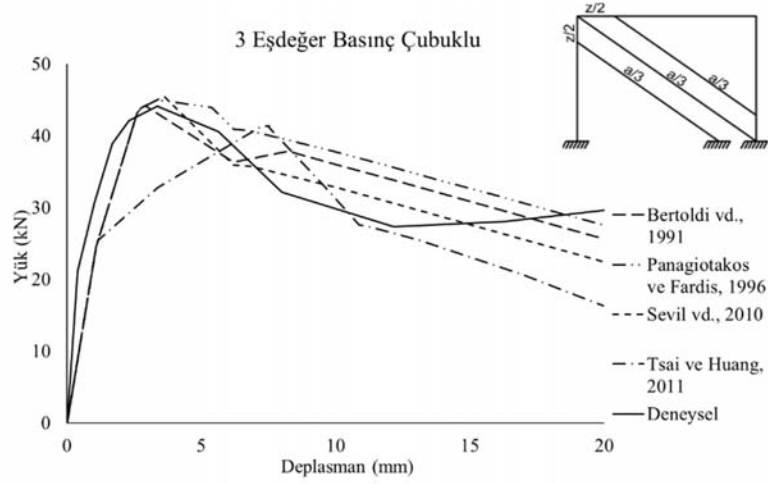
Şekil 11. İkili çapraz basınç çubuklu analitik modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (König, [29])
(Comparison of pushover curves of double cross strut models)



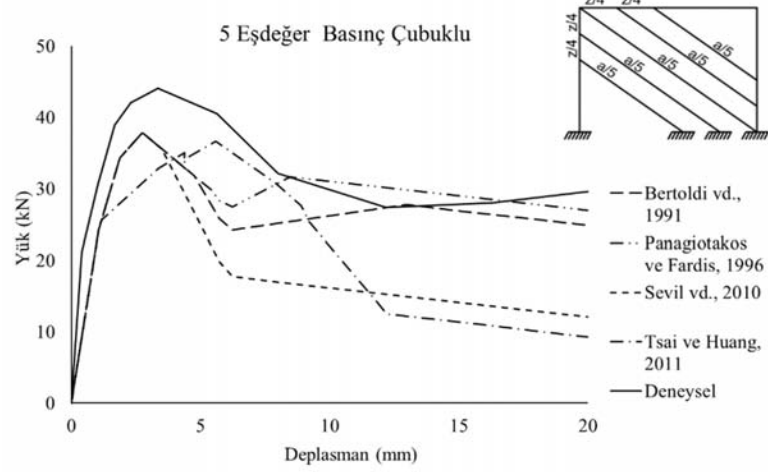
Şekil 12. İki eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Crisafulli, [26])

ve Huang [14]'ın gerçeğe daha uzak sonucu verdiği görüldüğünden bu modelin hasar dağılımları karşılaştırılmamıştır. Kapasite eğrilerinin karşılaştırılmalarına ilave olarak, analitik olarak elde edilen

yatay kuvvet kapasitesi ve enerji sönümlenme kapasitesini temsil eden kuvvet-deplasman eğrisi altında kalan alan hesaplanıp deneysel sonuçlara göre normalize edilerek Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 13. Üç eşdeğer basınç çubuklu modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Chrysostomou [27])
(Comparison of pushover curves of three equivalent strut models)



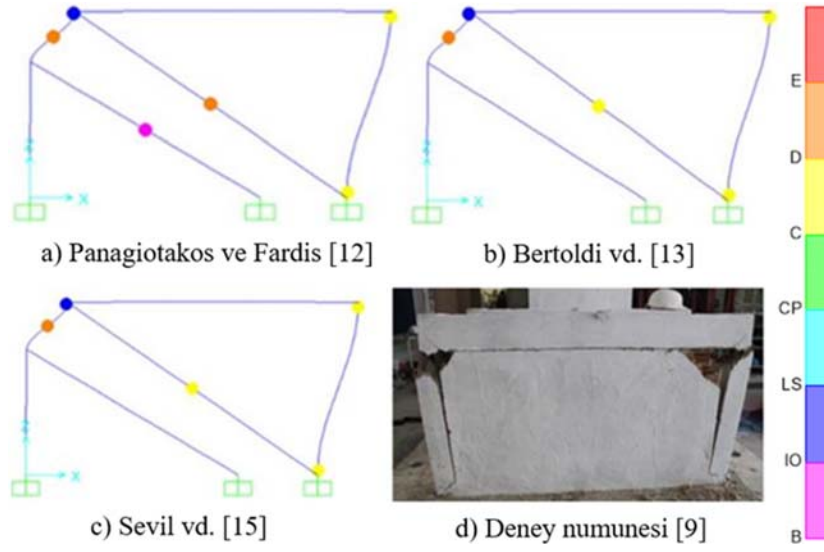
Şekil 14. Beş eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Syrmakezis ve Vratsanou, [28]) (Comparison of pushover curves of five equivalent strut models)

Tablo 1. Deney sonucuna göre normalize edilen yatay kuvvet kapasitesi ve enerji sönmüleme kapasitesi
(Normalised horizontal force capacity and energy dissipation capacity according to the experimental result)

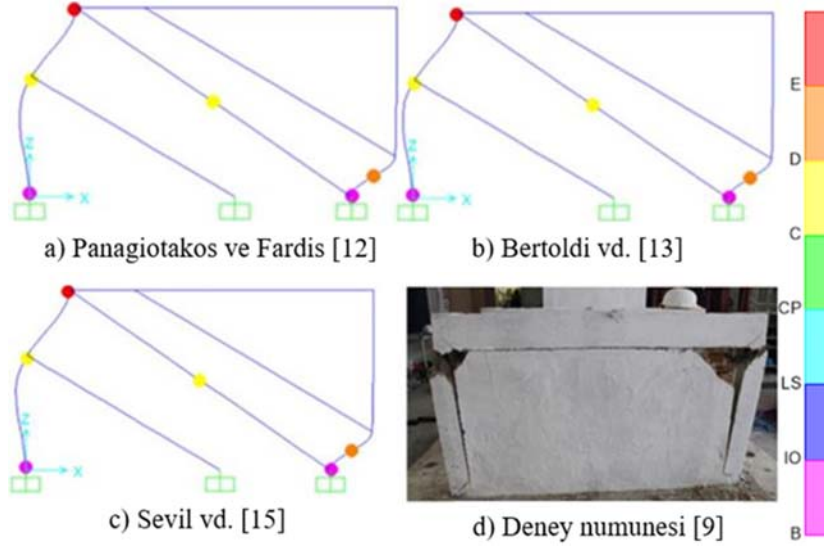
Dolgu duvarın doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkisi	Önerilen 2 Eşdeğer Basınç Çubuklu		3 Eşdeğer Basınç Çubuklu	
	Normalize Dayanım	Normalize Enerji	Normalize Dayanım	Normalize Enerji
Panagiotakos ve Fardis [12]	0,99	0,94	1,02	1,09
Bertoldi vd. [13]	0,90	0,85	1,00	1,03
Tsai ve Huang [14]	0,91	0,84	0,93	0,86
Sevil vd. [15]	1,12	1,03	1,03	0,97

Ayrıca, kullanılan modelleme teknikleri ile elde edilen hasar dağılımları da önerilen ikili ve Chrysostomou [27] tarafından literatürde bulunan üçlü eşdeğer basınç çubuğu modelleri için sırayla Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilmiştir. Deneyde gözlemlenen yapısal hasar dağılımı, Panagiotakos ve Fardis [12], Bertoldi vd. [13] ve Sevil vd. [15]'in önerdiği kuvvet-deplasman ilişkileri ile oluşturulmuş

analitik modellerin itme analizleri sonuçlarından elde edilen hasar dağılımlarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu analitik modelde deney numunesinin kapasitesine ulaştıktan sonra dolgu duvarın hasar almasıyla beraber kolonlara gelen kesme kuvvetinden dolayı gevrek kesme kırılması gözlenmiştir (Şekil 15). Kolon üst ucu kesme hasarı her 3 kuvvet-deplasman ilişkisi ile tanımlanan



Şekil 15. Önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin kesme ve plastik mafsals dağılımı
(Shear and plastic hinge distribution of the suggested two equivalent strut models)



Şekil 16. Üç eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin kesme ve plastik mafsals dağılımı
(Shear and plastic hinge distribution of the three equivalent strut models)

analitik modellerin itme analiz sonuçlarında gözlenmiştir. Bu durum, deneysel gözlemlenen hasarla oldukça uyumludur. Deney esnasında kolon üst bölgelerinde gözlenen kesme hasarı 3 eşdeğer basınç çubuklu modeller ile elde edilen analitik sonuçlarda gözlenmemiştir (Şekil 16). Diğer taraftan, 3 eşdeğer basınç çubuklu modellerin itme analizleri sonuçlarında, kolon kesme hasarlarının deneyde gözlemlenmeyen sağ kolonun alt ucunda oluştuğu görülmektedir (Şekil 16). Dolgu duvarların dayanımı iyi olduğundan hiçbir analitik modelde dolgu duvar kapasitesine ulaşmamıştır.

3. SİMGELER (SYMBOLS)

a : Dolgu duvar-çerçeve temas uzunluğu (mm)
 E_{inf} : Dolgu duvarın elastisite modülü (N/mm²)

E_{fr} : Betonarme çerçevenin elastisite modülü (N/mm²)
 f_b : Tuğla birimlerinin basınç dayanımı (MPa)
 f_c : Çerçeve betonunun basınç dayanımı (MPa)
 f_j : Harç birimlerinin basınç dayanımı (MPa)
 f_m : Dolgu duvarın basınç dayanımı (MPa)
 f'_m : Tuğla duvarın basınç dayanımı (MPa)
 f_p : Sıvanın basınç dayanımı (MPa)
 h_{col} : Kolonun çerçeve eksenine kadar olan yüksekliği (mm)
 h_{inf} : Dolgu duvar yüksekliği (mm)
 I_{col} : Kolonun atalet momenti (mm⁴)
 r_{inf} : Dolgu duvarın diyagonal uzunluğu (mm)
 t_{inf} : Dolgu duvar ve eşdeğer çubuğun kalınlığı (mm)
 t_p : Sıvanın kalınlığı (mm)
 t_w : Tuğla duvarın kalınlığı (mm)

Z	: Basınç çubuklarının kenar çerçeve elemanı üzerindeki konumları (mm)
τ	: Dolgu duvarın kesme dayanımı (MPa)
σ	: Düşey yük altındaki normal gerilme (MPa)
λ	: Dolgu duvar ile çerçevenin görelî rijitliğini ifade eden katsayı
θ	: Eşdeğer basınç çubuğunun yatayla yaptığı açı

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada literatürde dolgu duvarları analitik olarak modellemek için kullanılan tekli, ikili, üçlü, ikili çapraz, beşli ve bu çalışmada önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu modeller ile Tunaboyu [9] tarafından test edilen tam dolgu duvarlı betonarme deney çerçevesinin kuvvet-deplasman kapasite eğrisi ile yapısal hasarları elde edilmeye çalışılmıştır. Betonarme çerçevedeki dolgu duvar yerine kullanılan eşdeğer basınç çubukların doğrusal olmayan davranışının modellenebilmesi için Panagiotakos ve Fardis [12], Bertoldi vd. [13], Tsai ve Huang [14] ve Sevil vd. [15] taraflarından önerilen dört farklı kuvvet-deplasman ilişkisi tanımlanarak plastik mafsallı modelleri oluşturulmuştur. Deney numunesinin kesit boyutları, malzeme ve geometrik özellikleri temel alınarak 6 farklı geometri ile eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modeli ile 4 farklı doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisi kullanılarak oluşturulan 24 adet analitik modelin artımsal itme analiz sonuçları deneysel sonuçla karşılaştırılarak aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

İyi dayanımlı dolgu duvarlı betonarme çerçeve deney numunesinin sabit düşey yük ve tekrarlı tersinir yatay yük altında yapılan deney sonuçlarına göre, dolgu duvarın komşu kolona aktarmış olduğu ek kesme kuvveti kolon kesme kapasitesinin aşılmasına neden olduğu için kesme hasarı oluşmaktadır ve bu kesme hasarı öneri olarak sunulan ikili ve literatürde kullanılan üç eşdeğer basınç çubuklu analitik modeller ile gerçekleştirilen itme analizleri sonuçlarında da görülmüştür.

- Tek eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerde deney numunesinin kapasite eğrisine yakın bir davranış gözlenmemiştir. Betonarme çerçevenin kolon elemanlarının uçlarında eğilme plastik mafsalları oluşmasına rağmen, kesme mafsalı oluşmadığı için deney numunesinin gerçek davranışı elde edilememiştir.
- Çoklu eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerden Panagiotakos ve Fardis [12] ile Bertoldi vd. [13]'a ait plastik mafsalların kullanıldığı, bu çalışmada önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu ve üç eşdeğer basınç çubuklu modellerin artımsal itme eğrilerinin kapasiteleri deney sonucuna en yakın çıkmıştır.
- Öneri olarak sunulan ikili ve literatürdeki üç eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerde tam dolu dolgu duvarlar sebebiyle kolonlarda görülen beklenmedik kesme hasarları kolonların gevrek bir şekilde hasar görmesine ve kapasite eğrisinin akma dayanımından sonra ani bir şekilde azalmasına sebep olmaktadır.
- Dört farklı plastik mafsallı model ile oluşturulan beş eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerde, deney

numunesinde gözlenen kesme mafsalları gözlenmesine rağmen deney numunesinin akma dayanımına ulaşamamış ve elde edilen kapasite eğrileri deneysel elde edilen kapasite eğrisi arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir.

- İkili ve ikili çapraz eşdeğer basınç çubuklu analitik modeller ile elde edilen kapasite eğrilerinin akma öncesi rijitliği ve kapasite değerleri deneysel sonuçlarla uyumlu değildir.

Genellikle, dolgu duvarlar taşıyıcı sistemde yapısal eleman olarak hesaplara katılmazlar ve sadece düşey yük olarak ağırlıkları hesaplara katılır. Bu çalışmada da görüldüğü gibi kısa kolon oluşması beklenmeyen tam dolu dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde dayanımı iyi olan dolgu duvarlar çerçeve elemanları üzerinde kesme hasarları oluşturarak çerçeve elemanlarının gevrek bir şekilde kırılmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, özellikle standart altı betonarme yapıların deprem davranışının gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için dolgu duvarlarının doğru bir şekilde analitik modele dahil edilmesi gerekliliği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada öneri olarak sunulan ikili ya da literatürde tanımlı üçlü çapraz eşdeğer basınç çubuklu modellerin bu amaç için daha etkili bir modelleme yöntemi olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Gerek A. E., Soyluk A., Investigation of Earthquake Resistance at Primary School Buildings in Turkey, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 485-490, 2016.
2. Çiftçi Z., Kara F. İ., Fahjan Y. M., Investigation of the Fragility of a Damaged Mid-rise Reinforced Concrete Building, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1589-1602, 2018.
3. Tunaboyu O., Avşar Ö., Seismic Repair of Captive-Column Damage with CFRPs in Substandard RC Frames, Structural Engineering and Mechanics, 61 (1), 1-13, 2017.
4. Crisafulli F.J., Carr A.J., Proposed Macro Model for the Analysis of Infilled Frame Structures, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 40 (2), 67-77, 2007.
5. Kaushik H.B., Rai D.C., Jain S.K., A Rational Approach to Analytical Modeling of Masonry Infills in Reinforced Concrete Frame Buildings, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing-China, October 12-17, 2008.
6. Ghosh R., Kumar M., Evaluation of Macro Models for Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames, 13th North American Masonry Conference, Salt Lake City/Utah-USA, 1029-1041, June 16-19, 2019.
7. Timurağaoğlu M.Ö., Doğançün A., Livoğlu R., Comparison of Different Analytical Models of Infilled RC Frame, III International Conference on Engineering and Natural Science, Budapest-Hungary, May 3-7, 2017.

8. Trapani F.D., Macaluso G., Cavaleri L., Papia M., Masonry Infills and RC Frames Interaction: Literature Overview and State of the Art of Macromodeling Approach, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19 (9), 1059-1095, 2015.
9. Tunaboyu O., Kısa Kolon Oluşumuna Neden Olabilecek Boşluksuz Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçeve Davranışının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle İrdelenmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2017.
10. Sattar S., Eeri M., Liel A.B., Seismic Performance of Nonductile Reinforced Concrete Frames with Masonry Infill Walls-II: Collapse Assesment, *Earthquake Spectra*, 32 (2), 819-842, 2016.
11. Mehrabi A.B., Shing P.B., Schuller M.P., Noland J.L., Experimental Evaluation of Masonry Infilled RC Frames, *Journal of Structural Engineering*, 122 (3), 228-237, 1996.
12. Panagiotakos T. B., Fardis M. N., Seismic Response of Infilled RC Frames Structures, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco-Mexico, Paper No. 225, June 23-28, 1996.
13. Bertoldi S.H., Decanini L., Gavarini C., Telai tamponati soggetti ad azioni sismiche, un modello semplificato: Confronto sperimentale e numerico (Infilled frames subjected to seismic actions, a simplified model: Experimental and numerical comparison), *Atti del 6 Convegno Nazionale ANIDIS (Proceedings of the 6th national conference on seismic engineering ANIDIS)*, Perugia-Italy, 815-824, 1993.
14. Tsai M., Huang T., Numerical Investigation on the Progressive Collapse Resistance of an RC Building with Brick Infills Under Column Loss, *World Academy of Science Engineering and Technology*, 5 (10), 483-490, 2011.
15. Sevil T., Baran M., Canbay E., Tuğla Dolgu Duvarların B/A Çerçevesi Yapıların Davranışına Etkilerinin İncelenmesi; Deneysel ve Kurumsal Çalışmalar, *International Journal of Engineering Research and Development*, 2 (2), 35-42, 2010.
16. American Concrete Institute 318M-11, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute (ACI), Detroit-USA, 2011.
17. Duran B., Tunaboyu O., Avşar Ö., Determination of Elasticity Modulus of Low Strength Concrete and Its Effect on the Risk Assessment Results by DSVB, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (1), 253-264, 2017.
18. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), T. C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara, 2007.
19. Kaushik H. B., Rai D. C., Jain S. K., Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry Under Uniaxial Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (9), 728-739, 2007.
20. Akansel V.H., Yakut A., Gülkan P., Effects of Openings on Collapse Risk of Infilled Buildings, *4th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Anadolu University-Eskişehir-Turkey, October 11-13, 2017.
21. Baran M., Investigation of the Effects of Infill Walls on the Behavior of Reinforced Concrete Framed Structures, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 275-284, 2012.
22. Ezzatfar P., Binici B., Kurc O., Canbay E., Sucuoglu H. and Ozcebe G., Application of Mesh Reinforced Mortar For Performance Enhancement of Hollow Clay Tile Infill Walls, *Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures*, Volume 26, Springer International Publishing, 171-186, 2014.
23. FEMA 356, *Prestandart and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington-USA, 2000.
24. Begimgil M., Tuğla Duvarların Kayma Dayanımının Güçlendirilmesi Üzerine Deneysel ve Analitik Bir Çalışma, *Türkiye İnşaat Mühendisliği 11. Teknik Kongresi*, 167-181, 1991.
25. Kakaletsis D. J., Karayannis C. G., Influence of Masonry Strength and Openings On Infilled R/C Frames Under Cycling Loading, *Journal of Earthquake Engineering*, 12 (2), 197-221, 2008.
26. Crisafulli F. J., *Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills*, PhD Thesis, University of Canterbury, Department of Civil Engineering, Christchurch, 1997.
27. Chrysostomou C.Z., *Effects of Degrading Infill Walls on the Nonlinear Seismic Response of Two-Dimensional Steel Frames*, PhD thesis, Cornell University, Ithaca (NY), 1991.
28. Syrmakizis C. A., Vratanou V. Y., Influence of Infill Walls to RC Frames Response, *Proc., 8th European Conference on Earthquake Engineering*, European Association for Earthquake Engineering (EAEE), Istanbul-Turkey, 47-53, 1986.
29. König G., *The State of the Art in Earthquake Engineering Research*, *Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering*, J. Donea and P.M. Jones (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1-22, 1991.
30. Stafford Smith B. and Carter C., *A Method of Analysis for Infilled Frames*, Volume 44(1), *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 31-48, 1969.
31. Öztürkoğlu O., Uçar T., Yeşilce Y., Kısmi Boşluklu Dolgu Duvarların Betonarme Binaların Deprem Davranışına Etkisinin İncelenmesi, *Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu*, Burdur-Türkiye, 123-133, 7-9 Mayıs, 2015.
32. SAP2000 Plus 15.1.0 *Structural Analysis Program*, Computers and Structures Inc., University Ave., Berkeley, CA., 1995.



Usage of micronized zeolite in high performed concrete

Semih Ceylan*¹, Salih Yazıcıoğlu², Lutfullah Turanlı³

¹Gazi University, Institute of Science, Civil Engineering Department, 06500 Beşevler, Ankara, Turkey

²Gazi University Faculty of Technology, Civil Engineering Department, 06500, Beşevler, Ankara, Turkey

³Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Architecture, Civil Engineering Department, 06220, Etlik, Ankara, Turkey

Highlights:

- Mikronize zeolit kullanımı ile geçirimsiz beton elde edilmesi
- Silis dumanına yakın etki gösteren mineral katkı kullanımı
- Durabil beton elde edilmesinde farklı yaklaşımlar

Keywords:

- Pozzolan
- Silica Fume
- Zeolite

Graphical/Tabular Abstract

Silica fume is a commonly used mineral additive in structures like harbors, bridge piers, nuclear facilities and airfields. It is an expensive and limited material. Therefore it is important to find an alternative material to silica fume. Clinoptilolite type zeolite can be found in Turkey commonly. The most important experiment in this study to evaluate the impermeability was chloride-ion permeability test. The results of the chloride ion permeability test is given below. The test results were in accordance with porosity, water permeability, capillarity in terms of impermeability. Therefore it is assumed that micronized zeolite provides impermeable concrete and can be used instead of silica fume.

Table A. Test results of chloride-ion permeability

Mixture	7 day (coulomb)	28 day (coulomb)	365 day (coulomb)
Control	6317	3832	2417
Silica Fume %10	1873	633	469
Zeolite %15	3537	1786	1278

Article Info:

Research Article
Received: 08.02.2020
Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.686689

Correspondence:

Author: Semih Ceylan
e-mail:
smhceylan@hotmail.com.
phone: +90 532 543 4131

Purpose: In this study effect of replacing %15 micronized zeolite to impermeability and other engineering properties was investigated experimentally with various experiments and compared mainly with silica fume.

Theory and Methods:

Compressive strength, split tension strength, porosity, capillarity, water absorption, chloride ion permeability, ultrasonic pulse velocity, modulus of elasticity, poisson ratio, heat of hydration, carbonation, SEM, XRD, FTIR and TGA analyses were done to observe the effect of micronized zeolite replacement.

Results:

The laboratory experiments were carried out and due to the results obtained zeolite replacement gave close strength results to control concrete made with CEM I 42,5 R. Zeolite filled the voids, strengthened the ITZ in concrete therefore impermeable and durable concrete is achieved according to the results.

Conclusion:

It can be advised to use micronized zeolite instead of silica fume in concrete to get durable and impermeable concrete.



Mikronize edilmiş zeolitın yüksek performanslı betonda kullanımı

Semih Ceylan*¹, Salih Yazıcıoğlu², Lutfullah Turanlı³

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500 Beşevler, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500, Beşevler, Ankara, Türkiye

³Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06220, Etlik Ankara, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Mikronize zeolit kullanımı ile geçirimsiz beton elde edilmesi
- Silis dumanına yakın etki gösteren mineral katkı kullanımı
- Durabil beton elde edilmesinde farklı yaklaşımlar

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.02.2020

Kabul: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.686689

Anahtar Kelimeler:

Puzolan,
zeolit,
silis dumanı

ÖZET

Bu çalışmanın başlıca amacı ülkemizde bol miktarda bulunan doğal zeolit mineralinin mikronize edilerek silis dumanına alternatif olarak yüksek performanslı betonda kullanımını araştırmaktır. Bu amaçla çimentoya %15 oranında mikronize edilmiş zeolit ve %10 oranında silis dumanı ikame edilerek 10x10x10 cm boyutunda küp, 10x20 cm ve 15x30 cm boyutlarında silindirik numuneler hazırlanmıştır. Çalışmalar kapsamında 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 ve 365 günlük numunelerin basınç, yarma dayanımlarına bakılmış olup birim hacim ağırlık, su emme, klor-iyon geçirgenliği, porozite, elastisite modülü, poison oranı, karbonatlaşma, ultrasonik hız, kılcallık, hidrasyon ısı deneyleri yapılmış ve birbirleriyle olan ilişkileri kıyaslanmıştır. Ayrıca mikro yapıda oluşan değişimleri gözlemek amacıyla numunelere SEM, XRD, FTIR ve TGA analizleri de yapılmış olup birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre %15 mikronize zeolit kullanımının, %10 silis dumanı kullanımına yakın dayanım değerleri verdiği, mikronize zeolit kullanımı ile silis dumanına yakın geçirimsiz ve durabil beton edilebileceği görülmüş olup mikronize zeolitın silis dumanına alternatif olabileceği tespit edilmiştir.

Usage of micronized zeolite in high performance concrete

HIGHLIGHTS

- Attaining impermeable concrete using micronized zeolite
- Usage of mineral admixture showing close affect to silica fume
- Different approaches to attain durable concrete

Article Info

Research Article

Received: 08.02.2020

Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.686689

Keywords:

Pozzolan,
zeolite,
silica fume

ABSTRACT

The main purpose of this study is to investigate the usage of micronized natural zeolite that has big amounts of reserves in our country as an alternative to silica fume in high performance concrete. 10x10x10 cm, 10x20 cm and 15x30 cm concrete specimens made with 10% replaced silica fume, 15% replaced micronized zeolite were prepared to achieve this aim. Compressive strength and split tensile strength tests were done to concrete specimens on the 3rd, 7th, 14th, 21st, 28th, 56th, 90th and 365th days during the study and unit weight, water absorption, chloride-ion impermeability, porosity, modulus of elasticity, poisson ratio, carbonation, ultrasonic pulse velocity, capillarity, heat of hydration experiments were done and their relation compared with each other. Also SEM, FTIR, XRD, TGA analyses were done to specimens to observe the change in microstructure and the results obtained were compatible with each other. According to the results obtained from experiments, usage of 15% micronized zeolite gave close results to silica fume and it is observed that impermeable and durable concrete can be attained by usage of micronized zeolite instead of silica fume, therefore it is determined that micronized zeolite can be alternative to silica fume.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: smhceylan@hotmail.com, syazicioglu@gazi.edu.tr, lturanli@ybu.edu.tr / Tel: +90 532 543 4131

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton mekanik özellikleri ve dayanımından dolayı en çok kullanılan yapı malzemesidir [1, 2]. Ancak Portland çimentosu, üretimi esnasında (betonun ana bileşeni olarak kullanılan ana malzeme) olumsuz birçok çevresel etkilere sebep olabilir çünkü ciddi oranda CO₂ açığa çıkmakta ve doğaya salınmaktadır [3]. Doğal zeolitlerin betona puzolan olarak ilave edilmesinin betonun mekanik özelliklerini ve durabilitesini artırdığı ve ayrıca geçirgenliğin azalmasına yardımcı olduğu görülmüştür [3]. Bu sorunları çözmek için birçok çözümler önerilmiş olup en önemlilerinden bir tanesi çimento tüketimini azaltmaktır. Bu da doğal puzolan ya da endüstriyel atık olan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemelerin kullanılmasıyla olmaktadır [4, 5].

Bağlayıcı olarak etkili olması için zeolit çok ince öğütülmesi gerekmektedir. Zeolit düşük sertliği ve öğütme esnasında daha az enerji ihtiyacı olduğu için bir takım avantajlar sağlamaktadır. Zeolit beton çimento ikamesi olarak kullanımı çimento tüketimini ve karbon ayak izini azaltmış olup beton üretiminin sürdürülebilirliğine katkı sağlamıştır [6].

Zeolit genelde perlit, uçucu kül, pomzatasından daha fazla Ca(OH)₂ tüketmektedir. Bu kapsamda yüksek özgül yüzeyli zeolit daha fazla puzolanik reaktiviteye sahiptir [7]. Zeolit bol miktarda SiO₂ ve Al₂O₃ içermektedir [8]. Mineral katkı olarak kullanılmasının sebebi; yüksek iyon değişim kapasitesi, bol silisli olması, düşük yoğunluğu, özgül yüzeyinin yüksek oluşu, ve kristal yapısı bozulmadan dehidratasyona uygunluğudur. Bunlardan dolayı zeolit üstün özelliklere sahiptir [9].

Elemental silikon metalinin ve ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen silis dumanı çok ince ve bol miktarda amorf silis içeren puzolanik malzemedir (Yoğunlaştırılmış silis dumanı ve mikrosilika olarak da bilinmektedir) [10]. Silis dumanının yüksek performanslı betonda etkili bir bağlayıcı olduğu kanıtlanmıştır. Ancak aşırı ince olması çok su ihtiyacına sebep olmakta olup ayrıca yüksek maliyetli bir üründür. Silis dumanı ASTM C 1240 doğrultusunda genelde %10 seviyesinde çimento yerine ikame edilerek kullanılmaktadır [11]. Silis dumanı vb. mineral katkılar betonun porozitesindeki düşmenin yanında, harç, beton ve agrega ara yüzeyindeki boşlukların azalmasını da sağlarlar [12]. Silis dumanı, suyun çimento ile reaksiyonunun ürünü olan Ca(OH)₂ ile uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi diğer puzolanik malzemelere göre daha erken ve hızlı tepkimeye girer. Silis dumanının çimentonun suyla olan reaksiyonuna kimyasal etkisinin yanında fiziksel etkisi de bulunmaktadır. Silis dumanı, ince olması ve mineral yapısı sayesinde çimentonun su ile olan reaksiyonunu hızlandırarak betonun dayanım kazanma sürecini hızlandırmış olur. Geçirgenlik betonun dayanıklılığı üzerinde etkili olan en önemli parametredir. Betonun geçirgenliği düştükçe durabilitesi artar. Ca(OH)₂ dayanıma katkısı olmayan, suda çözünen ve betonun boşluklu

yapısından sorumludur. Betonda bulunan Ca(OH)₂ suda çözünebildiği için kılcal boşluklar oluşturur. Betonun içerisinde minimum miktarda olması daha iyidir. Silis dumanı ise Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek boşluklarda kararlı C-S-H jeli oluşturur ve geçirimsizliği azaltır [13].

Turanlı vd. [14] klinoptiloliti farklı oranlarda ve daha kaba kullanarak yapmış oldukları puzolanik çalışmalarda olumlu sonuçlar elde etmiş olup farklı bir çalışmada [15] ise silis dumanı, zeolit, uçucu kül ve non-zeolitik puzolanlar kullanarak zeolit uçucu külden daha iyi, silis dumanının altında değerler verdiğini gözlemlemişlerdir.

Şimşek vd. [16] zeolitik tuf ikamesinin farklı agregalar üzerinde alkali-silika reaksiyonu etkilerinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapmış olup zeolitik tuf katkısının reaktif agregaların ASR'sini önlemede etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Şimşek vd. [17] farklı oranlarda zeolitik tuf, içme suyu, deniz suyu ile birtakım deneyler yaparak fiziksel ve mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır.

Şimşek vd. [18] zeolit, uçucu kül ve atık cam malzemelerin Portland kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliği ile ilgili birtakım deneyler yaparak bahse konu malzemelerin çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini tespit etmişleridir.

Bu çalışmanın amacı betona bu kadar üstün özellikler sağlayan silis dumanı yerine ülkemizde çok fazla bulunan klinoptilolit türü zeolit mikronize seviyede öğütülerek kullanılması ve böylelikle silis dumanına yakın değerler elde etmektir. Silis dumanı havaalanlarında ve yüksek mukavemet istenen yerlerde kullanılan pahalı ve genellikle ithal edilen bir mineral katkıdır. Bu kapsamda bu pahalı ve değerli olan mineral katkıya yakın üstünlükler sağlayan bir mineral katkı malzemesi bulunmasının ülkemize teknik, ticari ve milli anlamda avantajlar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

2. MALZEMELER (MATERIALS)

2.1. Çimento (Cement)

Deneylerde, kimyasal içeriği Tablo 1'de, dayanım özellikleri Tablo 2'de yer alan TS EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmış olup başlangıç ve bitiş priz süreleri sırasıyla, 165 ve 280 dakikadır. Kullanılan çimentoya ait SEM görüntüsü Şekil 1'de yer almaktadır.

Deneylerde kullanılan çimento bileşenleri Rietveld Analizi yöntemiyle bulunmuştur. Bu kapsamda kullanılan çimentoda %54 Alite-Nishi (C₃S), %16,5 Belite (C₂S), %10,5 Brownmillerite (C₄SAF), %3,5 kübik C₃A, %1,2 ortho C₃A, %0,2 kireç, %0,8 periklas, %0,6 alçı, %3,3 hemihidrat, %5,8 kalsit, %0,1 quartz, %1,9 dolomite, %1,7 kübik mayenit bulunmuştur.

Tablo 1. Kullanılan malzeme özellikleri
(Specifications of the materials used)

Kimyasal İçerik (%)	Çimento	Zeolit	Silis Dumanı
SiO ₂	19,39	72	94
CaO	63,91	4,44	0,47
Al ₂ O ₃	5,65	12,74	0,35
Fe ₂ O ₃	3,42	2,64	0,25
MgO	2,15	1,2	0,55
SO ₃	3,91	1,2	0,95
Na ₂ O	0,87	1,24	0,72
K ₂ O	1,37	4,54	2,7
Kızdırma Kaybı	3,70	9-14	3,5
Çözünmeyen Kalıntı	0,89	-	-
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,11	2,3	2,4
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3640	19340	20230
BET değeri (cm ² /g)	-	458624	331000

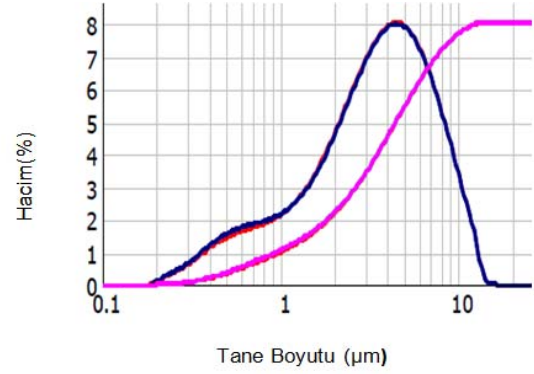
Tablo 2. Çimento dayanım özellikleri (MPa)
(Strength of the cement used)

Gün	Basınç Dayanımı (MPa)
1	20,1
2	33,2
7	44,9
28	52,8

2.2. Zeolit (Zeolite)

Manisa yöresinde faaliyet gösteren bir firmadan temin edilen klinoptilolit türü 10 mikron inceliğinde öğütülmüş doğal zeolit ağırlıkça %15 çimento yerine ikame edilerek deneylerde kullanılmıştır. Zeolit kimyasal kompozisyonu

Tablo 1’de, Malvern Mastersizer 2000 aleti yardımıyla elde edilen lazer tane boyut dağılımı Şekil 2’de yer almakta olup dane çapı dağılımı d(10): 0,78 µm, d(50) : 3,855 µm, d(90) : 8,162 µm’dir. Kullanılan zeolite ait SEM görüntüsü Şekil 3’de yer almaktadır.

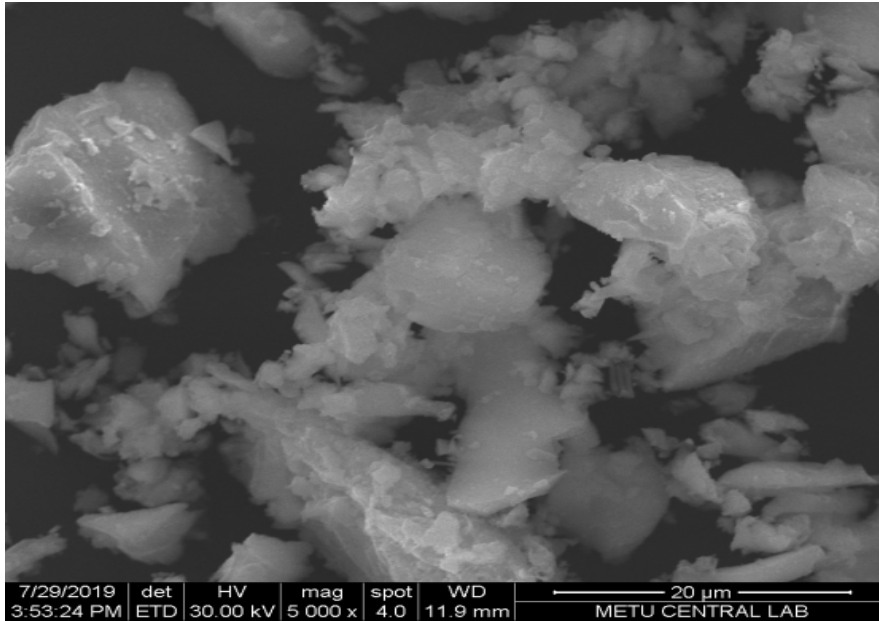
**Şekil 2.** Zeolit’e ait lazer tane boyut dağılımı
(Gradation of zeolite)

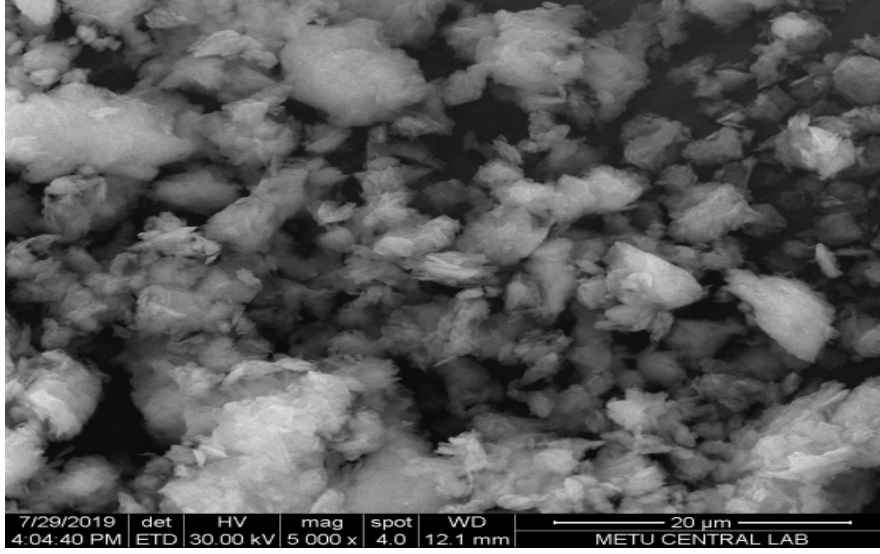
2.3. Silis Dumanı (Silica Fume)

Çalışmada ağırlıkça %10 çimento yerine ikame edilerek ithal silis dumanı kullanılmış olup kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de, SEM görüntüsü de Şekil 4’te yer almaktadır.

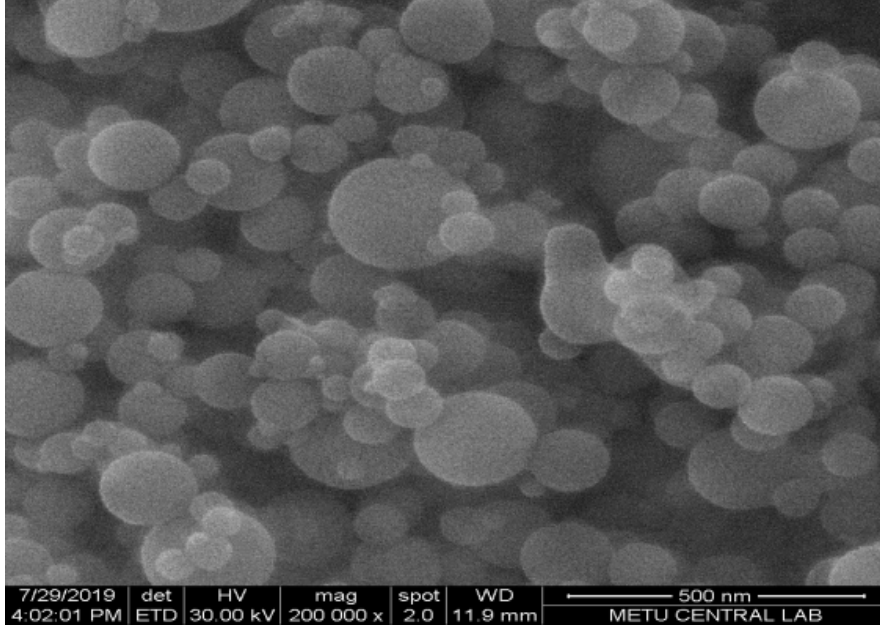
2.4. Akışkanlaştırıcı (Plasticizer)

Zeolit ve silis dumanı katkısının kıvamda oluşturacağı olumsuz etkiyi azaltma ve işlenebilirliği aynı yapabilmek için beton karışımlara ağırlıkça %1,5-2 oranında melamin sülfonat esaslı toz süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmış olup özellikleri Tablo 3’te yer almaktadır.

**Şekil 1.** Kullanılan çimentonun SEM görüntüsü (SEM image of cement used)



Şekil 3. Kullanılan zeolitin SEM görüntüsü (SEM image of zeolite used)



Şekil 4. Kullanılan silis dumanının SEM görüntüsü (SEM image of silica fume used)

Tablo 3. Akışkanlaştırıcı özellikleri
(Specifications of the superplasticizer used)

Özellik	Değer
Malzeme Yapısı	Melamin Sülfonat
Görünüm	Toz, Beyaz
Yoğunluk	1,80±0,01 g/cm ³ (20°C)
pH	10±0,01

2.5. Agregası (Aggregate)

Ankara Hasanoğlan bölgesi taşocaklarından temin edilen agregalar deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Karışımlarda %60 ince agregası (0-4 mm), %20 kaba agregası (4-11mm), %20 kaba agregası (11-22,4 mm) kullanılmış olup agregası özellikleri Tablo 4 ve Tablo 5’de yer almaktadır.

Tablo 4. Kullanılan agregalara ait doymuş yüzey kuru, kuru birim ağırlıklar ve su emme oranları (TS 1097-6) (Saturated surface dry unit weight, dry unit weight, water absorption ratio of the aggregates used)

Agregası	0-4 mm	4-11 mm	11-22,4 mm
γ_{dyk} (g/cm ³)	2,69	2,69	2,7
γ_k (g/cm ³)	2,67	2,67	2,6
Su emme (%)	0,58	0,59	0,1

3. DENEYSEL METOD (EXPERIMENTAL METHOD)

Beton deneylerine geçmeden önce zeolit ikame oranını belirlemek için 5x5x5 cm numunelerle harç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde ASTM C 1240

doğrultusunda silis dumanı için en çok kullanılabilir oran olan %10 ikame oranı kullanılmış olup zeolit için %10, %15, %20 gibi ikame oranları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda %15 zeolit kullanımının silis dumanına en yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 5. Kullanılan agregalara ait gradasyon
(Gradation of the aggregates used)

Kümülatif Geçen, %			
Elek (mm)	0-4 mm	4-11 mm	11-22,4 mm
44,8	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	90,5
16	100,0	100,0	46,1
11,2	100,0	97,0	10,6
8,0	100,0	55,4	5
5,6	100,0	14,3	-
4	98,34	-	-
2	70,78	-	-
1	47,02	-	-
0,5	31,68	-	-
0,25	20,04	-	-
0,125	-	-	-

3.1. Beton Deneyleri ve Karışım Dizaynı (Concrete Experiments and Mix Design)

Harç numunelerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda beton deneylerinde ağırlıkça %10 silis dumanı ve %15 zeolit ikame edilerek 18 adet 10x10x10 cm küp, 210 adet 10x20 cm ve 27 adet 15x30 cm silindir beton numuneler hazırlanmış olup beton karışım oranları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Beton karışım dizaynı (Concrete mix design)

Malzeme	Kontrol Karışımı	Silis Dumanlı Karışım	Zeolitli Karışım
Çimento	350 kg	315 kg	297,5 kg
Su	165,5 kg	166,5 kg	166,5 kg
Silis Dumanı	-	35 kg	-
Zeolit	-	-	52,5 kg
0-4 Agregası	1147 kg	1247 kg	1247 kg
4-11 Agregası	383 kg	379 kg	379 kg
11-22 Agregası	386 kg	382 kg	382 kg
Akışkanlaştırıcı	4,9 kg	5,95 kg	6,3 kg
TOPLAM	2431,5kg	2424,5 kg	2424,5 kg

Hesaplamalarda su/çimento oranı 0,45 olarak öngörölmüş olup agregaların su emme muhtevalarına göre su oranları tekrar hesaplanmıştır. Tüm dökümler 40 dm³ hacimli betoniyerde karışımların slump değerleri 12 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Betonlarda hava oranları %1,5 bulunmuştur.

3.2. Beton Birim Hacim Ağırlıkları (Concrete Unit Weight)

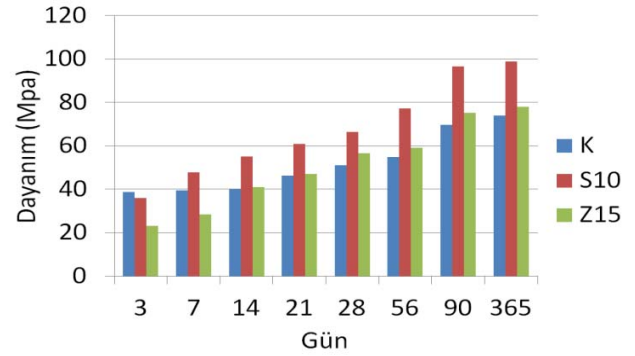
Beton karışımlarının birim hacim ağırlıkları Tablo 7'de yer almaktadır.

Tablo 7. Beton karışımların birim hacim ağırlıkları (ASTM C 29'ye uygun olarak) (Unit weight of concrete mixtures)

Karışım	kg/m ³
Kontrol	2500
Silis Dumanı %10	2380
Zeolit %15	2300

3.3. Beton Basınç Dayanımı (Compressive Strength of Concrete)

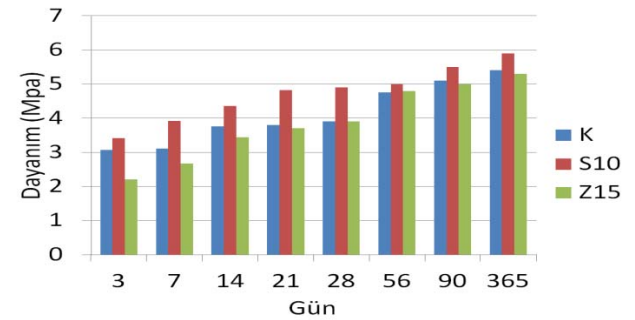
ASTM C 39/C doğrultusunda her karışımından her deney günü hidrolik yük kontrollü beton basınç dayanım presinde 3 kN/s yükleme hızı uygulanarak minimum 3 adet numuneye deney yapılmış olup sonuçların ortalaması alınmıştır. 10x20 cm silindir beton basınç dayanım sonuçları Şekil 5'de yer almaktadır.



Şekil 5. Beton Basınç Dayanımı
(Compressive Strength of Concrete)

3.4. Beton Yarma Dayanımı (Split Tension Strength of Concrete)

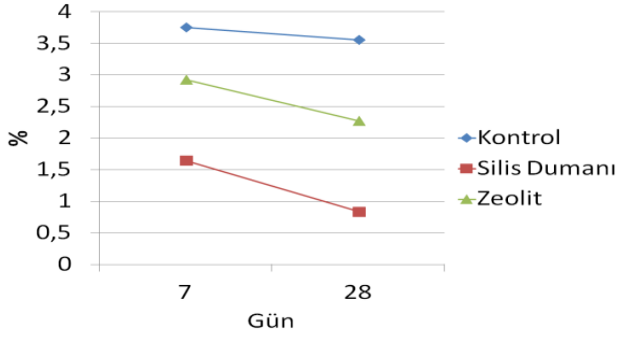
ASTM C 496 'ye uygun olarak her karışımından her deney günü minimum 3 adet numuneye deney yapılmış olup sonuçların ortalaması alınmıştır. 10x20 silindir beton yarma dayanım sonuçları Şekil 6'da yer almaktadır.



Şekil 6. Beton yarma dayanımı (Split tension strength of concrete)

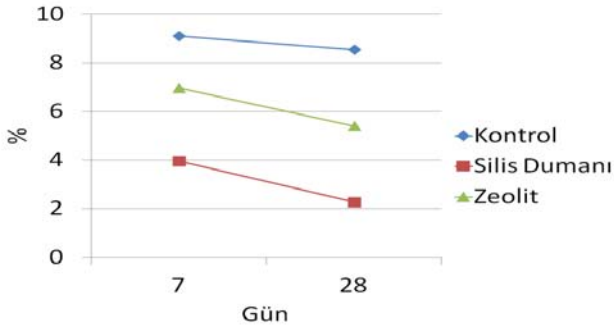
3.5. Su Emme ve Porozite Oranları (Water Absorption and Porosity Ratio)

ASTM C 642'ye uygun olarak 10 cm³'lük küp numunelerin 7 ve 28.günlerde su emme oranları ve porozite değerleri hesaplanmıştır. Numuneler deneylerden 1 gün önce kür havuzundan çıkartılarak etüvde kurutulmuştur.



Şekil 7. 10 cm³ beton numunelere ait su emme değerleri
(Water absorption ratio of 10 cm³ concrete specimens)

Her karışımdan her deney günü 3 adet numuneye deney yapılmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Su emme oranları Şekil 7'de yer almaktadır.



Şekil 8. 10 cm³ beton numunelere ait porozite değerleri
(Porosity ratio of 10 cm³ concrete specimens)

Her karışımdan her deney günü 3 adet numuneye deney yapılmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Porozite oranları Şekil 8'de yer almaktadır.

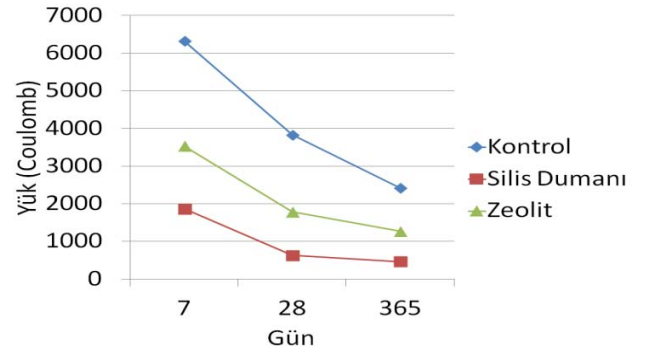
3.6. Klor-İyon geçirgenliği deneyleri (Chloride-Ion Permeability Experiments)

Klor-iyon geçirgenliği deneyleri ASTM C 1202-17'ye uygun olarak 7, 28 ve 365. günlerde 10x20 cm lik numunelerden 5 cm boyunda beton numuneleri kesilerek her numuneye 6 saat boyunca 60 V elektrik akımı uygulanarak yapılmıştır. ASTM C 1202-17'ye göre değerlendirme tablosu Tablo 8'de olup deney sonuçları Şekil 9'da yer almaktadır.

Her karışımdan her deney günü 4-6 adet numuneye deney yapılmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır.

Tablo 8. ASTM C 1202-17'ye göre klor-iyon geçirgenliği yönünden değerlendirme (Evaluation of chloride-ion permeability with respect to ASTM C 1202-17)

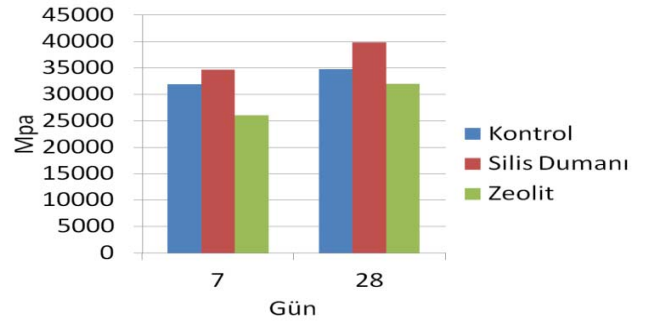
Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Klor İyonu Geçirgenliği Yönünden Değerlendirme
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir



Şekil 9. Klor-iyon geçirgenlik değerleri
(Test results of chloride-ion permeability)

3.7. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Deneyleri (Test results of modulus of elasticity and Poisson Ratio)

ASTM C469 doğrultusunda 7 ve 28 günlük 10x20 cm silindir numunelere MTS marka aksenal test cihazıyla elastisite modülü deneyi yapılmış olup deney sonuçları Şekil 10'da yer almaktadır.



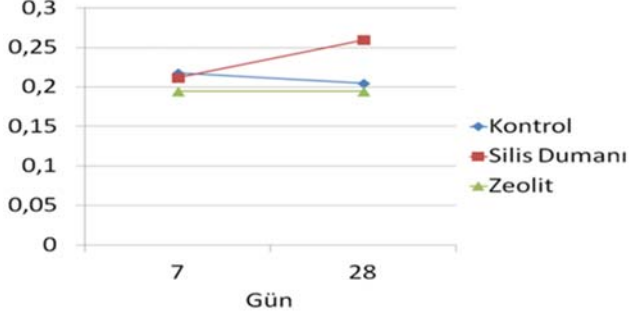
Şekil 10. Elastisite Modülü değerleri
(Test results of modulus of elasticity)

Ayrıca ASTM C469'a uygun olarak 7 ve 28 günlük 10x20 cm silindir numunelere MTS marka aksenal test cihazıyla elastisite modülü deneyi yapılırken numunelerin poisson oranları da hesaplanmış olup deney sonuçları Şekil 11'de yer almaktadır.

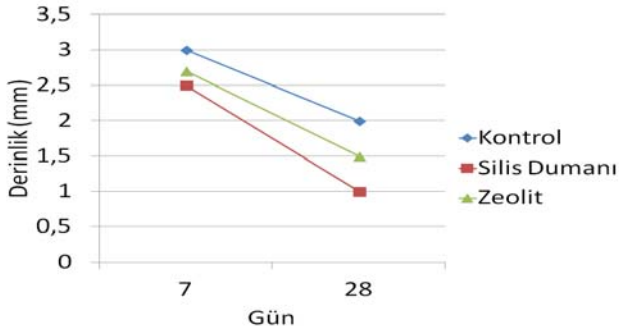
3.8. Karbonatlaşma Deneyleri (Carbonation Experiments)

7 ve 28 günlük numuneler karbonatlaşma deneyi için karbonasyon tankının içine konulmuştur. 24 saat 1 atmosfer

basınçta CO₂ dolu tank içinde bekletilen 10 cm³'lük beton numuneler tanktan çıkartılarak ortadan ikiye kırılmıştır. Kırılan yüzeylere %1 fenolftalin içeren çözelti püskürtülerek asidik-bazik bölge ayrımı yapılmıştır. Renk değişimi olmayan yerlerin yüzeyden uzunlukları ölçülmüş ve karbonasyon derinlikleri bulunmuştur. Deney sonuçları Şekil 12 ve Şekil 13'de yer almaktadır.



Şekil 11. Poisson oranı değerleri (Poisson's ratio values)

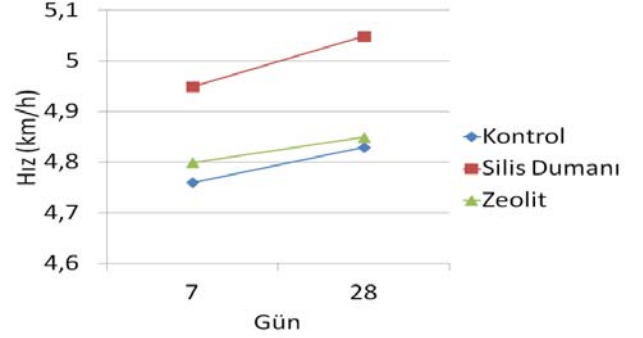


Şekil 12. Karbonatlaşma derinlik değerleri (Carbonation depth values)

3.9. Ultrasonik Hız Deneyi (Ultrasonic Pulse Velocity Experiments)

ASTM C 597 doğrultusunda her karışımdan her deney günü 6 adet 10 cm³'lük numuneye birbirine paralel beton yüzeylere problar yerleştirilerek ultrasonik hız deneyleri yapılmıştır.

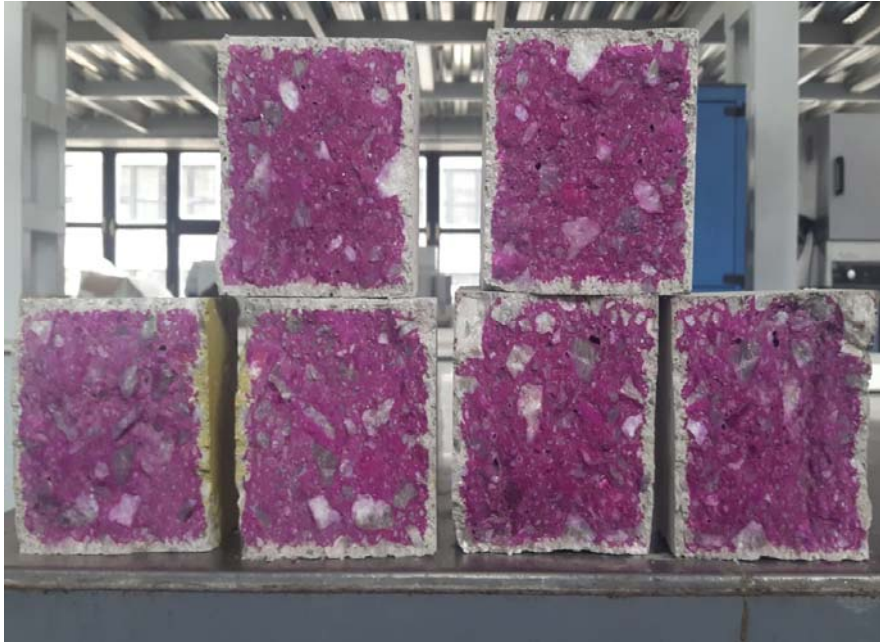
Elde edilen sonuçların ortalaması alınmış olup deney sonuçları Şekil 14'te yer almaktadır.



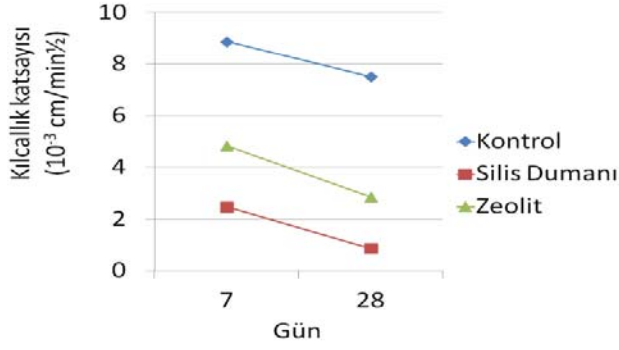
Şekil 14. Ultrasonik hız değerleri (Ultrasonic Pulse Velocity values)

3.10. Kılcallık Deneyi (Capillarity Experiments)

ASTM C 1585 doğrultusunda her karışımdan her deney günü 3 adet 10 cm³'lük numune 24 saat boyunca standartta belirtilen şekilde su yüzeyinde bırakılarak belirli zaman aralıklarında ağırlıkları ölçülmüştür. Çıkan sonuçların ortalaması alınmış olup deney sonuçları Şekil 15'de yer almaktadır.



Şekil 13. Karbonatlaşma deneyi (Carbonation test)



Şekil 15. Kılcallık katsayısı değerleri (Coefficient of capillarity values)

3.11. Hidratasyon Isısı Deneyi (Heat of Hydration Experiments)

TAM AIR marka izotermal kalorimetre cihazı ile yapılan hidratasyon ısısı deneyi sonucu Şekil 16'da yer almaktadır.

3.12. Mikroyapı Deneyleri (Microstructure Experiments)

Puzolanik reaksiyon sonucu oluşan mekanik dayanım, reaksiyona giren $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'den ziyade hidratasyon ürünlerinin mikroyapısı tarafından kontrol edilmektedir. Bu kapsamda mikroyapıda oluşan değişimleri incelemek amacıyla 3,7 ve 28. günlük beton numunelerine SEM, XRD, FTIR ve TGA analizleri yapılmıştır.

3.12.1. SEM Deneyleri (SEM Experiments)

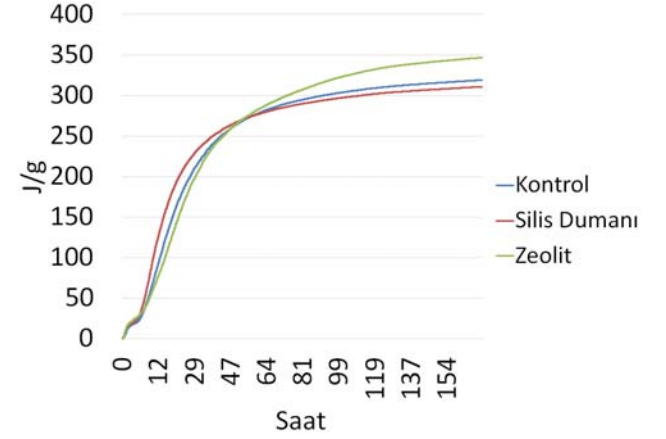
28 günlük SEM analizi görüntüleri Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19'da yer almaktadır.

3.12.2. XRD Deneyleri (XRD Experiments)

Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22 ile belirtilmiştir.

3.12.3. FTIR Analizleri (FTIR Analyses)

FTIR analizi sonucu 3,7 ve 28 günlük grafikler birbiriyle karşılaştırılarak yorumlanmış olup karşılaştırmalı şekiller Şekil 23, Şekil 24 ve Şekil 25'de yer almaktadır.



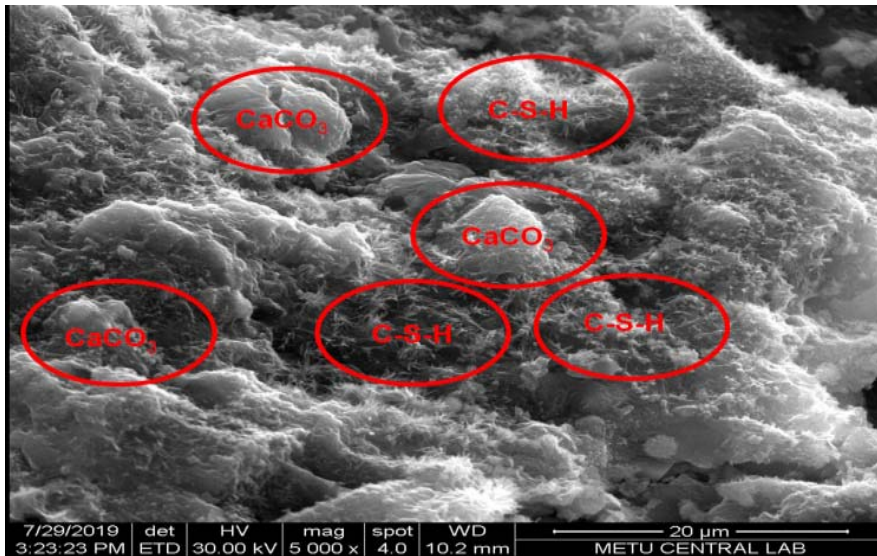
Şekil 16. Hidratasyon ısısı değerleri (Heat of hydration values)

3.12.4. TGA Analizleri (TGA Analyses)

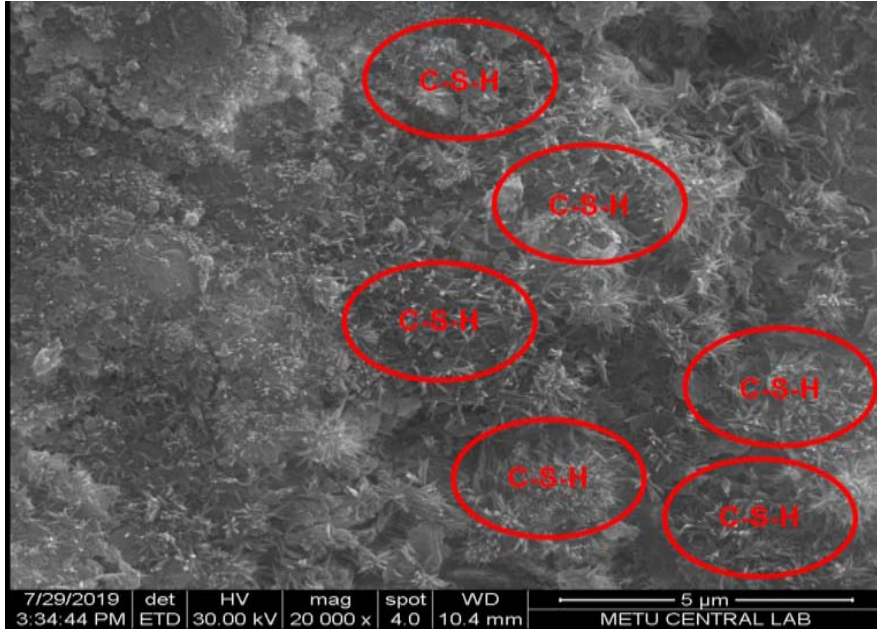
TGA analizi sonucu 3,7 ve 28 günlük grafikler birbiriyle karşılaştırılarak yorumlanmış olup karşılaştırmalı şekiller Şekil 26, Şekil 27 ve Şekil 28'de yer almaktadır.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

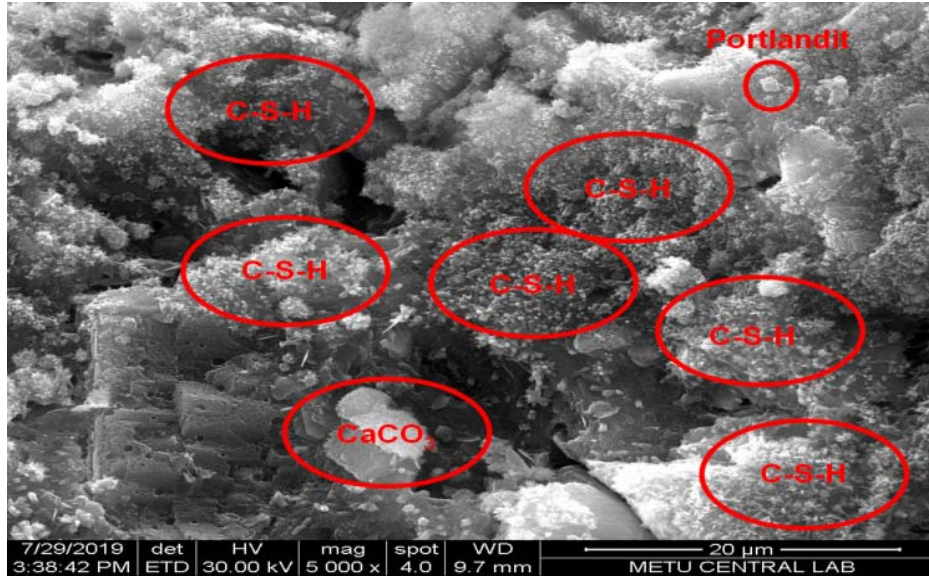
Zeolit ve silis dumanı hafif malzemeler olmaları dolayısıyla birim hacim ağırlıkları kontrol numunesine göre daha düşük seviyede çıkmıştır.



Şekil 17. 28 günlük kontrol numunesine ait SEM görüntüsü (SEM image of 28 day cured concrete specimen)



Şekil 18. 28 günlük silis katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü
(SEM image of 28 day cured silica fume replaced concrete specimen)



Şekil 19. 28 günlük zeolit katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü
(SEM image of 28 day cured zeolite replaced concrete specimen)

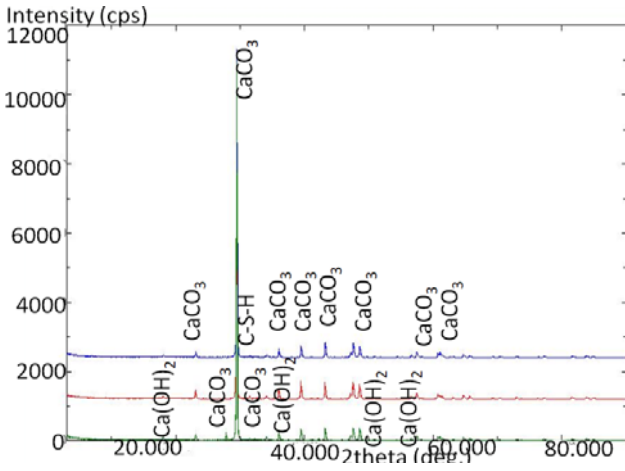
Basınç deneyleri sonuçları değerlendirildiğinde zeolitın erken dayanıma etkisinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Artan kür süresiyle birlikte silis dumanı ikameli betonlar en yüksek değerleri vermiş olup zeolit ikameli betonlar kontrol ve silis dumanı ikameli beton arasında değerler vermiştir. Zeolit ve silis dumanı toplam boşluk miktarını azaltarak ve agrega çimento hamuru arasındaki arayüzü iyileştirerek dayanımın artmasını sağlamışlardır. Yarma deneyleri sonuçları değerlendirildiğinde silis dumanı ikameli betonlar en yüksek değerleri vermiş olup kontrol ve zeolit ikameli betonlar birbirlerine yakın değerler vermiştir.

Su emme deney sonuçları değerlendirildiğinde zeolit ikameli beton, kontrol ve silis dumanı ikameli beton arasında değerler vermiştir.

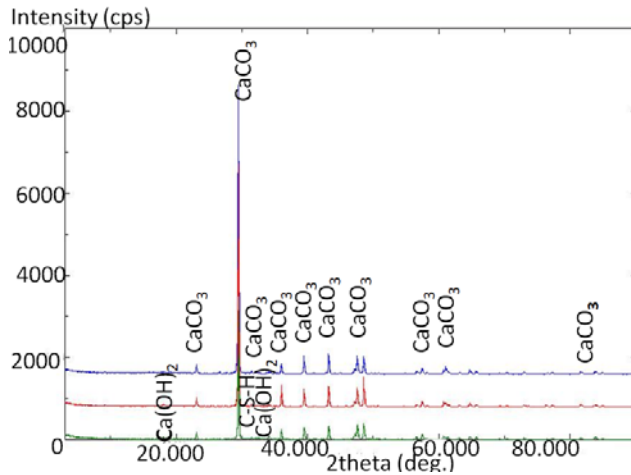
Porozite deney sonuçları değerlendirildiğinde zeolit ikameli beton kontrol ve silis dumanı ikameli beton arasında değerler vermiştir. Klor-iyon geçirgenliği deney sonuçları değerlendirildiğinde 7. günden sonra yapılan deneylere göre kontrol ve zeolitın geçirimsizliği yüksek olup silis dumanı geçirimsizliği düşük seviyededir. 28 ve 365 gün sonunda yapılan deneylerde kontrol numunelerinin geçirimsizliği orta

seviyede, silis dumanı ikameli betonun geçirirliliği çok düşük seviyede, zeolit ikameli betonun geçirirliliği düşük seviyededir. Yapılan deneyler sonucu 28 ve 365 gün sonunda puzolanik aktivitenin artmasıyla boşlukların azaldığı arayüzün dolduğu ve güçlendiği böylelikle geçirirliliğin azaldığı sonucuna varılmıştır. Klor iyonu geçirgenliği deneyi su emme ve porozite deneylerine uyumlu sonuçlar vermiştir.

XRD deneyinden çıkan sonuçlar doğrultusunda 3, 7 ve 28 günlük grafikler birbiriyle karşılaştırılmış olup 3 günlük numunelerde zayıf $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve güçlü CaCO_3 gözlemlenmiştir. Puzolanik reaksiyonların artması ile birlikte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in azaldığı CaCO_3 'ün daha yoğun olduğu Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22'de gözlemlenmiştir.



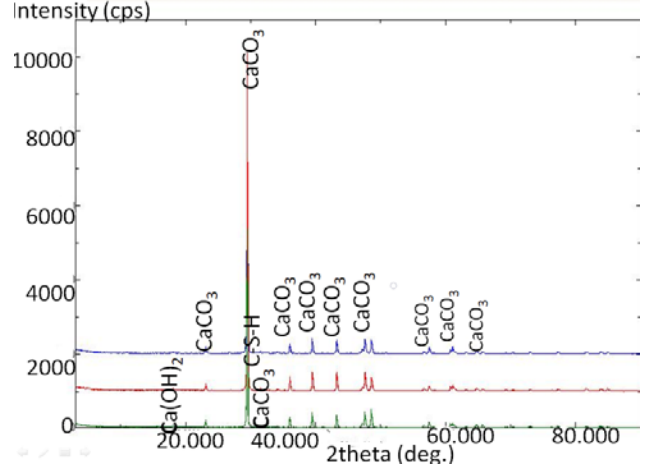
Şekil 20. 3,7 ve 28 günlük kontrol beton numunesine ait XRD grafiği (XRD of 3,7 and 28 day cured control concrete specimen)



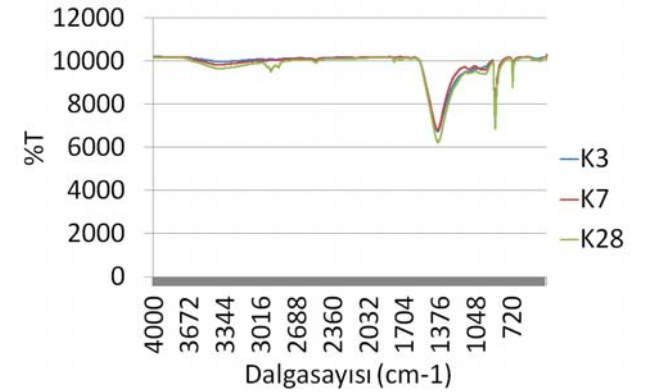
Şekil 21. 3,7 ve 28 günlük silis dumanı katkılı beton numunesine ait XRD grafiği (XRD of 3,7 and 28 day cured silica fume replaced concrete specimen)

Karbonatlaşma deney sonuçları değerlendirildiğinde artan kür süresi ve tamamlanan hidrasyon reaksiyonları ve gelişen boşluk yapısı karbonatlaşma derinliklerini azaltmıştır. Silis dumanı karbonasyon açısından en olumlu etkiyi göstermiş olup zeolit, kontrol ve silis dumanı arasında

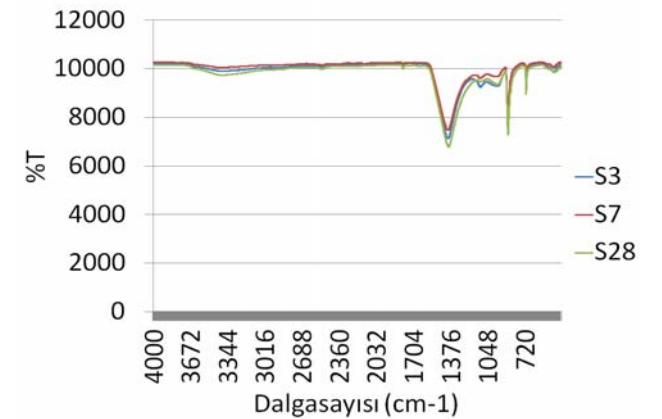
bir etki göstermiştir. Karbonatlaşma deneyinin yapılan klor iyonu geçirgenliği deneyi su emme ve porozite deneylerine uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 22. 3,7 ve 28 günlük zeolit katkılı beton numunesine ait XRD grafiği (XRD of 3,7 and 28 day cured zeolite replaced concrete specimen)

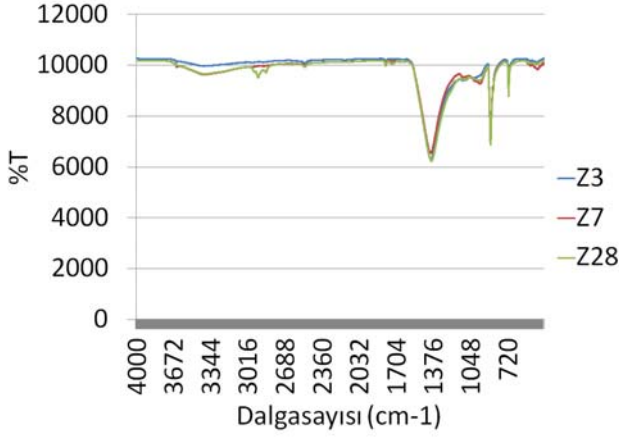


Şekil 23. 3,7 ve 28 günlük kontrol beton numunesine ait FTIR analizi (FTIR analysis of 3,7 and 28 day cured control concrete specimen)

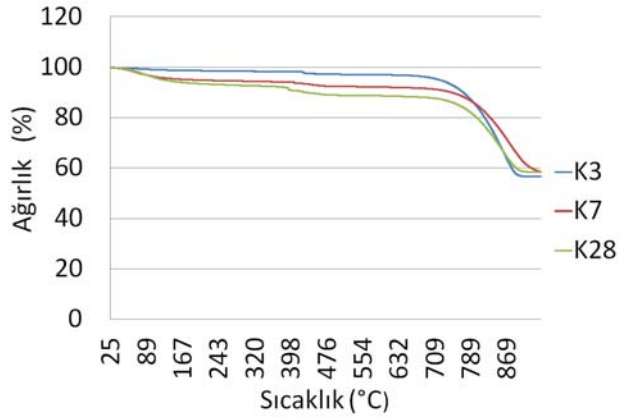


Şekil 24. 3,7 ve 28 günlük silis dumanı katkılı beton numunesine ait FTIR analizi

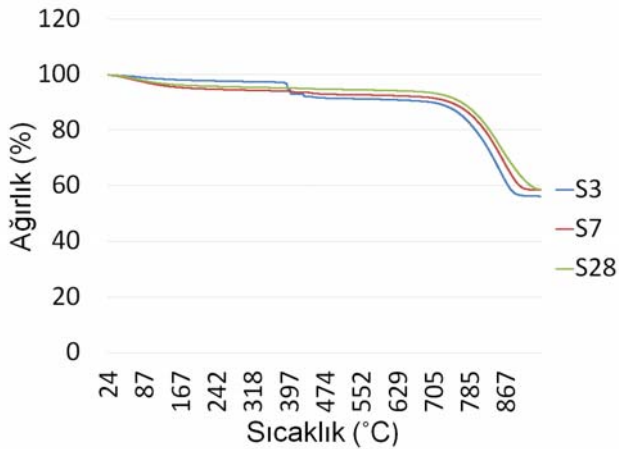
(FTIR analysis of 3,7 and 28 day cured silica fume replaced concrete specimen)



Şekil 25. 3, 7 ve 28 günlük zeolit katkılı beton numunesine ait FTIR analizi (FTIR analysis of 3,7 and 28 day cured zeolite replaced concrete specimen)

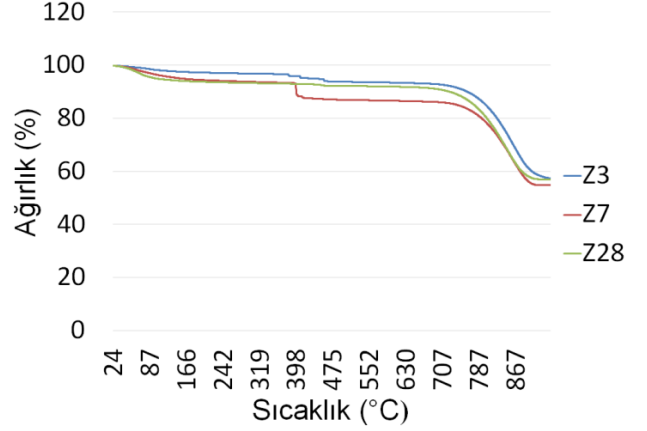


Şekil 26. 3,7 ve 28 günlük kontrol beton numunesine ait TGA analizi (TGA analysis of 3,7 and 28 day cured control concrete specimen)



Şekil 27. 3,7 ve 28 günlük silis dumanı katkılı beton numunesine ait TGA analizi

(TGA analysis of 3,7 and 28 day cured silica fume replaced concrete specimen)



Şekil 28. 3,7 ve 28 günlük zeolit katkılı beton numunesine ait TGA analizi

(TGA analysis of 3,7 and 28 day cured zeolite replaced concrete specimen)

Ultrasonik hız deneyi sonuçları değerlendirildiğinde hız değerleri basınç dayanım değerleri ile orantılı sonuçlar vermiştir. İçerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda, sesüstü dalganın betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça, sesüstü dalganın hızı daha az olmaktadır. [19] Kılcallık deneyi sonuçları değerlendirildiğinde silis dumanının beton yapısındaki boşlukları azalttığı zeolitin ise kontrol ve silis dumanı arası değerler verdiği gözlemlenmiş, deney kapsamında su emme ve porozite deneyleriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Betonun emebileceği toplam su miktarı, betonun içerisindeki boşlukların toplam hacmiyle ilgilidir. Silis dumanı ve zeolit çok ince olduğundan dolayı, hamur içindeki boşluklar ve agrega çimento arasındaki arayüz bu mineral katkıları tarafından doldurulduğundan kapiler boşluklar azalmıştır. Mineral katkıların en önemli rolü durabiliteyi dayanıklılığı arttırmak ve kapiler emme de azalma sağlamaktır.

Hidratasyon ısısı deney sonuçlarına göre kullanılan mineral katkıların bir miktar hidratasyon ısısını artırdığı gözlemlenmiştir. Silis dumanı yüzey alanı nedeniyle C_3S hidratasyonunu hızlandırdığından 3 günlük süre sonunda kontrol numunesine göre daha yüksek sonuç vermiş olup zeolitin de yüzey alanının fazla olmasının aynı etkiyi yarattığı değerlendirilmektedir.

Yapılan SEM deneyleri doğrultusunda her 3 karışımda yoğun olarak C-S-H jelleri ve $CaCO_3$ zeolit numunesinde az miktarda portlandit gözlemlenmiştir. Zamana bağlı olarak gelişen puzolanik reaksiyonlar sebebiyle C-S-H jelleri yoğun olarak gözlemlenmiş olup C-S-H jellerine bağlı olarak basınç ve yarma dayanımları yüksek değerler vermiştir.

FTIR analizlerinde 1394,871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında $CaCO_3$, 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında C-S-H, 3646 cm^{-1} dalga boyunda $Ca(OH)_2$ gözlemlendiği literatur

çalışmalarında belirtilmiştir. [20].Bu kapsamda kontrol numunesinde 1394,871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 gözlemlenmiş olup sadece 7 günlük numunede 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H gözlemlenmiştir. Silis dumanı ile yapılan 3 günlük numune grafiğinde 3646 cm^{-1} dalga boyunda zayıf Ca(OH)_2 diğer tüm numunelerde 1394,871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H gözlemlenmiştir. Zeolit grafiklerinde 1394,871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H, sadece 28 günlük numuneye ait grafikte 2924 ve 2854 cm^{-1} dalga boylarında CH gözlemlenmiş olup literatur çalışmaları ile uyumludur.

TGA analizlerinde 105-420°C aralığında hidrasyon ürünlerinden C-S-H'nin, 420-540°C aralığında Ca(OH)_2 'in 540-950°C aralığında CaCO_3 'in parçalandığı literatur çalışmalarında belirtilmiştir [21]. Bu kapsamda beton numunelerine yapılan TGA analizleri sonucu 420-540°C aralığında %1-3 civarlarında kütle kaybına neden olan Ca(OH)_2 'in parçalandığı 540-950°C aralığında %40 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'in parçalandığı gözlemlenmiş olup elde edilen sonuçlar literatur çalışmaları ile uyumludur.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda zeolitin %15 çimento yerine ikame edilerek kullanılmasının geçirimsiz ve daha durabil beton elde edilmesinde olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Zeolitin erken dayanıma etkisi düşük olup artan kür süresiyle puzolanik reaksiyonların artmasına bağlı olarak dayanımda artışlar meydana gelmiştir. İkincil C-S-H'ların oluşumu, ortamdaki portlanditin tüketilmesi dayanımın artmasını sağlamıştır. Hidrasyon ürünlerinin beton arayüzeyini ve boşlukları doldurmasından dolayı kılcallık, su emme ve porozite değerlerinde olumlu sonuçlar gözlemlenmiştir. Puzolanik reaksiyonlar boşluk yapılarında iyileşmelere ve kapiler boşlukların birbiriyle bağlanamamasına neden olmuştur. Klor iyonu geçirimsizlik deneyinde zeolit ile yapılan deneylerde silis dumanına yakın geçirimsizlik değerleri elde edilmiştir. Klor iyonu geçirimsizlik deneyi karbonasyon deneyi, su emme, porozite ve kılcallık deneyleri kapsamında birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Karışımların elastisite modülleri basınç ve çekme dayanımları ile orantılı sonuçlar vermiş olup zeolit dayanım olarak kontrol ve silis dumanı arasında değerler vermiştir. Zeolit ve silis dumanı hafif malzemeler olması dolayısıyla birim hacim ağırlıkları kontrol betonuna göre daha düşük çıkmıştır. SEM, XRD, FTIR ve TGA analizlerinde birbirleriyle uyumlu olarak yoğun miktarda C-S-H, CaCO_3 ve zayıf miktarda Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir. FTIR analizinin XRD analizine göre daha farklı miktarlardaki hidrasyon ürünlerini gözlemlenmede etkili olduğu sonucuna varılmıştır. %15 zeolit ikamesinin optimum bir ikame oranı olduğu daha fazla oranda zeolit ikamesinin su ve akışkanlaştırıcı ihtiyacını artıracığından ekonomik ve uygulanabilir olmayacağı değerlendirilmektedir. Silis dumanı dünyada az bulunan ve

pahalı bir malzeme olmasından dolayı havaalanları, köprü ayakları, nükleer tesisler gibi geçirimsizlik ve durabilite gereksinimi olan yapılarda ülkemizde yaygın olarak bulunan klinoptilolit türü zeolitin mikronize seviyede öğütülerek kullanılmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Sonuç olarak mikronize zeolit, dayanım ve durabilite yönünden kontrol ve silis dumanı arasında değerler vermiş olup mikronize zeolitin silis dumanı yerine alternatif olarak kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu proje Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından 07/2018–2030 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Eskandari H, Vaghefi M, Kowsari K. Investigation of mechanical and durability properties of concrete influenced by hybrid nano silica and micro zeolite. *Procedia Materials Science*, 11, 594-9, 2015.
2. Markiv T, Sobol K, Franus M, Franus W. Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16 (4), 554-62, 2016.
3. Tran Y, Lee J, Kumar P, Kim K, Lee S. Natural Zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part*, 165, 354-364, 2019.
4. Rajendran RR. Flexural behavior of concrete beam with GGBS and fly ash as supplementary cementitious material, 10, 32310, 2015.
5. Hefni Y., Zaher YAE, Wahab MA, Influence of activation of fly ash on the mechanical properties off concrete. *Constr. Build Mater*, 172, 728-34, 2018.
6. Nagrockiene D., Girskas G., Research into properties of concrete modified with natural zeolite addition. *Constr. Build.Mater.*113, 964-969, 2016.
7. Ghafari E., Feys D., Khayat K., Feasibility of using natural SCMs in concrete for infrastructure applications, *Constr. Build. Mater*, 127, 724-732, 2016.
8. Canpolat F., Yılmaz K., Köse M., Yurdusevm A., Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash as Replacement Materials in Cement Production , *Cement and Concrete Research*, 34, 731-735, 2004.
9. Sevim U.K., Okumuş N., Strength and permeability of concrete containing natural zeolite and silica fume, *Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 26 (2), 57-63, 2011.
10. ASTM C 1240, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures.
11. Z.Zhang, B.Zhang, P.Yan, Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete, *Constr. Build. Mater.*105, 82-93, 2016.
12. Hassan, K.E., Cabrera J.G., Maliehe R.S. The effect of mineral admixtures on the properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*,2, 267-271, 2000.

13. Holland, T, Silica Fume User's Manual, Silica Fume Association, Washington, 2005.
14. Turanlı L., Uzal B., Mehta P.K., High-volume natural pozzolan concrete for structural applications, ACI Mater J. 104, 535-538, 2007.
15. Turanlı L., Uzal B., Yücel H., Göncüoğlu M.C., Çulfaz A., Pozzolanic activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan, Cement and Concrete Research.40, 398-404, 2010.
16. Şimşek O., Taban S., Gökçe H.S., Investigation of Usability of Zeolite, Fly Ash and Waste Glass Materials in Portland Composite Cement Production, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (4), 803-809, 2010.
17. Şimşek O., Taban S., Determination of Alkali-Silica Reaction Effects of Zeoliti Tuff Addition on the Different Aggregates, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 24 (1), 145-153, 2009.
18. Şimşek O., Dayı M., Aruntaş H.Y., Çavuş M., The Effect of Zeolitic Tuff Additon Ratio and Sea Water on Physical and Mechanical Properties on Cement, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (3), 491-499, 2013.
19. Erdoğan T., Beton, Metu Pres, Ankara, 2003.
20. Qin L., Gao X., Chen T., Influence of mineral admixtures on carbonation curing of cement paste , Constr. Build. Mater., 212, 653-662, 2019.
21. Qin L., Gao X., Li Q., Upcycling carbon dioxide to improve mechanical strength of portland cement, J.Clean Prod., 196, 726-738, 2018.



Effect of chromium content on $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($X=3,4,5$) hardfacing electrode on microstructure, abrasion and corrosion behavior

Engin Kocaman^{1*}, Bülent Kılıncı², Şaduman Şen³, Uğur Şen³

¹Metallurgical and Materials Engineering, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, 67100, Turkey

²Welding Technology Program, Arifiye Vocational School, Sakarya University of Applied Science, Arifiye, Sakarya, 54580, Turkey

³Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya University, Sakarya, 54100, Turkey

Highlights:

- Coatings of $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) based hardfacing electrodes on steel substrate.
- Microstructural development of coatings formed on steel surface.
- Hardness, wear and corrosion behavior of coatings depending on chromium ratio.

Graphical/Tabular Abstract

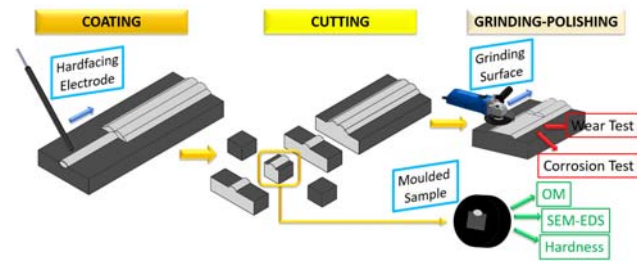


Figure A. Schematic illustration of coating process

Keywords:

- Hardfacing
- Surface alloying
- Hardness
- Wear
- Corrosion

Article Info:

Research Article

Received: 14.02.2020

Accepted: 12.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.689230

Correspondence:

Author: Engin Kocaman
e-mail: enginkocaman@beun.edu.tr
phone: +90 372 291 1970

Purpose: The aim of this study is to investigate the effect of chromium content on coating carried out with $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) hardfacing electrode.

Theory and Methods:

Electrode cover composition was prepared with ferro-chromium, ferro-bor and various flux components as starting material. Then the mixed powders were compressed in a mold to form electrode and dried a certain period. The coating on to an AISI 1010 steel surface was carried out by using these electrodes. The coating samples were prepared according to standard metallographic operations and The microstructure, hardness, wear and corrosion behavior of coating was investigated.

Results:

For each sample, the average coating layer thickness ranged from 4 to 6 mm and has a smooth surface and porosity free topography. It has been determined that α -(Fe-Cr) phase and eutectic phases in coatings which were carried out according to changing chrome ratio. In the coating containing 15% chromium, primary eutectic α -(Fe,Cr)+orthorhombic $(Cr,Fe)_2B$ structure surrounded by secondary eutectic α -(Fe,Cr)+tetragonal $(Fe,Cr)_2B$ phase and in the coating containing 20% and 25% chromium, primary eutectic α -(Fe,Cr) surrounded by chromium-rich boride (α -(Fe,Cr)+ortorombik $(Cr,Fe)_2B$) were observed. X-ray diffraction analysis shows that the system includes α -(Fe,Cr)+orthorhombic $(Cr,Fe)_2B$ phases as well as tetragonal $(Cr,Fe)_2B$ and $(Fe,Cr)_3(C,B)$ phases. Hardness values were measured as 65 (+/- 0.4) HRC, 65.3 HRC (+/- 0.3) and 67.5 HRC (+/- 0.5), respectively, according to the increasing chromium ratio. The lowest wear rate was found 2.32×10^{-5} (mm^3/m) in 3N load for the electrode with the $Fe_{13}Cr_5B_2$ composition and the highest value was found to be 8.16×10^{-5} (mm^3/m) for electrode with $Fe_{15}Cr_3B_2$ composition at 9N load. In addition, the I_{cor} value decreased according to the increasing amount of chromium and was measured as $2.166 \mu A/cm^2$ and $1.615 \mu A/cm^2$ and $1.242 \mu A/cm^2$, respectively. It was determined that the E_{cor} value increased with increasing chrome ratio and reached -473.991 mV, -450.056 mV and -347.157 mV respectively.

Conclusion:

Due to the increase in the chromium ratio in the coating layers, the amount of boride in the eutectic structure, which causes better mechanical and metallurgical properties, has increased. Accordingly, with the increase of Cr ratio in the coating layer, hardness values increased and wear rate values decreased. In addition, the corrosion resistance of the coatings increased with the increase of Cr ratio.



Krom içeriğinin $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) sert dolgu elektrotunda mikroyapı, aşınma ve korozyon davranışı üzerindeki etkisi

Engin Kocaman^{1*}, Bülent Kılınç², Şaduman Şen³, Uğur Şen³

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 67100 İncevez Zonguldak, Türkiye

²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Arifiye Meslek Yüksek Okulu, Kaynak Teknolojisi Programı, 54580, Arifiye, Sakarya, Türkiye

³Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54100, Esentepe Sakarya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) esaslı sert dolgu elektrotlarının çelik altlık üzerine kaplanması
- Çelik yüzeyinde oluşturulan kaplamaların mikroyapısal gelişimi
- Kaplamaların krom oranına bağlı sertlik, aşınma ve korozyon davranışı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.02.2020

Kabul: 12.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.689230

Anahtar Kelimeler:

Sertdolgu,
yüzey alaşımlama,
sertlik,
aşınma,
korozyon

ÖZET

Bu çalışmada, $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) bileşimine sahip örtülü elektrotlar üretilmiş ve AISI 1010 çeliği üzerine elektrik ark kaynak yöntemi kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Nihai mikroyapılarda in-situ olarak oluşan ötektik borür fazlarının varlığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, ötektik altı faz dağılımı gösteren bileşimlerde, başlıca $\alpha(Fe, Cr)$, tetragonal $(Fe, Cr)_2B$, ortorombik $(Fe, Cr)_2B$ ve eser miktarda $(Fe, Cr)_3(C,B)$ fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen karşılıklı aşınma testinde, kaplama tabakalarının sürtünme katsayısı değerleri artan yük ile birlikte azaldığı ve 0,844-0,65 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, sürtünme katsayısının değişimi krom oranından bağımsız olarak hareket ettiği gözlemlenmiştir. Aşınma oranının ise artan krom miktarı ile azaldığı buna karşın artan yük ile arttığı gözlemlenmiştir. Aşınma oranının, en düşük değeri 3N yükte $Fe_{13}Cr_3B_2$ bileşimine sahip elektrot için $2,32 \times 10^{-5}$ (mm^3/m); en yüksek değeri ise 9N yükte $Fe_{15}Cr_3B_2$ bileşimine sahip elektrot için $8,16 \times 10^{-5}$ (mm^3/m) olduğu tespit edilmiştir. $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) bileşimine sahip elektrotlar ile kaplanmış yüzey alaşım tabakalarına potansiyodinamik polarizasyon testi uygulanmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon testine göre korozyon direncinin artan krom miktarı ile arttığı görülmüştür. Korozyon testine göre, I_{kor} değerinin artan krom miktarına göre azalarak sırasıyla 2,166, 1,615 ve 1,242 $\mu A/cm^2$ olarak ölçülmüştür. E_{kor} değerinin ise artan krom miktarı ile arttığı ve sırasıyla -473,991, -450,056 ve -347,157 mV değerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Effect of chromium content on $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($X=3,4,5$) hardfacing electrode on microstructure, abrasion and corrosion behavior

H I G H L I G H T S

- Coating of $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x = 3,4,5$) based hardfacing electrodes on steel substrate
- Microstructural development of coatings formed on steel surface
- Hardness, wear and corrosion behavior of coatings depending on chromium ratio

Article Info

Research Article

Received: 14.02.2020

Accepted: 12.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.689230

Keywords:

Hardfacing,
surface alloying,
hardness,
wear,
corrosion

ABSTRACT

In this study, covered electrodes with $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) composition have been produced and coating was carried out on AISI 1010 steel by using electric arc welding method. It was observed that the presence of eutectic boride phases formed as in-situ in the final microstructures. In addition, in the compositions showing hypo-eutectic phase distribution, mainly consist of $\alpha(Fe-Cr)$, tetragonal $(Fe, Cr)_2B$, orthorhombic $(Fe, Cr)_2B$ and trace amount of $(Fe, Cr)_3(C,B)$ phases were determined. In the reciprocal wear test against alumina ball, it was determined that the friction coefficient values of the coating layers decreases with increasing load and changed between 0.844-0.65. However, it has been observed that the change of friction coefficient moves independently of the chromium ratio. It was observed that the wear rate decreased with increasing chromium ratio, despite that increased with increasing load. The lowest wear rate was found $2,32 \times 10^{-5}$ (mm^3/m) in 3N load for the electrode with the $Fe_{13}Cr_3B_2$ composition and the highest value was found to be $8,16 \times 10^{-5}$ (mm^3/m) for electrode with $Fe_{15}Cr_3B_2$ composition at 9N load. Potentiodynamic polarization test has been performed to the surface alloyed layers coated with electrodes with $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) composition. According to the potentiodynamic polarization test, it was observed that the corrosion resistance increases with increasing chromium content. According to corrosion test, the I_{cor} value decreased according to the increasing amount of chromium and was measured as 2.166 and 1.615 and 1.242 $\mu A/cm^2$, respectively. It was determined that the E_{cor} value increased with increasing chrome ratio and reached -473.991, -450.056 and -347.157 mV respectively.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: enginkocaman@beun.edu.tr, bkilinc@subu.edu.tr, sdmnsen@sakarya.edu.tr, ugunsen@sakarya.edu.tr / Tel: +90 372 291 1970

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzemelerin çevresiyle ilk etkileşimde bulunan noktaları yani yüzeyleri aşınmaya, korozyona ve darbelere maruz kalarak servis sürelerinin azalmasına neden olmaktadır. Böyle bir hasara uğrama potansiyeli taşıyan malzemenin bütün olarak aşınma dayanımının geliştirilmesi veya hasar sonrası değiştirilmesi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu sebeple malzemenin, yüzey özelliklerini geliştirecek başka bir malzeme ile kaplanması veya hasar sonrası tamir edilmesi parça ömrünün uzatılması ve ekonomik kayıpların azaltılması için günümüz endüstrisinde önem arz etmektedir [1-3]. Dünya’da tüketilen enerjinin yaklaşık %23’lük (119 EJ) kısmı maden, enerji üretimi ve taşımacılık gibi endüstrilerde kullanılan makine parçalarında oluşan aşınma ve sürtünme kayıplarından kaynaklanmaktadır [4]. Özellikle maden ve hafriyat gibi agresif ortamlarda çalışan makinalarda, triboloji kaynaklı kayıplar sebebiyle birçok parça, ya kullanılamaz hale gelip yenisi ile değiştirilmekte, ya da çeşitli tamirat işlemleri sebebiyle büyük ekonomik yükler oluşturmaktadır. Sadece maden endüstrisinde aşınma kaynaklı hasarların giderilmesi için 2 EJ enerji kaybı ortaya çıkmakta ve Dünya CO₂ salınımının %2,7’sine tekabül eden 970 milyon ton CO₂ salınımına neden olmaktadır. Maden endüstrisinde bu kayıpların maddi karşılığı ise 210 milyon Euro olarak hesap edilmektedir [5]. Tarım makinalarında ise aşınma kaynaklı revize edilen parça oranı %40 civarındadır [6]. Aşınma kaynaklı kayıplara karşı yüzeyin kaplanması vb. bir çözüm ile kısa vadede %20’lik, uzun dönemde ise %60’lık bir enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmektedir [7]. Öte yandan yaşanan kayıplar sadece aşınma ile kalmayıp korozyon hasarı da kullanılan endüstriyel malzemelerin kaybına neden olmaktadır. Dünya’daki endüstriyel ürünlerin yaklaşık %3,4’ü korozyon nedeni ile hasara uğramakta bunun ekonomik karşılığı ise 2,5 trilyon dolar gibi çok büyük bir rakama tekabül etmektedir. Kaplama vb. gibi bir yöntem ile korozyon hasarlarının %15-35 oranında engellenebileceği tahmin edilmektedir [8, 9]. Günümüzde polimerik malzemelerden seramik malzemelere kadar çok geniş bir skalada malzeme yüzey özellikleri kaplama ile geliştirilebilmektedir. Fakat 2017 yılı verilerine göre Dünya’da yaklaşık 1.7 milyar tonluk üretimi [10] ve özellikle korozyon ve aşınmanın olduğu agresif ortamlarda yüksek kullanım miktarı ile çelik malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ayrı bir öneme sahiptir. Çelik malzemelerin kaplanmasında çeşitli yöntemler kullanılabilir. Kaplama yönteminin seçimi başlıca; kaplamadan beklenen özellikler, geometri, kaplama kalınlığı, ekonomi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak yapılır [11]. Kaplamadan beklenen özelliklere göre değişimle birlikte metal malzemelerin yüzeyleri termal sprey, koruyucu kaplama ve kaynak gibi çeşitli yöntemler ile kaplanmaktadır. Fakat bu yöntemler içerisinde kaynak metodu kullanılarak gerçekleştirilen kaplamalar, diğer yöntemlere göre kaplama kalınlığının fazla olması, yüzeyle yaptığı metalürjik bağların güçlü olması ve ekonomik olması gibi avantajlar sebebiyle daha fazla tercih edilmektedir [12, 13]. Sert dolgu kaplamalar olarak da bilinen bu yöntem için; örtülü elektrot ark kaynağı [14-16],

toz altı ark kaynağı [17], gaz tungsten ark kaynağı [18, 19], plazma transfer ark kaynağı [20], özlü tel [21] ve lazer biriktirme [22] gibi çeşitli kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin içinde yüksek biriktirme oranı, mobilite ve düşük maliyet gibi faktörlerden dolayı örtülü elektrot ark kaynak yöntemi önemli bir yere sahiptir. Sert dolgu kaplamalarda yüzeyde oluşturduğunuz yeni malzemenin bileşimi ve yapısı elde edilen yeni yüzeyin özelliklerini belirleyen en önemli faktördür. Günümüzde Fe, Co ve Ni esaslı gibi farklı bileşimlerde kaplama alaşımları bulunmaktadır. Bu alaşımlar içerisinde demir-krom alaşımları genel yapı çeliklerinin yüzey özelliklerini geliştirmede en çok tercih edilen alaşım grubudur. Bileşime bağlı olarak Fe-Cr grubu sert dolgu alaşımları başlıca ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü yapılar içermektedir [23, 24]. Sert dolgu sonrası bileşimdeki karbon oranına bağlı olarak kaplama yapısında MC, M₂C, M₃C, M₇C₃ ve M₂₃C₆ tipi sert karbürler görülebilir [23-27]. Endüstriyel uygulamalarda nihai kaplama yapısında (Fe-Cr)-karbür oluşumu ile yüzey özellikleri geliştirilen birçok kaplama alaşımına rastlamak mümkündür. Kromun aynı zamanda güçlü bir borür yapıcı element olmasından dolayı Fe-Cr sistemine az miktarda bor ilavesi yapıda başlıca MB, M₂B gibi sert fazların oluşumuna neden olmaktadır [28-30]. Kaplama yapısında blok faz olarak adlandırılan bu tip karbür ve borür miktarının, morfolojisi, boyutu ve dağılımı malzemenin aşınmaya direnci ile doğrudan ilgilidir. Aynı zamanda bu yapıların malzemenin korozyon direncine katkısı olduğu da bilinmektedir. Günümüzde hem imalatçılar hem de araştırmacılar özel bileşimlere sahip kaynak elektrotlarının geliştirilmesi için çaba sarf etmektedirler.

Endüstride Fe-Cr-C sistemine mensup örtülü elektrotlar kullanılmakla birlikte artan karbon oranı yüzeyde çatlama ve krom karbür çökmesi gibi hatalara neden olmaktadır. Bu sebeple hala Fe-Cr-C bileşimine sahip örtülü elektrotlara alternatif elektrot arayışı devam etmektedir. Fe-Cr esaslı sert dolgu elektrotları çok popüler olmasına rağmen denenmemiş ve keşfedilmeyi bekleyen birçok bileşim grubuna sahiptir. Bu bileşimlerden biri de Fe_(18-x)Cr_xB₂ (x=3,4,5) kimyasal yapısına sahip elektrotlar ile gerçekleştirilen kaplamalardır. Bu çalışmada çeşitli Fe-Cr-B bileşimlerinde örtülü elektrotlar geliştirilmiş ve elektrik ark kaynağı kullanılarak düşük karbonlu çelik üzerine kaplama yapılmıştır. Kaplama sonrası yüzeyde oluşan tabakaların mikroyapı, faz analizleri, sertlik ve aşınma özellikleri ile korozyon dirençleri incelenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada Tablo 1’de bileşimleri verilen üç farklı örtülü elektrot hazırlanmıştır. Örtülü elektrotların çekirdek kısmında Tablo 2’de kimyasal bileşimi verilen H08A düşük karbonlu çelik, örtü kısmında ferro alaşımlar (Aveks Ltd. Şti.) ve ARMCO Co. firmasından temin edilen demir tozu kullanılmıştır. Elektrotun kaynak süresince kararlı bir şekilde çalışması ve görevini yerine getirebilmesi için örtü içeriğine ağırlıkça %5 oranında flaks ilavesi yapılmıştır.

Flaks malzemesi olarak, Rutile (TiO₂), kalsiyum karbonat (CaCO₃), kalsiyum florid (CaF₂), silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), potasyum titanat ve potasyum-aljinat kullanılmıştır. Örtü tozlarının çekirdek üzerine tutunabilmesi için ağırlıkça %20 oranında potasyum silikat (K₂O.SiO₂) kullanılmıştır.

Tablo 1. Elektrotların bileşimleri (%at.)
(Composition electrodes (at.%))

Bileşim	Cr	B	Fe
Fe ₁₃ Cr ₅ B ₂	25	10	Kal.
Fe ₁₄ Cr ₄ B ₂	20	10	Kal.
Fe ₁₅ Cr ₃ B ₂	15	10	Kal.

Örtü bileşiminin hazırlanması için ilk olarak kayaç formunda olan ferro alaşımlar öğütülmüş ve 100 µm altı elekten geçirilmiştir. Eleme sonrası ferro alaşımlara ve demir tozuna ait tane boyut dağılımı Şekil 1’de verilmiştir.

Sonrasında istenilen oranlara göre tartılan tozlar önce kuru sonra bağlayıcı ile birleştirilerek yaş olarak karıştırılmıştır. Viskoz bulamaç haline dönüşen örtü çamuru tartılarak üzerinde örtü çapına (5,5 mm) göre ayarlanan kanalların bulunduğu kalıba dökülmüş ve içerisinden çekirdek metali

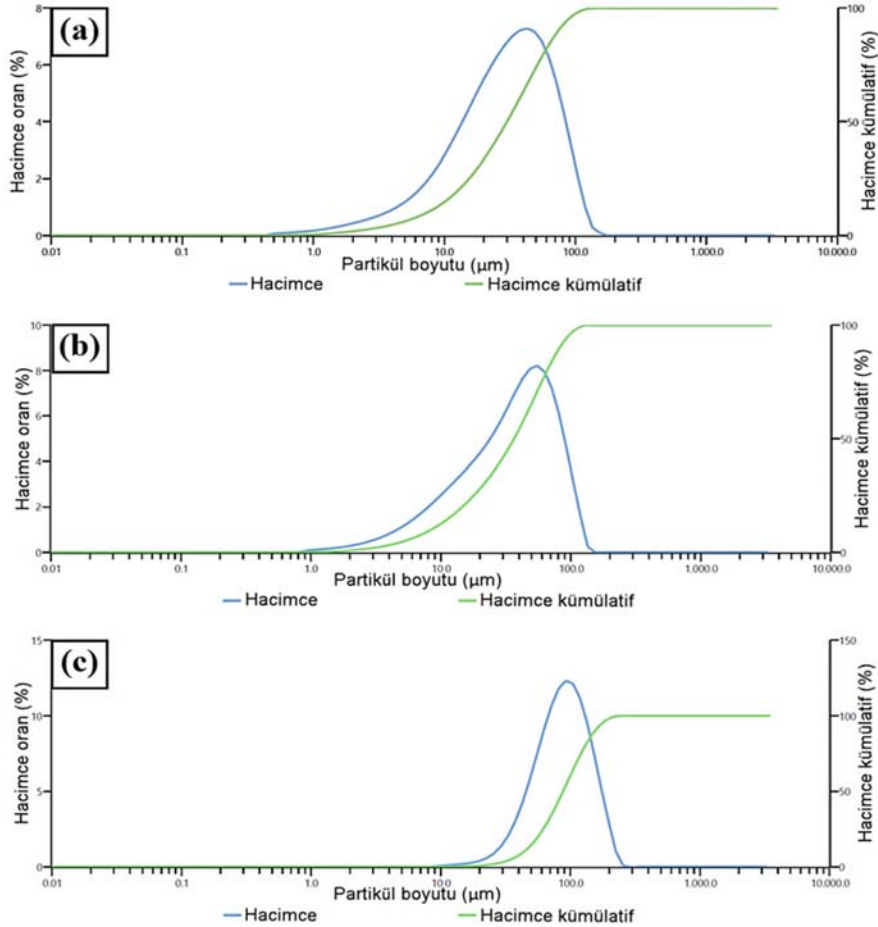
(2,5 mm) geçirilmiştir. Akabinde açık atmosferde 24 saat ve sonrasında 350°C’de argon atmosferinde 2,5 saat süre ile fırınlanmış ve elektrotlar kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir. Elektrot üretim sürecinin şematik görünümü Şekil 2’de verilmiştir.

Sert dolgu işlemi örtülü elektrot ark kaynağı kullanılarak Tablo 3’te spektral analiz sonucu verilen 70*30*8 mm ölçülerindeki AISI 1010 çeliği üzerine gerçekleştirilmiştir. Kaplama öncesi altlık malzeme yüzeyi aseton ile yıkanmıştır.

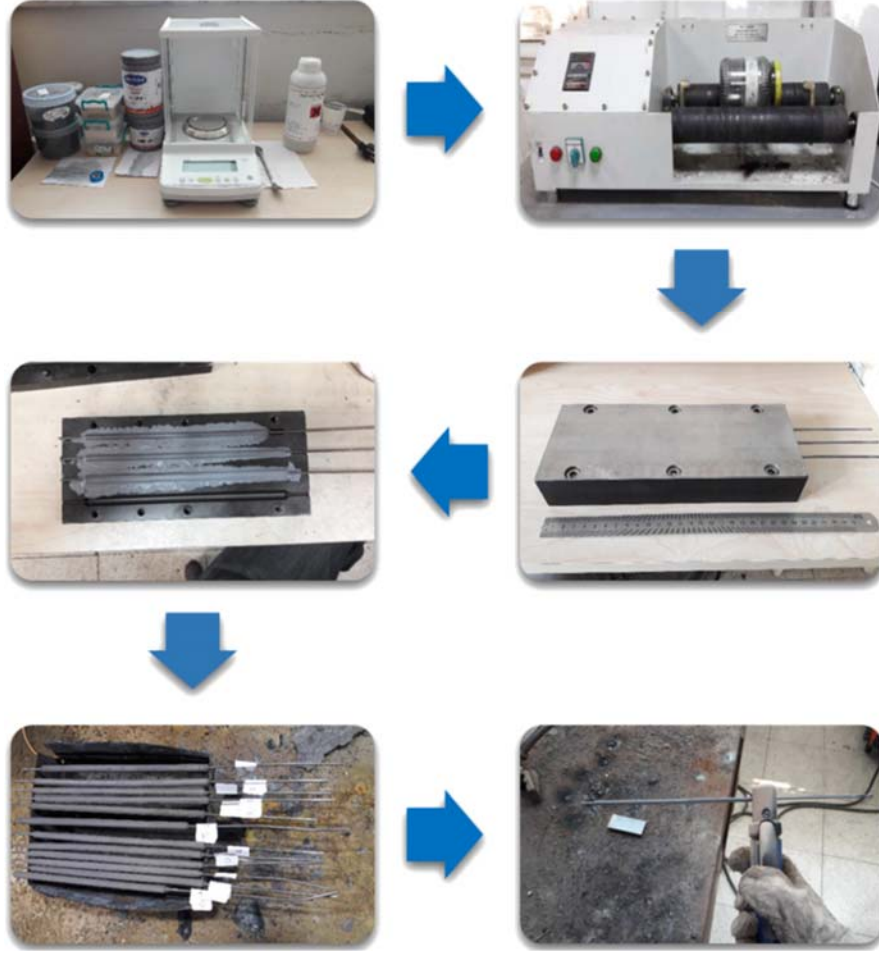
Kaplama işlemi Magmaweld RD 650 E elektrik ark kaynak makinası ile 0,3 m/dk kaynak hızında, 125A akım değerinde ve 25V gerilim ile doğru akım ters kutup kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama sonucu metal parçada oluşan ısı girdisi (IG) Eş. 1’de verilen formül uyarınca hesaplanmıştır.

$$IG = \frac{E \cdot I \cdot 60 \cdot f}{V \cdot 1000} \quad (1)$$

Formülde E kaynak gerilimi (Volt), I kaynak akımı (Amper), V kaynak hızını (m/dak) ve f ısı iletim verimi olup ark



Şekil 1. Örtü elektrot bileşiminde kullanılan ferro tozların tane boyut analizi (a) ferro-krom (b) ferro-bor ve (c) demir tozu
(Particle size analysis of ferro powders used in covered electrode composition (a) ferro-chrome (b) ferro-boron and (c) iron powder)



Şekil 2. Elektrot üretim süreci görünümü (view of covered electrode production process)

Tablo 2. Çekirdek metal ve elektrot örtü bileşimlerinde kullanılan tozların kimyasal kompozisyonları
(Chemical compositions of powders used in core metal and electrode cover compositions)

	C	Cr	B	Mn	Si	P	S	Al	Fe
H08A	<0,1	0,064	-	0,35-0,40	0,10	<0,02	<0,02	-	Kal.
Ferro-Cr	0,038	73,06	-		0,19	0,023	0,0057	-	26,683
Ferro -B	0,312	-	18,58		0,39	0,029	0,003	0,084	80,602

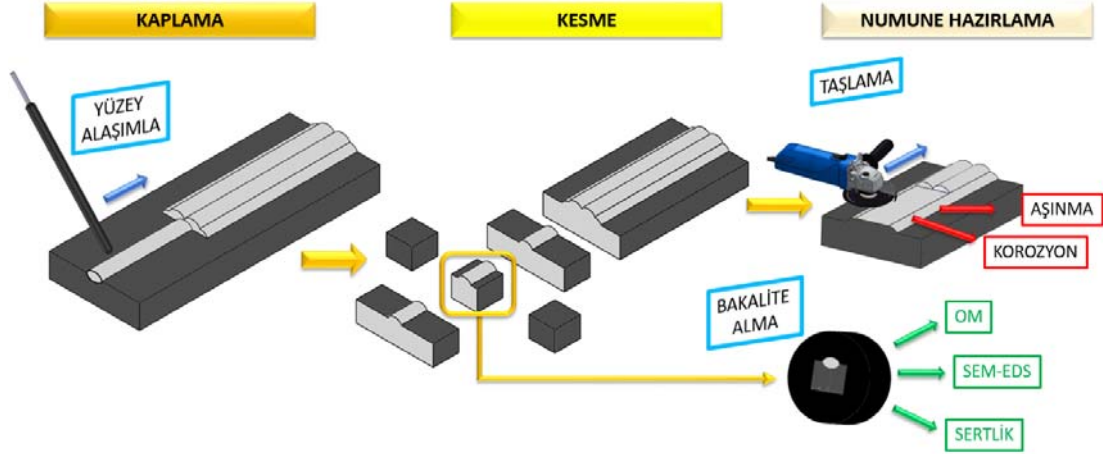
kaynağı için bu değer 0,8 olarak alınmıştır. Eş. 1'e göre gerçekleştirilen kaplamalar için ısı girdisi 500 kJ/m olarak hesaplanmıştır.

Sert dolgu kaplama işleminden sonra Şekil 3'te şematik olarak gösterilen numune hazırlama aşamaları tatbik edilmiştir. Numunelerin hazırlanmasından sonra her bir yüzey 1200 kum SiC kâğıt ile zımparalanmış ve 0,3 µm alümina pasta ile parlatılmıştır. Makroyapı incelemeleri Leica M400 model stereo mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Akabinde mikroyapı incelemesi gerçekleştirilecek numunelerin yüzeyleri %3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM/EDS) (JEOL-JSM-6060), faz analizleri XRD kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 1010 altlık malzeme spektral analiz sonucu
(AISI 1010 substrate material spectral analysis results used in experimental studies)

C	Si	Cr	S	P	Mn	Fe
0,09	0,001	0,064	0,022	0,026	0,4	Kal.

Şekil 3'de gösterildiği gibi kaplama bölgesinden çıkarılıp hazırlanan numuneye ASTM G133 standardına uygun olarak TRIBOtechnic-TRIBOtester karşılıklı aşınma cihazı ile oda sıcaklığında ve %30 (+/-3) nem koşullarında aşınma testi uygulanmıştır. Aşındırıcı bilye olarak 10 mm çapında Al₂O₃ (1850 HV_{0.1}) seçilmiş olup, aşınma mesafesi 200 metre, 30mm/sn⁻¹ sabit hız ve 3, 6, 9 N olmak üzere üç farklı aşınma yükü test parametresi olarak belirlenmiştir. Aşınma testi



Şekil 3. Kaplama işlemi ve numune hazırlama deneysel akış şeması (Coating process and sample preparation experimental flow chart)

sonrası 2D profilometre ile iz alanları ölçümü yapılmış ve Eş. 2 uyarınca aşınma hacmi, Eş. 3 kullanılarak sürtünme katsayısı (SK) ve Eş. 4'e göre aşınma oranı (AO) hesaplanmıştır.

$$V = A \cdot l \quad (2)$$

Formülde L iz uzunluğu (mm), A iz alanı (mm²) ve V iz hacmidir (mm³).

$$SK = \frac{F_s}{F_N} \quad (3)$$

Eş. 2'de SK sürtünme katsayısı, FS yanal yük (N), FN normal yük olarak tanımlanmıştır.

$$AO = V/S \quad (4)$$

AO aşınma oranı formülünde (Eş. 4) V aşınma izi hacmi S kayma mesafesini temsil etmektedir. Aşınma testi sonrasında aşınma izlerine gelmeyecek şekilde yüzeyin BMS-DIGIROCK-RB model cihaz kullanılarak Rocwell skalasında sertlikleri ölçülmüştür. Ayrıca Şekil 3'te gösterildiği gibi dikiş kesitinden Vickers (Hv_{0,2}) sertlik ölçme yöntemi kullanılarak FutureTech FM700 mikro sertlik cihazı ile 0,5 mm aralıklarla sıralı sertlikleri alınmıştır.

Potansiyodinamik korozyon testi ASTM G59-97 standartlarına uygun olarak Gamry 300 elektrokimyasal test ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon ortamı olarak 0,5M NaCl çözeltisi, tarama hızı 1 mV/sn ve -0,5, +1,5 mV potansiyel aralığında standart kalomel referans elektrot ve grafit karşıt elektrot kullanılarak yapılmıştır. Polarizasyon eğrilerinden faydalanarak I_{kor} (korozyon akımı) ve E_{kor} (korozyon potansiyeli) belirlenmiştir.

Korozyon hızı (KH) Eş. 5 uyarınca, korozyon akımı Eş. 6'ya göre hesaplanmıştır.

$$KH = \frac{I_{cor} K EA}{dA} \quad (5)$$

Formülde K sabit, EA= eşdeğer ağırlık (gram/ekivalent), d yoğunluk (gr/cm³) A numune alanını (cm²) temsil etmektedir.

$$i_{cor} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3Rp(\beta_a + \beta_c)} \quad (6)$$

β_a anodik Beta Tafel sabiti (volts/onyıl) ve β_c katodik Beta Tafel sabitidir (volt/onyıl).

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Mikroyapısal İncelemeler (Microstructural Investigations)

AISI 1010 çelik altlık yüzeyine tek dikiş formunda kaplanmış Fe_(18-x)Cr_xB₂ (x=3,4,5) esaslı sert yüzey alaşımlarının makroyapı görüntüleri Şekil 4a, Şekil 4b, Şekil 4c'de verilmiştir.

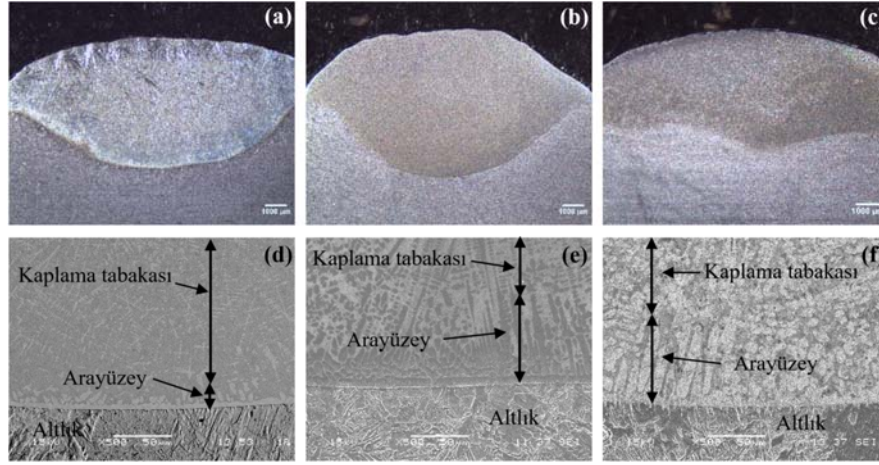
Makroyapı çalışmalarında, altlık üzerinde ergimiş bölge olarak görülen sert kaplanmış tabaka kalınlıklarının yaklaşık 5-6 mm arasında olduğu ve altlık ile iyi bir bağlanma sergilediği görülmektedir. Oldukça kalın bu kaplama tabakalarının, porozitesiz ve düzgün bir yüzey topoğrafyasına sahip olduğu belirlenmiştir. AISI 1010 çelik altlık yüzeyine kaplanmış Fe_(18-x)Cr_xB₂ (x=3,4,5) esaslı sert yüzey alaşımlarının altlık-kaplama arayüzey SEM görüntüleri Şekil 4d, Şekil 4e, Şekil 4f'de verilmiştir. İncelenen mikroyapıların, altlık, arayüzey ve kaplama olarak üç farklı katmandan oluştuğu görülmektedir. Bu katmanların boyutsal ve metalürjik özellikleri katılma sırasında oluşan faktörlere bağlıdır. Altlık-kaplama arayüzeyinin geçiş kısmında dentritik katılmanın hakim olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığındaki AISI 1010 çelik altlık üzerine gerçekleştirilen kaplama sonrası, ara yüzeyde elektrot bileşimi ve altlık bileşiminden oluşan ve elektrot bileşimine göre daha fazla demir içeren seyreltik bir yapı oluşmaktadır. Böyle bir yapıda katılma aralığının genişlemesi beklenmektedir. Genişleyen katılma aralığı yapısal aşırı soğuma ve mikro segregasyon etkisi altında dentritik yapı oluşumunu desteklemektedir.

Bu sebeple katılaşmanın altlık malzemeden yüzeye doğru dentritik olması beklenmektedir ve bu durum Şekil 4d, Şekil 4e, Şekil f'de görülmektedir. Çelik yüzeyinde oluşturulan $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) esaslı alaşımların, SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 5'te verilmektedir. Şekil 5a'da verilen $Fe_{13}Cr_5B_2$ elektrot ile üretilen kaplama tabakasının mikroyapıları incelendiğinde, ötektik öncesi primer ferrit (α -(Fe,Cr)) fazıyla birlikte ötektik (α -(Fe,Cr)+(Cr,Fe)₂B) fazlarının/yapılarının birlikte bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 6'da izotermal üçlü Fe-Cr-B faz diyagramında yer alan $Fe_{13}Cr_5B_2$ bileşiminin bulunduğu nokta ele alındığında [31], alaşım öncelikle belirlenen sıcaklık değeri için ($1200^\circ C$) (Cr,Fe)₂B fazını doğrudan α -(Fe,Cr) ile birlikte oluşturduğu görülmektedir. Oluşan ferrit primer ferrit olup, dendritik yapı şeklinde gerçekleşmektedir. Soğumaya bağlı olarak ötektik içinde ferrit adacıklarının etrafında sürekli yapı olarak α -(Fe,Cr)+(Cr,Fe)₂B fazlarının oluştuğu ötektik yapı görülmektedir. Yapılan EDS analizleri (Şekil 7) ve elementel dağılım haritaları da (Şekil 8) bu fikri destekler niteliktedir. Bu analizler sonucunda, primer ferrit olarak belirtilen fazda bor piklerinin olmadığı, ancak ötektik yapıdan alınan EDS analizlerinde ise bor piklerin bulunduğu görülmektedir.

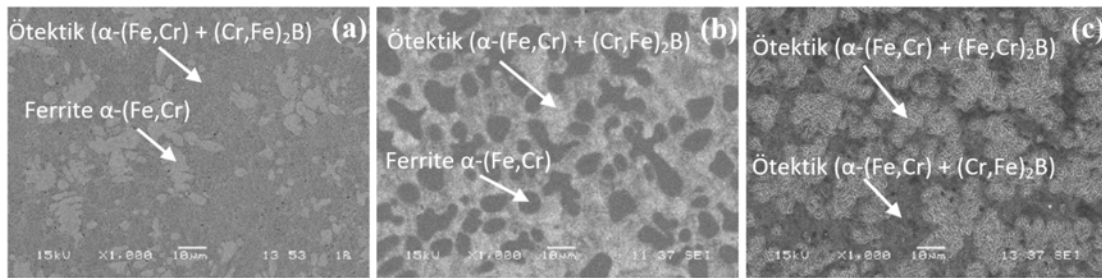
Ayrıca, EDS analizleri sonucunda, ötektik yapıda bulunan Cr içeriğinin primer ferrit bölgesinde bulunan Cr içeriğinden

daha fazla olduğu da tespit edilmektedir. Şekil 7'de EDS ve Şekil 8'de elementel dağılım haritalarında görüldüğü üzere kaplama tabakasında yer alan matris fazı (primer α -Fe) içerisinde, Si elementi mevcuttur. Sorour ve ark. yaptıkları çalışmada, Si, Mo ve Ni gibi elementlerin ilavesinin Fe-Cr-B esaslı alaşımlara ait borürler içerisinde çözünemeyeceğini, fakat matrise difüze olabileceğini rapor etmişlerdir [32]. Bu açıklamalara uygun olarak yaptığımız çalışmada, Si elementi borürler içerisinde çözünmemiş α -(Fe,Cr) matrise difüze olmuştur.

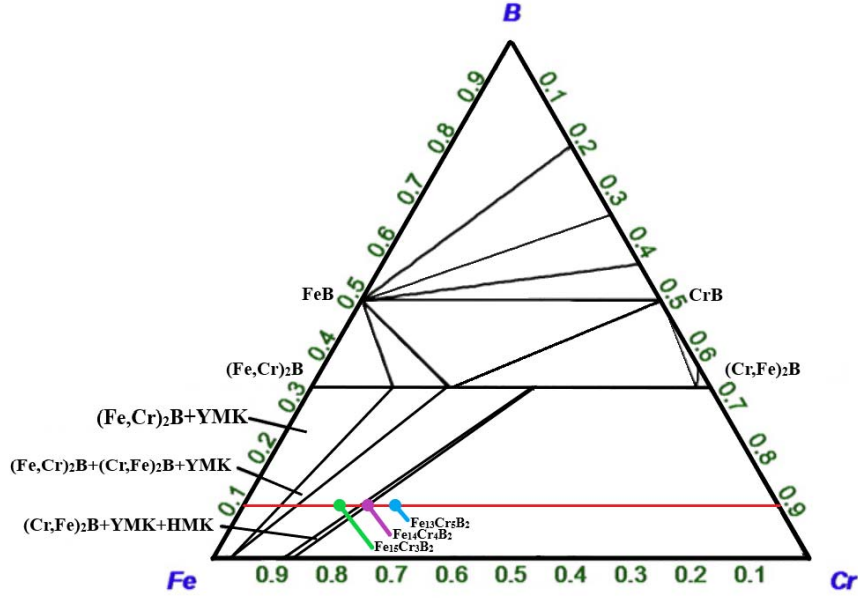
Şekil 5b'de $Fe_{14}Cr_4B_2$ elektrot ile üretilen kaplama tabakasının mikroyapısı verilmektedir. Ötektik altı bileşime sahip yapıda, ötektik öncesi primer ferrit (α -(Fe,Cr)) fazıyla birlikte ötektik (α -(Fe,Cr)+(Cr,Fe)₂B) fazlarının/yapılarının birlikte olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6'da Fe-Cr-B üçlü denge diyagramında yer alan $Fe_{14}Cr_4B_2$ bileşiminin bulunduğu nokta ele alındığında [31], ilk bileşimden farklı olarak kaplamanın katılaşması ile öncelikle γ -(Fe,Cr) ve (Cr,Fe)₂B fazları oluşmuş, akabinde primer γ -(Fe,Cr) yapısı küreselliğini koruyarak α -(Fe,Cr) yapısına dönüşmüştür. Benzer şekilde ötektik sıcaklığına gelindiğinde oluşan ötektik yapı içerisinde yer alan γ -(Fe,Cr) fazı da α -(Fe,Cr) fazına dönüşmektedir.



Şekil 4. (a) $Fe_{13}Cr_5B_2$ (b) $Fe_{14}Cr_4B_2$ ve (c) $Fe_{15}Cr_3B_2$ bileşimine sahip kaplamaların kesiti makro görünüşleri (d) $Fe_{13}Cr_5B_2$ (e) $Fe_{14}Cr_4B_2$ ve (f) $Fe_{15}Cr_3B_2$ arayüzey-kaplama görüntüsü
(Cross-sectional macro image of coatings with composition of (a) $Fe_{13}Cr_5B_2$ (b) $Fe_{14}Cr_4B_2$ and (c) $Fe_{15}Cr_3B_2$) Interface-coating image of (d) $Fe_{13}Cr_5B_2$ (e) $Fe_{14}Cr_4B_2$ and (f) $Fe_{15}Cr_3B_2$)

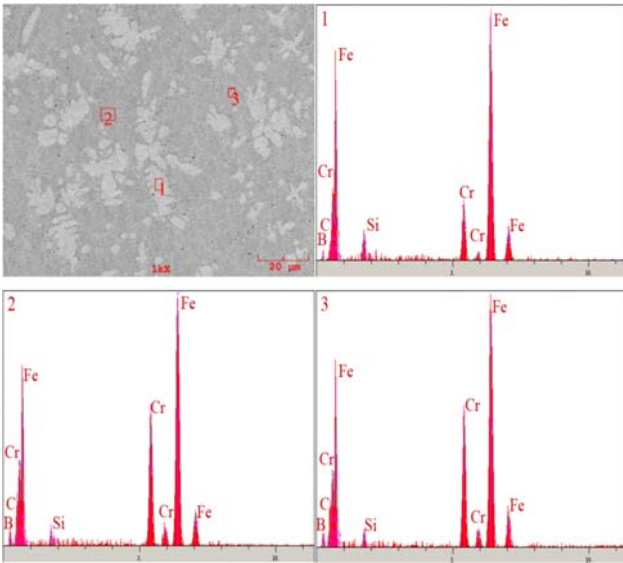


Şekil 5. (a) $Fe_{13}Cr_5B_2$ (b) $Fe_{14}Cr_4B_2$ ve (c) $Fe_{15}Cr_3B_2$ bileşimine içeren kaplama tabakalarının SEM mikroyapı görüntüleri
(SEM microstructure images of coating layers containing the composition of (a) $Fe_{13}Cr_5B_2$ (b) $Fe_{14}Cr_4B_2$ and (c) $Fe_{15}Cr_3B_2$)



Şekil 6. İzotermal üçlü Fe-Cr-B denge diyagramının 1100°C'deki görünümü [26]
(View of the isothermal triple Fe-Cr-B balance diagram at 1100°C.)

Soğumaya bağlı olarak oda sıcaklığında ötektik içerisinde küresel ferrit adacıklarının etrafında α -(Fe,Cr)+(Cr,Fe)₂B fazlarının oluştuğu ötektik yapı görülmektedir. Yapılan SEM ve EDS analizleri sonucunda ferrit olarak tanımlanan bölgelerde Fe, Cr ve Si elementlerinin varlığı tespit edilmektedir. Ancak ötektik bölgede belirlenen Cr içeriğinin daha fazla olduğu, buna bağlı olarak Fe ve Si içeriğinin düştüğü de görülmektedir. Ayrıca ötektik bölgede B elementinin varlığı da tespit edilmiştir. Yine yukarıdaki açıklamaya uygun olarak Si elementi borürler içerisinde çözünmemiş α -(Fe,Cr) matrisine difüze olmuştur.



Şekil 7. Fe₁₃Cr₅B₂ kaplama tabakasının SEM görüntüsü ve EDS analizleri

(Fe₁₃Cr₅B₂ coating layer SEM image and EDS analysis)

Şekil 5c'de Fe₁₅Cr₃B₂ elektrot ile üretilen kaplama tabakasının mikroyapısı verilmektedir. Fe-Cr, Fe-B ve Cr-B denge diyagramları dikkate alındığında, ötektik bölgede bulunan alaşımın katılaşma sıcaklığında oluşacak ilk fazlar bileşime bağlı olarak α -(Fe,Cr) ve (Cr,Fe)₂B fazlarıdır ve katılaşma yaklaşık ~1500°C sıcaklığında başlamaktadır. Bu esnada yapıda γ -(Fe,Cr)+(Cr,Fe)₂B fazları bulunmaktadır. Fe-Cr-B faz diyagramının Fe₁₅Cr₃B₂ bileşim noktası gözüne alındığında, katılaşmanın γ -(Fe,Cr) ve (Cr,Fe)₂B fazları arasında kalan hat boyunca devam etmesi beklenmektedir. Soğumanın Fe₂B yönünde devam etmesi ile yapıda bulunan (Cr,Fe)₂B fazı demirce zengin (Fe,Cr)₂B fazına dönüşmesi beklenmektedir. Sıcaklığın düşmesi ile birlikte yapıda bulunan γ -(Fe,Cr) fazı tekrar α -(Fe,Cr) fazına dönüşerek α -(Fe,Cr)+(Cr,Fe)₂B ötektik fazını oluşturmuştur. Bu ötektik yapı Şekil 5c'de görülmektedir ve birincil ötektik olarak ifade edilebilir. Ancak hızlı katılaşma ve dengesiz soğuma şartları sebebiyle nihai yapıda hala kromca zengin (Cr,Fe)₂B fazının varlığı görülmektedir. Böylece katılaşmanın tamamlanması ile nihai yapı α -(Fe,Cr)+(Cr,Fe)₂B ve α -(Fe,Cr)+(Fe,Cr)₂B olmak üzere iki farklı ötektik yapıdan oluşmaktadır.

Kaplama tabakalarına ait mikroyapıların karşılaştırılması sonucunda, krom oranının artmasına bağlı olarak, sert yüzey tabakasında daha iyi mekanik ve metalurjik özellikler gösteren ötektik yapı içerisinde bulunan borür miktarının da arttığı görülmektedir. Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda, %15Cr içeriğine sahip kaplamanın mikroyapısının, birincil ötektik (α -(Fe,Cr)+ortorombik (Cr,Fe)₂B) yapısının, ikincil ötektik (α -(Fe,Cr)+tetragonal (Fe,Cr)₂B) yapısı ile çevrelendiği belirlenmiştir. Buna karşılık, %20Cr ile %25Cr içeriğine sahip numunelerde, birincil α -(Fe,Cr) yapısının, Cr açısından zengin ortorombik

(Cr,Fe)₂B tipi borür ötektik (α -(Fe,Cr)+ortorombik (Cr,Fe)₂B) yapısı ile çevrelediği görülmektedir.

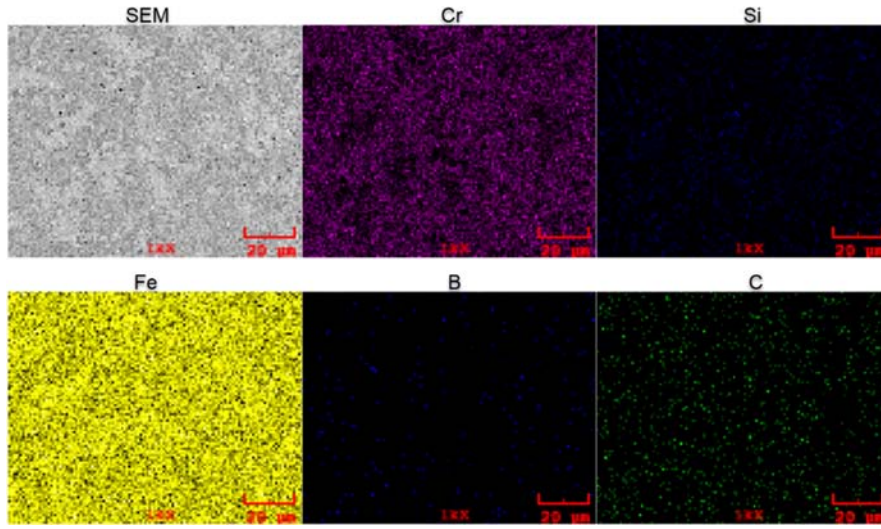
Lentz ve ark. yapmış oldukları bir çalışmada, farklı Cr oranlarına sahip Fe-Cr-B alaşımları üretmişler ve Cr içeriğinin mikroyapıya ve dolayısıyla mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Atomik olarak 0 ile 10 Cr içeriğine sahip numunelerin, tetragonal M₂B fazına sahip yapılar içerdiğini; ancak Cr içeriğinin daha da artması ile tetragonal M₂B fazının 15 Cr örneğindeki gibi ortorombik M₂B tipi bir faza geçişine neden olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak %14,7 atomdan daha yüksek bir Cr içeriğinde, M₂B fazı, tetragonalden ortorombik yapıya dönüştüğünü tespit etmişlerdir [33].

Şekil 9'da verilen X-ışınları difraksiyon analizleri sistemin, α -(Fe,Cr)+orth.(Cr, Fe)₂B fazlarının yanı sıra tetr.(Cr, Fe)₂B

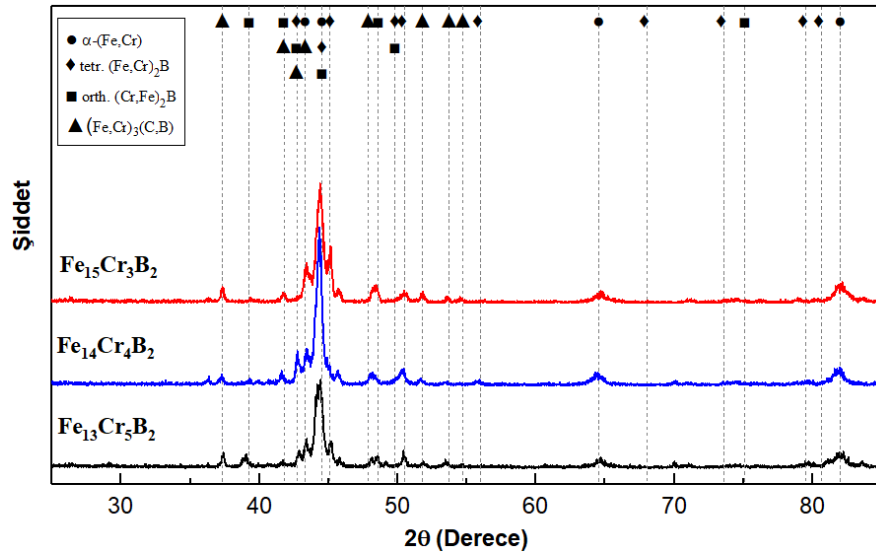
ve (Fe,Cr)₃(C,B) fazları içerdiğini göstermektedir. Çalışmamızda kullanılan elektrot içerisinde Cr oranının atomik olarak %15-%25 civarında olması sebebiyle kaplama tabakasında bulunan (Cr,Fe)₂B fazının ortorombik yapıda olması beklenmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere sistem primer ferrit (α -(Fe,Cr)) fazıyla birlikte ötektik morfolojiye sahip α -(Fe,Cr)+orth.(Cr,Fe)₂B yapısında olduğu görülmekte olup; Lentz ve arkadaşlarının çalışmalarıyla da benzerlik göstermektedir. Ancak; sistem ergime ve hızlı katılaşma şartları sebebiyle denge diyagramında olması gereken fazların yanı sıra az da olsa tetr.(Cr, Fe)₂B ve (Fe,Cr)₃(C,B) fazlarını da içermektedir.

3.2 Aşınma ve Sertlik (Wear and Hardness)

Fe-Cr-B esaslı sert yüzey alaşımlanmış kaplamaların sertlikleri, gerekli yüzey hazırlama işlemlerinin ardından 5

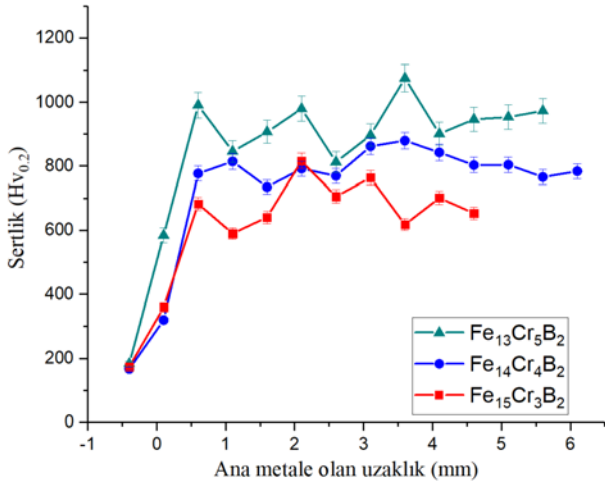


Şekil 8. Fe₁₃Cr₅B₂ kaplama tabakasının elemental dağılım haritası (Elemental distribution map of the Fe₁₃Cr₅B₂ coating layer)



Şekil 9. Fe_(18-x)Cr_xB₂ (x=3,4,5) esaslı yüzey kaplamaların x-ışını difraksiyon paterni (X-ray diffraction pattern of Fe_(18-x)Cr_xB₂ (x=3,4,5) based surface coatings)

mm aralıkla Rockwell sertlik ölçme yöntemi ile ölçülmüştür. Ayrıca dikiş kesitinin altlık malzemeden başlayarak yüzeye kadar 0,5 mm aralıklarla Vickers ($HV_{0,2}$) metodu ile sıralı sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik test sonuçları Şekil 10'da verilmektedir. Ölçülen sıralı sertlik sonuçlarına göre en yüksek sertliğin $Fe_{13}Cr_5B_2$ bileşimine sahip elektrot ile gerçekleştirilen kaplama ile elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte elektrot örtü bileşimindeki kromun azalması ile birlikte sertliğin azaldığı anlaşılmaktadır. Kromun oluşturduğu fazların sertliklerinin yüksek olması aynı zamanda matriste dağılan kromun, matrisin sertliğini de artırması ile açıklamaktadır. Alınan mikro sertlik sonuçlarında kısmi dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmaların sebebi Mikroyapı içerisinde bulunan sert fazların küçük olmasından ileri gelmektedir. Bu sebeple bu tip küçük ve kompozit mikroyapılara sahip yüzeylerin makro sertliklerinin ölçülmesi, yüzeyin genel sertliğini hakkında fikir vermesi açısından daha anlamlı olabilmektedir. Ölçüm sonrası elde edilen değerler $Fe_{13}Cr_5B_2$ için 67,5 (+/-0,5), $Fe_{14}Cr_4B_2$ için 65,3 (+/-0,3) ve $Fe_{15}Cr_3B_2$ bileşimine sahip kaplama için 65 (+/-0,4) HRC olarak bulunmuştur. AISI 1010 altlık malzemenin Rockwell B skalasında ölçülen sertlik değeri 63 HRB'dir. Bu sonuçların literatürde yapılan benzer sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir [32, 34-36]. Gerçekleştirilen Fe-Cr-B esaslı sert yüzey alaşımlama işlemi ile malzemelerin yüzey sertlik değerleri büyük oranda arttığı söylenebilir. Ayrıca bütün yüzey boyunca ölçülen makro sertlik değerlerinin düşük standart sapma göstermesi, kaplama özelliklerinin bütün yüzey boyunca homojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır.



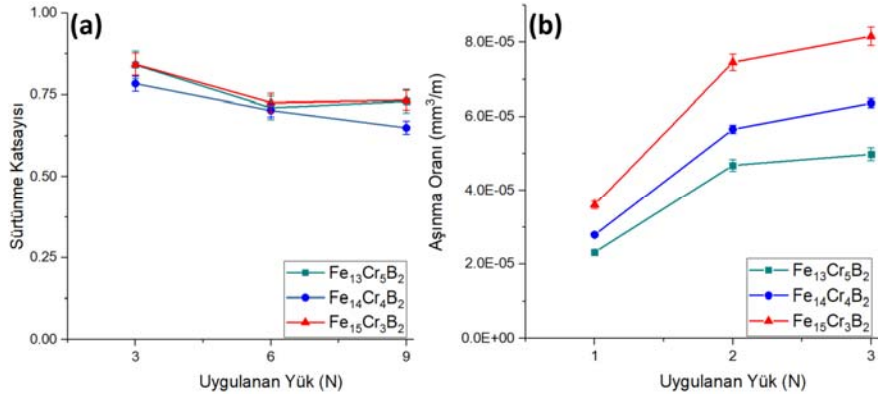
Şekil 10. $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) esaslı kaplamaların ana metalden yüzeye kadar kesitten alınan sıralı sertlikleri (Cross-sectional sequential hardness of $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) coatings from base metal until surface)

Şekil 11a'da Fe-Cr-B esaslı sert yüzey alaşımlanmış kaplamaların alümina (Al_2O_3) bilyeye karşı yapılan aşınma deneyleri neticesinde elde edilen sürtünme katsayısı değerlerini göstermektedir. Şekilden, alaşımların kompozisyonuna ve aşınma esnasında uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerinin 0,65-0,844 arasında

değiştiği görülmektedir. Özel ve arkadaşları Fe-Cr-B-C yüzey alaşımını çelik üzerine çalışmış olup; mevcut çalışmaya uygun olarak 0,5 ve 0,75 arasında sürtünme katsayısı değerleri elde etmişlerdir [37]. Şekil 11a incelendiğinde, tüm bileşimler için aşınma yükünün artması ile sürtünme katsayısı değerlerinin kısmi olarak azaldığı tespit edilmiştir. Yük arttığında, sürtünmeye bağlı oluşan sıcaklığın etkisiyle aşınma ürünlerinin oksidasyonu sonucunda kısmi yağlayıcı etki görülebilir.

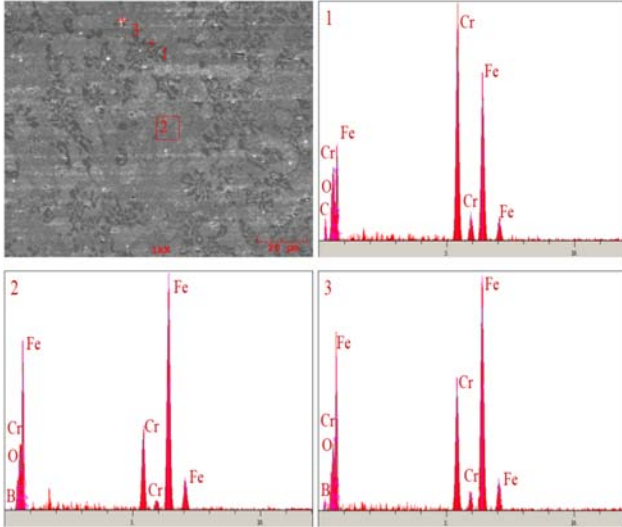
Şekil 12'de görülen, aşınma yüzeyinin SEM mikroyapısı ve EDS analizleri sonucunda tespit edilen oksitler, bu düşüncüyü desteklemektedir. Ayrıca $Fe_{13}Cr_5B_2$ ve $Fe_{15}Cr_3B_2$ alaşımları için 9N yük altındaki sürtünme katsayılarında bir miktar artış gözlemlenmektedir. Uygulanan yükteki artış mikroyapıdaki daha yumuşak olan matris α -fazının artışına bağlı olarak yapışmaya neden olması ve en yüksek yük değerlerinde (9N) $Fe_{13}Cr_5B_2$ ve $Fe_{15}Cr_3B_2$ bileşimleri için sürtünme katsayılarında küçük bir artış göstermesi mümkündür. Şekil 11b'de Fe-Cr-B esaslı sert yüzey aşım tabakasına ait aşınma oranlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde, Archard eşitliğinde [38] gösterildiği gibi uygulanan yük değerinin artışı ile aşınma hızı değerinin arttığı görülmekte olup; ilave edilen Cr miktarı arttıkça uygulanan tüm yükler için aşınma hızlarının düştüğü görülmüştür. Aşınma hızları $Fe_{13}Cr_5B_2$ için $3,2 \times 10^{-5}$ ile $7,75 \times 10^{-5}$ mm^3/m , $Fe_{14}Cr_4B_2$ için $4,48 \times 10^{-5}$ ile $2,07 \times 10^{-5}$ mm^3/m ve $Fe_{15}Cr_3B_2$ sert yüzey kaplaması için $4,9 \times 10^{-5}$ ile $2,29 \times 10^{-5}$ mm^3/m arasında değişmektedir. G. Hu ve ark., yaptığımız çalışmaya benzer olarak, uygulanan yükteki artışla birlikte, aşınma oranlarının arttığını bildirmişlerdir [39].

Durmuş ve ark., kaplama tabakasında bulunan sert borür ve karbür fazlarının hacim oranının artmasıyla, aşınma direncinin arttığını, bu sebeple kaplamanın toplam sertliğinin, aşınma direnci üzerinde belirleyici bir rolü olduğunu belirtmişlerdir [40]. Mikroyapı açıklamalarında belirtildiği gibi kaplama tabakasında, krom oranının artmasına bağlı olarak, yüksek sertlik değerlerine sahip metal borür içeren ötektik yapısının arttığı görülmektedir. Sertlik testi sonucu elde edilen değerler, Cr oranının artışı ile numunelerin makro sertlik değerlerinin arttığını açık bir şekilde göstermektedir. Bu açıklamalara uygun olarak, Cr oranının artması ile kaplama tabakalarının aşınma performansları da artmıştır. Kaplama tabakaları arasında en düşük aşınma hızı değerlerinin 3, 6 ve 9 N yükler için $Fe_{13}Cr_5B_2$ bileşimine sahip elektrotla üretilen sert yüzey kaplama tabakasında bulunduğu tespit edilmiştir. Yükteki % 100'lük bir artış (3'ten 6 N'a) $Fe_{13}Cr_5B_2$ alaşımı için % 102,2 oranında aşınma hızında artışa sebep olurken; yükteki artış % 200 (3'ten 9 N'a) olduğu zaman aşınma hızındaki artış % 115,1 oranında gerçekleşmektedir. Bu değer $Fe_{14}Cr_4B_2$ ve $Fe_{15}Cr_3B_2$ alaşımları için sırasıyla; % 103-128 ve % 106,9-126,4 oranlarında artışa sebep olmuştur. Değer artışları genel olarak birbirine yakın gerçekleşmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, Cr miktarının artışı (9 N yük için) belirgin bir şekilde % 63,7 oranına kadar aşınma hızında düşüslere sebep olmuştur. 0,1 m/s ve 9 N yük altında aşınma testine



Şekil 11. Aşınma testi sonrası alınan veriler (a) Sürtünme katsayısı-yük grafiği (b) Aşınma oranı-yük grafiği
(Data received after the wear test (a) Friction coefficient-load graph (b) Wear rate-load graph)

tabi tutulan Fe₁₄Cr₄B₂ bileşimine ait aşınma yüzeyinin SEM mikroyapısı ve EDS analizleri Şekil 12’de görülmektedir. SEM görüntüleri aşınma bölgesinde, kaplama tabakası içerisinde bulunan sert fazların, aşınmaya karşı direnci arttırdığını ve aşınmanın daha çok tepe noktalarında gerçekleştiğini göstermektedir. EDS analizlerinde görüldüğü üzere aşınma izinde bor, krom ve demirin yanında oksijen mevcuttur. Bu durum, aşınma mekanizmasının oksidatif ve mikro abrazyif olduğunu gösterir.



Şekil 12. 9N yük altında Al₂O₃ bilye ile aşındırılmış Fe₁₄Cr₄B₂ kaplama tabakasının SEM mikroyapı görüntüsü ve EDS analizleri

(SEM microstructure image, and EDS analysis of Fe₁₄Cr₄B₂ coating layer abraded with Al₂O₃ ball under 9N load)

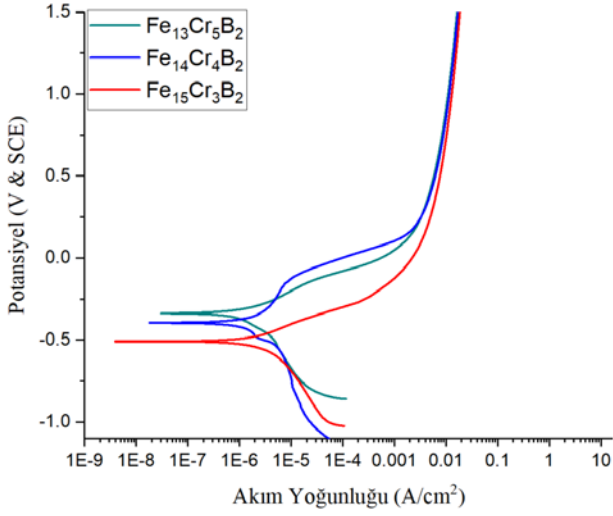
3.3. Korozyon Testi (Corrosion Test)

Atmosfer koşullarında gerçekleştirilen potansiyodinamik korozyon testi sonrası elde edilen Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 13’de verilmiştir. Elektrot örtü bileşiminde değişen krom miktarının anodik ve katodik Tafel eğrilerini önemli ölçüde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Polarizasyon eğrilerinde katodik bölgenin potansiyeli artarken akımın

düşüğü görülmektedir. Bu durum bütün numunelerdeki deneylerin aktivasyon kontrollü bir korozyon mekanizması ile gerçekleştiğine işaret etmektedir. Ayrıca korozyon potansiyelinin örtü bileşimindeki artan krom miktarı ile arttığı gözlemlenmektedir. Tafel eğrilerinde negatif potansiyellerin, metalin çözünmesi için gerekli olan katodik reaksiyon hızını artırdığı rapor edilmiştir [41]. Bileşimdeki krom oranının atomik olarak %15 ten %20’ye yükselmesi ile korozyon potansiyelinde yaklaşık %5 oranında bir artış meydana gelmektedir. Aynı şekilde krom oranının %20’den %25’e yükselmesi ile yaklaşık %23 oranında korozyon potansiyelinde bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Korozyon potansiyelindeki bu artış, artan krom miktarı ile kaplamanın kimyasal olarak daha soy hale dönüştüğünü göstermektedir. Tablo 4’te her bir numune için potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinin ekstrapole edilmesinden çıkarılan E_{kor}, I_{kor}, β_a, β_k ve K_h değerleri verilmiştir. Galvele’e göre akım yoğunluğu değerleri elektrot potansiyelleri ile doğrudan ilgili olup malzemenin elektrokimyasal davranışı hakkında daha doğru sonuçlar verebilir [42]. Tablo 4’te verilen I_{kor} değerleri kaplama bileşiminde bulunan krom miktarının azalması ile artmaktadır. Yani malzemenin korozyon direnci azalmaktadır ve buna paralel bir şekilde polarizasyon eğrilerinin anodik eğimleri (β_a) genel olarak artmaktadır. Aynı şekilde örtü bileşiminde azalan krom miktarı ile kaplamanın korozyon direnci hem anot bölgesinde hem katot bölgesinde genel olarak azalmıştır.

Şekil 13’te verilen polarizasyon eğrilerinden anodik kısımları üzerindeki dalgalanmalar koruyucu tabakanın yüzeyden ayrıldığı şeklinde yorumlanabilir [43, 44].

Fe-Cr-B esaslı elektrot örtüsü ile gerçekleştirilen kaplamaların ötektik altı yapıda olmasından dolayı mikroyapının büyük bir kısmını matris fazı olan α-Fe oluşturmaktadır. Yani korozyon davranışı matris fazda meydana gelecek korozyona bağlıdır [45]. Matris fazda korozyon testi sonrası meydana gelebilecek temel elektrokimyasal reaksiyon, demir fazın aktif bir metal olmasından dolayı yükseltgenme reaksiyonudur ve α-Fe için çeşitli kademelerde yükseltgenerek devam etmesi beklenir.



Şekil 13. Potansiyodinamik polarizasyon testi sonrası elde edilen Tafel polarizasyon eğrileri
(Tafel polarization curves obtained after potentiodynamic polarization test)

Bu sebeple sırasıyla anodik reaksiyon [46, 47];



NaCl çözeltisinde katodik reaksiyon oksijen indirgemesi ile gerçekleşebilir ve bu reaksiyonun aşağıdaki şekilde olması muhtemeldir [48];



Bununla birlikte mikroyapının kalan kısmını ise α -Fe+(Fe,Cr)₂B ve/veya α -Fe+(Cr,Fe)₂B fazları oluşturmaktadır. Teorik anlamda her bir bor atomunun iki Fe veya Cr atomu ile birleştirerek (Fe,Cr)₂B ve/veya (Cr,Fe)₂B yapısını oluşturması beklenmektedir. Literatürde bu fazların korozyon direncinin α -Fe'e göre yüksek olduğu rapor

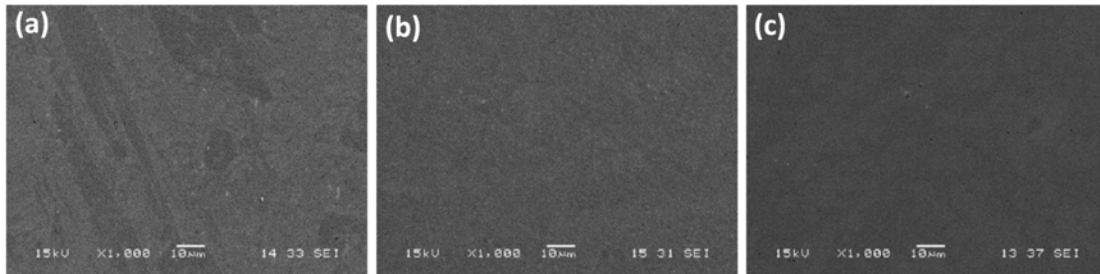
edilmiştir [47, 49]. Ayrıca borun Fe ve Cr ile harcanmasından sonra kalan kromun matriste dağılması beklenmektedir. Bu sebeple artan krom oranı ile (Fe,Cr)₂B ve/veya (Cr,Fe)₂B ve α -Fe'nin yanında matris içerisinde dağılan krom miktarında artış olacaktır. Bu sebeple galvanik olarak kromun demire göre daha soy bir element olmasından dolayı kaplamanın korozyon direnci artmaktadır. Ayrıca 0,5 M NaCl çözeltisi olarak belirlenen korozyon ortamı H, O ve Cl gibi agresif iyonları barındırır. Çözelti içerisinde bulunan klorür iyonları yüzeyde kısmi olarak yoğunlaşır ve demirin çeşitli tuzlarını (Fe(OH)Cl)₂, FeCl) ve katyonlarını oluşturabilir [50]. Şekil 14'te potansiyodinamik korozyon testi sonrası korozyon bölgesinden alınan taramalı elektron mikroskop görüntüsü verilmiştir. Görüntülerde yüzeylerde çukurcuk veya aralık gibi bir korozyon hasarına rastlanmamıştır. Bu sonuca göre uygulanan korozyon test şartlarına karşı malzemenin korozyon direncinin yüksek olduğu söylenebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Fe_(18-x)Cr_xB₂ (x=3,4,5) esaslı sert yüzey alaşım tabakası örtülü elektrot ark kaynak yöntemi ile AISI 1010 çelik altlık yüzeyinde başarılı bir şekilde kaplanmıştır. Kaplama tabakaları, yaklaşık 5-6 mm arasındadır ve altlık ile iyi bir bağlanma sergilemiştir. Ayrıca, porozitesiz ve düzgün bir yüzey topoğrafyasına sahiptir. Fe-Cr-B esaslı kaplamalarda, krom oranının artmasına bağlı olarak ötektik yapı içerisinde bulunan borür miktarının arttığı görülmektedir. Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda atomik olarak %15Cr içeriğine sahip kaplamanın mikroyapısının, birincil ötektik (α -(Fe,Cr)+ortorombik (Cr,Fe)₂B) yapısının, ikincil ötektik (α -(Fe,Cr)+tetragonal (Fe,Cr)₂B) yapısı ile çevrelediği tespit edilmiştir. Buna karşılık, %20Cr ile %25Cr içeriğine sahip kaplamalarda, birincil α -(Fe,Cr) yapısının, Cr açısından zengin ortorombik (Cr,Fe)₂B tipi borür ötektik (α -(Fe,Cr)+ortorombik (Cr,Fe)₂B) yapısı ile çevrelediği belirlenmiştir. X-ışınları difraksiyon analizleri sonucunda kaplamaların, α -(Fe,Cr)+orth.(Cr,Fe)₂B, tetr.(Cr,Fe)₂B ve

Tablo 4. Fe_(18-x)Cr_xB₂(x=3,4,5) esaslı yüzey kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon test sonuçları
(Potentiodynamic polarization test results of Fe_(18-x)Cr_xB₂ (x = 3,4,5) based coatings)

	E _{kor} (mV)	I _{kor} (μ A/cm ²)	β_a (mV)	β_k (mV)	Kh (mpy)
Fe ₁₃ Cr ₅ B ₂	-347,157	1,242	161,5	270,8	0,88
Fe ₁₄ Cr ₄ B ₂	-450,056	1,615	420,1	193,3	1,06
Fe ₁₅ Cr ₃ B ₂	-473,991	2,166	107,5	318,5	1,32



Şekil 14. Korozyon yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu görüntüsü a) Fe₁₅Cr₃B₂ b) Fe₁₄Cr₄B₂ ve c) Fe₁₃Cr₅B₂
(Scanning electron microscope image of corroded surfaces a) Fe₁₅Cr₃B₂ b) Fe₁₄Cr₄B₂ and c) Fe₁₃Cr₅B₂)

(Fe,Cr)₃(C,B) fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Sertlik testi sonucu elde edilen değerler, Cr oranının artışı ile numunelerin makro ve mikro sertlik değerlerinin arttığını göstermektedir. Buna paralel olarak, Cr oranının artması ile kaplama tabakalarının aşınma performansları da artmıştır. Ayrıca krom oranının kaplamaların korozyon direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Artan krom oranı korozyon potansiyel değerleri artarken akım yoğunluğu değerlerinin azaldığı yani korozyon direncinin arttığı anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, Fe-Cr-B esaslı kaplamalarda Cr oranının artışı, bileşimin mikroyapısını etkilemekte ve buna bağlı olarak tabakaların aşınma dayanımı ve korozyon direncine katkı sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmayı 219M192 numaralı proje ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve derginin incelenmesinde yaptığı katkılardan dolayı editör ve anonim hakemlere teşekkürü borç bilimiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Gramajo J., Gualco A., Svoboda H., Study of the welding procedure in nanostructured super-hard Fe- (Cr, Mo, W) - (C, B) hardfacing, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 105178, 2020.
- Kaya Y., Aktürkoğlu F., Kahraman N., Coating of AISI 8620 steel by plasma spraying and characterization of coating , *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 1111–1122, 2018.
- Amushahi M.H., Ashrafizadeh F., Shamanian M., Characterization of boride-rich hardfacing on carbon steel by arc spray and GMAW processes, *Surface and Coatings Technology*, 204 (16), 2723–2728, 2010.
- Holmberg K., Erdemir A., Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, *Friction*, 5 (3), 263–284, 2017.
- Holmberg K., Kivikytö-Reponen P., Härkisaari P., Valtonen K., Erdemir A., Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry, *Tribology International*, 115 (5), 116–139, 2017.
- Bedolla P.O., Vorlaufer G., Rechberger C., Bianchi D., Eder S.J., Polak R., Pauschitz A., Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and its application to a tillage machine component, *Tribology International*, 127 (1), 122–128, 2018.
- Holmberg K., Siilasto R., Laitinen T., Andersson P., Jäsberg A., Global energy consumption due to friction in paper machines, *Tribology International*, 62, 58–77, 2013.
- Gerhardus K., Jeff V., Thopson N., Moghissi O., Gould M., Payer J., *International Measures of Prevention , Application , and Economics of Corrosion Technologies Study*, NACE IMPACT Report, 1–216, 2006.
- Kilinc B., Demirkiran S., Sen U., Sen S., Corrosion behavior of nitride and Cr-Al-N coatings formed on AISI D2 steel, *Acta Physica Polonica A*, 123 (2), 268–270, 2013.
- Avcioglu C., Özata F., Nirun H., Özbek K., Gürel Soyuer Ö., *Sektörel Görünüm: Demir Çelik*.
- Methods D., *Process Selection Guide, Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics*, (Eq 1), 1–16, 2005.
- Zahiri R., Sundaramoorthy R., Lysz P., Subramanian C., Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding, *Surface and Coatings Technology*, 260, 220–229, 2014.
- Wei D.-B. et al., Microstructure and tribological behavior of W-Mo alloy coating on powder metallurgy gears based on double glow plasma surface alloying technology, *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 55 (2), 227–234, 2019.
- Wang X., Han F., Liu X., Qu S., Zou Z., Microstructure and wear properties of the Fe – Ti – V – Mo – C hardfacing alloy, 265, 583–589, 2008.
- Morsy M., El-Kashif E., The effect of microstructure on high-stress abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing deposits, *Welding in the World*, 58 (4), 491–497, 2014.
- Gençer G.M., Owsalou R.G., Karadeniz S., Determination of abrasive wear resistances of Fe-based hardfacing coated wear plates that were used as grinders in cement production in cases where clinker and farin were used as abrasives, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 0, 2016.
- Oo H.Z., Muangjunburee P., Wear behaviour of hardfacing on 3.5% chromium cast steel by submerged arc welding, *Materials Today: Proceedings*, 5 (3, Part 2), 9281–9289, 2018.
- Chen J.-H., Hsieh C.-C., Hua P.-S., Chang C.-M., Lin C.-M., Wu P.T.-Y., Wu W., Microstructure and abrasive wear properties of Fe-Cr-C hardfacing alloy cladding manufactured by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), *Metals and Materials International*, 19 (1), 93–98, 2013.
- Özel S., Yalçın B., Turhan H., Somukıran İ., Fuzzy logic model of wear characteristic of surface alloyed with ferromanganese powder, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23 (1), 33–39, 2013.
- Babu S., Balasubramanian V., Reddy G.M., Balasubramanian T.S., Improving the ballistic immunity of armour steel weldments by plasma transferred arc (PTA) hardfacing, *Materials & Design* (1980-2015), 31 (5), 2664–2669, 2010.
- Bahoosh M., Shahverdi H.R., Farnia A., Macro-indentation fracture mechanisms in a super-hard hardfacing Fe-based electrode, *Engineering Failure Analysis*, 92, 480–494, 2018.
- Joo Y.A., Yoon T.S., Park S.H., Lee K.A., Microstructure and compression properties of Fe-Cr-B alloy manufactured using laser metal deposition, *Archives of Metallurgy and Materials*, 63 (3), 1459–1462, 2018.
- Azimi G., Shamanian M., Effects of silicon content on the microstructure and corrosion behavior of Fe–Cr–C hardfacing alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 505 (2), 598–603, 2010.

24. Lu L., Soda H., McLean A., Microstructure and mechanical properties of Fe–Cr–C eutectic composites, *Materials Science and Engineering: A*, 347 (1), 214–222, 2003.
25. BERNIS H., FISCHER A., Microstructure of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys with Additions of Nb, Ti and, B, *Materials Characterization*, 39 (2), 499–527, 1997.
26. Fan C., Chen M.-C., Chang C.-M., Wu W., Microstructure change caused by (Cr,Fe)₂₃C₆ carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys, *Surface and Coatings Technology*, 201 (3), 908–912, 2006.
27. Carbide reactions (M₃C→M₇C₃→M₂₃C₆→M₆C) during tempering of rapidly solidified high carbon Cr–W and Cr–Mo steels, *Metallurgical Transactions A*, 11 (5), 739–747, 1980.
28. Yamada K., Ohtani H., Hasebe M., Thermodynamic Analysis of the Fe-Cr-B Ternary System, *High Temperature Materials and Processes*, 27 (4), 269–284, 2008.
29. Predel B., Phase Equilibria, Crystallographic and Thermodynamic Data of Binary Alloys B-Cr, Madelung O. Eds. Berlin, Heidelberg, 1–3, 1992.
30. Gigolotti J.C.J., Chad V.M., Faria M.I.S.T., Coelho G.C., Nunes C.A., Suzuki P.A., Microstructural characterization of as-cast Cr–B alloys, *Materials Characterization*, 59 (1), 47–52, 2008.
31. Sorour A.A., Chromik R.R., Gauvin R., Jung I.-H., Brochu M., Understanding the solidification and microstructure evolution during CSC-MIG welding of Fe–Cr–B-based alloy, *Materials Characterization*, 86, 127–138, 2013.
32. Sorour A.A., Chromik R.R., Brochu M., Tribology of a Fe–Cr–B-Based Alloy Coating Fabricated by a Controlled Short-Circuit MIG Welding Process, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2 (4), 223–233, 2013.
33. Lentz J., Röttger A., Großwendt F., Theisen W., Enhancement of hardness, modulus and fracture toughness of the tetragonal (Fe,Cr)₂B and orthorhombic (Cr,Fe)₂B phases with addition of Cr, *Materials & Design*, 156, 113–124, 2018.
34. Do J. et al., Effects of Cr and B Contents on Volume Fraction of (Cr,Fe)₂B and Hardness in Fe-Based Alloys Used for Powder Injection Molding, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43 (7), 2237–2250, 2012.
35. Tian Y., Ju J., Fu H., Ma S., Lin J., Lei Y., Effect of Chromium Content on Microstructure, Hardness, and Wear Resistance of As-Cast Fe-Cr-B Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28 (10), 6428–6437, 2019.
36. Son C., Yoon T.A.E.S., Lee S., Correlation of Microstructure with Hardness, Wear Resistance, and Corrosion Resistance of Powder-Injection-Molded Specimens of Fe-Alloy Powders, 1, 1110–1117, 2009.
37. Özel C., Gürgeç T., Yiğit O., Comparison of Microstructure and Microhardness of Fe-Cr-W-B-C and Fe-Cr-B-C Coating on Low Carbon Steel Coated with PTA Method, in *International Advanced Researches & Engineering Congress 2017 Proceeding Book*, 2017, 743–751, 2017.
38. Rai V.K., Srivastava R., Nath S.K., Ray S., Wear in cast titanium carbide reinforced ferrous composites under dry sliding, *Wear*, 231 (2), 265–271, 1999.
39. Hu G., Meng H., Liu J., Friction and sliding wear behavior of induction melted FeCrB metamorphic alloy coating, *Applied Surface Science*, 308, 363–371, 2014.
40. Durmuş H., Çömez N., Gül C., Yurddaşkal M., Yurddaşkal M., Wear performance of Fe-Cr-C-B hardfacing coatings: Dry sand/rubber wheel test and ball-on-disc test, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 77, 37–43, 2018.
41. Aslan O., Plazma Sprey Kaplama Yöntemiyle Tek ve Çift Katmanlı Kaplanan AISI 316 L Paslanmaz Çeliğinin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2015.
42. Galvele J.R., Tafel's law in pitting corrosion and crevice corrosion susceptibility, *Corrosion Science*, 47 (12), 3053–3067, 2005.
43. Prince M., Thanu A.J., Gopalakrishnan P., Improvement in wear and corrosion resistance of AISI 1020 steel by high velocity oxy-fuel spray coating containing Ni-Cr-B-Si-Fe-C, *High Temperature Materials and Processes*, 31 (2), 149–155, 2012.
44. Eren H., Ferritik Paslanmaz Çeliğin Korozyon Davranışına Karbür Yapıcı Elementlerin Etkilerinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, 2005.
45. Gou J., Wang Y., Li X., Zhou F., Effect of rare earth oxide nano-additives on the corrosion behavior of Fe-based hardfacing alloys in acid, near-neutral and alkaline 3.5 wt.% NaCl solutions, *Applied Surface Science*, 431, 143–151, 2018.
46. Bhagavathi L.R., Chaudhari G.P., Nath S.K., Mechanical and corrosion behavior of plain low carbon dual-phase steels, *Materials & Design*, 32 (1), 433–440, 2011.
47. Sun G.F., Zhang Y.K., Zhang M.K., Zhou R., Wang K., Liu C.S., Luo K.Y., Microstructure and corrosion characteristics of 304 stainless steel laser-alloyed with Cr-CrB₂, *Applied Surface Science*, 295, 94–107, 2014.
48. Gökeril M., Çinko, Nikel Ve Nikel/Kobalt Kaplanmış Yüksek Karbonlu Çeliğin Korozyon Davranışının, Kocaeli Üniversitesi, 2010.
49. Márquez-Herrera A., Fernandez-Muñoz J.L., Zapata-Torres M., Melendez-Lira M., Cruz-Alcantar P., Fe₂B coating on ASTM A-36 steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance, *Surface and Coatings Technology*, 254, 433–439, 2014.
50. Esra P., 6-Amino-m-Kresol Polimerinin Bakır ve Paslanmaz Çelik Üzerine Sentezi ve Korozyon Performansının İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi, 2009.



Hematite particles' radiative properties within the ultraviolet-visible spectrum and thermal properties at low temperatures

Agah Aygahoğlu¹, Nimeti Döner^{2*}, Ali Rıza Pargan¹

¹Mechanical Engineering Department, Kutahya Dumlupınar University, Kutahya, 43270, Turkey

²Mechanical Engineering Department, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- Debris aged iron microparticles
- Hematite absorption measurements
- Thermal conductivity measurements

Keywords:

- Iron oxides
- Hematite
- Absorption
- Radiative
- Thermal conductivity

Article Info:

Research Article
Received: 20.02.2020
Accepted: 18.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.691904

Correspondence:

Author: Nimeti Döner
e-mail:
nimetidoner@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3424

Graphical/Tabular Abstract

The radiative properties within the UV and the visible wavelength range and the thermal properties at low temperatures of hematite (α -Fe₂O₃) samples were investigated. The two samples, which have different chemical properties, are referred to as Case 1 and Case 2 and were separated according to particle sizes by sieve analysis. The absorbance-wavelength change and the thermal conductivity-temperature change of the samples of the smallest, medium and the largest particle sizes were analysed. The coating on particles due to the aging effect was examined using scanning electron microscopy (SEM) images. In our study, the thermal properties of waste iron particles, which differ from those featured in previous studies in the literature in terms of particle size and content, were analysed by both absorption and thermal conductivity measurements. The absorption effects of the oxidation area on the particles were calculated, and the thermal conductivity properties were examined. In terms of the radiative properties, whereas the absorption values of the small diameter samples (32 and 56 μ m) are close to each other, the absorption values of the large diameter samples (250 μ m) are approximately 1.5 times higher than the others. The thermal conductivity properties were measured with two different devices. The Hot Disk TPS2500S (Thermal Constant Analyzer-TCA) device was used to measure the k_e conductivity, the specific heat and thermal diffusion coefficients of the particles. The P.A. Hilton experimental set-up was used to thermal conductivity measurements in low-temperature ranges (30–50 °C). Our experimental studies revealed that the thermal conductivity of the hematite samples underwent high order polynomial changes, and this change is linear in the small temperature range. In addition, the thermal conductivity values differ significantly according to the Mn, P, Si, Al, Cr and Cu components. If these components are present in large amounts, the thermal conductivity coefficient takes high values. The absorbance property effects of particle size are more pronounced than those of thermal conductivity.

Table A. The experimental results of the thermal properties of the hematite particles at room temperature

		Case 1			Case 2		
		k_e (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)	k_e (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)
Particle size (μ m)	37	0.054	0.5448	0.1138	0.056	0.4090	0.1388
	56	0.046	0.1628	0.2816	0.054	0.4253	0.1270
	125	0.052	0.2854	0.1883	0.063	0.6081	0.1078

Purpose: The aim of this study is to investigate the radiative properties within the visible spectrum and thermal properties at room temperature of aged hematite particles based on particle size.

Theory and Methods:

The absorbance-wavelength change and the thermal conductivity-temperature change of the hematite samples of the smallest, medium and the largest particle sizes were measured.

Results:

Radiative and thermal properties of debris hematite particles increase as the particle size increases. However, the radiative property decreases with increasing wavelength, and the thermal conductivity property decreases with increasing temperature.

Conclusion:

The absorption effect of particle size is more evident than that of thermal conductivity.



Hematit parçacıkların kısa ve görünür dalga boyundaki ışınlım ve düşük sıcaklıklardaki ısı özellikleri

Agah Aygahoğlu¹, Nimeti Döner^{2*}, Ali Rıza Pargan¹

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 43270 Kütahya, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Atık yaşlanmış demir mikro parçacıklar
- Hematit soğurma ölçümleri
- Isıl iletkenlik ölçümleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 20.02.2020
Kabul: 18.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.691904

Anahtar Kelimeler:

Demir oksitler,
hematit,
soğurma,
ışınlım,
ısıl iletkenlik

ÖZET

Bu çalışmada 900-1100°C sıcaklıklarda basınçlı alım kaynak (flash butt welding) işlemi sonucunda oluşan ve sistem dışına atılan demir tozlarının, kısa ve görünür dalga boyu aralığındaki ışınlım özellikleri ve düşük sıcaklıklardaki ısıl iletkenliği incelenmiştir. Hematit yapısında olan atık demir tozları elek analizi ile parçacık büyüklüklerine göre ayrıştırılmıştır. Parçacık büyüklüğü en küçük, orta ve en büyük olan çeşitli büyüklüklerdeki numunelerin soğurma (absorbans)-dalga boyu değişimi ve ısıl iletkenlik-sıcaklık değişimi incelenmiştir. Hematit (α -Fe₂O₃) parçacıklarının, yaşlanma sürecinde oluşan oksidasyon bölgeleri SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir. Parçacıkların içeriği ve büyüklüğü ile oksitlenme etkisi, numunelerin ışınlım özelliklerinin dalga boyu ile değişiminde ve ısıl iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişiminde etkili olduğu görülmüştür. Atık hematit parçacıklarının ışınlım ve ısı iletim özellikleri parçacık büyüklüğü arttıkça artmaktadır. Ancak ışınlım özelliği artan dalga boyu ile ısı iletim özelliği de artan sıcaklıkla azalmaktadır.

Hematite particles' radiative properties within the ultraviolet-visible spectrum and thermal properties at low temperatures

H I G H L I G H T S

- Debris aged iron micro particles
- Hematite absorption measurements
- Thermal conductivity measurements

Article Info

Research Article
Received: 20.02.2020
Accepted: 18.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.691904

Keywords:

Iron oxides,
hematite,
absorption,
radiative,
thermal conductivity

ABSTRACT

The radiative in the UV and visible spectra and the conductivity properties at low temperatures of hematite (α -Fe₂O₃) samples of different particle size distributions and compositions obtained by the pressure welding procedure within temperatures of 900-1100°C were investigated. In this study, the two samples which have different chemical properties were called as Case 1 and Case 2. Debris iron oxides samples, which are in the morphology of hematite, were separated according to particle sizes by sieve analysis. The absorbance-wavelength change and the thermal conductivity-temperature change of the samples of, the smallest, medium and largest of which the particle size were analysed. The coating on particles due to the aging effect was examined using scanning electron microscopy (SEM) images. It has been concluded that the content and size of the particles and the oxidation effect are effective in the variation of the radiation properties of the samples with the wavelength and the temperature of the thermal conductivity coefficient. Radiative and thermal transfer properties of debris hematite particles increase as the particle size increases. However, the radiative property decreases with increasing wavelength and the thermal conductivity property decreases with increasing temperature.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: agah.aygahoglu@dpu.edu.tr, nimetidoner@gazi.edu.tr, alipargan@gmail.com /

Tel: +90 312 582 3424

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstride en çok kullanılan metal oksitler arasında bulunan demir oksitler, hematit (α -Fe₂O₃), manyetit (Fe₃O₄), maghemit (γ -Fe₂O₃) ve goethite (α -FeOOH) olarak sınıflandırılır. Demir tozlarının, ısıtma işlemleri ile değişen ısıtma ve yapısal özellikleri ve *n*-tipi yarı iletken özellikleri çeşitli araştırmalar ile tespit edilmiştir [1-3]. Ayrıca, demir oksitlerin heterojen reaksiyonlara katıldıkları ve soğurma özellikleri nedeniyle, ısıtma dengesini etkiledikleri de tespit edilmiştir [4]. Çeşitli uygulama alanlarına sahip demir oksitler, gaz sensörlerinde, fotoelektrokimyasal hücrelerde fotoanod malzemesi olarak, yüksek yoğunluklu kaplama işleminde parlak ve korozyon önleyici madde olarak kullanılmaktadır [5].

Demir tozlarının ısıtma özellikleri ile ilgili, geçen yarım yüzyılda yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda ısıtma özelliklerini inceleyenler, az sayıda olmaları sebebiyle, özellikle bahsedilecektir. Hsu ve Matijević büyüklükleri 0,1-0,51 μ m olan küresel hematit parçacıklarının, görünür dalga boyu aralığı 380-700 nm'deki ısıtma özelliklerini deneysel olarak incelemişler ve Mie Teorisi sonuçları ile karşılaştırmışlardır [6]. Yazarlar bu çalışmaları sonucunda, hematit parçacıklarının yok olma (soğurma ve saçılmanın toplamı) özelliğinin parçacık çapı arttıkça arttığını, hem deneysel hem de hesaplama sonuçları ile tespit etmişlerdir.

Hematitin (α - ve γ -) yapısal özelliklerinin soğurma özelliğine etkileri Cherepy vd., [7] ile Lu vd., [8] tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmalarda, mikron seviyesinin altındaki büyüklüklere sahip hematit parçacıklarının metal ve oksijen etkileşimi incelenmiştir. Bedidi ve Cervelle, 400-700 nm dalga boyu aralığında, hava ve su ortamında çapları 0,010-0,50 μ m olan hematit parçacıklarının saçılma ve soğurma özelliklerini çalıştılar [9]. Buna göre; ısıtma özellikleri parçacık büyüklüğü ve dalga boyundan etkilenmektedir. Muñoz vd., hematit ve rutil parçacıklarının optik özelliklerini deneysel ve sayısal yöntemlerle analiz ettiler [10]. Çalışmalarında, 632,8 nm dalga boyunda yansıtma indeksinin ($m = n + ki$) saçılma özelliklerine etkilerini, *n* ve *k* 'nin farklı değerleri için ayrıntılı incelediler. Bu değerlendirme ile, yansıtma indeksinin saçılma özelliklerine parçacık şeklinden daha fazla etkilediği tespit edilmiştir. Hematit veya goethite gibi demir oksitlerin 0,47, 0,55 ve 0,66 μ m gibi görünür dalga boylarındaki optik özellikleri, Meland ve çalışma arkadaşları tarafından araştırılmıştır [11]. Saçılma etkileri Mie ve T-Matrix yöntemleri ile hesaplanmış ve parçacık şeklinin hematitin saçılma özelliklerini etkilemediği ancak goethite için belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Chakrabarty ve Chatterjee, farklı çözücülerin (örn., Etanol amin, etilen diamin, etilen glikol, asetik asit, etanol ve asetaldehid) hematit parçacıklarının yapısı üzerine etkilerini araştırmışlar ve ısıtma soğurma özelliğinin farklı dalga boylarında bazı yapısal geçişlerden dolayı oluştuğunu tespit etmişlerdir [12]. Chen ve diğerleri, hematit parçacıklarının şekil ve zamana bağlı büyüme

etkilerini araştırdılar [13]. Bunun için farklı çözeltilerde (etanol, saf su, sodyum asetat ilaveli çözeltiler) hematit nanoparçacıklarının organik ya da inorganik olan bazı anyonlarının, büyüme oluşumuna yapısal etkilerini araştırdılar. XRD, SEM ve geçirgenlik-yansıtma ölçümleri sonucunda, demir ve/veya molekül iyonlarının yüzey enerjilerinden dolayı düzensel büyümeye yatkın olduklarını tespit ettiler. Ayrıca, farklı miktarlardaki (0,3; 0,7; 1,2; 2,5 mL) saf su içinde büyüme işlemine tabi tutulan hematit nano yapıların 200-1000 nm dalga boyu aralığındaki yansıtma (reflectance) özelliklerini tespit ettiler. Buna göre, hematitin nanodüzensel yapıdan nanoküresel yapıya doğru değiştiği ve yansıtma özelliğinin 200-600 nm dalga boyu aralığında her yapısal durum için küçük değerler aldığı görülmüştür. Goethite, hematit ve maghemit gibi farklı yapısal karakteristiklere sahip, 0,1 μ m boyutundaki demir oksit parçacıkları, endüstriyel bir proseste yeniden kullanılmak üzere, yapısal ve ısıtma özellikleri bakımından Legodi ve De Waal tarafından analiz edildi [14]. Nano yapıdaki hematitlerin sentezi, karakterizasyonu ve fotoelektrokimyasal özellikleri Wheeler vd. tarafından araştırıldı [15]. Parçacık büyüklüğü 10 nm, 47 nm ve 65 nm olan farklı hematit örneklerinin soğurma ve yansıtma özellikleri, 250-900 nm dalga boyu aralığında He vd. [16] tarafından yapısal geçişlerine göre incelenmiştir.

Paslanmaz çelik ve hematit malzemelerin hava ve su gibi ortamlardaki oksitlenme durumlarını, Degueldre vd. [17] deneysel olarak analiz ettiler. Yazarlar, hematit üzerindeki oksitli tabaka kalınlığı arttıkça, ısıtma özelliklerinin 0,2-0,6 μ m dalga boyu aralığında belirgin bir değişime sahip olduğunu ve 0,6 μ m'den büyük dalga boylarında lineer bir artış olduğunu gösterdiler. Çelik üzerindeki demir oksitli film tabakalarının ısıtma özellikleri, sıcaklık, ortam ve yaşlanma süresi bakımından Goosens vd. [18] tarafından da incelendi. Çeliğin 250°C ve oksijenli bir ortamda, ısıtma sonucu oluşan oksitli bölgeleri ölçülerek analiz edildi. Bu çalışmada Goosens vd. [18], çelik üzerinde hematit ve magnetitin oluştuğunu tespit ettiler ve yansıtma indeksin *n* ve *k* değerlerinin dalga boyuna göre değişimini ölçtüler. Yansıtma indeks değerlerinden *n*'in görünür dalga boyu aralığında 2,5-3 değerlerinde olduğu, *k*'nin 1,5-2,5 aralığında olduğu ve *k* değerinin 2,5'dan 1,5'e hızlı düştüğü görülmektedir. Ayrıca, yazarlar çalışmalarında çelik üzerindeki hematit tabakanın kalınlığının yaşlanma süresi ile azaldığı, magnetit tabaka kalınlığının arttığını tespit ettiler. Farklı kalınlıklardaki (172-367 ve 553 nm) hematit film yüzeylerinin UV ve görünür dalga boyu aralığındaki soğurma ölçümleri Chen ve Tu [19] tarafından çalışıldı. Chen ve Tu [19]'nun yapmış olduğu yaşlanmaya bağlı soğurma ölçüm sonuçlarına göre, 600°C'de 14 / 6 oranlı Ar / O₂ ortamında bozulmaya bırakılan hematit film kaplı yüzeylerin ısıtma soğurma özelliklerinin görünür dalga boyu aralığında yükselişte olduğu görüldü.

Diğer önemli bir özellik olan ısıtma iletkenlik, enerji depolama sistemlerinde etkili bir ısıtma verimlilik sağlamak için önemli bir parametredir. Isıtma enerji depolama sistemlerinin

yüklenme ve boşaltma durumlarında yüksek ısı iletkenlik ve bakım durumlarında düşük ısı iletkenlik özelliklerine sahip olunması gibi farklı çalışma koşullarının sağlanması istenir. Isıl iletkenlik konusunda Akiyama vd. tarafından yapılan kapsamlı çalışmada, ısı işlem öncesi ve sonrası demir oksitlerin ısı iletkenlikleri, ısı yayım katsayıları, gözeneklilik durumları ve ısı dirençleri gibi farklı özellikler araştırılmıştır [20]. Bu çalışmada, demir oksitler yanmış-yanmamış, sinterlenmiş ve magnetik özelliği indirgenmiş durumlar için oda sıcaklığından 1273 K sıcaklığa kadar deneysel olarak incelenmiştir. Isıl iletkenliğin sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu, gözeneklilik durumlarının ısı işlem sonuçlarında %20 den %62'e kadar değiştiği, demirin öz ısı iletkenliğinin malzemenin yoğun öz ısı iletkenliğinden daha küçük olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Isıl iletkenlik ile ilgili deneysel çalışmalara dayanarak tanımlanmış çeşitli formüller mevcuttur. Bu formüller ve aralarındaki farklar Akiyama vd. [20]'nin makalesinde ayrıntılı açıklanmaktadır.

Çalışmamızda, literatürdeki önceki çalışmalardan parçacık ve içerik bakımından farklı olan, atık demir tozlarının ısı özellikleri hem soğurma hem de ısı iletkenlik ölçümleri yapılarak analiz edilmiştir. Kimyasal içeriklerine göre, iki tip olan numuneler parçacık büyüklüklerine göre ayrıştırılmıştır. Parçacık büyüklük dağılımına göre 32 µm, 56 µm ve 250 µm büyüklüğündeki numunelerin soğurma ve 37 µm, 56 µm ve 125 µm büyüklüğündeki numunelerin ısı iletkenlik özellikleri ölçülmüştür. Daha önceki yayımlarımızda [21] her iki numunenin aynı çap büyüklükleri için, UV-görünür dalga boyu aralığındaki soğurma ölçümleri yapılmış ve bir numerik yöntemle hesaplanan ışınım etkenlik katsayıları, dalga boyu ve açısal değişim açısından incelenmiş ve numerik sonuçların doğruluğu gösterilmiştir. Bu çalışmada, önceki çalışmamızdan farklı büyüklüklerdeki parçacıkların soğurma ölçümleri yapılmış, oksidasyon bölgesinin soğurma etkileri hesaplanmış ve ısı iletim özelliği üzerine yoğunlaşmıştır. Sonuç olarak, hematit parçacıkların büyüklük ve içeriklerine göre, ışınım ve ısı iletim özelliklerinin değişimini açıklayan ilk Türkçe çalışma olarak hazırlanmıştır.

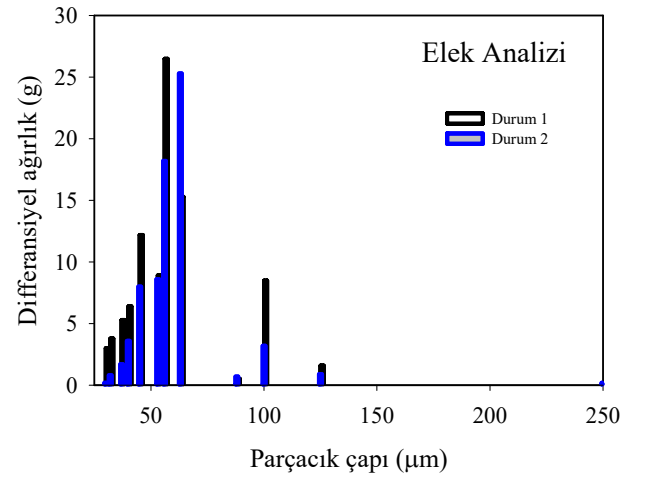
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Numunelerin Karakteristik Özellikleri (Characteristic properties of the samples)

Çalışmada kullanılan numuneler düşük ve orta mukavemetli çeliklerdir. Kaynak işlemi öncesindeki kimyasal içeriklerine göre Durum 1 ve Durum 2 olarak isimlendirilmiştir [21] ve bu içerikler Tablo 1'de verilmektedir. Durum 1 numunesinin karbon, mangan, fosfor, krom bileşenleri bakımından hemen

hemen iki kat; silisyum, alüminyum, bakır ve nikel bileşenleri bakımından diğer numuneye göre yaklaşık bir buçuk kat daha fazla olduğu görülmüştür. Özellikle, çelik üretiminde silisyum tane boyutunu küçültmek için kullanılmaktadır ve silisyum miktarı arttıkça çeliğin parçacık büyüklüğü de azalmaktadır. Dolayısıyla, Durum 1 parçacıklarının Durum 2 parçacıklarına göre daha küçük çapta olmaları da silisyum miktarından kaynaklanmaktadır. Kaynak işleminden sonra her iki numunenin XRD yapısal özellikleri incelendiğinde birbirlerine benzer olup, hematit kristal yapısında oldukları görülmüştür.

Elek analizi farklı büyüklükteki parçacıkların bulunduğu malzemelerin tane büyüklüğü dağılımını belirlemek için yapılır. Boyut dağılımı parçacıkların büyüklük ve miktarıyla bağlantılıdır. Bu çalışmada elek analizi için Endecotts firmasının OCTAGON 200 cihazı kullanılmıştır [22]. Durum 1 ve Durum 2 numunelerinin elek analizi sonuçları Şekil 1'de verilmektedir. Elek analizinde, ölçülen çaplara göre standart sapma 63 µm'dir.



Şekil 1. Numunelerin elek analizi sonuçları
(the results of sieve analysis of the samples).

2.2. SEM analizleri (SEM Analysis)

Durum 1 ve Durum 2 numunelerinin yapısal durumları, FEI Nova Nano SEM 650 cihazı ile çekilen SEM görüntüleri ile incelenmiştir. Şekil 2'deki gibi SEM görüntülerinden hematit parçacıklarının küresel oldukları ve oksitlenme bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Kullanılan çeliklerin, endüstriyel işlemdeki ergime sıcaklıkları 900-1150 °C aralığındadır. Endüstriyel işlemdeki elektrik akımı ve süresi, Durum 1 ve Durum 2 numuneleri için sırasıyla 641 A-17 s ve 1256 A-26 s'dir. Hematit parçacıklarının atmosferik

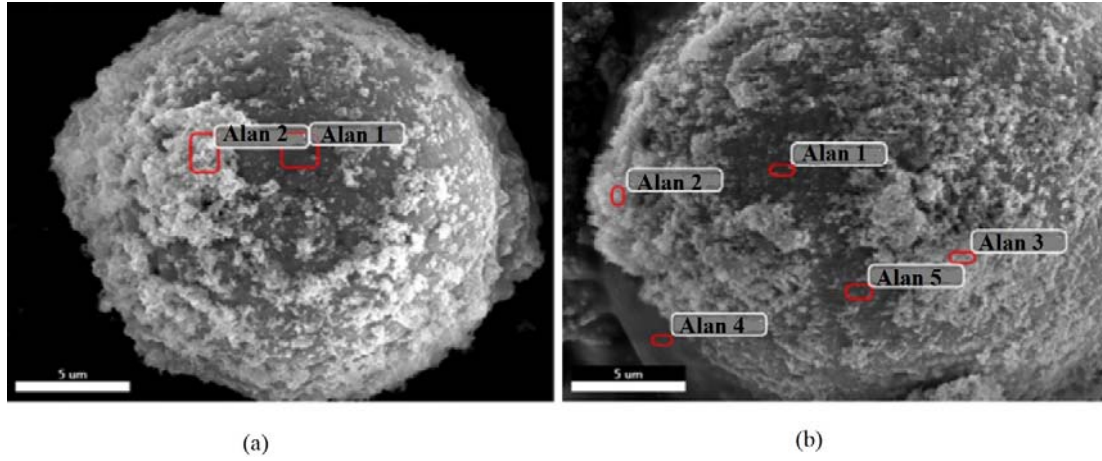
Tablo 1. Numunelerin kimyasal özellikleri (chemical contents of the samples).

İçerik (%)	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	Ceq	Fe
Durum 1	0,173	0,931	0,024	0,005	0,075	0,049	0,031	0,032	0,040	0,003	0,341	98,299
Durum 2	0,083	0,454	0,012	0,004	0,051	0,040	0,023	0,017	0,035	0,004	0,168	99,109

ortamda yaşlanma nedeniyle oluşan oksitlenme bölgelerinin özellikleri, parçacıkların kimyasal bileşenlerine ve kaynak işleminin akım ve işlem süresine göre değişmektedir. Aşağıda Şekil 2’de her iki numunenin 32 µm çaplı parçacıklarının SEM görüntüleri ve seçilen noktalarındaki EDX içerik analizleri sırasıyla, Tablo 2 ve Tablo 3’de verilmiştir [22]. Şekil 3a’da Durum 1 numunesinin Çap 100 µm ve (b)’de Durum 2 numunesinin Çap 32 µm’deki oksitlenme bölgelerinin yakın çekim görüntüleri sunulmuştur. Şekil 3 c’de ise Durum 2 numunesinde bir parçacık üzerindeki oksitlenme bölgesinin kalınlık ölçümü görülmektedir. Şekil 3a ve Şekil 3b’deki görüntüler,

parçacıkların oksitlenme bölgelerinde nano boyutlarda metal parçacıkların olduğunu göstermektedir. SEM EDX analizleri ile, parçacık üzerindeki bu oksitlenme bölgelerinde genel olarak karbon, manganez ve silisyum oksit ve nano ölçekte diğer metal parçacıklar bulunduğu tespit edilmiştir.

Bu görüntülere ek olarak, içerik analizlerinden bazı önemli bulgulara ulaşılmıştır. Öncelikle, yaşlanma sürecinde oksitlenme sonucu oluşan bölgelerde karbon, manganez, silisyum ve oksijenin yüzde değerlerinin, parçacıkların kendi malzeme bileşenlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. He vd. tarafından yapılan araştırmada, hematit nano



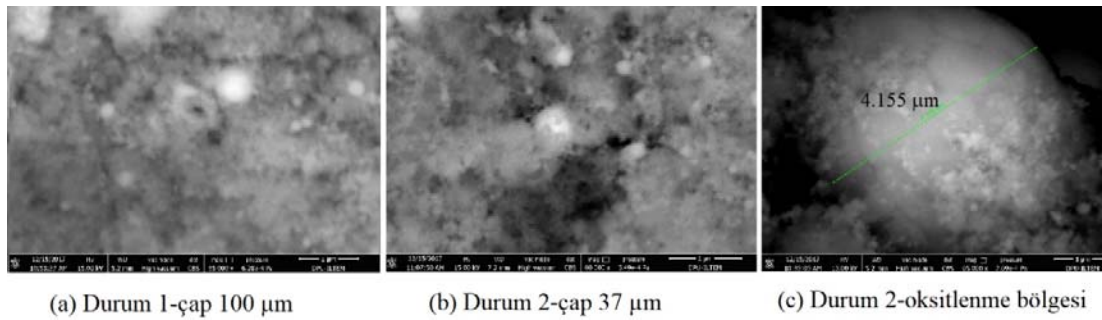
Şekil 2. (a) Durum 1 ve (b) Durum 2 numunelerinin çap 32 µm için SEM görüntüleri (images of SEM of samples of 32 µm (a) Case 1 and (b) Case 2).

Tablo 2. Durum 1 numunesi-çap 32 µm SEM görüntüsü içerik analizi (Content analysis of the Case 1-size 32 µm sample from the SEM images).

İçerik (%)	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Co
Alan 1	3,80	29,17	0,34	0,1	0,15	0,24	66,19	0,04
Alan 2	22,24	28,79	2,33	0,29	0,25	1,35	44,79	0,04

Tablo 3. Durum 2 numunesi-çap 32 µm SEM görüntüsü içerik analizi (Content analysis of the Case 2-size 32 µm sample from the SEM images).

İçerik (%)	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Co
Alan 1	5,69	43,30	0,34	0,0	0,39	2,07	48,15	0,05
Alan 2	27,89	32,56	0,21	0,50	0,42	7,33	30,18	0,92
Alan 3	24,75	33,07	0,0	0,49	0,81	11,01	29,86	0,0
Alan 4	83,54	14,50	0,01	0,07	0,28	0,48	1,10	0,06
Alan 5	6,97	50,28	0,13	0,0	0,82	4,63	37,16	0,0



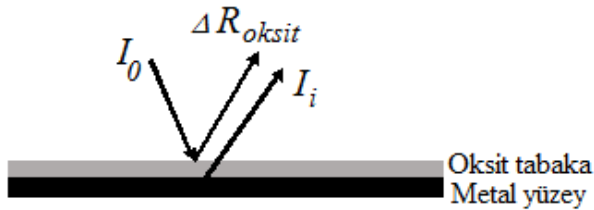
Şekil 3. Farklı çaplardaki numunelerin oksitlenme bölge görüntüleri (Images of the oxidation layers of the different size samples).

parçacıklarının soğurmasının SiO_2 tozlarının boyutlarıyla değiştiği ve soğurmanın azalmasının parçacık boyutunun küçülmesine bağlı olduğu belirlenmiştir [15]. Ayrıca, Lu vd., parçacık boyutlarının küçülmesiyle hematit yüzeyinin çok oksidasyona uğradığı ve kafes hacminin arttığına tespit etmişlerdir [7].

2.3. Işınım özellikleri (Radiative properties)

Işınım özelliklerinden biri olan soğurma özelliği, yüzey yada malzeme tarafından absorbe edilen ışınım miktarı olarak tanımlanır ve malzemenin yapısal özelliklerine bağlıdır. Soğurma özelliği, $[A = \ln(I_\lambda / I_{\lambda+d\lambda})]$ formülü ile ifade edilir [23]. Burada I_λ gelen ışınım ve $I_{\lambda+d\lambda}$ numuneden geçen ışınım şiddetini göstermektedir. Alt indislerdeki λ ve $(\lambda + d\lambda)$ gösterimi, dalga boyu aralıklarındaki soğurma özelliğinin değişimi için kullanılmıştır. Numunelerin 250-800 nm dalga boyu aralığındaki soğurma değerleri, Perkin Elmer Lambda 750 spectrophotometer cihazında, oda sıcaklığında ve parçacık ile etanolün ultrasonic tip karıştırıcı ile karıştırılarak hazırlanan çözeltisinde ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar üç kez tekrarlanarak, sonuçların doğruluğu teyit edilmiştir.

Parçacıklar veya yüzeyler üzerindeki oksitlenme bölgelerinin ışınım özelliklerine etkilerini hesaplamak üzere bir kaç çalışma yapılmış ve denklemler tanımlanmıştır. Şekil 4'de görülen metal yüzey üzerindeki oksitli tabaka ile ışınım soğurulması durumu, Eş. 1'de verilen uyarlanmış Beer yasası ile ifade edilir. Burada, ΔR metal numunenin dalga boyuna bağlı ışınım yansıtmasını (boyutsuz), d oksitli tabakanın kalınlığını (nm) ve $\mu(\lambda)$ istenilen dalga boyundaki oksitlenmiş tabakanın soğurma katsayısını (nm^{-1}) göstermektedir.



Şekil 4. Oksidasyon bölgesinin ve metal yüzeyin ışınım yansıtması (reflection of oxidation layer and metallic surface).

$$\Delta R_{\text{oksit}} = \frac{I_i}{I_0} = e^{-2\mu(\lambda)d} \quad (1)$$

2.4. Isıl iletkenlik (Thermal conductivity)

Bir maddenin ısı iletebilme kabiliyeti olarak tanımlanan ısı iletkenlik, Fourier ısı iletim kanunu kullanılarak sürekli rejim şartlarındaki deneyler ile belirlenen, sıcaklıkla değişebilen bir özelliktir. Katılarda ısı iletkenlik $k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$ şeklinde yazılır. Burada ρ yoğunluk (kg/m^3), α ısı yayılım katsayısı (m^2/s) ve C_p sabit basınçtaki ısı kapasitedir. Ayrıca katıların ısı iletkenliği k_e ve k_l şeklindeki iki bileşenden

oluşmaktadır ($k = k_e + k_l$). Burada k_e , serbest elektronların hareketi ile oluşan ısı iletkenliği ve k_l ise moleküller arası boşluklardaki (latice) titreşim dalgalarının oluşturduğu ısı iletkenliği ifade etmektedir. Literatürde katıların ısı iletkenliği için tanımlanmış dokuz model bulunmaktadır. Bunlar parçacıkların yapısal özelliklerini, içindeki gaz miktarını ve sıcaklık ile k_e ve k_l değişimini dikkate alırken, üç modelde ışınlama ısı transferini dikkate alarak ısı iletkenliği modellemektedir. Genel olarak deneysel çalışmalardan, katılardaki gözeneklilik artışının, ısı iletkenliği azalttığı tespit edilmiştir. Magnetit ve hematit üzerine çalışmalar yapan Molgaard ve Smeltzer [24], içeriğindeki Mg, Ni, Si, Cu < %0,001 ve Al, Cr, Mn, T < %0,001-0,01 olan hematit numuneler ile 340-675 K sıcaklık aralığında yaptıkları deneysel çalışmalarda ısı iletim katsayısının değişimi için $k(T) = 0.0839 - 6.63 \times 10^{-5} T$ bağıntısını elde etmişlerdir. Burada sıcaklık birimi Kelvin [K], ısı iletkenlik birimi için W/deg.cm olarak değerlendirilmiştir. Metallerin ısı iletkenliği üzerine kapsamlı bir çalışma yapan Abu-Eishah [25], farklı sıcaklıklar ve farklı metalik malzemeler (alüminyum, kadmiyum, kobalt, bakır, altın, demir, lityum, magnezyum, nikel, gümüş, sodyum, titanyum vs.) için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişim fonksiyonlarını elde etmeye çalışmıştır. En küçük kareler metodunu kullanarak yapılan n . inci dereceden polinom modeli Eş. 2 ve çok değişkenli lineer olmayan model Eş. 3 ile verilmiştir.

$$k(T) = B_0 + B_1T + B_2T^2 + \dots + B_nT^n \quad (2)$$

$$k(T) = aT^b e^{cT} e^{c/T} \quad (3)$$

Eş. 2 deki $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$ polinom katsayılarını ve Eş. 3 deki a, b, c ile d sabitleri de metallere göre değişen katsayıları göstermektedir. Eş. 3 ile yapılan yaklaşımın doğruluk katsayısı $R^2=0,97$ 'dir. Yaklaşımındaki a sabiti termofiziksel özellikleri temsil ettiğinden, negatif bir sayı olmamalıdır. Demir için 100 K ile 1183 K arasındaki 23 veri kullanılarak, sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı için oluşturulan yaklaşım fonksiyonunun katsayıları $a = 2,8993$, $b = 0,59552$, $c = -0,001783$ ve $d = 129,5933$ bulunmuştur. Aynı yaklaşım fonksiyonu, 35 K ile 1183 K arasındaki 26 veri kullanılarak yapıldığında, katsayıları $a = 9,27386$, $b = 0,391312$, $c = -0,001514$ ve $d = 107,3843$ bulunmuştur. Buradaki sonuçların doğruluk katsayısı $R^2=0,9978$ 'dir. Abu-Eishah [25] yaptığı çalışmada, 49 metalin 28'in de çok değişkenli lineer olmayan yaklaşımın iyi sonuç verdiğini, incelenen 21 metal (berilyum, bor, demir, silisyum, sodyum vs.) için polinom yaklaşımının daha iyi sonuç verdiğini tespit etmiştir.

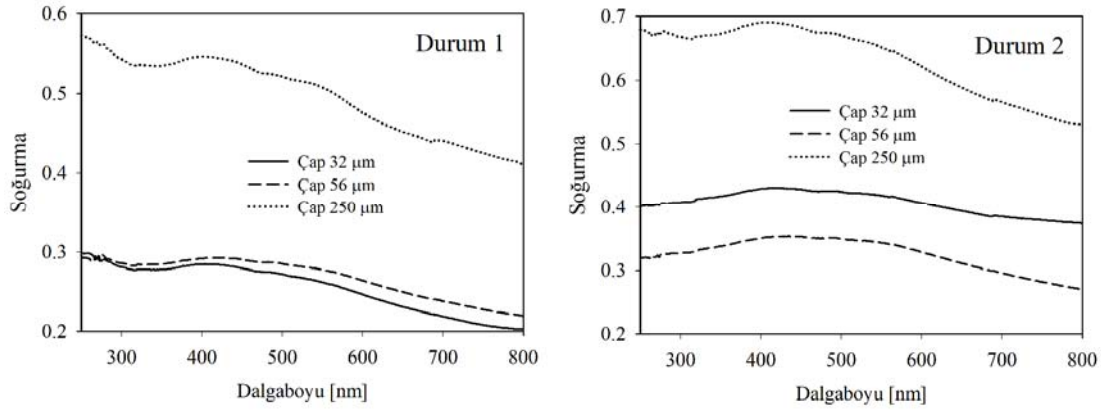
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Soğurma özelliği, parçacıkların şekline bağlı olup, büyüklük parametresindeki ($x = \pi D/\lambda$) D parçacık çapı ve/veya yansıtma indeksinin sanal kısmındaki (k) değerinin yüksek

değerler almasıyla artar [26, 27]. Hematit parçacıklarının farklı yansıtma indeks değerleri için soğurma özelliği, discrete dipole approximation (DDA) yaklaşımı ile önceki çalışmamızda [21] incelenmişti. Bu çalışma ile yansıtma indeksi $m=3,12+ i0,82$ olduğunda, soğurma özelliği literatürde tanımlı diğer yansıtma indeks değerleriyle hesaplanan soğurma değerlerinden yüksek olduğu görüldü. Durum 1 ve Durum 2 numunelerinin soğurma özelliklerinin $250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$ dalga boyu aralığındaki değişimi Şekil 5’de verilmektedir. Işınm özelliklerinde, küçük çaplı numunelerin soğurma değeri birbirlerine yakın değerlerde iken, büyük çaplı numunelerin soğurma değerleri diğerlerinin yaklaşık 1,5 kat büyük olduğu Şekil 5’den görülmektedir. Dalga boyundaki artış ile soğurma özelliğindeki azalma her iki numune için söz konusudur. Buradaki sonuçlarımız, Hsu ve Matijević [6]’in parçacık büyüklüğünün soğurma özelliğini etkilediği sonucunu teyit etmektedir. Soğurma değerlerinin dalga boyu ile değişiminde; Durum 2 numunelerinin sonuçları, Durum 1 numunelerinkinden belirgin olarak farklı trendler göstermektedir. Bu durum, hematit parçacıkları ve oksitlenme bölgelerinin metal içerik değerlerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Parçacık büyüklüğünden (D) kaynaklanan artışın yanında, oksitlenme bölgesinin soğurma özelliğine etkisi Eş. 1 ile değerlendirilmiştir. Parçacıklar üzerindeki oksitlenmiş bölge uniform kalınlıkta olmadığından, ölçümde görülen $\sim 4,2 \mu\text{m}$ lik kalınlık kullanılarak tüm çaplar için hesaplama yapıldığında; Durum 1’in 32, 56 ve 250 μm lik numunelerinin oksitlenme bölgelerinin ortalama soğurma değerleri 0,0352, 0,0372 ve

0,0824 olarak bulunur. Durum 2’de 32, 56 ve 250 μm lik numunelerin oksitlenme bölgelerinin ortalama soğurma değerleri 0,062, 0,047 ve 0,1203 olarak elde edilmektedir. Buna göre, Durum 2 numunelerinin oksitlenme bölgelerinin soğurma değerleri Durum 1 numunelerinkinden büyüktür. Bu sonuçlar, oksitlenme bölgelerinin ışım üzerine etkilerini inceleyen Chen ve Tu [19]’nun sonuçları ile uyumludur.

Isıl iletkenlik özellikleri iki ayrı cihaz ile ölçülerek değerlendirilmiştir. Önce Hot Disk TPS2500S (Thermal Constant Analyser-TCA) cihazı ile ortam sıcaklığı 24°C olan laboratuvar şartlarında yapılmış ve bir kaç kere tekrarlanarak doğruluğu teyit edilmiştir. Hot Disk TPS2500S cihazı 25°C ile 180°C sıcaklıkları arasında çalışan, hassasiyeti yüksek ve hızlı ölçüm yapabilen bir cihazdır. Metal plakaların k_e ölçümlerinde, slap modül için 5501F1 model Kapton yalıtkanlı gri sensör, parçacıklı (toz) numunelerin ölçümlerinde, isotropik modül için 5465F1 model Kapton yalıtkanlı gri sensör kullanılmıştır. Parçacıklı numunelerin k_e iletkenliği, özgül ısı ve ısıl yayım katsayısı gibi özellik ölçüm sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Burada, ısıl özelliklerin parçacık büyüklüklerine göre değiştiği görülmektedir. Isıl işlem öncesindeki demir numunelerin ısıl özellikleri ise ($25\text{-}150^\circ\text{C}$) sıcaklık aralığında ölçülerek Tablo 5’de sunulmuştur. Tablo 5’den görüldüğü üzere, demir numunelerin ısı iletim katsayıları, sıcaklık arttıkça artmıştır. Durum 1 numunesinde sıcaklık artışıyla ısı iletim katsayısındaki artış $\sim\%5$ ve Durum 2 numunesindeki artış $\%7,7$ olmuştur. Durum 2’nin ısı iletim katsayıları, Durum 1



Şekil 5. Durum 1 ve Durum 2 numunelerinin UV-görünür (250-800 nm) dalga boyu aralığında ölçülen soğurma değerleri (The experimental absorption results of Case 1 and Case 2 in the range of the UV-visible wavelength spectrum).

Tablo 4. Hematit parçacıkların oda sıcaklığındaki ısıl özelliklerinin ölçüm sonuçları (The experimental results of thermal properties of the hematite particles at room temperature).

	Durum 1			Durum 2		
	k_e (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)	k_e (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)
Parçacık büyüklüğü (μm)	37	0,054	0,5448	0,1138	0,056	0,4090
	56	0,046	0,1628	0,2816	0,054	0,4253
	125	0,052	0,2854	0,1883	0,063	0,6081

numunesinin incelenen sıcaklık aralığındaki ısı iletim katsayılarından %17 ile %19,7 kadar daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Durum 1 ve Durum 2 parçacıklı numunelerin ısı iletkenlikleri, başka bir cihaz ile P.A. Hilton marka deney seti kullanılarak, aynı ısı güçlerinde ve düşük sıcaklık aralıklarında (30-50°C) yapılmıştır. Klasik ve en bilinen ölçüm tekniği kullanılan ve maksimum 120°C sıcaklığa çıkabilen deney düzeneğinde, ekstenel yöndeki ısı geçişi U tipi termokupullar ile ölçülmektedir. Pirinç malzemeden yapılmış numune kabı 2,3 cm çapında ve 1,5 mm derinliğinde olup, ağırlığı 14,520 gr'dır. Her numunenin ölçümü aynı laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiş ve üç kez tekrarlanmıştır. Bu deney düzeneği ile ölçülen ısı iletim katsayısı değerleri Şekil 6'da grafik olarak verilmektedir. Ölçüm sonuçlarının hassasiyeti $\pm\%8$ 'dir. Ölçüm cihazının numune kabına doldurulan hematit parçacıkların ısı iletim katsayısı Fourier Yasasına göre hesaplanmıştır. Durum 1'in orta ve büyük ölçekli parçacıklara sahip numuneleri 25-50°C sıcaklık aralığında, yaklaşık ısı iletim katsayısına sahip oldukları Şekil 6'dan görülmektedir. 32 μm 'lik Durum 1 numunesinin ısı iletim katsayısı, diğer büyüklükteki numunelerden biraz daha küçüktür. Durum 2 numunelerinin ısı iletim katsayıları aynı sıcaklık aralığında benzer bir değişim trendi göstermektedir.

Hematit numunelerin ısı iletim katsayılarının değerlendirilmesinde, literatürdeki iki deneysel çalışma sonuçlarının burada tekrar yorumlanması uygun olacaktır. Bunlardan biri, Akiyama vd. [20] ortalama parçacık çapı 1 μm olan hematit (%99,9 saflıkta) malzemelerden yapılmış ve %0,1'den daha küçük gözenekli disk şeklinde preslenmiş

numuneler ile yaptıkları ısı iletkenlik ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesidir. Deneysel sonuçlara polinom şeklinde bir yaklaşım uygulandığında ($R^2 = 0,9959$), aşağıdaki Eş. 4 elde edilmektedir.

$$k(T) = -2 \times 10^{-8} \cdot T^3 + 6 \times 10^{-5} \cdot T^2 - 0,0675 \cdot T + 32,115 \quad (4)$$

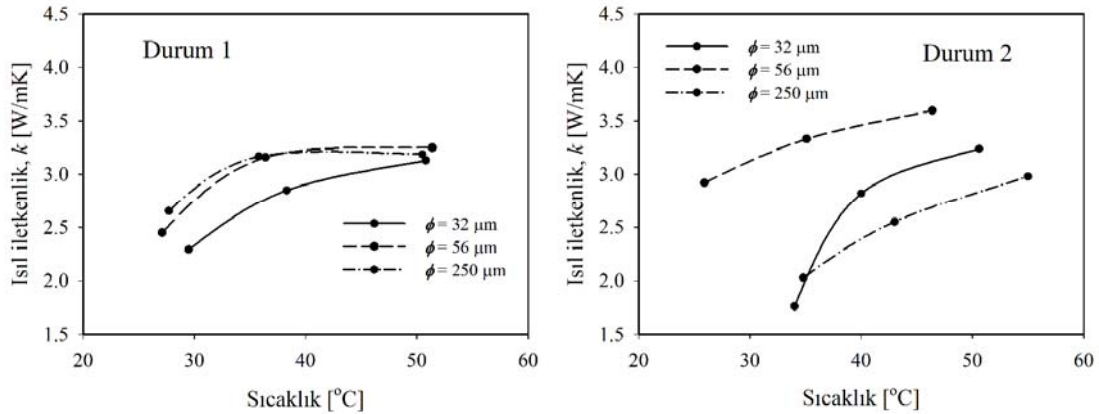
Diğer çalışma olarak, Molgaard ve Smeltzer [23]'in deneysel çalışmalara dayanan lineer yaklaşım ifadesi yukarıda bahsedilmiştir. Bu çalışmada 1,18 mm ile 510 ve 537 μm 'lik hematit numunelerin ısı iletkenlikleri termokupullar ile $\pm\%2$ lik hassasiyetle ölçülmüştür. 1,18 mm'lik numunelerin ısı iletkenliklerinin 0,065 W/deg.cm değerinden, 240 K lik sıcaklık değişimi sonucunda, hızlı düşüşle 0,045 W/deg.cm değerine azaldığı görülmektedir. Aynı çalışmada, 510 μm lik hematit numunelerin $\sim 0,056$ W/deg.cm değerinden, aynı sıcaklık değişimi sonucunda, $\sim 0,042$ W/deg.cm değerine düştüğü görülmüştür.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, Akiyama vd. [20]'nin çalışmasındaki parçacıklar, incelediğimiz 37 μm , 56 μm ve 125 μm büyüklükteki parçacıklardan çok küçüktür. Dolayısıyla ölçüm sonuçlarını direkt karşılaştırmak yerine, ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişimi incelendiğinde, her iki hematit numunelerin artan sıcaklıkla benzer bir değişim trendine sahip oldukları sonucuna ulaşılmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklıktaki kaynak işleminden sonra, oksitlenmiş hematit parçacıklarının ısı iletim katsayısı ölçüldüğünde, Akiyama vd. [20]'nin 1400 K'de ölçülen ısı iletim katsayısı 5 W/mK'den daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmamızda kullanılan hematit numunelerin içerik analizleri, bahsedilen literatür çalışmalarından farklı olup,

Tablo 5. Isıl işlem öncesindeki demir plaka numunelerin farklı sıcaklıklarda ölçülen ısı özellikleri
(The experimental results of thermal properties of the iron samples before heat process)

Sıcaklık (°C)	Durum 1			Durum 2		
	k (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)	k (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)
26	20,6	3,55	5,657	24,83	3,61	6,876
100	21,36	3,78	5,647	26,58	3,85	6,912
150	21,68	3,94	5,503	26,90	4,00	6,720



Şekil 6. Durum 1 ve Durum 2 parçacıklı numunelerinin düşük sıcaklıklarda ölçülen ısı iletkenlik değerleri
(The experimental results of the Case 1 and Case 2 samples at low temperatures).

yüksek oranlarda Mn, P, Si, Al, Cr ve Cu bileşenlere sahiptir. İncelenen parçacık büyüklükleri Akiyama vd. [20] çalışmalarındaki hematit parçacıklarından oldukça büyük, Molgaard ve Smeltzer [24]'in çalışmalarından oldukça küçüktür. Ancak, ortak elde edilen sonuç, hematit numunelerin ısı iletkenliğinin yüksek mertebeden polinomial değiştiği, küçük sıcaklık aralığında bu değişimin lineer olduğu. İçeriğindeki Mn, P, Si, Al, Cr ve Cu bileşenlere göre, ısı iletkenlik değeri belirgin farklılık göstermektedir. Bu bileşenler yüksek ise, ısı iletim katsayısı yüksek değerler almaktadır. Bir diğer önemli sonuç, daha önceki deneysel çalışmalarda genellikle ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi bir polinom ile tanımlanmaktadır. Çalışmamız ile, sıcaklığın yanında, parçacık çapları arasındaki farklılıkların ısı iletkenlik özelliklerine etkilerinin gösterilmesidir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yüksek sıcaklıktaki ısı işlem sonucu oluşan hematit parçacıkların çaplara göre ayrıştırılması yapılmıştır. İçeriklerindeki elementlerin farklılıklarından dolayı Durum 1 ve Durum 2 olarak sınıflandırılmıştır. Numunelerin görünür dalga boyu aralığındaki soğurma özelliği ve oda sıcaklıklarındaki ısı iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Parçacık boyutlarının etkisi, ısı iletkenlikten daha ziyade soğurma özelliğinde daha belirgindir. Büyük çaplı parçacıklara sahip numunelerin hem soğurma hem ısı iletkenlik özellikleri diğer küçük çaplı parçacık değerlerinden daha yüksektir. Durum 2 numunesinin soğurma ve ısı iletkenlik değerleri, Durum 1 numunesinin değerlerinden yüksektir. Burada Durum 2 numunesinin oksitlenmiş tabakasındaki Si, Mn, Al, Cr içeriklerinin Durum 1 numunesine göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Query M.R., Optical constants of minerals and other materials from the millimeter to the ultraviolet, CRDEC-CR88009, US Army Chemical Research, Development and Engineering Center, Aberdeen Proving Ground, MD, 331, 1987.
2. Sokolik IN, Toon OB, Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol, *J. Geophys. Res.*, 104 D8 9423-44, 1999.
3. Kaynar M.B., Toprak A., Özcan Ş., Saturation magnetization change with structure in CoFe₂O₄ nanostructures prepared from metallic iron and cobalt by wet grinding method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 1101-1108, 2019.
4. Shi Z., Bonneville S., Krom M.D., Carslaw K.S., Jickells T.D., Baker A.R., Benning L.G., Iron dissolution kinetics of mineral dust at low pH during simulated atmospheric processing, *Atmos. Chem. Phys.* 11, 995-1007, 2011.
5. Zboril R., Mashlan M., Petridis D., Iron(III) Oxides from Thermal Processes Synthesis, Structural and Magnetic Properties, Mossbauer Spectroscopy Characterization, and Applications, *American Chem. Mater.*, 14 (3), 969-982, 2002.
6. Hsu WP., Matijević E., Optical properties of monodispersed hematite hydrosols, *Applied Optics* 24 (11) 1623-1630, 1985.
7. Cherepy NJ., Liston DB., Lovejoy JA., Deng H., Zhang JZ., Ultrafast studies of photoexcited electron dynamics in γ - and α -Fe₂O₃ semiconductor nanoparticles, *J. Phys. Chem. B*, 102, 770, 1998.
8. Lu L., Li L., Wang X., Li G., Understanding of the finite size effects on lattice vibrations and electronic transitions of nano α -Fe₂O₃, *J. Phys. Chem. B*, 109, 17151-17156, 2005.
9. Bedidi A., Cervelle B., Light scattering by spherical particles with hematite and goethite like optical properties: effect of water impregnation, *J Geophys Res-Sol Ea*, 98 B7, 11941-11952, 1993.
10. Muñoz O., Volten H., Hovenier J.W., Min M., Shkuratov Y.G., Jalava J.P., van der Zande W.J., Waters L.B.F.M., Experimental and Computational study of light scattering by irregular particles with extreme refractive indices: hematite and rutile, *Astronomy & Astrophysics*, 446, 525-535, 2006.
11. Meland B., Kleiber P.D., Grassian V.H., Young M.A., Visible light scattering study at 470, 550 and 660 nm of components of mineral dust aerosol: Hematite and Goethite, *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 112, 1108-1118, 2011.
12. Chakrabarty S., Catterjee K., Oriented growth of α -Fe₂O₃ nanocrystals with different morphology and their optical behavior, *Journal of Crystal Growth*, 381, 107-113, 2013.
13. Chen L., Yang X., Chen J., Liu J., Wu H., Zhan H., Liang C., Wu M., Continuous shape- and spectroscopy—tuning of hematite nanocrystals, *Inorg Chem*, 49, 8411-8420, 2010.
14. Legodi MA, De Waal D., The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste, *Dyes and Pigments*, 74, 161-168, 2007.
15. Wheeler D.A, Wang G., Ling Y., Li Y, Zhang Z., Nanostructured hematite: synthesis, characterization, charge carrier dynamics, and photoelectrochemical properties, *Energy Environ. Sci.*, 5, 6682, 2012.
16. He YP., Miao YM., Li CR., Wang SQ., Cao L., Xie SS., Yang GZ., Zou BS., Burda C., Size and structure effect on optical transitions of iron oxide nanocrystals, *Phys. Rev. B*, 71, 125411, 2005.
17. Degueldre C., Fuks L., Schenker E., Pre-oxidation of stainless steel: a study by diffuse reflection spectroscopy, *Applied Surface Science*, 134, 254-262, 1998.
18. Goossens V., Wielant J., Van Gils S., Finsy R., Terryn H., Optical properties of thin iron oxide films on steel, *Surf. Interface Anal.* 38, 489-493, 2006.

19. Chen YH, Tu KJ, Thickness dependent on Photocatalytic activity of hematite thin films, *Int J Photoenergy*, Article ID 980595, 2012.
20. Akiyama T., Ohta H., Takahashi R., Waseda Y., Yagi J., Measurement and modelling of thermal conductivity for Dense Iron Oxide and Porous Iron Ore Agglomerates in stepwise Reduction, *ISIJ International*, 32 (7), 829-837, 1992.
21. Doner N., Pargan AR., Aygahoglu A., Liu F., Sen F., Radiative properties of hematite particles in the UV-visible Spectrum, *International Journal of Thermal Sciences*, 139, 79-87, 2019.
22. Pargan A.R., Kaynak sonrası oluşan gaz içindeki partiküllerin Işınım Özelliklerinin İncelenmesi, Master of Science Thesis, Kütahya Dumlupınar University, Science Institution, Kütahya, 2018.
23. Howell J.R., Siegel R., Mengüç M.P., *Thermal Radiation Heat Transfer Fifth Edition*, CRC Press, Taylor & Francis Group New York, 2010.
24. Molgaard J., Smeltzer W.W., Thermal conductivity of Magnetite and Hematite, *Journal of Applied Physics*, 42 (9), 3644-3647, 1971.
25. Abu-Eishah, S.I. 2001. Correlations for the thermal conductivity of metals as a function of temperature, *International Journal of Thermophysics*, 22 (6), 1855-1868, 2001.
26. Kahnert M., Nousiainen T., Mauno P., On the impact of non-sphericity and small-scale surface roughness on the optical properties of hematite aerosols, *Goethite, J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 112, 1815-1824, 2011.
27. Rother T., Schmith K., Wauer J., Shcherbakov V, Gayet J-F, Light scattering on Chebyshev particles of higher order, *Appl Opt.*, 45, 6030-7, 2006.



Analysis of rheological properties of modified bitumen with hybrid polymers

Esma Sarışın¹ , Erkut Yalçın¹ , Jülide Öner^{2*} 

¹Department of Civil Engineering, Firat University, Elazığ, 23000, Turkey

²Department of Civil Engineering, Usak University, Usak, 64000, Turkey

Highlights:

- Bitumen samples were modified with hybrid polymers.
- The plastomeric additive adversely affected the flexibility of the bitumen samples.
- The utilization of hybrid polymers improved the high temperature behavior of bitumen.

Keywords:

- Bitumen
- Elastomer
- Plastomer
- Hybrid additive
- Rheology

Article Info:

Research Article
Received: 26.03.2020
Accepted: 18.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.709653

Correspondence:

Author: Jülide Öner
e-mail:
julide.oner@usak.edu.tr
phone: +90 276 221 2746

Graphical/Tabular Abstract

Hybrid modification is defined as the use of two different types of asphalt additives together to achieve an improved modification. Improving performance, reducing costs and utilizing waste materials are the main implementation objectives of the hybrid modification. In this study, the effects of elastomeric (styrene-butadiene-styrene (SBS), Kraton[®] D1101) and plastomeric (Titan[®] 7686) additives on the rheological properties of polymer modified bitumen were investigated. As a conclusion, environmental and economic benefits could be achieved by using hybrid polymers in bitumen modification instead of the high cost elastomer.

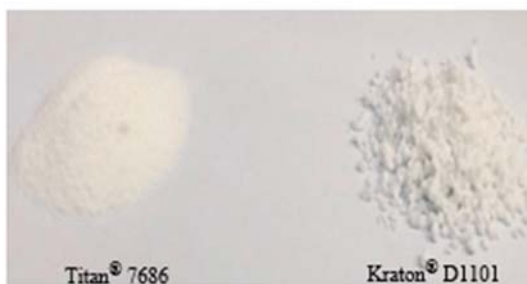


Figure A. Polymer additives used in hybrid form

Purpose:

In the study, it is aimed to reduce the usage rate of the high cost elastomer and obtain a hybrid additive with the addition of a lower cost plastomer, thereby producing a more economical hybrid polymer with similar performance with elastomer modified bitumen.

Theory and Methods:

For the purpose of the study, following to the preparation of modified bitumen samples with hybrid polymers, effects of additives on the rheology of bituminous binders have been evaluated by Dynamic Shear Rheometer and Bending Beam Rheometer tests at high and low temperatures respectively.

Results:

The utilization of hybrid polymers resulted in improved rutting resistance performance at both low and high frequencies. Besides it was also found that 3.5% SBS + 1.0% Plastomeric additive has more pronounced effect against rutting compared to the modification with SBS polymer. Bitumen samples containing plastomer additive exhibited the highest $G^* \cdot \sin \delta$ value at all intermediate temperatures. Higher $G^* \cdot \sin \delta$ values is not preferable since the samples with higher $G^* \cdot \sin \delta$ values exhibit fatigue cracking. According to the Bending Beam Rheometer test results applied on long-term aged modified bitumen samples in order to determine the low temperature performance, it was determined that polymer and hybrid polymer modification process did not change the low temperature performance level of bituminous binders.

Conclusion:

Within the scope of this study, modification process was carried out using two different commercial polymers. It was determined that in case of using 3.5% SBS + 1.0% Plastomeric additive, General Directorate of Highways specification requirements were met and similar performance was achieved with 4.5% SBS. Results indicated that polymer additives could be used together for higher rigidity and elastic behavior. The positive results obtained support the idea that environmental and economic benefits can be achieved by using hybrid polymers in bitumen modification.



Hibrit polimerlerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin incelenmesi

Esmâ Sarışın¹, Erku Yalçın¹, Jülide Öner^{2*}

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

²Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Bitüm numuneleri hibrit polimerler ile modifiye edildi
- Plastomerik katkı, bitüm numunelerinin esneklik yeteneğini olumsuz etkiledi
- Hibrit polimerlerin kullanımı bitüm numunelerinin yüksek sıcaklık davranışını iyileştirdi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 26.03.2020
Kabul: 18.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.709653

Anahtar Kelimeler:

Bitüm,
elastomer,
plastomer,
hibrit katkı,
reoloji

ÖZET

Uygulama bölgelerinde servis ömrü boyunca yeterli performans sağlayabilecek üstyapı kaplama tabakaları inşa edebilmek amacıyla uygun bağlayıcı seçimi büyük önem arz etmektedir. Trafik ve iklim koşullarından dolayı üstyapı kaplama tabakaları aşırı gerilmelere maruz kalmaktadır. Esnek üstyapı kaplama tabakalarının ana bileşenlerinden olan bitümlü bağlayıcıların özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli katkı malzemeleri modifikasyon amacıyla kullanılmaktadır. Modifikasyon yöntemiyle bitümlü bağlayıcıların mühendislik ve elde edilen asfalt karışımların mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Hibrit modifikasyon, geliştirilmiş bir modifikasyon elde etmek için iki farklı tipte asfalt katkı malzemesinin birlikte kullanılması yöntemidir. Bağlayıcı ve karışımların performanslarının iyileştirilmesi, maliyetlerin azaltılması ve atık malzemelerden faydalanılması hibrit modifikasyonun başlıca amaçlarındandır. Çalışma kapsamında, elastomerik (stiren-butadien-stiren (SBS), Kraton® D1101) ve plastomerik (Titan® 7686) katkı maddeleri ve bunların kombinasyonunun bitüm modifikasyonunda kullanılmasıyla bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda hem elastomerik hem de plastomerik katkı maddelerinin bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiği belirlenmiştir. Plastomerik katkı maddesi bağlayıcıların esnekliğini olumsuz etkilemiştir. Katkıların birlikte kullanımı değerlendirildiğinde %3,5 SBS +%1,0 Plastomerik katkı kullanılması durumunda Karayolları Genel Müdürlüğü şartname gereksinimlerinin karşılandığı, %4,5 SBS ile benzer performans seviyesinin sağlandığı tespit edilmiştir.

Analysis of rheological properties of modified bitumen with hybrid polymers

HIGHLIGHTS

- Bitumen samples were modified with hybrid polymers
- The plastomeric additive adversely affected the flexibility of the bitumen samples
- The utilization of hybrid polymers improved the high temperature behavior of bitumen

Article Info

Research Article
Received: 26.03.2020
Accepted: 18.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.709653

Keywords:

Bitumen,
elastomer,
plastomer,
hibrit additive,
rheology

ABSTRACT

In the application areas, the selection of suitable binders is of great importance in order to build superstructure coating layers that can provide sufficient performance throughout the service life. Due to traffic and climate conditions, the superstructure coating layers are exposed to excessive stresses. Various additives are used for modification in order to improve the properties of bituminous binders, which are one of the main components of flexible superstructure coating layers. With the modification method, the engineering properties of the bituminous binders and the mechanical properties of the asphalt mixes obtained can be improved. Hybrid modification is a method of using two different types of asphalt additives together to achieve an improved modification. Improving the performance of binders and mixtures, reducing costs and utilizing waste materials are among the main objectives of hybrid modification. In the study, the effects of elastomeric (styrene-butadiene-styrene (SBS), Kraton® D1101) and plastomeric (Titan® 7686) additives and their combination on the rheological properties of the binders were investigated using bitumen modification. As a result of the experimental study, it has been determined that both elastomeric and plastomeric additives improve the high temperature performance of bituminous binders. The plastomeric additive adversely affected the flexibility of the binders. When using the additives together, it was determined that if 3.5% SBS + 1.0% Plastomeric additive is used, the General Directorate of Highways specification requirements were met and a similar performance level was achieved with 4.5% SBS.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: esmasarisin@hotmail.com, erkutyalcin@firat.edu.tr, julide.oner@usak.edu.tr /

Tel: +90 276 221 2746

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde sürekli artan trafik hacimleri ve ağır yüklü taşıtlar nedeniyle asfalt kaplamalı karayolu üstyapılarının servis ömürleri önemli oranda azalmaktadır. Diğer yandan bitümlü malzemelerin sıcaklığa karşı duyarlılığı asfalt kaplamaların bozulmasını hızlandırmaktadır [1]. Hava sıcaklığının yüksek veya düşük olması, özellikle Türkiye gibi genellikle karasal iklimin hakim olduğu ülkelerde kaplama performansını olumsuz etkileyen başlıca sorunlar arasında yer almaktadır. Bitümlü bağlayıcı özelliklerini iyileştirmek, bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını azaltmak, bitümün dayanıklılığını dolayısıyla kaplamanın hizmet ömrünü arttırmak, soyulma, tekerlek izi, yorulma ve yaşlanmaya karşı direnci arttırmak amacıyla başta polimerler olmak üzere çeşitli katkıları kullanılmaktadır [2].

Bitümlü bağlayıcılar, yüksek sıcaklıklarda akışkan ve düşük sıcaklıklarda kırılabilir özelliğe sahip sıcaklığa duyarlı viskoelastik malzemelerdir [3]. Bu nedenle sıcaklık ve uygulanan yük miktarı, bitümün reolojik davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik karakteristiklerinin birbirlerinden farklı olmasının en önemli sebebi moleküler kombinasyonu tarafından oluşturulan elastik ağı çeşitliliğidir [4-6]. Bu viskoelastik dengenin, bir bitümlü bağlayıcı içinde polimer katkı maddeleri sayesinde moleküler birleşme yaratılarak oluşturulabileceği varsayılmaktadır [7, 8]. Etkili bir polimer, bitümlü bağlayıcı içinde moleküler etkileşimler yoluyla veya bağlayıcı ile kimyasal olarak reaksiyona girerek ikincil bir ağ veya yeni bir denge sistemi oluşturarak bitümlü bağlayıcı özelliklerini geliştirmektedir [9, 10].

Hibrit modifikasyonu, geliştirilmiş bir modifikasyon elde etmek amacıyla iki farklı tipte polimer modifiye katkı maddesinin bir arada kullanılmasıyla ortaya çıkan yeni bir yöntemdir [11-14]. Hibrit modifikasyonu güncel bir konudur ve farklı katkıların birlikte kullanılarak bitüm modifikasyonunun etkisinin artırılması üzerine sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Selvavathi vd. 2007 yılında yaptıkları çalışmada, elastomer ve reaktif polimer katkılarının bir arada kullanımının bitüm modifikasyonu üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmacılar, elastomer ve reaktif polimer kullanımıyla bitümlü malzemelerin kohezyon, adhezyon ve durabilite özelliklerinde dikkate değer gelişmeler gösterdiklerini vurgulamışlardır [15]. Mandrwalia vd. (2014) çalışmalarında stiren-butadien-stiren (SBS) polimeri ve polietilen polimerinin bir arada kullanımına yönelik bir laboratuvar çalışması yapmışlardır. Çalışmada SBS polimerinin uygun üretim koşullarında, düşük oranlarda dahi ilavesinin bitümün viskoelastik özelliklerindeki iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar daha iyi dayanım, işlenebilirlik ve elastik davranışın kazanılması adına polietilen katkısının SBS katkısıyla birlikte kullanımının avantaj sağlayacağını vurgulamışlardır [16]. Öcal vd. (2018) yaptıkları çalışmada, modifiye bitümlerin tekerlek izi ve yorulma dayanım performansının geliştirilmesini amaçlamışlardır. Modifiye bitüm elde etmek

amacıyla katkı malzemesi olarak nano magnezyum spinel oksit ve kolemanit kullanılmışlardır. Deneysel çalışma sonuçları, her iki katkıyı içeren modifiye bitüm numunelerin sünme rijitliğini arttırdığını göstermiştir [17]. Ghoreishi vd. (2018) bitüm modifikasyonunda elastomer tipi polimerler ile nano karbontüp ve nano kil malzemelerini hibrit kombinasyon şeklinde kullanmışlardır. Çalışma sonuçları, üç katkının bir arada kullanımıyla modifiye bitümlerin penetrasyon değerinin düştüğünü ve yumuşama noktası değerinin arttığını göstermiştir. Dolayısıyla araştırmacılar hibrit modifikasyon ile hazırlanan numunelerin bitüm modifikasyonunda kullanılması ile bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin azalacağı sonucuna ulaşmışlardır [11]. Kök vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada öğütülmüş atık araç lastiği ve FT-parafin ile hazırlanan bağlayıcıların reolojik ve geleneksel özelliklerini, stiren-butadien-stiren (SBS) modifiyeli bağlayıcılarla karşılaştırmışlardır. Sonuçlar katkı maddelerinin farklı kombinasyonları için farklı performanslar sergilediğini göstermiştir. Atık araç lastiği, FT-parafin ve kombinasyonlarının yüksek sıcaklıkta SBS modifikasyonundan daha iyi bir performans gösterdiğini belirlemişlerdir [18]. Arslan vd. (2020) yaptıkları deneysel çalışmada, granit kayalardan elde edilen bir kil türü olan ve Türkiye’de arı kil olarak bilinen kaolin ilavesi ile modifiye bitüm örnekleri hazırlamışlardır. Test sonuçları, kaolin katkılı bitüm ile Marshall Stabilité değerinde %11,2’ye ulaşan artışlar elde edildiğini göstermişlerdir [19]. Yan vd. (2020) çalışmalarında çeşitli oranlardaki EVA ve düşük molekül ağırlıklı amorf plastik polimerlerini bitüm modifikasyonunda kullanarak geleneksel ve reolojik deneylerle bitüm üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, katkıların tek kullanımına kıyasla iki katkının hibrit modifikasyonu şeklindeki ilavesiyle bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık davranışlarının iyileştiğini, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı dirençlerinin arttığını ve yaşlanmaya karşı daha dirençli hale geldiklerini göstermişlerdir [14]. Ezzat ve Abed (2020) çalışmalarında plastomer ve elastomer tipi polimerlerin hibrit modifikasyonu olarak kullanımını değerlendirmiş, bu amaçla deneysel çalışmada iki farklı oranda (%1 ve %3) polivinil klorür (PVC) ve %3 oranında SBS polimerinin bitümlü bağlayıcılarda kullanımını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda %3 oranında PVC ile %3 oranında SBS katkısının hibrit modifikasyonu ile hazırlanan test numunelerinin tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlak ve yaşlanma etkisine karşı orijinal bağlayıcılara kıyasla daha dirençli olduklarını belirtmişlerdir [12].

Elastomer grubu içerisinde yer alan ve yüksek maliyetlere sahip SBS polimerinin bitümlü bağlayıcılarda kullanılması viskoelastik özellikleri önemli ölçüde iyileştirmektedir. Çalışmada, yüksek maliyetli SBS polimerinin kullanım oranının azaltılarak daha düşük maliyetli bir plastomer olan Titan® 7686 ilavesi ile hibrit katkı elde edilmesi, böylece SBS modifiyeli bitüm ile benzer performansa sahip daha ekonomik bir katkı üretilmesi amaçlanmıştır. İki farklı katkının tek başına bitüm reolojisi ve genel özellikleri üzerinde yaptıkları etkileri ortaya koyabilmek amacıyla saf

bitüme öncelikle ayrı ayrı %4,5 oranında Kraton® D 1101 katkısı ve %3 Titan® 7686 katkısı ilave edilmiştir. Daha sonra söz konusu her iki katkının birlikte kullanımının etkilerini inceleyebilmek amacıyla saf bitüm %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 kombinasyonundaki katkılar ile modifiye edilmiştir. Elde edilen hibrit polimerlerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların reolojik ve geleneksel deneyler sonucundaki özellikleri belirlenerek test sonuçları yorumlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Malzemeler (Materials)

Çalışmada, İzmir Aliğa Rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfına ait bağlayıcı kullanılmıştır. Saf bağlayıcıya ait geleneksel deney sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Elastomerler, mukavemet ve elastikliğini üç boyutlu ağların fiziksel olarak çapraz şekilde bağlanmalarından elde etmektedirler. Polimere mukavemet kazandıran bileşen polistren uç bloklar olup orta bloklar (polibutadien) malzemeye esneklik sağlamaktadır [2, 4]. Elastomerin bitüm içerisinde dağılımı çok sayıda faktörden etkilenmekle birlikte bu faktörlerin arasında en önemlisi karıştırıcı tarafından uygulanan kesme kuvvetidir. Sıcak bitüme polimer eklendiğinde, bitüm hızlı bir şekilde polimer parçacıkları içerisine sızmaya başlamakta ve polimerin stiren ortamlarının çözülmesine ve şişmesine neden olmaktadır [4, 6, 8]. Karayolu uygulamalarında bitüm modifikasyonunda en fazla kullanılan katkı malzemesi SBS kökenli ve ticari

ismi Kraton® D 1101 olan üründür. Kraton® D 1101 elastomer modifikasyon katkısı ile bitüm dolayısıyla bitümlü karışımlar modifiye edilerek, yol üst yapılarının tekerlek izi oturması, agrega soyulması, ondülasyon oluşumu ve düşük sıcaklık çatlakları gibi olumsuzluklara karşı dirençli olmaları sağlanmaktadır [5, 6, 9]. SBS Kraton® D 1101 elastomer modifikasyon katkısına ait fiziksel özellikler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında SBS sınıfında incelenen Kraton® D 1101 katkısının [6, 7], üretici firmanın görüşleri ve yapılan ayrıntılı literatür çalışmaları ışığında, bitüme ağırlıkça % 3,5; %4,0 ve %4,5 içeriğinde eklenmesi uygun görülmüştür [12, 16, 18].

Plastomer türü polimerler, bitüm ile karıştırıldıklarında ortam sıcaklığında birleşerek, bağlayıcının kıvamını arttırmalarına rağmen bitümün elastikiyetini belirgin şekilde azaltmaktadırlar [1]. Isıtıldıklarında ayrışma sonrasında soğuma ile kaba bir dağılıma sebep olmaktadır. Bitümlü karışımlara plastomer ilavesi, sadece kaplamanın yüksek sıcaklık performansını iyileştirmek için uygulanmaktadır [3, 8]. Bu çalışmada Honeywell firması tarafından üretilen ve ticari adı Titan® 7686 olan plastomer türü modifiye katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Titan® 7686, yüksek sıcaklıkta polimerizasyon ve vaks oksidasyonu ile üretilmektedir. Titan® 7686 katkısının özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Ayrıca Kraton D1101 ve Titan® 7686 katkı maddeleri Şekil 1’de görülmektedir.

Asfalt karışımların adezyon özelliklerini artırarak suyun olumsuz etkilerine karşı dirençli hale getirmek ve

Tablo 1. Saf bitümlü bağlayıcının özellikleri (Properties of pure bituminous binder)

Test	Standartlar	Sonuçlar	Limitler
Yaşlandırılmamış numuneler üzerinde uygulanan deneyler			
Penetrasyon (25°C ; 0,1 mm)	TS EN 1426	57,3	50-70
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	49,85	46-54
Elastik Geri Dönme (%)	TS EN 13398	8	-
Özgül Ağırlık	TS EN 15326	1,038	-
Parlama Noktası (°C)	TS EN ISO 2592	348	230<
RTFOT (163°C) ile kısa dönem yaşlandırma sonrası			
Kütle Kaybı (%)	TS EN 12607-1	0,044	<0,5
Kalıcı Penetrasyon (%)	TS EN 1426	92,7	%50<
Yumuşama Noktasındaki artış (°C)	TS EN 1427	7,55	<9

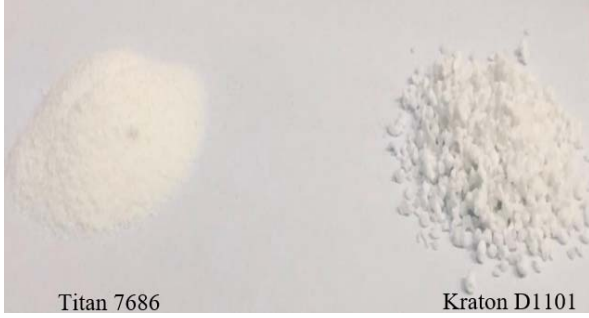
Tablo 2. Kraton® D 1101 polimerlerinin genel özellikleri [20] (General properties of Kraton® D 1101 polymers)

Kompozisyon	Standart	Sonuçlar
Moleküler yapısı		Doğrusal
Stiren / Butadien oranı		31/69
Özgül ağırlık	ASTM D792	0,94
Çekme dayanımı (MPa)	ASTM D 412	33
Sertlik (MPa)	ASTM D 2240	72
Fiziksel hali		Granül
%300 katsayısı (N/mm ²)		2,9
Akış katsayısı (g/10 min)	ASTM D 1238	<1
Uzama (%)	ASTM D 412	880
Yağ içeriği (%)	ASTM D 1546	<1

Tablo 3. Titan® 7686 polimerlerinin kompozisyonu ve fiziksel özellikleri [21]
(Composition and physical properties of Titan® 7686 polymers)

Kompozisyon	Standart	Sonuçlar
Moleküler yapısı		Yarı kristal
Özgül ağırlık	ASTM D792	0,99
Fiziksel hali		Toz
Hacim özgül ağırlık (g/cm ³)		0,625
25°C'de Sertlik (dmm)	ASTM D 2240	<0,5
Erime noktası (°C)	ASTM D 3418	137

işlenebilirliği arttırmak Titan® 7686 modifikasyon katkısının kullanım amaçlarındandır. Üretici firmanın görüşleri ve yapılan ayrıntılı literatür çalışmalarının ışığında, bitüme ağırlıkça %3 içeriğinde eklenmesi uygun görülmüştür.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan katkı maddeleri
(Additives used in the study)

2.2. Hibrit Polimerlerle Modifiye Edilmiş Bitüm Örneklerinin Hazırlanması (Preparation of Modified Bitumen Samples with Hybrid Polymers)

Kraton D® 1101 ve Titan® 7686 polimer katkıları, bitüm laboratuvarlarında; 2 saat süresince 170°C'de, yüksek devirli karıştırıcı ile 5000 devir/dakika hızda belirlenen kullanım oranlarında saf bitüm ile karıştırılmıştır. Daha sonra elde edilen modifiye bitüm örnekleri cam behere aktarılmış ve beherin ağzı alüminyum folyo ile kapatılarak modifiye bitümün sıcak ortama doğrudan maruz kalması sonucu yaşlanması engellenmiştir. Ardından, beher 170°C'ye ısıtılan etüve konulmuş, yaklaşık 16 saat olgunlaşma süresi için bekletilmiş, sürenin sonunda folyo açılmış ve 1000 devir/dakika hızda 10 dakika yüksek devirli karıştırıcı ile karıştırılarak test kalıplarına dökülmüştür. Çalışma kapsamında %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 olmak üzere iki farklı hibrit modifiye bitüm hazırlanarak incelenmiştir.

2.3. Test Yöntemleri (Test Methods)

Saf bitüme uygun üretim reçetesinde %4,5 Kraton® D 1101, %3 Titan® 7686, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 kombinasyonundaki katkıları ilave edilerek hazırlanan polimer modifiye (PMB) bitüm örnekleri üzerinde öncelikle fiziksel özelliklerin tespiti için; penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönme, parlama noktası, özgül ağırlık,

dönel ince film halinde ısıtma (RTFO), RTFOT sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılığı penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla penetrasyon indeksi değerleri hesaplanarak belirlenmektedir [22].

$$\frac{20-PI}{10+PI} = 50 * \frac{\log 800-pen}{T_{RB}-25} \quad (1)$$

Eş. 1'de pen, 25°C sıcaklıkta yapılan standart penetrasyon değerini, T_{RB} ise yumuşama noktası (halka bilye metodu) değerini ifade etmektedir. PI değeri ile ısıya karşı hassasiyet arasında ters orantı bulunmaktadır. PI değeri arttıkça ısıya karşı hassasiyet azalmaktadır [22].

Asfalt kaplamaların tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı gösterdikleri direnç dinamik kayma reometresi (DSR) ile tespit edilirken düşük sıcaklık davranışını belirleyebilmek amacıyla kiriş eğilme reometresi (BBR) cihazı kullanılmaktadır [23, 24]. Bitümlü bağlayıcıları farklı sıcaklıklardaki performanslarına göre değerlendirmek, ayrıca uygulama bölgesi iklim ve coğrafi şartlarını dikkate alarak bağlayıcıların kullanılabilirliğini tespit etmek geleneksel bağlayıcı deneylerinin yerine, performans dayalı deneyler yer almaktadır. Sistemde bağlayıcıların orta ve yüksek sıcaklıkta viskoelastik davranışlarını değerlendirmek amacıyla dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi kullanılmaktadır [25, 26].

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (G*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G*, tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G* hem de δ değerleri asfalt çimentosunun sahip olduğu ısı ve yüklenme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir. Tekerlek izi açısından bağlayıcıların yeterli dayanıma sahip olabilmeleri için G*/sin δ değeri orijinal (yaşlandırılmamış) bitüm için en az 1,00 kPa, dönel film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ile yaşlandırılmış bitüm için ise en az 2,20 kPa olmalıdır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yüksekliğindedir [25-27]. Superpave şartnamesinde yorulma çatlağına karşı direnç, DSR cihazından elde edilen G*.sinδ "yorulma çatlağı parametresi" ile değerlendirilmektedir. Bu faktörde, G* kompleks kayma modülü, δ ise faz açısıdır. Yorulma çatlağı

oluşumuna karşı direnç açısından Superpave şartnamesine göre PAV sonrası yaşlandırılmış bitümden istenilen $G^* \cdot \sin \delta$ değeri maksimum 5000 kPa'dır. Deneyde yükleme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye'dir (10 rad/s). Deneyde ortam şartlarını yansıtmaması amacıyla genelde 40°C'de deneye başlanmakta ve daha sonra test sıcaklığı 3°C azaltılarak standart deney tekrarlanmaktadır. Numune boyutları, yorulma çatlakları dayanımını tespit etmek için 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliğindedir [25-27].

Bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki reolojik özelliklerini değerlendirmek amacıyla kırış eğilme reometresi (BBR) deneyi kullanılmaktadır. Deney sıfırın altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve sabit yük uygulanan kırış şeklindeki bitümlü bağlayıcıda, bu yük altında belirli bir zamanda meydana gelen sehim değerlendirilmektedir. Deney sıcaklığı, asfaltın servis durumundaki karşılaşacağı en düşük sıcaklığa göre değişmektedir. Bu deneyde RTFOT ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyleri ile yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. Böylece hizmet ömrü boyunca kısa ve uzun dönem yaşlanmaya maruz kalan bitümlü bağlayıcı deneyde temsil edilmiş olur. Deney bilgisayar kontrollü yapılmakta ve yine bilgisayar tarafından anlık zaman-deformasyon ile zaman-sünme sertliği grafikleri çizilerek 60 sn sonundaki sünme sertliği "S" ve sünme oranı "m" hesaplanmaktadır. 60 sn için sünme sertliği değeri 300 MPa dan büyük, m değeri 0,3'ten küçük olmamalıdır. Belirli bir ısıda ve sabit bir yük altında bağlayıcının ne kadar sünme veya şekil değişimi yapacağı ölçülmektedir. Bu deney için 6,25 mm yükseklik, 12,5 mm genişlik ve 125 mm uzunlukta

hazırlanan bitümlü bağlayıcı numunesi eksi derecelerde donmayan bir sıvı banyosu içinde 980 N ve 240 saniye süreyle tek nokta yüklemesine maruz bırakılmaktadır. Deney süresince birim şekil değişimi ölçülerek sünme sertliği aşağıdaki formül yardımıyla tayin edilmektedir [28, 29].

$$S(t) = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta(t)} \quad (2)$$

Eş. 2'de S(t): t anında sünme sertliğini (MPa), P: Uygulanan sabit yükü (N), L: Kırışın yük tatbik aralığını (102 mm), b: Kırış genişliğini (12.5 mm), h: Kırış yüksekliğini (6.25 mm), $\delta(t)$: t anında yer değiştirmeyi (mm) ifade etmektedir.

3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENT RESULTS)

3.1. Geleneksel Bağlayıcı Deney Sonuçları (Traditional Binder Experiment Results)

Deneyisel çalışmalarda, saf bitüme uygun üretim reçetesinde %4,5 Kraton® D 1101, %3 Titan® 7686, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 kombinasyonundaki katkıları ilave edilerek hazırlanan polimer modifiye bitüm örnekleri üzerinde öncelikle fiziksel özelliklerin tespiti için; geleneksel bitüm deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcıların geleneksel özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılan deneylerin sonuçları Tablo 4'te detaylı biçimde verilmiştir. Penetrasyon deneyi ile asfalt çimentolarının sertlik veya kıvamlılıkları tayin edilmektedir. Penetrasyon değeri kıvamlılıkla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşamaktadır. Elastomer ve plastomer

Tablo 4. Bağlayıcıların geleneksel özelliklerini tespit etmek için yapılan deneylerin sonuçları
(Results of experiments to determine the traditional properties of binders)

Test	Standartlar	Saf Bitüm	%4,5 Kraton® D 1101	%3 Titan® 7686	%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686
Yaşlandırılmamış numuneler üzerinde uygulanan deneyler						
Penetrasyon (25°C ; 0,1 mm)	TS EN 1426	57,3	37,475	37,925	36,825	38,525
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	49,85	70,7	78,2	71,5	73,55
Elastik Geri Dönme (%)	TS EN 13398	8	85,3	*	78	*
Penetrasyon İndeksi (PI)		-0,93	2,22	3,37	2,31	2,73
Özgül Ağırlık	TS EN 15326	1,038	1,040	1,042	1,039	1,043
Parlama Noktası (°C)	TS EN ISO 2592	348	349,5	343,6	345,7	344,9
RTFOT (163°C) ile kısa dönem yaşlandırma sonrası						
Kütle Kaybı (%)	TS EN 12607-1	0,044	0,084	0,04	0,108	0,092
Kalıcı Penetrasyon (%)	TS EN 1426	92,7	73,9	80,6	95,5	85,7
Yumuşama Noktasındaki artış (°C)	TS EN 1427	7,55	1,05	1,8	0,85	6,0

* %3 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 numunelerine ait Elastik Geri Dönme yüzdeleri sonuçları test örneklerinin kopmasından dolayı tespit edilememiştir.

katkılarının tek ve hibrit polimer şeklindeki bitüm modifikasyonlarında penetrasyon değerlerinin düştüğü ve beklendiği üzere yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı görülmektedir.

Yaşlanmadan sonraki penetrasyon değerleri dikkate alındığında; kısa dönem yaşlanma (RTFOT) ile bitümler daha sert hale gelmekte ve penetrasyon değerleri düşmektedir. Tablo 4 incelendiğinde; yaşlanmadan kaynaklı meydana gelen penetrasyon değerindeki en büyük değişimin, %4,5 Kraton® D 1101 katkısıyla modifiye edilen bitüm örneğinde olduğu görülmüştür.

Tablo 4'te görüldüğü üzere yaşlanmadan sonraki yumuşama noktası değerleri göz önüne alındığında, bitümlerin yaşlanma sırasında yapılarındaki uçucu madde miktarı azalmış, dolayısıyla numunedeki yüzde asfalt oranı artmıştır. Buna bağlı olarak da bitüm örnekleri daha sert hale gelip yumuşama noktası değerleri yaşlanmadan önceki değerlerine kıyasla artmıştır. Yaşlanmayla beraber yumuşama noktasındaki en büyük artış saf bitüm numunesinde gözlemlenmiştir.

Bitüm örneklerinin penetrasyon indekslerindeki artış, bitümlerin sıcaklığa karşı duyarlılığının azaldığını göstermektedir. Penetrasyon indeksi değerleri incelendiğinde, polimer katkı kullanımı ile penetrasyon indeksi değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Elastomer ve plastomer katkı ilavesi kendi içinde değerlendirildiğinde; plastomer katkı ilavesinin elastomer katkı ilavesine kıyasla bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. Hibrit polimerler ile modifiye edilen bitüm numuneleri kendi içinde kıyaslandığında plastomer katkı oranının artırılıp elastomer oranının düşürüldüğü test örneklerinde (%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686) sıcaklığa karşı duyarlılığının en az olduğu tespit edilmiştir. Test örneklerinin elastik geri dönme yüzdeleri bir arada

değerlendirildiğinde, elastomer katkı ilavesiyle bitüm örneklerinin esneklik davranışının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca %0,5 oranından daha fazla Titan® 7686 katkısının bitüme ilavesinde numunelerin koptuğu gözlenmiştir. Dolayısıyla elastik geri dönme değerleri göz önüne alındığında Titan® 7686 katkısının en fazla bitüme ilave edilme oranının %0,5 olabileceği sonucuna varılmıştır. %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 numunesinin elastikiyet özelliğinin saf bitüm örneğine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 hibrit polimer modifiyeli bitüm ile üretilen asfalt kaplamaların elastikiyet açısından saf bağlayıcıya göre avantaj sağlayacağını göstermektedir.

3.2. DSR ve BBR deneyleri ile Katkıların Bitümlü Bağlayıcıların Reolojisine Etkilerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of the Effects of Additives on the Rheology of Bituminous Binders by DSR and BBR Experiments)

Üretilen modifiye bitüm örnekleri üzerinde; katkı türünün (elastomer, plastomer ve hibrit polimer) etkisini tespit etmek amacıyla yüksek ve orta sıcaklıkta DSR, düşük sıcaklıkta ise BBR deneyleri uygulanmıştır.

Öncelikle, hem orijinal hem de yaşlandırılmış bitüm örnekleri üzerinde, Superpave şartnamesinde belirtilen frekans değerinde (1,59 devir/saniye) ve farklı sıcaklıklarda DSR deneyi uygulanarak $G^*/\sin\delta$ parametresi elde edilmiştir. Her bir polimer ve hibrit polimer modifiye bitüm örnekleri üzerinde Superpave performans seviyesi (PG) üst sınıfını belirleyebilmek amacıyla farklı sıcaklıklarda uygulanan DSR deneyi sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda bağlayıcıların şartname gereksinimlerini sağlayabildiği son değerler kırmızı ile gösterilmiştir. Orijinal ve kısa dönem yaşlandırılmış bitümlerin $G^*/\sin\delta$ değerleri incelendiğinde sıcaklık artışı ile $G^*/\sin\delta$ değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu sonuç bitümlerin, sıcaklık artışı ile

Tablo 5. Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlere ait performans sınıfı sonuçları
(Performance class results of polymer and hybrid polymer modified bitumen)

Bitümler	Sıcaklık (°C)	DSR, $G^*/\sin\delta$ (Pa)		Performans Üst Sınıfı
		Orijinal	Yaşlandırılmış	
Saf Bitüm	64	1747,3	3642,2	PG 64
	70	822,7	1666	
	76	-	4791,2	
%4,5 Kraton® D 1101	82	1349,91	2609,53	PG 82
	88	803,056	1471,31	
	76	-	3626,77	
%3 Titan® 7686	82	1216,38	1923,09	PG 76
	88	714,994	1096,73	
	76	-	-	
%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	82	1142,95	2514,44	PG 82
	88	695,951	1400,89	
	76	-	3374,97	
%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686	82	1560,38	3310,32	PG 82
	88	900,126	1828,51	

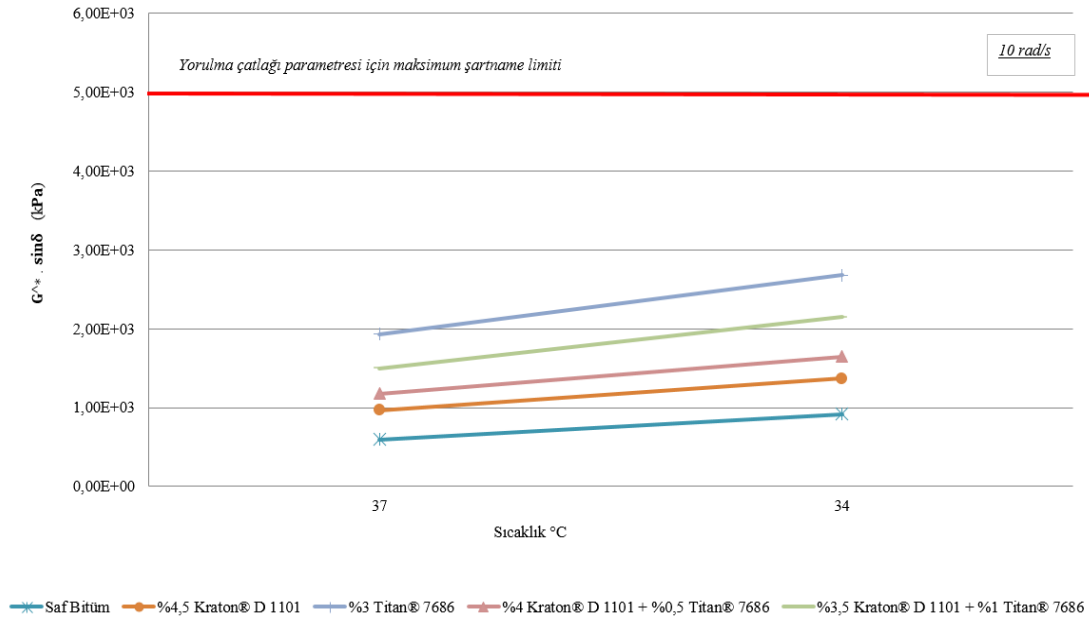
tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının azaldığının bir göstergesidir.

Test sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, elastomer ve plastomer katkılarının kullanımıyla bitümlerin performans sınıfı yüksek sıcaklık değerlerinin yükseldiği kaydedilmiştir. Bu artış, her bir polimer katkının tek başına ve hibrit kombinasyonu şeklinde kullanımı ile asfalt kaplamaların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençli hale geldiklerini göstermektedir. Kısa dönem yaşlandırma prosedürüne tabi tutulan numunelerin tekerlek izi parametreleri incelendiğinde, tek başına %3 oranında Titan® 7686 kullanılan modifiye bağlayıcının performans sınıfı yüksek sıcaklık değerinin PG 76 olduğu, diğer katkılarla hazırlanan modifiye bitümlerin ise PG 82 olduğu tespit edilmiştir.

Hibrit polimer teknolojisinin bitüm modifikasyonunda kullanımı göz önüne alındığında, %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 kombinasyonu ile hazırlanan polimer modifiye bitüm örneklerinin yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı diğer modifiye bağlayıcılara kıyasla daha yüksek dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlerin orta sıcaklıklardaki performansını belirleyebilmek amacıyla $G^*.sin\delta$ değerleri belirlenmiştir. Deneysel şartnamesine uygun olarak yüklenme

frekansı 1,59 devir/saniye olarak seçilmiştir. PAV ile uzun dönem yaşlandırılmış bitüm örnekleri üzerinde 34°C ve 37°C sıcaklıkta deney uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan modifiye bitümlerin orta sıcaklıktaki $G^*.sin\delta$ değerinin değişimi Şekil 2’de verilmektedir.

Şekil 2’de görüldüğü üzere; test edilen tüm bitüm örnekleri için sıcaklık düştükçe, $G^*.sin\delta$ değerleri artmıştır. Düşük $G^*.sin\delta$ değerlerine sahip bitümler yorulma çatlaklarına karşı daha dirençli olmaktadır. Her iki orta sıcaklıkta; saf bitüm numunesine kıyasla bütün polimerler $G^*.sin\delta$ değerlerini arttırmasına rağmen hem 34 hem de 37°C sıcaklıkta Superpave şartname limiti olan maksimum 5000 kPa gereksinimini sağlamıştır. Orta sıcaklıklarda yorulma çatlaklarının oluşumu bakımından en iyi performansı (en düşük $G^*.sin\delta$ değerleriyle), saf bitüm örnekleri göstermiştir. Plastomer katkısı ilavesiyle bitümlerinin orta sıcaklıktaki performans sınıflarını yükselttiği yani yorulma çatlaklarına karşı dayanımlarının daha düşük olabileceği tespit edilmiştir. Titan® 7686 katkısının bitüme ilavesiyle elde edilen modifiye bitümün orta sıcaklıklarda belirlenen yorulma dayanımı her ne kadar şartname sınırları içerisinde olsa da katkı oranının artmasıyla yorulma çatlakları oluşumu riskinin artabileceği sonuçlar arasında yer almaktadır.



Şekil 2. Modifiye bitümlerin $G^*.sin\delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi
(Change of $G^*.sin\delta$ values of modified bitumen with temperature)

Tablo 6. Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlere ait BBR sonuçları
(BBR results of polymer and hybrid polymer modified bitumen)

Bağlayıcı türü	Sünme Sertliği (MPa)		m-Değeri		PG düşük sıcaklık değeri
	-6 °C	-12 °C	-6 °C	-12 °C	
Saf Bitüm	113	233,95	0,4309	0,2962	-16
%4,5 Kraton® D 1101	94,97	171,2	0,3187	0,2651	-16
%3 Titan® 7686	156,27	291,32	0,3009	0,2564	-16
%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	115	191,38	0,3163	0,2618	-16
%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686	119,90	244,28	0,3209	0,2819	-16

Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlerin düşük sıcaklıklardaki performansları BBR testi ile değerlendirilmiştir. Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlere ait BBR test sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Tabloda şartname gereksinimlerini sağlayan değerler kırmızı ile gösterilmiştir.

Tablo 6'da görüldüğü üzere; -12°C sıcaklıkta bütün bağlayıcıların sünme oranları ve m-değerleri şartname limitlerinin (sünme modülü en fazla 300 MPa, m-değeri en az 0,30) dışına çıkmıştır. Bunun yanı sıra bütün bağlayıcılar -6°C sıcaklıkta şartname gereksinimini sağlamıştır. Dolayısıyla polimer ve hibrit polimer modifikasyon işlemleriyle bitüm numunelerinin düşük sıcaklık performans sınıfları değişmemiştir. SBS ilavesi ile sünme sertliği değeri düşerken plastomer ilavesi ile sünme sertliği değeri artmasına rağmen bütün bağlayıcıların -6°C sıcaklıktaki değerleri şartname limitleri arasında kalmıştır. Tüm sıcaklıklarda, sünme sertliğindeki en büyük değer, %3 oranında Titan® 7686 katkısıyla modifiye edilen bitüm

örneğinde gözlenmiştir. Bu durum; plastomer modifikasyonu ile bitümlerin daha sert bir hal aldıklarını göstermektedir. Dolayısıyla asfalt kaplamalarda düşük sıcaklık davranışını iyileştirmek için polimer ve hibrit polimer modifikasyon işleminin etkisiz olabileceği sonucu çıkmaktadır.

3.3. Deneysel Sonuçlarının EN 14023 Modifiye Bitüm Şartnamesi ile Karşılaştırılması

(Comparison of Experiment Results with EN 14023 Modified Bitumen Specification)

Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi'nde modifiye bitümlerin değerlendirilmesinde EN 14023 modifiye bitüm standardı kullanılmaktadır. Standartta yer alan şartname limitleri ve elde edilen deneysel sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

SUPERPAVE yönteminde bitümler, sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılmaktadır. Bu

Tablo 7. Deneysel sonuçlarının EN 14023 standardı ile karşılaştırılması (Comparison of test results with EN 14023 standard)

Deneysel Adı	EN 14023 standardı Şartname Limiti	%4,5 Kraton® D 1101	%3 Titan® 7686	%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686
Yaşlandırılmamış numuneler üzerinde uygulanan deneyler					
Penetrasyon	25-55 mm ⁻¹	37,5	37,9	36,8	38,5
Yumuşama Noktası	≥ 70°C	70,7	78,2	71,5	73,55
Elastik geri dönme	≥ %60 veya %70	85,3	*	78	*
Parlama Noktası	≥ 220°C	349,5	343,6	345,7	344,9
Özgül ağırlık	1-1,1 g/cm ³	1,040	1,042	1,039	1,043
Dinamik kayma reometresi @82°C	≥ 1000 Pa	1349,91	1216,38	1142,95	1560,38
Dinamik kayma reometresi @88°C	≥ 1000 Pa	803,056	714,994	695,951	900,126
RTFOT (163°C) ile kısa dönem yaşlandırma sonrası					
Kütle kaybı	≤ 0,5	0,084	0,04	0,108	0,092
Yumuşama noktasındaki artma	≤ 8°C	1,05	1,8	0,85	6
Kalıcı penetrasyon	≥ %40	73,9	80,6	95,5	85,7
Dinamik kayma reometresi @76°C	≥ 2200 Pa	4791,2	3626,77	4623,4	3374,97
Dinamik kayma reometresi @82°C	≥ 2200 Pa	2609,53	1923,09	2514,44	3310,32
Dinamik kayma reometresi @88°C	≥ 2200 Pa	1471,31	1096,73	1400,89	1828,51
PAV ile uzun dönem yaşlandırma sonrası					
Dinamik kayma reometresi @34°C	≤ 5000 kPa	1369	2681	1649	2149
Dinamik kayma reometresi @37°C	≤ 5000 kPa	966,7	1934	1176	1498
Kiriş eğilme reometresi @-6°C	≥ 0,3 ≤ 300 MPa	0,318704 94,97	0,300879 156,27	0,316268 115,00	0,320918 119,90
Kiriş eğilme reometresi @-12°C	≥ 0,3 ≤ 300 MPa	0,265074 171,2	0,256396 291,32	0,261749 191,38	0,281939 244,28

* %3 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 numunelerine ait Elastik Geri Dönme yüzdeleri sonuçları test örneklerinin kopmasından dolayı tespit edilememiştir.

nedenle, bu tür bitümlere “Performans Sınıfı (Performance Grade-PG)” bitüm adı verilmiştir [30]. Hibrit polimer katkılarının düşük ve yüksek sıcaklıkta asfalt kaplama performansındaki etkilerinin karşılaştırılması olarak daha net ortaya konulabilmesi için test örneklerine ait alt ve üst PG sınıfları Tablo 8’de sunulmaktadır.

Tablo 8. Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlere ait PG sınıfları

(PG results of polymer and hybrid polymer modified bitumen)

Bağlayıcı türü	PG Sınıfı
Saf Bitüm	PG 64-16
%4,5 Kraton® D 1101	PG 82-16
%3 Titan® 7686	PG 76-16
%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	PG 82-16
%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686	PG 82-16

Elde edilen sonuçlar EN 14023 standardı ile karşılaştırıldığında %4,5 Kraton® D 1101, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 modifiye bitümlerinin performans seviyesinin PMB 82-16 olduğu, %3 Titan® 7686 modifiyeli bitümün performans seviyesinin ise PMB 76-16 olduğu belirlenmiştir. Tablo 7’de kırmızı ile işaretlenen değerler şartname limitlerinin sağlanmadığı deney parametrelerini göstermektedir. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların deney sonuçları incelendiğinde bütün modifiye bitümler penetrasyon, yumuşama noktası ve 82°C sıcaklıkta $G^*/\sin\delta$ şartname gereksinimlerini sağlamıştır. Bağlayıcıların hepsi 82°C sıcaklıkta $G^*/\sin\delta$ şartını sağlamasına rağmen 88°C sıcaklıkta hiçbirisi bu şartı sağlayamamıştır. RTFOT ile kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları incelendiğinde %3 Titan® 7686 modifiyeli bitümün 76°C sıcaklıkta $G^*/\sin\delta$ şartname kriterlerini sağladığı fakat 82°C sıcaklıkta sağlayamadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle %3 Titan® 7686 modifiyeli bitümün performans seviyesi yüksek sıcaklık değeri PMB 76-Y olarak belirlenmiştir. Diğer bütün modifiye bitümler 82°C’de RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ şartını sağladıklarından %4,5 Kraton® D 1101, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 modifiye bitümlerinin performans seviyesi yüksek sıcaklık değerlerinin PMB 82-Y olduğu belirlenmiştir. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların elastik geri dönme deneylerinde %3 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 modifiye bitümlerde kopma meydana gelmiştir. Dolayısıyla bu bağlayıcıların düşük sıcaklıkta elastik davranışı azalmıştır. Fakat bu deney şartı sadece elastomer polimerlerle modifiye bitümlerde aranmaktadır. Dolayısıyla plastomerler için geçerli olmadığından şartname açısından herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Fakat %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 modifiye bitümde hem elastomer hem de plastomer katkı bulunduğundan bu bağlayıcı açısından olumsuzluk söz konusudur. RTFOT sonrası bütün modifiye bitümlerin kütle kaybı, kalıcı penetrasyon ve yumuşama noktası farkı şartname gereksinimlerini sağlamıştır. PAV ile yaşlandırma sonrası bütün modifiye bitümler -6°C sıcaklıkta BBR deneylerinden elde edilen sünme modülü ve m-değeri gereksinimlerini sağlamıştır. Ayrıca bağlayıcıların hiç biri -12°C sıcaklıkta BBR şartname

gereksinimlerini sağlayamamıştır. Bütün bağlayıcılar PAV kalıntılarına uygulanan DSR deneylerinden elde edilen $G^*/\sin\delta$ şartname gereksinimlerini sağlamıştır. Dolayısıyla bütün bağlayıcıların performans seviyesi düşük sıcaklık değerinin PMB X-16 olduğu tespit edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Son yıllarda artan trafik hacmi ve araç sayısı ile beraber asfalt kaplamaların maruz kaldıkları yük miktarı günden güne artmakta ve kaplamanın hizmet ömrü kısalmaktadır. Yol kaplamalarını, ağır trafik koşulları ve tekrarlı yükler altında viskoelastik davranışlarında meydana gelen bozulmalardan dolayı yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlar, düşük sıcaklıklarda ise gevrek yapı oluşumu tehdit etmektedir.

Asfalt kaplamaların yüksek maliyetleri araştırmacıları asfalt stabilitesini ve dayanıklılığını arttıracak çözümler aramaya motive etmektedir. Dolayısıyla inşaat endüstrisinde bu amaçlarla kullanılan polimer katkı stratejik bir öneme sahiptir. Bu çalışmanın asıl amacı elastomer, plastomer ve hibrit elastomer-plastomer kombinasyonunun bitümün reolojik özelliklerine etkilerinin araştırılmasıdır. Test sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir.

Elastomer, plastomer ve hibrit polimerler ile modifiye edilen bitüm numuneleri bir arada değerlendirildiğinde; plastomer katkı ilavesi asfalt kaplamaların sıcaklığa karşı duyarlılığını etkili biçimde düşürdüğü sonuçlar arasında yer almaktadır. Hibrit polimerler ile modifiye edilen bitüm numuneleri kendi içinde kıyaslandığında en yüksek plastomer oranına sahip olan %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 örneğinin sıcaklığa karşı duyarlılığının en az olduğu belirlenmiştir.

Test örneklerinin elastik geri dönme yüzdeleri bir arada değerlendirildiğinde, elastomer katkı ilavesiyle bitüm örneklerinin esneklik davranışı artmıştır. Hibrit polimerlerin kullanımı açısından %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 hibrit polimer modifiyeli bitüm ile üretilen asfalt kaplamalarının sadece plastomer içeren modifiye bitümlere göre belli zaman içinde elastikiyet bakımından bir avantaj sağlayacağı yorumlanabilmektedir.

Yüksek sıcaklıkta dinamik kayma reometresi sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, elastomer ve plastomer katkı ilavesiyle bitümlerinin performans seviyesi yüksek sıcaklık değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Performans sınıfındaki bu artış, bitüm modifikasyonunda polimer katkıların ve hibrit polimer kombinasyonunun kullanımının tekerlek izi oluşumuna karşı direnç sağladığını göstermektedir.

Orta sıcaklık performansını belirlemek amacıyla uygulanan dinamik kayma reometresi testi sonuçları irdelendiğinde, plastomer katkısı kullanılan asfalt kaplamaların yorulma çatlaklarına karşı daha riskli oldukları tespit edilmiştir. Düşük sıcaklık performansını belirlemek amacıyla uzun dönem yaşlandırılmış modifiye bitüm örnekleri üzerine uygulanan BBR testi sonuçlarına göre polimer ve hibrit

polimer modifikasyon işleminin bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyesini değiştirmedeği belirlenmiştir.

Çalışma sonuçları; daha yüksek rijitlik ve elastik davranış için modifiye katkı malzemelerinin birlikte kullanılabilirliklerini göstermektedir. Çalışma kapsamında iki farklı ticari ürün kullanılarak modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen olumlu sonuçlar özellikle atık polimerlerle birlikte ticari ürünlerin bitüm modifikasyonunda hibrit kullanılarak çevresel ve ekonomik fayda sağlanabileceği fikrini desteklemektedir. Mevcut deney sonuçlarının geçerlilik kazanması adına karışım numuneleri hazırlanarak özellikle tekerlek izi ve yorulma deneylerinin yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. İleriki çalışmalara ışık tutmak amacıyla; farklı penetrasyon sınıflarına ait bitümlerde, hibrit polimer modifikasyonu kullanımına ait maliyet azalmasına yönelik performans analizlerinin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Gonzalez O., Munoz M.E., Santamaria A., Garcia M.G Navarro F.J., Partal P., Rheology and stability of Bitumen/EVA blends, *European Polymer Journal*, 40, 2365-2372, 2004.
- Rahman M.N., Ahmeduzzaman M., Sobhan M.A., Ahmed T.U., Performance evaluation of waste polyethylene and PVC on hot asphalt mixtures, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1 (5), 97-102, 2013.
- Mohammadiroudbari M., Tavakoli A., Aghjeh M.K.R., Rahi M., Effect of nanoclay on the morphology of polyethylene modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 116, 245-251, 2016.
- Formela K., Sulkowski M., Saeb M.R., Colom X., Haponiuk J.T., Assessment of microstructure, physical and thermal properties of bitumen modified with LDPE/GTR/elastomer ternary blends, *Construction and Building Materials*, 106, 160-167, 2016.
- Daryae D., Ameri M., Mansourkhaki A., Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures, *Construction and Building Materials*, 235, 1-11, 2020.
- Schaur A., Unterberger S., Lackner R., Impact of molecular structure of SBS on thermomechanical properties of polymer modified bitumen, *European Polymer Journal*, 96, 256-265, 2017.
- Ragni D., Ferrotti G., Lu X., Canestrari F., Effect of temperature and chemical additives on the short-term ageing of polymer modified bitumen for WMA, *Materials & Design*, 160, 514-526, 2018.
- Yusoff N.I.Md., Alhamali D.I., Ibrahim A.N.H. Hassan N.A., Engineering characteristics of nanosilica/polymer modified bitumen and predicting their rheological properties using multilayer perceptron neural network model, *Construction and Building Materials*, 204, 781-799, 2019.
- Rajan S., Sutton M.A., Oseli A., Emri I., Matta F., Linear viscoelastic creep compliance and retardation spectra of bitumen impregnated fiberglass mat and polymer modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 155, 664-679, 2017.
- Gonzalez E., Costa L.M.B., Silva H.M.R.D., Hilliou L., Rheological characterization of EVA and HDPE polymer modified bitumen under large deformation at 20°C, *Construction and Building Materials*, 112, 756-764, 2016.
- Ghoreishi A., Koosha M., Nasirizadeh N., Modification of bitumen by EPDM blended with hybrid nanoparticles: Physical, thermal, and rheological properties, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1-14, 2018.
- Ezzat E. Abed A.H., Enhancement rheological properties of asphalt binder modified with hybrid polymers according to superpave system, *Materials Today: Proceedings*, Article in press, 2020.
- Lecomte M. Hacker S. Teymourpour P. Bahia H., Use of plastomeric additives to improve mechanical performance of warm mix asphalt, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague-Czech, Republic, 1-3 June, 2016.
- Yan K., Tian S., Chen J., Liu J., High temperature rheological properties of APAO and EVA compound modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 233, 1-11, 2020.
- Selvavathi V., Sekar V.A., Sriram V., Sairam B., Modifications of bitumen by elastomer and reactive polymer - A comparative study, *Petroleum Science and Technology*, 20 (5-6), 535-547, 2007.
- Mandrawalia A.K., Gaur A., Mittal A., Laboratory study on SBS modified bitumen with Titan copolymer, *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 1, 3, 5-8, 2017.
- Öcal A., Gürü M., Karacasu M., Improvement of bitumen performance properties with nano magnesium spinel and colemanite, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 939-951, 2018.
- Kok B.V., Yılmaz M., Akpolat M., Effect of CR and FT-paraffin versus SBS modification in terms of conventional and rheological properties, *International Journal of Pavement Engineering*, 18 (12), 1052-1059, 2017.
- Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Çubuk M., Farshbafian F.K., Investigation of rheological and mechanical properties of kaolin-clay modified bitumen, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1409-1419, 2020.
- KRATON. Polimer. <https://kraton.com/products/pdsDocs/polymer/D1101K.pdf>. Yayın tarihi Ocak 9, 2018. Erişim tarihi Şubat 20, 2020.
- Öner J., Farklı vaks türleri ile üretilen bitümlerin reolojik özelliklerinin asfalt betonu performansı üzerine etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2016.

22. Lav A. H., Lav M. A., Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, 3, 334, 2004.
23. Oruç Ş., Yılmaz B., Improvement in performance properties of asphalt using a novel boron-containing additive, *Construction and Building Materials*, 123, 207-213, 2016.
24. Oruç Ş., Yılmaz B., Sancak K., Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder, *Road Materials and Pavement Design*, 17 (4), 810-824, 2016.
25. Lu X., Uhlback P., Soenen H., Investigation of bitumen low temperature properties using a dynamic shear rheometer with 4mm parallel plates, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10 (1), 15-23, 2016.
26. Mehra S., Mittal A., Sharma P N., Laboratory study on CRMB modified bitumen mixes with Titan polymer. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 1 (3), 5-8, 2014.
27. Zhu J. Birgisson B. Kringos N., Polymer modification of bitumen: Advances and challenges, *European Polymer Journal*, 54 (1), 18-38, 2014.
28. Garilli E., Autelitano F., Giuliani F., Use of bending beam rheometer test for rheological analysis of asphalt emulsion-cement mastics in cold in-place recycling, *Construction and Building Materials*, 222, 484-492, 2019.
29. Zhou J., Chen X., Xu G., Fu Q., Evaluation of low temperature performance for SBS/CR compound modified asphalt binders based on fractional viscoelastic model, *Construction and Building Materials*, 214, 326-336, 2019.
30. Sağlık A., Öztürk E.A., Determination of the performance-grades of surface treatment binders in turkey, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (4), 689-698, 2014.



Multilevel thresholding with metaheuristic methods

Yağmur Ölmez^{1*}, Abdulkadir Sengür², Gonca Ozmen Koca¹

¹Mekatronik Engineering Department, Faculty of Technology, Fırat University, 23000, Elazığ, Turkey

²Electrical and Electronics Engineering Department, Faculty of Technology, Fırat University, 23000, Elazığ, Turkey

Highlights:

- A two-dimensional histogram based on non-local means filter
- A new multilevel thresholding method based on Renyi's Entropy and PSO algorithm
- Improved results compared to existing methods.

Keywords:

- Metaheuristic Methods
- Image Segmentation
- Multilevel Thresholding
- Particle Swarm Optimization

Graphical/Tabular Abstract

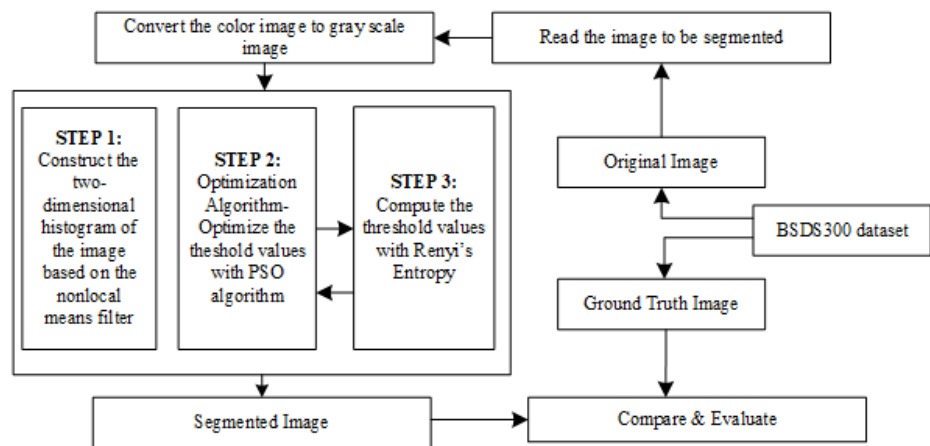


Figure A. Flowchart of the proposed method for multilevel thresholding

Article Info:

Research Article
Received: 27.04.2020
Accepted: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.727811

Correspondence:

Author: Yağmur Ölmez
e-mail: yolmez@firat.edu.tr
phone: +90 424 237 0000 / 7606

Purpose:

The aim of this study is to achieve a more precise segmentation process in a shorter time by improving multi-level thresholding performance.

Theory and Methods:

2DYOH-PSO multi-level thresholding method has been presented to increase the segmentation performance of images. In the proposed method, two-dimensional histogram method based non-local means filter was used for segmentation of gray level images. Renyi's entropy as a cost function has been redefined for multi-level thresholding in the two-dimensional histogram, and the PSO algorithm has been adapted to the problem in order to find the most appropriate threshold values by reducing the calculation time. Experimental studies were carried out using the BSDS300 data set. Thresholding at different levels were applied to the images in the data set.

Results& Conclusion:

With the proposed method, the segmentation performance of the images in the BSDS300 data set were evaluated using 12 different quality measurement indices. The proposed method has been compared with the Gravity Search Algorithm (GSA) [26], Artificial Bee Algorithm (ABC) [27], Differential Evolution (DE) [28], chaotic Kbest Gravity Search Algorithm (cKGSA) [29], exponential Kbest Gravity Search Algorithm (eKGSA) [24] methods, which were quite successful in terms of 12 quality measurement indices, and more effective results were obtained with experimental studies by using this algorithm.



Meta sezgisel yöntemlerle çok seviyeli görüntü eşikleme

Yağmur Ölmez^{1*}, Abdulkadir Sengür², Gonca Ozmen Koca¹

¹Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 23000 Elazığ, Türkiye

²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 23000 Elazığ, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Yerel olmayan ortalama filtre tabanlı iki boyutlu histogram yöntemi
- PSO algoritması ve Renyi'nin entropisine dayalı çok seviyeli eşikleme yöntemi
- Mevcut yöntemlere kıyasla geliştirilmiş sonuçlar

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.04.2020

Kabul: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.727811

Anahtar Kelimeler:

Meta sezgisel yöntemler,
görüntü bölütleme,
çok seviyeli eşikleme,
parçacık sürü optimizasyonu

ÖZET

Bu çalışmada, hesaplama zamanını azaltmak ve çok seviyeli eşikleme performansını geliştirmek için PSO yönteminin hızlı yakınsama oranı dikkate alınarak iki boyutlu yerel olmayan histograma dayalı çok seviyeli bir eşikleme yöntemi (2DYOH-PSO) önerilmiştir. Önerilen 2DYOH-PSO yöntemi iki boyutlu Renyi'nin entropisine dayalı eşikleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, Berkeley-Benchmark veri setindeki 300 görüntü için farklı seviyeli eşik değerleri dikkate alınarak yapılmıştır. Var olan 5 farklı eşik belirleme yöntemi (Diferansiyel Gelişim, Yapay Arı Algoritması, Yer Çekimi Arma Algoritması, K_{best} Yer Çekimi Arma Algoritması, Kaotik K_{best} Yer Çekimi Arma Algoritması) ile karşılaştırılarak, önerilen 2DYOH-PSO yönteminin performansı değerlendirilmiştir. 2DYOH-PSO yönteminin başarımı 12 farklı performans değerlendirme endeksi kullanılarak belirlenmiştir. 2DYOH-PSO ile 3 seviyeli eşikleme işlemi gerçekleştirildiği durumda, mevcut 5 farklı yöntem ile 12 performans değerlendirme endeksi bakımından yapılan bölütleme işlemlerinin başarımları BDE'de %2,63 oranında, PRI'de %0,83 oranında SSIM'de %15,5 oranında, RMSE'de %13,2 oranında, PSNR'de %8,63, CC'de %35 oranında, AD'de %13,9 oranında, MD'de %14,75 oranında, NAE %10 oranında iyileşme sağlanmıştır. 2DYOH-PSO ile 5 seviyeli eşikleme işlemi gerçekleştirildiği durumda ise Berkeley-Benchmark veri setindeki görüntülerin bölütlenmesinde ki başarımın BDE'de %1, VOI'de %1,4, SSIM'de %1,3, FSIM'de %0,66, RMSE'de %0,46, PSNR'de %0,46, CC'de %21,69, AD'de %0,84 oranında iyileştiği deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir.

Multilevel thresholding with metaheuristic methods

H I G H L I G H T S

- A two-dimensional histogram based on non-local means filter
- A new multilevel thresholding method based on Renyi's Entropy and PSO algorithm
- Improved results compared to existing methods

Article Info

Research Article

Received: 27.04.2020

Accepted: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.727811

Keywords:

Metaheuristic methods,
image segmentation,
multilevel thresholding,
particle swarm optimization

ABSTRACT

In this study, a multi-level thresholding method (2DYOH-PSO) based on 2D non-local means histogram is proposed, taking into account the fast convergence rate of the PSO method to reduce the computation time and improve the multi-level thresholding performance. The proposed 2DYOH-PSO method has been realized by using the two-dimensional Renyi's entropy-based thresholding method. Experimental studies are conducted for 300 images in the Berkeley-Benchmark dataset, taking into account different level threshold values. The performance of the proposed 2DYOH-PSO method is evaluated by comparing the existing 5 different threshold determination methods (Differential Evolution, Artificial Bee Algorithm, Gravity Search Algorithm, K_{best} Gravity Search Algorithm, and Chaotic K_{best} Gravity Search Algorithm). The performance of the 2DYOH-PSO method is determined using 12 different performance evaluation indices. In the case of 3-level thresholding with 2DYOH-PSO in terms of 12 performance evaluation indexes with 5 different methods, the performance of the segmentation processes shows improvements such that 2.63% in BDE, 0.83% in PRI, 15.5% in SSIM, 13.2% in RMSE, 8.63% in PSNR, 35% in CC, 13.9% in AD, 14.75% in MD, 10.04% in NAE, respectively. In the case of 5-level thresholding with 2DYOH-PSO, the performance of the segmentation processes shows 1% improvement in BDI, 0.85% in FSIM, 15.35% in RMSE, 8.88% in PSNR, 0.85% in CC and 12.8% in AD with the experimental studies.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: yolmez@firat.edu.tr, ksengur@gmail.com, gonca.ozmen@gmail.com /

Tel: +90 424 237 0000 / 7606

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Görüntü bölütleme, dijital bir görüntünün aynı özellikteki piksellerini parçalar halinde bir araya toplayarak çoklu bölümlere ayırma işlemidir. Oluşturulan her bir bölüm bölüt olarak adlandırılır ve her bölüt farklı özellik taşır. Bölütlemenin amacı, görüntüleri daha anlamlı ve analiz edilmesi kolay hale getirmek için basitleştirmek ve değiştirmektir.

Sinyallerin sınıflandırılması, kenar bulma problemleri, hasarlı doku tespiti, orman yangınlarının tespiti gibi çok çeşitli alanlarda ihtiyaç duyulan bölütleme işlemi görüntü analizinin ilk ve en önemli aşamalarından biridir. Prostat sınırının bulunması [1], lökosit hücrelerinin preparat görüntüsünden tespiti ve sınıflandırılması [2], EMG sinyallerinin sınıflandırılması [3] gibi farklı araştırma alanlarında gerçekleştirilen uygulamalarda bölütleme işleminin önemli rol oynadığı görülmüştür. Yine yapılan farklı bir uygulamada ekme gözeneklerinin morfolojik yapısı incelenerek ekme kalitesinin analiz edilmesinde görüntü bölütleme yöntemine ihtiyaç duyulmuştur [4].

Görüntü bölütleme için geliştirilmiş olan pek çok yöntem mevcuttur. Demirhan vd. çeşitli özelliklerdeki görüntülerin bölütlenmesi için gri seviye eş oluşum matrisi ve öz-örgütlemeli harita ağları kullanarak bu yöntemlerin başarımlarını araştırmışlardır [5]. 2018 yılında yapılan çalışmada orman yangınlarının tespiti için süper piksel görüntü bölütleme yöntemi yardımıyla uzamsal komşuluk bilgilerini de kullanarak yangın bölgesinin tespiti sağlanmıştır [6]. Bir kornea bozukluğu hastalığı olan keratokonus hastalığının teşhisinde ve tedavi sonrası sürecin izlenmesi amacıyla kornea görüntülerinin bölütlenmesinde eşikleme ve Havza (Watershed) bölütleme yöntemleri kullanılmıştır [7].

Görüntü bölütleme için tasarlanan yöntemler ve bu yöntemlerin başarımları, görüntüden görüntüye ve uygulamaya dayalı olarak değişiklik arz eder. Bölgeler arasındaki benzerliğin tanımlanması ve uygulanması için geliştirilen yaklaşımlar; histogram tabanlı, kümeleme tabanlı, bölge büyütme, ayırma-birleştirme ve morfolojik yaklaşımlar olarak sınıflandırılır.

Eşikleme (thresholding) metodu, en basit ve en yaygın kullanılan bölütleme yöntemidir. 2004 yılında, Sezgin vd. eşiklemeyi, histogram şekil tabanlı yöntemler, kümeleme temelli yöntemler, entropi temelli yöntemler, nesne özniteliği temelli yöntemler, mekânsal yöntemler ve yerel yöntemler olarak altı gruba ayırmışlardır [8]. Geçtiğimiz yıllarda, bu yöntemler en uygun eşik değerlerini bulmak amacıyla iki seviyeli ve çok seviyeli bölütleme için yaygın olarak uygulanmıştır. İki seviyeli eşikleme yaklaşımlarında, görüntüler nesne ve arka plan olarak iki bölüme ayrılır. Görüntü daha büyük ayrıntıya sahipse, görüntülere çok seviyeli eşikleme uygulanır. Literatürde en sık kullanılan eşikleme amaç fonksiyonları Kapur'un entropi yaklaşımı ve

Otsu'nun sınıflar arası varyans tekniği olmuştur. Yıllar boyunca, çeşitli uygulamalar için birçok eşikleme tekniği önerilmiştir. Bunlar arasında, en etkili teknikler entropi tabanlı yaklaşımlardır. Kapur ve diğerleri tarafından önerilen entropi yöntemi, bölütlenen sınıflar arasındaki benzerliği ölçmek için entropinin maksimize edilmesi ile en uygun eşik değerleri bulmak için kullanılır. Otsu'nun yönteminde [9], en uygun eşik değerleri gri seviyelerin sınıflar arası varyansını maksimize ederek bulunmaktadır. Çok seviyeli eşik problemlerinde de Kapur ve Otsu'nun yöntemleri kolayca uygulanabilmektedir [10]. Ancak hesaplama sürelerinin çok fazla artması nedeniyle en uygun eşikleri belirlemede tek başına bu yöntemler yetersiz kalmaktadır. Çok seviyeli eşiklemede eşik sayısı ne kadar artarsa hesaplama süresi de o oranda artacaktır. Hesaplama verimliliğini artırmak için çok seviyeli eşiklemede birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerin, geleneksel Kapur ve Otsu yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok seviyeli eşikleri belirlemede hesaplama karmaşıklığı büyük ölçüde azalttığı gösterilmiştir.

Manikandan ve diğerleri [11], Kapur'un entropi yöntemine dayalı çok seviyeli eşiklemeyi, simüle edilmiş ikili çaprazlama (Simulated Binary Crossover-SBX) ile kodlanmış genetik algoritma kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Algoritma, manyetik rezonans beyin görüntülerinin bölütlenmesi amacıyla uygulanmıştır. Bulunan sonuçlar, Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization-PSO), bakteriyel yemleme optimizasyonu (Bacterial Foraging Optimization-BFO) ve uyarlamalı bakteriyel yemleme optimizasyonu (Adaptive Bacterial Foraging Optimization-ABFO) algoritmaları ile karşılaştırılmıştır ve genetik algoritmanın PSO, BF ve ABF optimizasyon yöntemlerinden daha iyi olduğu gösterilmiştir.

2018 yılında Agrawal vd. [12], çok seviyeli eşikleme için köşegen sınıf entropisi (diagonal class entropy - DCE) olarak adlandırılan yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Mercan resifi optimizasyon algoritması ile amaç fonksiyonu minimize ederek optimal eşik değerleri bulunmuştur. Amaç fonksiyonu DCE'den türetilmiştir ve DCE özellikleri ise gri seviye eş oluşum matrisinden (Giray Level Co-occurrence Matrix - GLCM) çıkarılmıştır. Önerilen yöntemin, 2-D Otsu'nun yönteminden ve diğer çok seviyeli eşikleme yöntemlerinden (Kapur'un Entropisi, Saliency Haritası [13], KL-MPSO [14], Entropi tabanlı [15]) üstün olduğu gösterilmiştir.

Pare ve diğerleri [16], GLCM'e dayalı renkli çok seviyeli eşikleme için yeni bir bölütleme yaklaşımı sunmuşlardır. GLCM'nin eksikliklerini (hesaplama karmaşıklığı ve kararlılık problemi) gidermek için en uygun eşik değerleri bulmada diferansiyel gelişim (Diferential Equation - DE) algoritması kullanmışlardır. Sunulan yöntemin diğer optimizasyon algoritmalarından (Geriye Dönük Arama Optimizasyonu Algoritması, PSO, BFO) ve geleneksel GLCM algoritmasından daha iyi performans gösterdiği sunulmuştur. Ayrıca kapsamlı enerji fonksiyonunu

kullanarak renkli çok seviyeli görüntü bölütlemesi için sürü tabanlı bir algoritma Pare ve diğerleri tarafından uygulanmıştır [17]. Shao vd. [18], farklı arama algoritmasına dayanan çok seviyeli eşikleme kullanarak ultrason görüntülerin bölütlenmesi için yeni bir yöntem önermişlerdir. Kapur'un entropisine dayalı çok seviyeli eşikleme ile uydu görüntülerinin bölütlenmesi için guguk kuşu ve rüzgar ile çalışan optimizasyon algoritması, Bhandari ve diğerleri tarafından uygulanmıştır [19]. Bao ve diğerleri tarafından çok seviyeli renkli görüntülerin bölütlenmesi için Harris Hawks (HH) ve DE optimizasyon algoritmalarının birleştirilmesiyle yeni bir hibrid algoritma gerçekleştirilmiştir [20].

[21]'te renkli görüntü bölütlemeyi iyileştirmek için kendinden uyarlamalı güve-alev optimizasyonu olarak adlandırılan yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak Kapur'un entropi yöntemi ve Otsu'nun eşikleme yöntemi kullanılmıştır. 6 doğal görüntü ve 4 tane uydu görüntüsü olmak üzere farklı eşik seviyelerine sahip 10 tane renkli görüntü kullanılmıştır. Bulunan sonuçlar, diğer sekiz meta sezgisel algoritma (multi-verse optimizer (MVO), balina optimizasyon algoritması, standart güve-alev optimizasyon algoritması, vs.) ile karşılaştırılmıştır ve kendinden uyarlamalı güve-alev optimizasyon algoritmasının diğer algoritmalara göre daha iyi olduğu gösterilmiştir. Pare vd. [22], farklı seviyelerdeki renkli görüntülerin çok seviyeli eşiklemesini gerçekleştirmek için değiştirilmiş bir bulanık entropi fonksiyonu sunmuşlardır. Optimal thresholding değerlerinin bulunmasında Levy uçuş güdümlü ateş böceği algoritması kullanılarak arama performansı dolayısıyla renkli görüntü bölütleme iyileştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca iki boyutlu histogramına dayalı görüntü bölütleme ile ilgili de pek çok çalışma yapılmıştır. Sarkar vd. [23], çok seviyeli eşikleme de iki boyutlu histogram tabanlı yaklaşımlardan daha üstün olduğunu göstermek için bir çalışma yapmışlardır. Ayrıca diferansiyel gelişim algoritmasının performansını diğer meta sezgisel algoritmalar (PSO, yapay arı koloni algoritması (Artificial Bee Colony - ABC), genetik algoritma, benzetimli tavlama algoritması) ile karşılaştırarak göstermişlerdir. Mittal ve Saraswat [24], yeni bir iki boyutlu histogram ve geliştirilmiş yer çekimi arama algoritması kullanarak çok seviyeli eşikleme yapmışlardır. Önerilen yöntemin deneysel sonuçları için, Berkeley ve Benchmark (BSDS300) veri seti, 3 seviye ve 5 seviyeli görüntü segmentasyonu için kullanılmıştır. Performans analizleri için ise ABC, yer çekimi arama algoritması (Gravitational Search Algorithm-GSA), Kaotik K_{best} yer çekimi arama algoritması (Chaotic K_{best} Gravitational Search Algorithm-cKGSA), DE algoritması ile karşılaştırmalı olarak 12 ölçü ve sonuç kullanılarak yapılmıştır. Borjigin ve Sahoo [25], gri seviye & yerel ortalama (gray level & local average-GLLA) histograma dayalı çok seviyeli eşikleme ile renkli görüntü bölütleme yapmışlardır.

Bu çalışmada gri seviyeli görüntüleri bölütlemek için çok seviyeli bir eşikleme yöntemi önerilmiştir. Önerilen metodun

etkililiği, BSDS300 veri seti üzerinde deneyler yapılarak görüntü bölütleme kalite ölçüm yöntemleri ile gösterilmiştir. Bu makalenin ana katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- Yerel olmayan ortalama filtre tabanlı yeni bir iki boyutlu histogram yöntemi sunulmuştur,
- Maliyet fonksiyonu olarak iki boyutlu histogram da Renyi'nin entropisi çok seviyeli eşikleme için yeniden tanımlanmıştır,
- Hesaplama süresini azaltarak en uygun eşik değerlerini bulmak amacıyla PSO algoritması probleme uyarlanmıştır,
- Çok fazla ayrıntıya sahip görüntülerin bölütleme performansını artırmak amacıyla Renyi'nin entropisine dayalı 2DYOH-PSO çok seviyeli eşik belirleme yöntemi sunulmuştur,
- 2DYOH-PSO yöntemi, Berkeley-Benchmark veri setindeki görüntüler için uygulanan çok seviyeli eşiklemede 12 farklı kalite ölçüm endeksi (BDE, PRI, VOI, GCE, SSIM, FSIM, PSNR, RMSE, NAE, AD, MD) açısından oldukça başarılı olan GSA [26], ABC [27], DE [28], cKGSA [29] ve eKGSA [24] yöntemleri ile karşılaştırılarak daha etkin sonuçlar elde edildiği deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir.

Makalenin organizasyonu şu şekildedir: Bölüm 2'de yaygın kullanılan eşikleme yöntemlerinden biri olan Renyi'nin Entropisi, Yerel olmayan ortalama filtre ve PSO algoritması incelenmiştir. Önerilen yöntem için iki boyutlu yerel olmayan ortalama histogram ve çok seviyeli eşikleme için Renyi'nin entropisi yeniden tanımlanarak, Bölüm 3'te verilmiştir. Bölüm 4'te, deneysel çalışmalarda kullanılan veri seti, önerilen yöntem için gerçekleştirilen algoritmanın uygulama adımları, algoritma parametrelerine değinilmiştir ve bölütleme başarımını ölçmek için kullanılan 12 kalite ölçüm indeksinden kısaca bahsedilmiştir. Deneysel sonuçlar ve diğer yöntemlerle elde edilen karşılaştırma tabloları Bölüm 5'te verilmiştir. Ve son olarak Bölüm 6'da, yapılan çalışmanın başarımları, eksiklikleri ve gelecekte yapılması hedeflenen çalışmalara değinilmiştir.

2. ÇOK SEVİYELİ GÖRÜNTÜ EŞİKLEME (MULTILEVEL IMAGE THRESHOLDING)

Çok seviyeli eşikleme, en çok kullanılan görüntü bölütleme yöntemlerinden birisidir. Verilen görüntünün histogramı çıkarıldıktan sonra Renyi'nin entropi yöntemine göre eşik değerleri bulunarak bölütleme işlemi gerçekleştirilir. Görüntü bölütleme de kullanılan pek çok metod hesaplama karmaşıklığından dolayı çok fazla zaman tüketmektedir. Ayrıca eşik seviye sayısı arttıkça uygulama daha karmaşık ve zaman alıcı hale gelmektedir. Hesaplama zamanını azaltmak ve eşikleme performansını iyileştirmek amacıyla PSO yönteminin hızlı yakınsama oranı dikkate alınarak bölütleme işlemi gerçekleştirilir.

2.1. Renyi'nin Entropisi (Renyi's Entropy)

Renyi'nin entropi yöntemi, ön plan ile arka plan arasındaki entropi farkını hesaplayarak optimal eşik değerini elde etmede kullanılır. $M \times N$ boyutlarında L gri seviyeli bir

görüntünün olasılık dağılımı $p_i = \{p_0, p_1, \dots, p_{L-1}\}$ şeklindedir ve $p_i = h_i/MxN$ olarak hesaplanmaktadır. Burada, h_i i . gri seviyedeki piksellerin tekrarlanma sıklığıdır. MxN ise görüntüdeki toplam piksel sayısıdır. İki seviyeli eşiklemede, görüntü ön plan ve arka olarak iki sınıfa ayrılır. t eşliğinde arka plan (Sınıf A) ve ön plan (Sınıf B) için entropiler; (Eş. 1, Eş. 2)

$$H_A = \frac{1}{1-q} \ln \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} \left(\frac{p_i}{P_A}\right)^q \quad (1)$$

$$H_B = \frac{1}{1-q} \log \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} \left(\frac{p_i}{P_B}\right)^q \quad (2)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada, q entropi indeksidir ve en uygun değeri 0,8 olarak verilmektedir [30]. Ön plan ve arka plan için olasılık dağılımları $P^A = \sum_{i=1}^t p_i$, $P^B = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i$ ve $p^A + p^B = 1$ şeklindedir. Renyi'nin toplam entropisi;

$$H = H_A + H_B \quad (3)$$

Eş. 3 kullanılarak elde edilir. Optimum eşik değeri ise;

$$T^* = \text{Arg max} (H_q) \quad (4)$$

Eş. 4 ile hesaplanır.

2.2. Yerel Olmayan Ortalama Filtre (Non-Local Means Filter)

$f(i)$; giriş görüntüsündeki i . pikselin gri seviye değeri olarak ifade edilirse, yerel olmayan filtredeki i . pikselin tahmini değeri, giriş görüntüsündeki diğer piksellerin ağırlıklandırılmış ortalaması olarak Eş. 5'te verildiği gibi ifade edilir [31]:

$$Y(x, y) = \sum_j w(i, j) \cdot f(j) \quad (5)$$

Burada, $w(i, j)$ değeri i ve j pikselleri arasındaki benzerliği gösteren ağırlık matrisi;

$$w(i, j) = \frac{1}{z_i} e^{-\frac{\|f(\mathcal{N}_i) - f(\mathcal{N}_j)\|^2}{h^2}} \quad (6)$$

şeklinde hesaplanır. Burada, h filtrenin derecesini, N_k ; sabit boyutlu ve k pikselinde ortalanmış karesel bir komşuluğu gösterir. $f(\mathcal{N}_i)$ ve $f(\mathcal{N}_j)$ ise gri seviye vektörlerinin yoğunluğunu ifade eder. Normalize edilmiş sabit z_i Eş. 7 ile bulunur.

$$z_i = \sum_j e^{-\frac{\|f(\mathcal{N}_i) - f(\mathcal{N}_j)\|^2}{h^2}} \quad (7)$$

i ve j pikseller arasındaki benzerlik, gri seviye vektörlerinin yoğunluk benzerliklerine dayalıdır. Bu benzerlik, Eş. 6'da görüldüğü gibi ağırlıklı Öklid mesafesinin azalan bir fonksiyonu olarak ölçülür. $f(\mathcal{N}_j)$ ile benzer gri düzey komşuluğuna sahip pikseller ortalama olarak daha büyük ağırlıklara sahiptir.

2.3. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (Particle Swarm Optimization Algorithm)

Parçacık sürü optimizasyon (Particle Swarm Optimization-PSO), sürü halinde yaşayan hayvanların davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş meta-sezgisel bir algoritmadır. Bu hayvanlar incelendiğinde yiyecek ararken etkileşim içerisinde oldukları ve birinin yiyecek bulması halinde diğer parçacıkların da konumlarını yiyeceğin olduğu yöne çevirdikleri ve hızlarını da yine yiyecek bulan parçacığa göre güncelledikleri görülmüştür. Bu sosyal etkileşim PSO ile modellenmiştir [32]. Parçacıkların hız ve pozisyonları;

$$v_{ij}(k+1) = v_{ij}(k) + C_1 \cdot \text{rand}_1 \left(P_{best,ij}(k) - x_{ij}(k) \right) + C_2 \cdot \text{rand}_2 (g_{best,ij}(k) - x_{ij}(k)) \quad (8)$$

$$x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + v_{ij}(k+1) \quad (9)$$

eşitlikleri kullanılarak güncellenir. PSO algoritmasında p_{best} ve g_{best} olmak üzere iki önemli parametre mevcuttur. p_{best} , her bir parçacığın sahip olduğu en iyi pozisyonunu ifade ederken g_{best} , tüm parçacıkların içerisindeki en iyi pozisyonunu ifade eder.

3. ÖNERİLEN YÖNTEM (PROPOSED METHOD)

3.1. İki Boyutlu Yerel Olmayan Ortalama Histogram (Two Dimensional Non-Local Means Histogram)

f giriş görüntüsünün yerel olmayan ortalamalar ile filtrelenmiş görüntüsü g olsun ve MxN boyutlarındaki L gri seviyeli görüntünün $f(x,y)=i$ ve $g(x,y)=j$ deki toplam piksel sayısı h_{ij} olsun. Bu durumda, iki boyutlu yerel olmayan histogram,

$$p_{ij} = \frac{h_{ij}}{MxN} \quad (10)$$

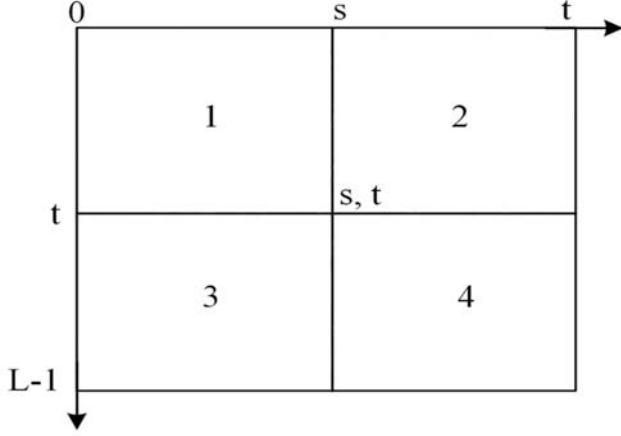
Eş. 10 olarak tanımlanabilir. Burada p_{ij} 'deki $i=\{0,1,\dots,L\}$ ve $j=\{0,1,\dots,L\}$ 'dir ve LxL boyutlarında elde edilen P histogramı Şekil 1'de görülmektedir.

İki boyutlu olarak alınan eşik vektörü, histogramı 4 eşit parçaya ayırır. Burada, Bölge 1 ve 4 ön ve arka plan bilgisini bulundururken Bölge 2 ve 3 gürültü ve kenar bilgisini içermektedir. Bu kapsamda, önerilen metodun hedefi olan nesnelere arka plandan ayırmak amacıyla sadece diagonal bölgeler dikkate alınmıştır.

3.2. Çok Seviyeli Eşikleme için Renyi'nin Entropisi (Renyi's Entropy for Multilevel Thresholding)

Bölütlenecek görüntü, $\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ eşik değerleri ile $\{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ olmak üzere m sınıfa ayrılmış olsun. Bu durumda gri seviye sınıfları Eş. 11'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} S_1 &= [0, \dots, t_1 - 1] \\ S_2 &= [0, \dots, t_2 - 1] \\ &\vdots \\ S_m &= [0, \dots, t_m - 1] \end{aligned} \quad (11)$$



Şekil 1. Yerel olmayan iki boyutlu histogram
(2D Non-local Means Histogram)

Buradan hareketle, Çok seviyeli eşikleme için Renyi'nin sınıf entropileri Eş. 12'de sunulmuştur:

$$H_0 = \frac{1}{1-q} \ln \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} \left(\frac{p_{ij}}{p_0}\right)^q$$

$$H_1 = \frac{1}{1-q} \ln \sum_{i=s}^{s_1-1} \sum_{j=t}^{t_1-1} \left(\frac{p_{ij}}{p_B}\right)^q$$

$$H_2 = \frac{1}{1-q} \log \sum_{i=s_1}^{s_2-1} \sum_{j=t_1}^{t_2-1} \left(\frac{p_{ij}}{p_B}\right)^q$$

$$\vdots$$

$$H_M = \frac{1}{1-q} \log \sum_{i=s_1}^{L-1} \sum_{j=t_1}^{L-1} \left(\frac{p_{ij}}{p_B}\right)^q \quad (12)$$

Renyi'nin toplam entropisi ise Eş. 13 ile hesaplanır.

$$H = \sum_{i=0}^m H_i \quad (13)$$

Optimum eşik değerleri Eş. 14 ile bulunur.

$$T^* = \text{Arg max}(H) \quad (14)$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneyle, 2,4 GHz, Intel^R core i7 işlemcili ve 8 GB RAM'a sahip bilgisayarda Matlab 2019a kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem, BSDS300 veri seti içerisindeki görüntülere uygulanmıştır. Veri setinde 300 görüntü mevcuttur ve farklı kişiler tarafından yapılmış olan, her bir görüntüye ait 6 farklı referans görüntü bulunmaktadır. Kullanılan görüntüler 381x421 boyutlarındadır. Çalışmanın başarımı, veri seti içerisinde bulunan her bir görüntü için referans görüntüler kullanılarak değerlendirilir. Tablo 1'de önerilen yöntemin sözde kodu verilmektedir.

4.1. Parametrelerin Ayarlanması (Parameters Setting)

Parametrelerin değeri her algoritmanın performansını belirlemede önemli rol oynamaktadır. Bu makalede, tüm algoritmalar adil bir karşılaştırma için maksimum iterasyon sayısı, her algoritma için 1000 olarak alınmıştır. PSO algoritmasının parametreleri olan hızlandırma faktörleri *c1* ve *c2* ile momentum katsayısı (*w*) sırasıyla **0,12**, **1,2** ve **0,9** olarak uygulama için en uygun değerleri sağlayacak şekilde seçilmiştir. Önerilen yöntem için kullanılan tüm algoritma parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen Yöntemin Sözde Kodu (Pseudo Code of the Proposed Method)

Giriş: Veri seti içerisindeki görüntüler ($f^1, f^2, f^3, \dots, f^{300}$)
Çıkış: 12 kalite ölçüm indeksi, bölütlenen görüntüler ($g^1, g^2, g^3, \dots, g^{300}$)
1 : for görüntü sayısı
2 : Eş. 10 kullanarak her bir f^n görüntüsünün histogramını hesapla
3 : Bölütlenecek giriş görüntüsü f^n için eşik seviye sayısını belirle
4 : Görüntü histogramını ve eşik seviye sayısını optimizasyon algoritmasına gönder
a. Başlangıç algoritma parametreleri olan atalet faktörü (<i>w</i>), hızlandırma faktörleri (<i>c1</i> , <i>c2</i>), popülasyondaki parçacık sayısı (<i>N</i>), iterasyon sayısı değerlerini belirle.
b. D-boyutlu arama uzayında başlangıç popülasyonunu oluştur $P = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_N\}$
c. for maksimum iterasyon sayısı
i. Her bir <i>X</i> parçacığının uygunluk değerini, Renyi'nin Entropi yöntemine göre hesapla
ii. En iyi yerel değerlerini- p_{best} , önceki p_{best} değerleri ile karşılaştırarak güncelle.
iii. Partiküllerin lokal en iyi pozisyonlarını birbirleri ile karşılaştır ve en iyi p_{best} değerini küresel en iyi g_{best} olarak ata. Her iterasyonda g_{best} değerini güncelle.
iv. Parçacıkların hız ve pozisyonlarını Eş. 8 ve Eş. 9'u kullanarak güncelle.
d. end for
e. Bulunan eşik değerleri giriş görüntüsüne uygula.
5 : Bulunan optimal eşik değerini ve eşik değerine ait maksimum entropiyi sakla.
6 : end for
7 : Eşik değerleri giriş görüntüsüne uygula.
8 : Bölütlenen görüntüleri veri setinde bulunan referans görüntüler ile karşılaştır.
9 : Belirli kalite ölçüm indeksleri kullanarak bölütlenen görüntünün başarımını değerlendir.
10 : Return kalite ölçüm değerleri ve bölütlenen görüntüler

Tablo 2. Çok seviyeli eşikleme için kullanılan algoritma parametreleri
(The parameters of the algorithm for multilevel thresholding)

Parametreler	Değerleri
Parçacıkların boyutu	Eşikleme seviyesi
Alt sınır	0
Üst sınır	255
Sürüdeki parçacık sayısı	100
Popülasyon boyutu	Parçacık boyutu * parçacık sayısı
İterasyon sayısı	1000
Hızlandırma faktörleri ($c1, c2$)	0,12,1,2
Momentum katsayısı (w)	0,9
Eşik seviye sayıları	3 seviye, 5 seviye

Önerilen yöntemde, oluşturulan popülasyondaki parçacıkların boyutu görüntüye uygulanacak eşik seviyesine göre belirlenmektedir. Beş seviyeli görüntü eşikleme için her bir parçacık boyutu 5×1 ve 100 parçacıktan oluşan popülasyon boyutu 5×100 şeklinde olacaktır. Oluşturulan popülasyondaki parçacıklar $[0,255]$ arasında değerler almaktadır.

4.2. Kalite Ölçüm İndeksleri (Quality Measurement Indexes)

Görüntülerin bölütlenmesi işleminin ne ölçüde başarılı olduğunu belirlemek amacıyla yapılandırılmış benzerlik indeksi, özellik benzerlik indeksi, tepe sinyal-gürültü oranı, rastgele olasılık indeksi, çapraz korelasyon, bilgi varyasyonu, sınır yer değiştirme hatası, global tutarlılık hatası, ortalama karesel hata gibi ölçüm indeksleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.2.1. Yapılandırılmış benzerlik indeksi (Structured similarity index -SSIM)

SSIM indeksi, orijinal resim ile bölütlenen resim arasındaki benzerliği ölçer. SSIM değerinin yüksek olması daha iyi bir performansını ifade eder [33]. SSIM değeri;

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y+c_1)(2\sigma_{xy}+c_2)}{(\mu_x^2+\mu_y^2+c_1)(\sigma_x^2+\sigma_y^2+c_2)} \quad (15)$$

Eş. 15 ile hesaplanmaktadır.

4.2.2. Özellik benzerlik indeksi (Feature similarity index -FSIM)

FSIM indeksi, orijinal resim ile bölütlenen resim arasındaki benzerliği değerlendiren ölçüm birimidir. FSIM değeri $[-1,1]$ aralığındadır. Yüksek FSIM değeri daha iyi eşikleme yapıldığını göstermektedir. Eşik seviyesi arttıkça bu değerler de artış göstermektedir [34]. FSIM değeri;

$$FSIM(x, y) = \frac{\sum_{x \in \Omega} S_L(X)PC_m(X)}{\sum_{x \in \Omega} PC_m(x)} \quad (16)$$

Eş. 16 olarak elde edilir.

4.2.3. Tepe sinyal-gürültü oranı (Peak signal to noise ratio -PSNR)

PSNR farklı dinamik aralıklara sahip görüntüleri karşılaştırmak için kullanılmaktadır. Yüksek PSNR değeri

daha iyi bir eşikleme performansını ifade eder [35]. PSNR değeri: (Eş. 17)

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{(2^b-1)^2}{\sqrt{MSE}} \quad (17)$$

4.2.4. Olasılık rand indeksi (Probability rand index -PRI)

İki görüntü arasındaki benzerlik ölçümünde kullanılır. Genellikle $[0,1]$ aralığında değer almaktadır. Yüksek PRI değeri iyi bir eşikleme performansını göstermektedir [36]. PRI değeri: (Eş. 18)

$$PRI = \frac{a+b}{a+b+c+d} \quad (18)$$

$a + b$ ifadesi iki görüntü arasındaki benzer piksellerin sayısı, $c + d$ ifadesi iki görüntü arasındaki farklı piksellerin sayısıdır.

4.2.5. Çapraz korelasyon (Cross correlation -CC)

Eşik sayısı arttıkça CC değeri de artış gösterir. Yüksek CC değeri iyi bir eşikleme performansını göstermektedir [35]. (Eş. 19)

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{\sigma_x \sigma_y} (X(x, y) - \bar{X})(Y(x, y) - \bar{Y}) \quad (19)$$

4.2.6. Bilgi varyasyonu (Variation of information -VOI)

VOI, ortalama koşullu entropi cinsinden iki bölütleme arasındaki mesafeyi tanımlayarak bölütlenmiş bir görüntüdeki rastgelelik miktarını hesaplar [36]. VOI değeri;

$$VOI(X; Y) = H(X) + H(Y) - 2I(X, Y) \quad (20)$$

Eş. 20 olarak hesaplanır. Burada, $H(X)$ ifadesi, X in entropisini, $I(X, Y)$ ifadesi ise X ile Y arasındaki ortak bilgidir. VOI, $[0, \infty)$ aralığında değer alır. Daha iyi bölütleme için küçük VOI değeri tercih edilir.

4.2.7. Sınır yer değiştirme hatası (Boundary displacement error -BDE)

BDE, bölütlenmiş görüntüler arasında sınır piksellerin yer değiştirmesinin ortalama hatasını hesaplar. Diğer görüntü sınırındaki piksel ile en yakın piksel arasındaki mesafe olarak tanımlanır. Daha iyi bölütleme için daha düşük bir BDE değeri tercih edilir [36]. (Eş. 21)

$$BDE = \begin{cases} \frac{u-v}{L-1}, & 0 < (u - v) \\ 0, & u - v < 0 \end{cases} \quad (21)$$

4.2.8. Global tutarlılık hatası (Global consistency error - GCE)

GCE bir bölütlemenin, diğerinin bir gelişimi olarak ne ölçüde gözlenebileceğini hesaplar. GCE endeksi (0,1) aralığındadır [36]. Değer ne kadar küçükse, bölütleme o kadar iyi olur. GCE değeri Eş. 22 olarak hesaplanır.

$$GCE = \frac{1}{n} \{ \sum_i E(S_1, S_2, p_i), \sum_i E(S_2, S_1, p_i) \} \quad (22)$$

4.2.9. Ortalama karesel hata (Mean square error - MSE)

Endeks, hatanın karesinin ortalamasını ölçmektedir. Düşük MSE değerleri iyi bir görüntü bölütlemesi yapıldığını gösterir [35]. MSE denklemi Eş. 23’de verilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \|x(i, j) - y(i, j)\|^2 \quad (23)$$

Burada, M ve N görüntünün boyutlarını temsil etmektedir. X orijinal görüntü ve Y bölütlenmiş görüntüyü göstermektedir.

4.2.10. Ortalama fark (Average difference- AD)

AD, referans görüntü ve bölütlenmiş görüntü arasındaki farkın ortalamasıdır. Daha iyi bir bölütleme için düşük AD değeri tercih edilir [35]. AD değeri Eş. 24 ile hesaplanır.

$$AD = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x(i, j) - y(i, j)) \quad (24)$$

4.2.11. Maksimum fark (Maximum difference- MD)

MD, iki görüntü arasındaki hatanın maksimumunu alır. MD değerinin küçük olması, daha iyi bölütlemeyi ifade eder [35]. MD eşitliği Eş. 25 olarak verilir.

$$MD = \max |x(i, j) - y(i, j)| \quad (25)$$

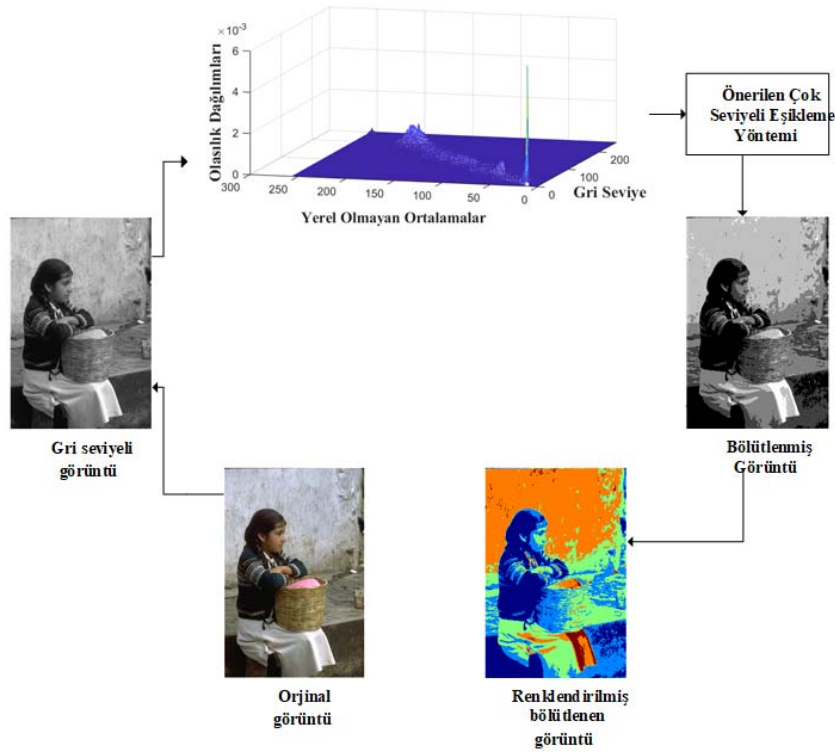
4.2.12. Normalize edilmiş mutlak fark (Normalized absolute error- NAE)

NAE, iki görüntü arasındaki normalleştirilmiş mutlak farkı hesaplar. iyi bölütleme için Düşük NAE değeri tercih edilir [24]. Değeri Eş. 26 ile hesaplanır.

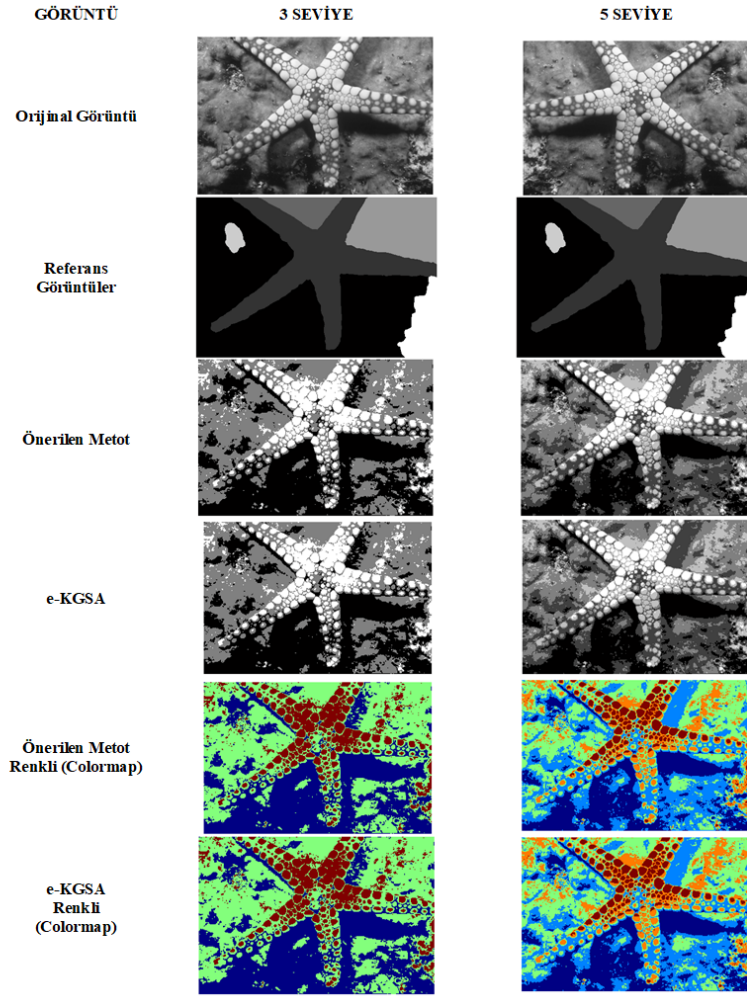
$$NAE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |x(i, j) - y(i, j)| \quad (26)$$

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Belirtilen veri setinde eğitim ve test verisi olarak ayrı ayrı bulunan 300 görüntüye farklı seviyelerde eşikleme yapılmıştır. Yapılan eşiklemenin başarımını değerlendirmek için 12 kalite ölçüm yöntemi uygulanmıştır. Önerilen yöntem ile bölütleme işlem adımlarını gösteren akış şeması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Önerilen yöntemin akış şeması (The Flow Chart of the Proposed Method)



Şekil 3. Önerilen çok seviyeli eşikleme yönteminin analizi (Analysis of the proposed multi-level thresholding method)

Tablo 3. 3 seviyeli görüntü eşikleme ile önerilen yöntemin diğer yöntemlerle karşılaştırması (Comparison of the proposed method with 3-level image thresholding with other methods)

YÖNTEM	Önerilen Yöntem	GSA	cKGSA	eKGSA	DE	ABC
BDE	9,9713	10,2567	10,2719	10,2407	10,4109	10,456
PRI	0,6130	0,6073	0,6070	0,6079	0,5993	0,6016
VOI	2,8057	2,8067	2,8060	2,8078	2,7882	2,7828
GCE	0,3391	0,3348	0,3345	0,3352	0,3247	0,3238
SSIM	0,5258	0,4529	0,4529	0,4549	0,4423	0,4398
FSIM	0,5902	0,6749	0,6742	0,6779	0,6697	0,6691
RMSE	43,3015	50,0514	50,0259	49,8913	51,1517	51,7063
PSNR	15,6764	14,4014	14,4092	14,4306	14,2079	14,1617
CC	0,8824	0,6414	0,6517	0,6532	0,6414	0,6369
AD	36,7691	42,7436	42,7141	42,5637	43,7985	44,2451
MD	94,5	110,902	110,925	110,8570	111,107	113,715
NAE	0,367	0,4100	0,4099	0,4080	0,422	0,4257

Verilen orjinal renkli görüntü gri seviyeye dönüştürülüp histogramı çıkarılır. Hesaplanan histograma, PSO optimizasyon yöntemi ile Renyi yöntemine dayalı eşikleme yapıp bulunan optimal eşik değerlerine göre görüntü bölütlenir. Önerilen görüntü bölütleme yöntemi BSDS300 veri setinden rastgele seçilen bir görüntü için uygulanmıştır

ve bölütlenen görüntüler, Mittal ve Saraswat tarafından yapılan çalışma [24] ile karşılaştırmalı olarak Şekil 3'de verilmiştir. Belirtilen kalite ölçüm yöntemleri, veri setinde bulunan tüm görüntülere ayrı ayrı uygulanmıştır ve ortalama değerleri hesaplanarak sonuçları verilmiştir. Önerilen yöntem ile görüntülere 3 seviyeli eşikleme uygulandığında

elde edilen ortalama kalite ölçüm değerleri, diğer meta sezgisel yöntemler olan yerçekimi arama algoritması (GSA) [26], yapay arı algoritması (ABC), diferansiyel gelişim algoritması (DE), kaotik K_{best} yerçekimi arama algoritması (cKGSA) [29], üstel K_{best} yerçekimi arama algoritması (eKGSA) [24] gibi yöntemlerle karşılaştırmalı olarak Tablo 3’de verilmiştir.

Önerilen yöntem ile görüntülere 5 seviyeli eşikleme uygulandığı durumda ise elde edilen ortalama kalite ölçüm değerleri, belirtilen diğer meta sezgisel yöntemlerin sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Tablo 4’de verilmiştir.

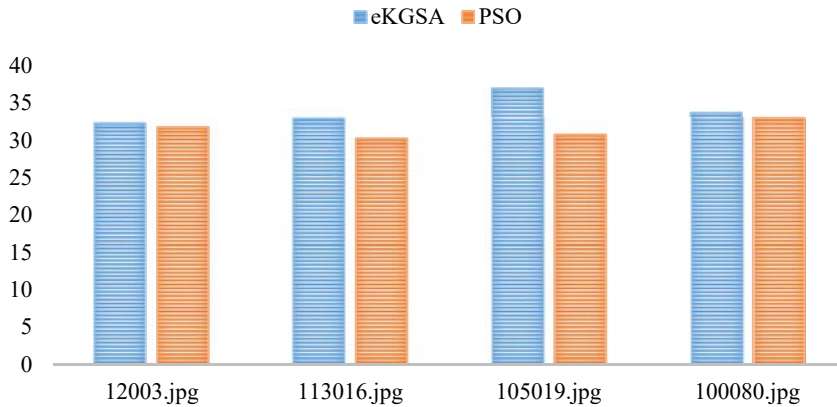
Tablo 3 ve Tablo 4 incelendiğinde önerilen bölütleme metodu ile yapılan çok seviyeli eşikleme işlemi için hesaplanan BDE değerinin hem 3 seviyeli hem de 5 seviyeli eşikleme de diğer yöntemlere göre daha küçük olduğu görülmektedir. BDE değeri, bölütlenmiş görüntü ile referans görüntü arasındaki minimum sapmayı ifade etmektedir. Bu değer ne kadar küçük olursa o kadar iyi bir bölütleme yapıldığı anlamına gelmektedir. BSDS300 veri seti içerisinde rastgele seçilen bir görüntüye ait referans görüntüler ve önerilen metot ile bölütlenmiş görüntüler Şekil 3’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. PRI değeri bölütleme kararlılığını göstermektedir. 3 seviyeli bölütleme de önerilen

yöntem diğerlerine göre daha iyi sonuç verirken 5 seviyeli eşikleme de PRI, VOI ve GCE değerlerinin rekabetçi sonuçlar ürettiği görülmektedir. RMSE, AD, MD, NAE indeksleri istatistiksel hata parametreleri olup 3 seviyeli bölütleme için önerilen yöntemle bulunan sonuçların diğer yöntemlerden daha üstün olduğu görülmektedir. PSNR değeri ise RMSE değeri ile ters orantılı olup yüksek değerlerinde daha iyi bölütleme yapıldığını göstermektedir. SSIM ve FSIM değerleri görüntü kalitesinin göstergeleridir. 5 seviyeli bölütleme de her iki değer de iyi çıkması yapılan görüntü bölütlemenin kalitesini göstermektedir. Sonuç olarak Tablo 3 ve Tablo 4’de önerilen bölütleme metodu ile 3 seviyeli ve 5 seviyeli olarak yapılan eşikleme işlemlerinde önerilen yöntemin diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

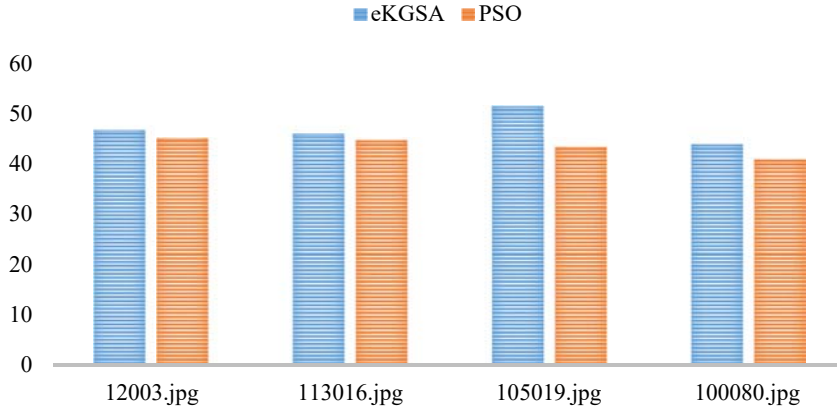
Üç seviyeli eşikleme için önerilen yöntemde kullanılan PSO algoritması ile e-KGSA algoritmasının uygun eşik değerlerini hesaplama süreleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4’de verilmiştir. Aynı şekilde, PSO, e-KGSA algoritmaları kullanılarak 5 seviyeli eşiklemede uygun eşik değerlerini hesaplama süreleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5’de verilmiştir. Her iki çok seviyeli eşikleme için de PSO yönteminin diğer yöntemlere göre hesaplama süresinin daha az olduğu belirtilen şekillerde görülmektedir.

Tablo 4. 5 seviyeli görüntü eşikleme ile önerilen yöntemin diğer yöntemlerle karşılaştırması
(Comparison of the proposed method with 5-level image thresholding with other methods)

Yöntem	Önerilen Yöntem	GSA	cKGSA	eKGSA	DE	ABC
BDE	9,7782	9,9448	9,8978	9,8776	10,0865	9,9355
PRI	0,6591	0,6610	0,7010	0,7261	0,645	0,6553
VOI	3,0255	3,1415	3,1419	3,1436	3,0676	3,1283
GCE	0,4401	0,4396	0,4391	0,4397	0,4124	0,4332
SSIM	0,6654	0,6566	0,6569	0,6428	0,598	0,6428
FSIM	0,791	0,7857	0,7858	0,78	0,7549	0,6428
RMSE	29,2333	29,3868	29,4240	29,3922	35,1074	30,9452
PSNR	19,0404	18,9516	18,9410	18,9463	17,565	18,596
CC	0,9743	0,8006	0,8004	0,8	0,7629	0,7888
AD	24,6882	24,9333	24,9601	24,899	29,4665	26,1351
MD	71,55	69,5218	69,8932	70,1836	79,7659	73,2606
NAE	0,2427	0,2419	0,2420	0,2412	0,2878	0,2557



Şekil 4. 3 seviyeli eşik için PSO ve e-KGSA tarafından elde edilen hesaplama süresinin karşılaştırılması
(Comparison of calculation time computed by PSO and e-KGSA for 3-level thresholding)



Şekil 5. 5 seviyeli eşik için PSO ve e-KGSA tarafından elde edilen hesaplama süresinin karşılaştırılması
(Comparison of calculation time computed by PSO and e-KGSA for 5-level thresholding)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Görüntü bölütleme, uzun yıllardır çalışılan bir konu olmasına rağmen yapılan çalışmaların başarımları görüntüden görüntüye ve uygulamaya dayalı olarak değişiklikler göstermektedir. Bu sebeple görüntü bölütleme hala geliştirilmesi gereken bir alan olarak görülmektedir ve her geçen gün yeni yöntemler üzerinde çalışılmaktadır.

Bu makalede, gri seviyeli görüntüler için yerel olmayan ortalama filtre tabanlı iki boyutlu histogram yöntemi kullanılarak çok seviyeli bir görüntü bölütleme yöntemi önerilmiştir. Maliyet fonksiyonu olarak iki boyutlu histogram da Renyi'nin entropisi çok seviyeli eşikleme için yeniden tanımlanmıştır ve hesaplama süresini azaltarak en uygun eşik değerlerini bulmak amacıyla PSO algoritması probleme uyarlanmıştır. Görüntülerin bölütleme performansını artırmak amacıyla Renyi'nin entropisine dayalı 2DYOH-PSO çok seviyeli eşik belirleme yöntemi sunulmuştur. Tablo 3 ve Tablo 4 incelendiğinde 2DYOH-PSO ile 3 seviyeli eşikleme işlemi gerçekleştirdiği durumda, mevcut 5 farklı yöntem ile 12 performans değerlendirme indeksi bakımından yapılan bölütleme işlemlerinin başarımları BDE; %2,63 oranında, PRI; %0,83 oranında SSIM; %15,5 oranında, RMSE; %13,2 oranında, PSNR; %8,63, CC; %35 oranında, AD; %13,9 oranında, MD; %14,75, NAE %10 oranında iyileşme sağlanmıştır. 2DYOH-PSO ile 5 seviyeli eşikleme işlemi gerçekleştirildiği durumda ise Berkeley-Benchmark veri setindeki görüntülerin bölütlenmesinde ki başarımın BDE; %1, FSIM; %0,85 oranında, RMSE; %15,35 oranında, PSNR; %8,88, CC; %17,36 oranında, AD; %12,8 oranında iyileştiği deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, daha ayrıntılı görüntülerin bölütlenmesinde kullanılan çok seviyeli eşikleme yöntemlerindeki hesaplama karmaşıklığını azaltmak amacıyla eşik seviye sayısını adaptif olarak hesaplayabilen algoritmalar geliştirilmeye çalışılacaktır. Böylece daha hassas bir bölütleme gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, enerji tabanlı eşikleme yöntemler [17], bulanık entropi [22], köşegen sınıf entropisi gibi farklı yöntemler

üzerinde çalışmalar genişletilerek görüntüler için daha optimum eşik değerleri ile daha hassas doğrulukta bölütleme sağlanması amacıyla adaptif yöntemlerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bunların yanı sıra önerilen yöntem ve gelecekte geliştirilecek yöntemler uydu görüntüleri, tıbbi görüntüler, doğa görüntüleri, gerçek zamanlı görüntüler gibi farklı uygulama alanları için de sınanacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bilge H., Verim V., Prostate Contour Extraction from Ultrasound Images, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22 (3), 407-413, 2013.
2. Kasim Ö., Kuzucuoğlu A.E., Detection and Classification of Leukocyte Cells from Smear Image, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (1), 95-109, 2015.
3. Küçük H., Eminoğlu İ., Balcı K., Classification of neuromuscular diseases with artificial intelligence methods, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 34 (4), 1725-1741, 2019.
4. Alkan A., Selcuk T., Çolakoğlu A.S., Bread texture analysis and development of user interface using image processing techniques, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (1), 31-41, 2018.
5. Demirhan A., Güler İ., Image Segmentation Using Self-Organizing Maps and Gray Level Co-Occurrence Matrices, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (2), 285-291, 2010.
6. Karaca A.C., Güllü M.K., Detection of forest fire in Menderes district using a superpixel segmentation based search method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (2), 1061-1076, 2019.
7. Kaya H., Çavuşoğlu A., Çakmak H.B., Şen B., Delen D., Supporting the diagnosis process and processes after treatment by using image segmentation and image simulation techniques: Keratoconus example, Journal of

- the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 737–747, 2016.
8. Sezgin M., Sankur B., Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation, *J. Electron. Imaging*, 13, 146–165, 2004.
 9. Nobuyuki O., A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, 9, 62–66, 1979.
 10. Kapur J. N., Sahoo P. K., Wong A. K. C., A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 29, 273–285, 1985.
 11. Manikandan S., Ramar K., Willjuice Iruthayarajan, M., Srinivasagan, K.G., Multilevel thresholding for segmentation of medical brain images using real coded genetic algorithm, *Measurement*, 47, 558–568, 2014.
 12. Agrawal S., Panda R., Abraham A., A Novel Diagonal Class Entropy-Based Multilevel Image Thresholding Using Coral Reef Optimization, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 1–9, 2018.
 13. Achanta R., Estrada F., Wils P., Süsstrunk S., Salient Region Detection and Segmentation, In: *Computer Vision Systems*, 66–75. Berlin, Heidelberg, 2008.
 14. Zhao X., Turk M., Li W., Lien K., Wang G., A multilevel image thresholding segmentation algorithm based on two-dimensional K–L divergence and modified particle swarm optimization, *Applied Soft Computing*, 48, 151–159, 2016.
 15. Ben İshak A., A two-dimensional multilevel thresholding method for image segmentation, *Applied Soft Computing*, 52, 306–322, 2017.
 16. Pare S., Kumar A., Singh G. K., Color multilevel thresholding using gray-level co-occurrence matrix and differential evolution algorithm, 2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), India, April 6, 2017.
 17. Pare S., Kumar A., Bajaj V., Singh G.K., A context sensitive multilevel thresholding using swarm based algorithms, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 6, 1471–1486, 2019.
 18. Shao D., Xu C., Xiang Y., Gui P., Zhu X., Zhang C., Yu Z., Ultrasound image segmentation with multilevel threshold based on differential search algorithm, *IET Image Processing*, 13, 998–1005 2019.
 19. Bhandari A.K., Singh V.K., Kumar A., Singh G.K., Cuckoo search algorithm and wind driven optimization based study of satellite image segmentation for multilevel thresholding using Kapur’s entropy, *Expert Systems with Applications*, 41, 3538–3560, 2014.
 20. Bao X., Jia H., Lang C., A Novel Hybrid Harris Hawks Optimization for Color Image Multilevel Thresholding Segmentation, *IEEE Access*, 7, 76529–76546, 2019.
 21. Jia H., Ma J., Song W., Multilevel Thresholding Segmentation for Color Image Using Modified Moth-Flame Optimization, *IEEE Access*, 7, 44097–44134, 2019.
 22. Pare, S., Bhandari, A.K., Kumar, A., Singh, G.K., A new technique for multilevel color image thresholding based on modified fuzzy entropy and Lévy flight firefly algorithm, *Computers & Electrical Engineering*, 70, 476–495, 2018.
 23. Sarkar S., Das S., Multilevel Image Thresholding Based on 2D Histogram and Maximum Tsallis Entropy— A Differential Evolution Approach, *IEEE Transactions on Image Processing*, 22, 4788–4797, 2013.
 24. Mittal, H., Saraswat, M., An optimum multi-level image thresholding segmentation using non-local means 2D histogram and exponential Kbest gravitational search algorithm, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 71, 226–235, 2018.
 25. Borjigin S., Sahoo P.K., Color image segmentation based on multi-level Tsallis–Havrda–Charvát entropy and 2D histogram using PSO algorithms, *Pattern Recognition*, 92, 107–118, 2019.
 26. Rashedi E., Nezamabadi-pour H., Saryazdi S., GSA: A Gravitational Search Algorithm, *Information Sciences*, 179, 2232–2248, 2009.
 27. Akay B., A study on particle swarm optimization and artificial bee colony algorithms for multilevel thresholding, *Applied Soft Computing*, 13, 3066–3091, 2013.
 28. Sarkar S., Das S., Chaudhuri S.S., A multilevel color image thresholding scheme based on minimum cross entropy and differential evolution, *Pattern Recognition Letters*, 54, 27–35, 2015.
 29. Mittal H., Pal R., Kulhari A., Saraswat M., Chaotic Kbest gravitational search algorithm (CKGSA), Ninth International Conference on Contemporary Computing (IC3), 1–6, IEEE, Noida, India, 2016.
 30. Liang H., Jia H., Xing Z., Ma J., Peng X., Modified Grasshopper Algorithm-Based Multilevel Thresholding for Color Image Segmentation, *IEEE Access*, 7, 11258–11295, 2019.
 31. Buades A., Coll B., Morel J. M., A Non-Local Algorithm for Image Denoising, 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05), 60–65, IEEE, San Diego, CA, USA, 2005.
 32. Erdo P., Yalçın E., The Solutions of Unconstrained Optimization Benchmark Problems with Particle Swarm Optimization, 4, 14–22, 2015.
 33. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P., Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity, *IEEE Trans. on Image Process*, 13, 600–612, 2004.
 34. Zhang L., Zhang L., Mou X., Zhang D., FSIM: A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment, *IEEE Transactions on Image Processing*, 20, 2378–2386, 2011.
 35. Sasi varnan C., Jagan A., K.J., Jyoti D., Rao Dr.D.S., Image Quality Assessment Techniques pn Spatial Domain, *International Journal of Computer Science and Technology*, 2, 177–184 (2011).
 36. Sathya, B., Manavalan R., Image Segmentation by Clustering Methods: Performance Analysis. *International Journal of Computer Applications*, 29, 27–32, 2011.



Ayak bileği eklemının EMG tabanlı sertlik kestirimi ve sertliği değiştirilebilir bir ayak bileği dış iskelet robot üzerinde gerçek zamanlı uygulaması

Ergin Kılıç*^{ORCID}, Özgür Başer^{ORCID}, Hasbi Kızıllhan^{ORCID}

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Sertliği değiştirilebilir ayak bileği dış iskelet robot
- Ayak bileği eklemi sertlik değerinin EMG sinyalleri üzerinden kestirimi
- EMG tabanlı ayak bileği sertlik kestiriminin gerçek zamanlı uygulaması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 04.06.2020

Kabul: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.748240

Anahtar Kelimeler:

Sertlik kestirimi,
EMG sinyal işleme,
sertliği değiştirilebilir
eyleyici,
empedans kontrol,
dış iskelet robotlar

ÖZET

İnsan kas-iskelet sistemi yürüme esnasında ayak bileği eklemünde sertliği devamlı değiştirerek esnek ve kararlı bir yürüme kabiliyeti sunmaktadır. Bilek eklemının bu hareketini taklit edebilmek için hareket esnasında bilek eklemının sertlik kestirimi önem arz etmektedir. Bu çalışmada bilek eklemının EMG tabanlı bir model üzerinden sertlik kestirimi ve uygulanan kuvvet geri beslemeli bir empedans kontrol algoritması ile VS-AnkleExo-kullanıcı arasında düşük etkileşim torkları sağlanarak gerçek zamanlı robotun kullanıcıya ait sertlik değerini taklit edebildiği gösterilmiştir. Çalışmada öncelikle bilek eklemının davranışını tanımlamak için iki adet kas tarafından tahrik edilen bir eklemden oluşan kas-iskelet model yaklaşımı kullanılmıştır. Bileğin plantar-fleksiyon ve dorsal fleksiyon hareketlerini sağlayacak kas kuvvetlerini oluşturmak amacıyla Mykin kas modelinden faydalanılmıştır. Daha sonra öznelik çıkarım yöntemleri ile elde edilen EMG verileri ve ölçülen tork verileri kullanılarak Mykin modelindeki parametreler belirlenmiştir. Bu parametrelerin kestirimi sinyal işleme yöntemlerine göre farklılık gösterdiğinden, yapılan doğrulama deneyi ile EİD sinyal işleme yönteminin en uygun yöntem olduğuna karar verilmiştir. Bu yöntem ile bulunan biyomekanik parametreler Mykin modeli yardımıyla elde edilen denklemlerde yerine konarak bilek eklemının sertlik kestirimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada son olarak bilek eklemının kestirilen sertlik değeri gerçek zamanlı VS-AnkleExo'nun sertlik ayarlama mekanizmasına gönderilmiş ve kullanıcı ile VS-AnkleExo arasında minimum etkileşim torku elde etmek için cihaz üzerinde kuvvet geri beslemeli bir empedans kontrol algoritması uygulaması gerçekleştirilmiştir.

EMG-based stiffness estimation of ankle joint and real-time implementation on a variable stiffness ankle exoskeleton robot

H I G H L I G H T S

- Variable stiffness ankle exoskeleton robot
- Estimation of ankle joint stiffness value over EMG signals
- Real-time implementation of EMG based ankle stiffness estimation

Article Info

Research Article

Received: 04.06.2020

Accepted: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.748240

Keywords:

Stiffness estimation,
EMG signal processing,
variable stiffness actuator,
impedance control,
exoskeleton robots

ABSTRACT

The human musculoskeletal system offers a flexible and stable walking ability by constantly changing the stiffness of the ankle joint during walking. In order to imitate that movement of the ankle, the stiffness estimation of the ankle during movement is important. In this study, EMG-based stiffness estimation of the ankle is presented and it has been shown that the robot can mimic the stiffness value of the user in real time by providing low interaction torques between VS-AnkleExo-user with the applied force feedback impedance control algorithm. To describe the behavior of the ankle joint, a musculoskeletal model approach consisting of a joint driven by two muscles was used. Mykin muscle model was used to create muscle forces that will provide plantar-flexion and dorsal flexion movements of the ankle. Then, the parameters in the Mykin model were determined by using the EMG data obtained by different feature extraction methods and the measured torque data. Since the estimation of these parameters differs according to signal processing methods, it was decided that the Slope Sign Change signal processing method is the most suitable one with the verification experiment. The biomechanical parameters found with this method were replaced in the equations obtained with the help of Mykin muscle model and the stiffness estimation of the ankle joint was performed. Finally, within the scope of the study, the estimated stiffness value of the ankle joint was sent to the stiffness adjustment mechanism of VS-AnkleExo in real time and an impedance control algorithm with force feedback was implemented on the device to obtain minimum interaction torque between the user and VS-AnkleExo.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Robotik cihazların hedeflerinden birisi yürüme engelli kişilerin bacak ve eklemlerinin güç kazanmasına ya da tekrar yürüme kabiliyeti elde etmesine yardımcı olmaktır. Dış iskelet robotlar insan tarafından giyilebilir cihazlar olup, insanlarla sürekli olarak fiziksel olarak etkileşim halindedirler. İnsan kas iskelet sistemi eklemlerindeki sertliği sürekli değiştirerek farklı ortamlarda çeşitli hareketleri otonom olarak gerçekleştirebilmektedir [1]. İnsan hareketinin altında yatan bu özelliği taklit edebilmek için son zamanlarda sertliği değiştirilebilir eyleyiciler (SDE) alt uzuv dış iskelet robot sistemlerinde hareket birimi olarak kullanılmaya başlamıştır (ARES [2], MACCEPA [3], UVSHA [4], MeRIA [5]). Literatürdeki diğer SDE tasarımları haricinde makale yazarları tarafından insan ayak bileği eklemine kullanılmak üzere VS-AnkleExo [6] isimli bir cihaz geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan VS-Ankle isimli sistem daha önce yazarlar tarafından sertliği değiştirilebilir bir ayak bileği dış iskelet robotun çeşitli kontrolcüler ile pozisyon takibi kontrol performansının değerlendirilmesi çalışmasında da kullanılmıştır [7].

İnsan sinir-kas sistemi kontrol ettiği eklemlerde sertlik ve sönümlemeyi devamlı değiştirerek minimum enerji sarfiyatı ile esnek ve kararlı bir hareket kabiliyeti sağlamaktadır [8]. Bir SDE için farklı yürüme hızlarında optimize edilmiş sertlik değerlerinin kullanılmasıyla dış iskelet robot kullanıcılarına ait metabolik enerji ihtiyaçlarının azaltıldığı bilinmektedir [9]. Ayrıca ayak bileği sertliğinin uygun değerlere ayarlanması yürüme ve koşma sırasında meydana gelen darbe şoklarının iletimini azaltarak darbeden kaynaklanan yaralanmaları önlemektedir [10]. Dolayısıyla, eklem sertliğinin anlık kontrolü insanın farklı çevresel koşullara adaptasyonunu sağlamak için önem arz etmektedir. Bir mekanik sistemin dinamiğini belirleyen en önemli parametrelerden biri olan sertlik değerinin ayarlanmasıyla arzulanan harekete yakın doğal bir hareket elde etmek mümkündür [11]. Değişken çevresel koşullarda merkezi sinir sistemi eklem sertliğini sürekli ayarlayarak kararsız dinamik hareketlerin kararlı bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır [12]. Sonuç olarak insan hareketlerini taklit etmek için geliştirilen robotik cihazlarda biyobenzetim ("biomimetic") hareket uygulamaları yapabilmek için bilek eklemlerinin anlık sertlik kestirimine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayak bileği eklemi sertlik kestirimi için literatürde çeşitli tahmin yaklaşımları önerilmektedir. Bu yaklaşımlardan biri Roy vd. [13] tarafından klinik ölçüm aracı olarak Anklebot kullanarak, insan ayak bileği sertliğini tahmin etmek için basit bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Ortaya koyulan bu yaklaşıma karşı insan eklemlerinin fiziksel model yaklaşımını kullanan çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır [14-15]. Misgeld vd. [16] ayak bileği ortezy uygulamalarında kullanmak için, ayak bileği sertlik değerini tahmin eden model tabanlı bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Rouse vd. [17] atalet, sönümleme ve sertlik elemanlarından oluşan bir matematiksel model kullanarak ayak bileği sertliğini belirlemişlerdir. Literatürde farklı model

yaklaşımları olmasına karşın kişiye özel insan eklemlerini ele alan çok az dinamik model bulunmaktadır. Sartori vd. [18] tarafından ortaya koyulan böylesi bir dinamik model kişiye ait EMG verisi tarafından oluşturulmakta ve söz konusu eklemle ilgili torklar tahmin edilmektedir. Bu konu ile ilgili diğer bir çalışma, bir diz eklemindeki kas kuvvetlerini ve eklem hareketlerini tahmin etmek için kullanılan EMG-tahrikli kas-iskelet modelidir [19]. EMG-tahrikli modellerin avantajı, bir kas aktivasyonu neticesinde ortaya çıkan eklem sertliği değişikliklerinin anlık olarak tespit edilmesidir. Bu prensibe dayanan literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan biri, ayakta durma esnasında ayak bileği sertliğini doğrudan ölçmek için bir kuvvet platformu üzerine monte edilmiş bir cihaz kullanımıdır [20]. Diğer bir çalışma olarak Vlutters vd. [21] kullanıcı ayakta dengedeysen baldır kısmına yerleştirilen EMG sensörleri ile her iki taraftaki ayak bileği sertliğini ölçmek ve genlik ilişkisini belirlemek için deneysel bir protokol geliştirmişlerdir.

Literatürde birçok farklı tasarıma sahip sertliği değiştirilebilir dış iskelet robotlar bulunsada şimdiye kadar robot kullanıcılarına özgü anlık eklem sertlik değişimlerinin bir dış iskelet robot üzerine gerçek-zamanlı yansıtılarak gerçekleştirilen herhangi bir çalışma olmadığı görülmüştür. Bu çalışmanın özgünlüğü literatürde ilk defa bir dış iskelet robot kullanıcısının eklem sertliğinin anlık olarak kestirimi ve bir rasgele hareket kontrolü esnasında gerçek-zamanlı biyobenzetim uygulamasının gerçekleştirilmesidir. Bu çalışma EMG sinyalleri ile elde edilen ayak bileği kas-iskelet model parametreleri üzerinden robot kullanıcısının ayak bileği eklem sertliğinin gerçek-zamanlı olarak kestirimini ve elde edilen bu sertlik kestirim değerlerinin ayak bileği eklemine kullanılmak üzere daha önce geliştirilen sertliği değiştirilebilir bir ayak bileği dış iskelet robot (VS-AnkleExo) üzerine uygulamasını içermektedir. Gerçek-zamanlı sertlik kestirimi için fleksiyon ve ekstansiyon kaslarından alınan EMG sinyalleri farklı sinyal işleme yöntemleri ile işlenmiş ve elde edilen sinyaller bir kas-iskelet model yaklaşımındaki parametreleri belirlemek için kullanılmıştır. Bir sonraki aşamada ise EMG sinyal işleme yöntemi ile bulunan biyomekanik parametreler ve kişinin ayak bileğini hareket ettirme esnasında ölçülen ayak bileği açı değerleri ilgili kas-iskelet model yaklaşımıyla elde edilen sertlik denkleminde yerine konularak ayak bileği sertlik tahmini yapılmıştır. Çalışma kapsamında son olarak tahmin edilen sertlik değerinin gerçek-zamanlı olarak AnkleExo'nun hareket birimi olan SDE'ye gönderilmesi ve bu esnada kuvvet geri beslemeli bir empedans kontrol algoritmasının uygulanması işlemi gerçekleştirilmiştir.

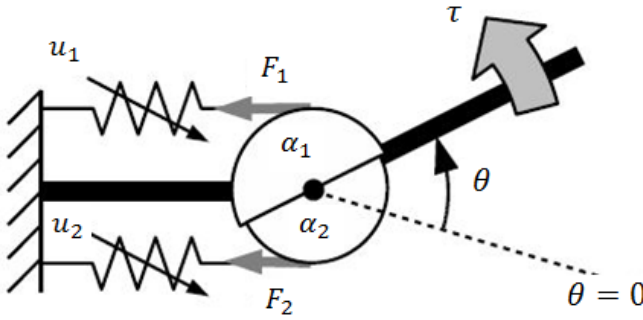
Bu çalışma şu şekilde organize edilmiştir; Bölüm 2 ayak bileği eklemine biyomekanik model ve EMG sinyal işleme yöntemleri ile ilgili detay bilgileri içermektedir. EMG sinyal işleme üzerinden ayak bileği sertlik kestirim çalışmaları Bölüm 3'te sunulmaktadır. Bölüm 4'te tahmin edilen ayak bileği sertlik değerinin sertliği değiştirilebilir bir ayak bileği dış iskelet robot üzerinde uygulanmasına ait test sonuçları

verilmektedir. Bölüm 5'te ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçların genel bir yorumlaması ve gelecek çalışmalar ile ilgili öngörüler yer almaktadır.

2. KAS-İSKELET MODEL YAPISI VE EMG ÖZNETELİK ÇIKARIM YÖNTEMLERİ (MUSCUSKELETON MODEL STRUCTURE AND EMG FEATURE EXTRACTION METHODS)

2.1. Kas-İskelet ve Mykin Kas Modeli (Musculoskeletal and Mykin Muscle Model)

Bu çalışmada ayak bileği kas-iskelet modeli olarak Kawase vd. [22] tarafından önerilen bir biyomekanik model kullanılmıştır. Bu biyomekanik model fleksiyon ve ekstansiyon hareketler için antagonistik olarak yerleştirilmiş iki kas tarafından tahrik edilen bir serbestlik dereceli dönel bir eklemde oluşmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi her kasın gerginliği, kas aktivasyonları ve eklem açısı ile değişmektedir.



Şekil 1. Basitleştirilmiş kas-iskelet model yapısı
(Simplified muscuskeleton model structure) [22]

Gerçekte insan ayak bileği kas-iskelet modeli bu kadar basit olmayıp, 12 farklı kas tarafından tahrik edilmektedir. Şekil 2a'da gösterilen Tibialis Anterior (TA), Lateral Gastrocnemius (LG), Medial Gastrocnemius (MG), Peroneus Longus (PER) kasları yürüme esnasında aktif olarak kullanılmaktadır. Ancak Zhen vd. [23] tarafından yapılan bu klinik çalışmada, Tibialis Anterior (TA) kasının ayak bileği dorsal-fleksiyon hareketinde ve Medial Gastrocnemius (MG) kasının ise plantar-fleksiyon hareketinde baskın olduğu ve diğer kasların ise zayıf kaldığı

ortaya koyulmuştur. İlgili çalışmada özellikle bu kasların hareket esnasında güçlü EMG sinyali verdiği belirlenmiştir. Bu nedenle kullanılan ayak bileği kas-iskelet modelinde ayak bileği dorsal-fleksiyon hareketi için Tibialis Anterior (TA) kasının (Şekil 1'de u_1 ile gösterilen) ve plantar-fleksiyon hareketi için ise Medial Gastrocnemius (MG) kasının (Şekil 1'de u_2 ile gösterilen) kullanılması tercih edilmiştir. Ayrıca kullanılan bu modelde moment kol uzunluklarının (a_1 ve a_2) bilek açısı değerlerine göre değişmediği ve hareket boyunca sabit kaldığı kabul edilmiştir.

Söz konusu bu çalışmada fleksör ve ekstansör kasları üzerinden ayak bileği torkunu ve sertliğini hesaplamak için kullanılan kas iskelet modeli Shin vd. [24] tarafından ortaya koyulan Mykin (Miyokinetic) kas modeline benzer bir şekilde oluşturulmuştur. Mykin kas modeline göre her bir kas tarafından uygulanan gerilme kuvveti (F_i) Eş. 1 sayesinde hesaplanmaktadır.

$$F_i = (k_{0i} + k_{1i} * u_i)(l_{0i} + l_{1i} * u_i - a_i * \theta) \quad (1)$$

Burada, a_i i 'nci kasa ait moment kol uzunluğunu, k_{0i} ve k_{1i} i 'nci kasa ait tendon sertliklerini, l_{0i} ve l_{1i} i 'nci kasa ait tendon uzunluklarını, u_i EMG sinyallerinin işlenmesi ile elde edilen i 'nci kas aktivasyon değerlerini ve θ ise eklem açısını ifade etmektedir.

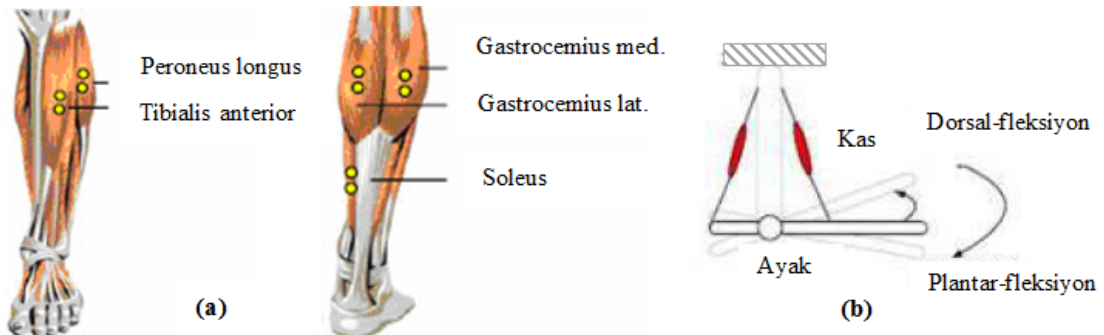
Kas gerilme kuvveti formülü kullanılarak bilek eklemine oluşan eklem torku (T) Eş. 2 ile hesaplanabilmektedir.

$$T = \sum_{i=1}^2 a_i (k_{0i} + k_{1i} * u_i)(l_{0i} + l_{1i} * u_i - a_i * \theta) \quad (2)$$

Bu tork denkleminin θ eklem açısı değişkenine göre kısmi türevi alındığında, bilek eklemineki sertlik değeri Eş. 3 ile ifade edilmektedir.

$$K = -\frac{\partial T}{\partial \theta} = \sum_{i=1}^2 (a_i)^2 (k_{0i} + k_{1i} * u_i) \quad (3)$$

Sonuç olarak, ayak bileğinin genel bir hareketi esnasında ayak bileği eklem açısı (θ) değerleri ve ayak bileği tarafından uygulanan tork (T) değerleri ile bütün bu bilek hareketini sağlayan u aktivasyon seviyelerinin ölçülebildiği bir deneysel çalışma yapılırsa söz konusu kas modeline ait olan



Şekil 2. (a) Yürüme esnasında aktif olan kaslar ve (b) kasların plantar-fleksiyon ve dorsal-fleksiyon hareketi
(a) Active muscles during walking and (b) plantar-flexion and dorsi-flexion movement of the muscles) [23]

tüm k_{0i} , k_{1i} , l_{0i} ve l_{1i} kas parametrelerinin sayısal değerleri uygun bir optimizasyon tekniği kullanılarak bulunabilecektir. Sonrasında ise bulunan parametre değerleri Eş. 3'te yerine konularak ayak bileği sertlik değeri gerçek-zamanlı olarak doğrudan EMG sinyalleri üzerinden kolayca tahmin edilebilecektir.

2.2. EMG Öznitelik Çıkarım Yöntemleri (EMG Feature Extraction Methods)

Elektromiyografi (EMG) bir kasın kasılmasını sağlayan kas hücrelerinden ölçülen çok düşük seviyede bir potansiyel elektrik sinyalidir [25]. EMG bilindiği üzere çok farklı uygulamalarda hastaların tanı ve teşhisinde bir araç olarak kullanılmaktadır [26]. Son yıllarda çoğu araştırmacılar insan-robot arasındaki etkileşimi daha iyi sağlamak, dış iskelet robotu kullanıcısının isteği ve gayesi doğrultusunda kolaylıkla kontrol etmek ve son olarak biyobenzetim bir hareketin temel unsuru olan eklem sertlik bilgisini tahmin etmek için EMG sinyallerini kullanmaktadırlar. Bu çalışmada ayak bileği eklemi sertlik kestirimi için ayak kaslarından elde edilen EMG sinyalleri kullanılmıştır. Sertlik kestirimi işleminde üstesinden gelinmesi gereken ilk problem EMG sensörlerinden okunan sinyallerin gerçek-zamanlı olarak hızlı bir şekilde işlenebilmesidir. EMG sinyallerinden istenen bilgiyi elde etmek için uygulanabilecek öznitelik çıkarım yöntemleri literatürde bulunmaktadır. Bir EMG sinyalinden elde edilebilecek öznitelikler zaman tanım alanı ("time domain") ve frekans tanım alanı ("frequency domain") olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu çalışmada zaman tanım alanı öznitelikleri

düşük gürültülü ortamlardaki yüksek sınıflandırma performansları ve frekans tanım alanındaki öznitelikler ile karşılaştırıldığında daha düşük hesaplama karmaşıklıkları nedeniyle tercih edilmiştir. Bu bölümde literatürde var olan zaman tanım alanı kapsamına giren EMG sinyal işleme yöntemlerinin teorisi kısaca sunulmuş ve matematiksel ifadeleri Tablo 1'de verilmiştir [27].

EMG sinyal işlemede kullanılan en popüler yöntemlerin başında Ortalama Karekök (OK) yöntemi gelmektedir. Ortalama Karekök (OK) yöntemi özellikle EMG sinyallerinin ortalama genliğini hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu nedenle ortalama bir kuvvet göstergesi olarak bilinmektedir. EMG sinyal işlemede sık kullanılan başka bir öznitelik çıkarım yöntemi ise Ortalama Mutlak Değer (OMD) yöntemidir. Bir kasın ortalama aktivasyon seviyesini hesaplamak için mutlak değerce düzeltilmiş sinyalleri kullanan OMD yöntemi bir önceki yöntemden oldukça benzerdir. Sinyal işlemede sıklıkla kullanılan diğer bir yöntem ise Sıfır Geçiş (SG) yöntemidir. Bu yöntemde EMG sinyalinin sıfır değerinden geçişleri (ya da işaret değişiklikleri) sayılmakta olup bir nevi sinyalin frekans bilgileri elde edilmektedir. Düşük voltaj dalgalanması ya da gürültü yüzünden olan geçişlerin bu hesaba katılmaması için genellikle bir eşik değeri kullanılmaktadır. Eğim İşaret Değişimi (EİD) yöntemi SG yöntemi ile büyük bir benzerlik göstermekte olup EMG sinyali yerine EMG sinyalinin eğiminde (türevinde) meydana gelen işaret değişimleri sayılmaktadır. Pozitif ve Negatif eğimler arasında olan işaret değişimleri sayılırken yine sinyal üzerindeki gürültünün bu hesaba katılmaması

Tablo 1. Öznitelik çıkarım yöntemleri (Feature extraction methods)

<p><i>Ortalama Karekök (OK):</i></p> $OK = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$ <p><i>Ortalama Genlik Değişimi (OGD):</i></p> $OGD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} |x_{i+1} - x_i|$ <p><i>v-Derece (v-De):</i></p> $v - De = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^v \right)^{\frac{1}{v}}$ <p><i>Sıfır Geçişi (SG):</i></p> $SG = \sum_{i=1}^{N-1} (\text{sgn}(x_i \times x_{i+1}) \cap |x_i - x_{i+1}|) \geq \text{Eşik Değeri}$ <p><i>Eğim İşaret Değişimi (EİD):</i></p> $EİD = \sum_{i=1}^{N-1} [\text{sgn}[(x_i - x_{i-1}) \times (x_i - x_{i+1})]]$	<p><i>Ortalama Mutlak Değer (OMD):</i></p> $OMD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|$ <p><i>Fark Mutlak Standart Sapma Değeri (FMSSD):</i></p> $FMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^1 (x_{i+1} - x_i)^2}$ <p><i>Log Dedektörü (Log-De):</i></p> $\text{Log} - De = e^{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log|x_i|}$
<p><i>Önemli Notlar:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • N : Pencere Genişliği • x_i : Pencere içindeki i. adımda örneklenmiş EMG sinyali • Eşik Değeri : EMG sinyalinin gürültü değeri <p>$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x \geq \text{Eşik Değeri} \\ 0, & \text{değilse} \end{cases}$</p>	

için bir eşik değerinin kullanılması gerekmektedir. Ortalama Genlik Değişimi (OGD) yöntemi ise EMG sinyalinin bir nevi karmaşıklığını (complexity) ölçmektedir. Bu yöntemde EMG sinyal dalga formunun belirli bir zaman boyunca birikimli ortalama uzunlukları hesaplanmaktadır. Sinyal işlemede sıklıkla kullanılan Fark Mutlak Standart Sapma Değeri (FMSSD) yöntemi ise OK yöntemine büyük benzerlik göstermekte olup EMG dalga formunun bir nevi standart sapma değeri hesaplanmaktadır. Sinyal işlemede önerilen diğer bir yöntem ise v-Derece (v-De) yöntemidir. EMG sinyalinden kasların aktivasyon seviyesini doğrusal olmayan bir model üzerinden tahmin etmeye yönelik oluşturulan bu yöntemin matematiksel ifadesi Tablo 1'de sunulmaktadır. Tablo 1'deki ilgili denklem $v=2$ için incelendiğinde çıkan sonuç v-Derece yönteminin OK yöntemine dönüştüğüdür. Deneysel sonuçlar v'nin optimal değerinin 2 olduğunu gösterse de (bu yüzden OK yöntemi literatürde en sık kullanılan yöntemlerden biri olmuştur), bu çalışmada $v=4$ alınıp OK yöntemi ile olan farkı ortaya konulmak istenmiştir. Literatürde EMG sinyal işlemede tercih edilen bir diğer yöntem ise Log Dedektörü (Log-De) yöntemidir. Bu yöntemde kasın aktivasyon seviyesi doğrusal olmayan bir logaritmik hesaplama yöntemi ile hesaplanmaktadır.

3. EMG SİNYAL İŞLEME VE AYAK BİLEĞİ SERTLİK KESTİRİM TESTLERİ (THE TESTS OF EMG SIGNAL PROCESSING AND ESTIMATION OF ANKLE STIFFNESS)

3.1. EMG Sinyal İşleme (EMG Signal Processing)

Bu bölümde sinyal işleme testlerinin gerçekleştirilmesi için ilk olarak EMG sensörleri Şekil 3'te gösterildiği üzere Medial Gastrocnemius (MG) ve Tibialis Anterior (TA) kasları üzerine denk gelecek şekilde yapıştırılmıştır. Daha sonra EMG sinyal işleme testleri için 60 saniye boyunca ayak bileğine plantar-fleksiyon ve dorsal-fleksiyon hareketleri yaptırılarak ham EMG verisi 1000 Hz'lik örnekleme frekansında ölçülmüştür. Bu esnada ölçülen bir EMG verisi için pencere genişliği (N) 256 olacak şekilde ayarlanmış olup bir önceki bölümde bahsedilen zaman tanım alanlı öznelik çıkarım yöntemleri kullanılarak hem Medial Gastrocnemius (MG) hem de Tibialis Anterior (TA) kasları

için ayrı ayrı uygulanmıştır. Örnekleme frekansının 1000 Hz (örnekleme periyodu 1ms) olduğu durumda pencere genişliğinin 256 ms olması, EMG sinyalinin sürekli en son 256 ms'lik kısmının veri işlemeye tabi tutulacağını göstermektedir. Pencere artım miktarı ise 1ms olup sinyal işlemeye tabi tutulan verileri içeren ardışık pencereler arasında geçen süreyi bildirmektedir. Gerçek-zamanlı EMG sinyal işleme hakkında daha ayrıntılı bilgiler Kılıç ve Doğan [28] çalışmasında sunulmaktadır. Önemle belirtmek gerekir ki; Sıfır Geçiş (SG) ve Eğim İşaret Değişimi (EİD) yöntemlerinden elde edilen öznelik değerleri pencere genişliğine (N=256) bölünerek sonuçlar normalize edilmektedir. Ayrıca bu iki yöntem için ihtiyaç duyulan eşik değeri ise ham EMG sinyali üzerindeki gürültü değeri göz önüne alınarak Tibialis Anterior (TA) kası için 0,01 V ve Medial Gastrocnemius (MG) kası için 0,03 V olarak ayarlanmıştır. Medial Gastrocnemius (MG) kası için eşik değerinin daha büyük seçilmesinin nedeni bu kas üzerindeki gürültü seviyesinin daha yüksek olmasıdır.

Yukarıda bahsedilen öznelik çıkarım yöntemlerinin 10 saniyelik bir zaman aralığında MG ve TA kaslarından ölçülen ham EMG sinyallerine uygulanması sonucunda çıkarılan öznelik grafikleri ise sırasıyla Şekil 4 ve 5'te sunulmaktadır. Önemle belirtmek gerekir ki, bir sonraki bölümde anlatılacak olan parametre kestirme/tahminleme işlemlerinde ölçülen ham EMG verilerinin gürültülü bir sinyal yapısında olmasından ötürü doğrudan kullanılması mümkün değildir. Eş. 2 aracılığı ile gerçekleştirilecek olan parametre kestirme işleminde bu bölümde elde edilen öznelik değerleri kullanılacaktır.

3.2. EMG Sinyallerinden Ayak Bileği İçin Moment ve Sertlik Kestirimi

(Estimation of Ankle Moment and Stiffness from EMG Signals)

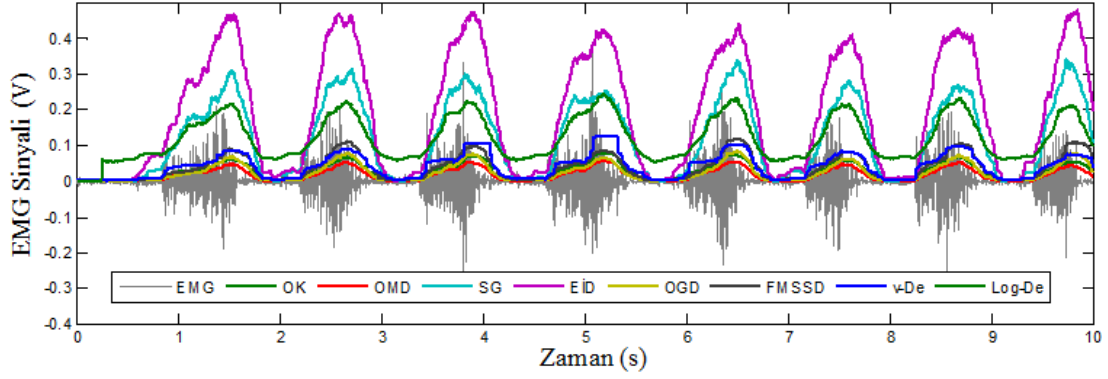
Bu kısımda ayak bileği eklemının sertlik kestirim işlemi gerçekleştirilmiştir. Sertlik kestirimi için EMG sinyalleri ile ayak bileği momenti arasında bir ilişki kurulması için Mykin kas modelinden [24] faydalanılmıştır. Bu model yardımıyla ayak bileği torku ve EMG sinyalleri arasında ilişki kurulabilmekte ve daha sonra Eş. 2'deki model parametreleri kişiye özel elde edilmektedir. Son olarak Eş. 3 ile ayak bileğinin sertlik kestirimi yapılmaktadır. Bütün bu işlemleri



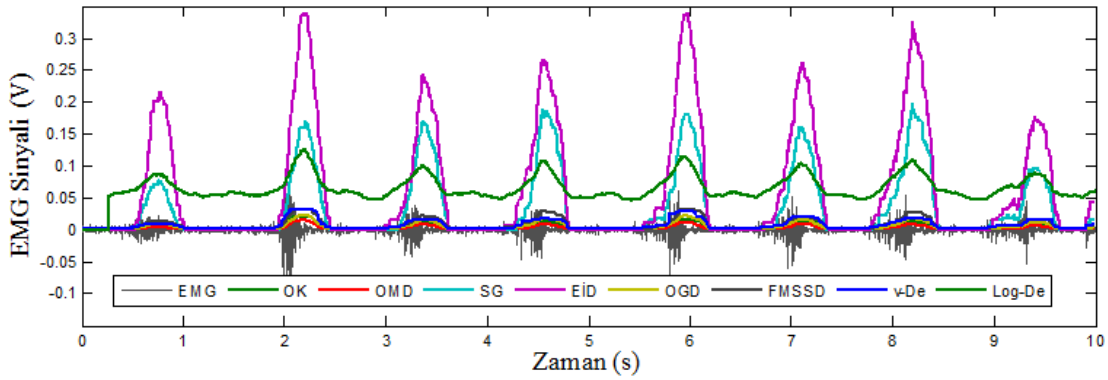
Şekil 3. EMG sensörlerinin ayak bileği kaslarına adaptasyonu (Adaptation of EMG sensors to ankle muscles)

başarıyla gerçekleştirebilmek için bilek hareketinde baskın olan Tibialis Anterior (TA) ve Medial Gastrocnemius (MG) kaslarından eş zamanlı olarak sağlıklı ölçüm alabilmek için bir deney düzeneği kurulmuştur. Şekil 6'da gösterilen deney

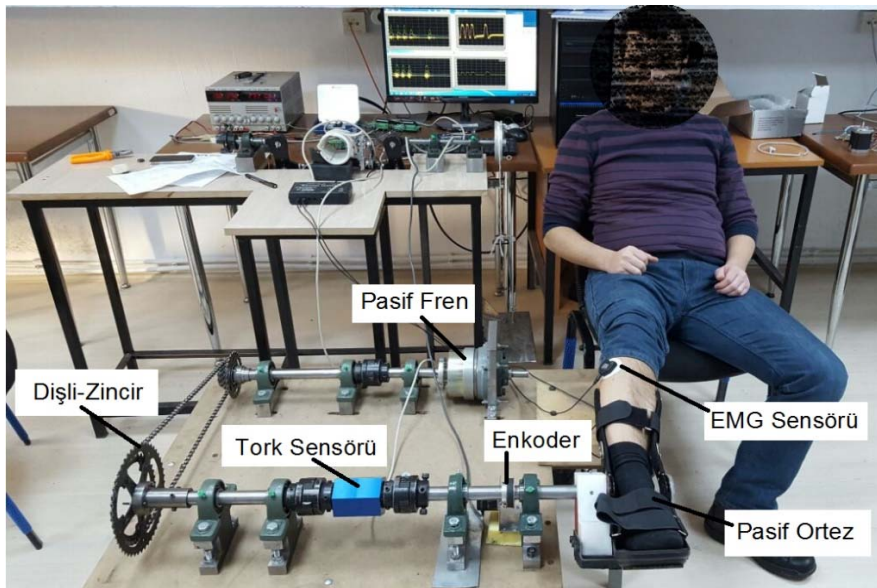
düzeneği, direnç torku yaratan manyetik bir fren, fren torkunu çok daha yüksek değerlere çıkartabilmek için bir dişli-zincir düzeneği, denek kişinin ayağını yerleştirebileceği pasif bir ortezi, ayak bileğinin açısını ölçen bir artımsal



Şekil 4. Medial Gastrocnemius (MG) kasından ölçülen EMG sinyaline öznelik çıkarım yöntemlerinin uygulanması (Application of feature extraction methods to the EMG signal measured from Medial Gastrocnemius (MG) muscle)



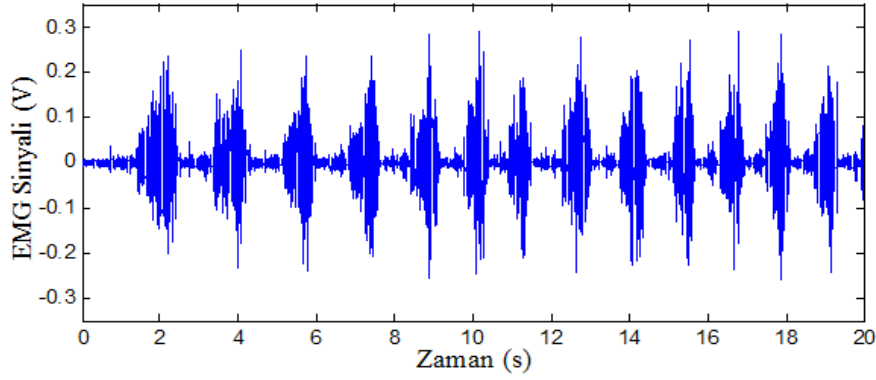
Şekil 5. Tibialis Anterior (TA) kasından ölçülen EMG sinyaline öznelik çıkarım yöntemlerinin uygulanması (Application of feature extraction methods to EMG signal measured from Tibialis Anterior (TA) muscle)



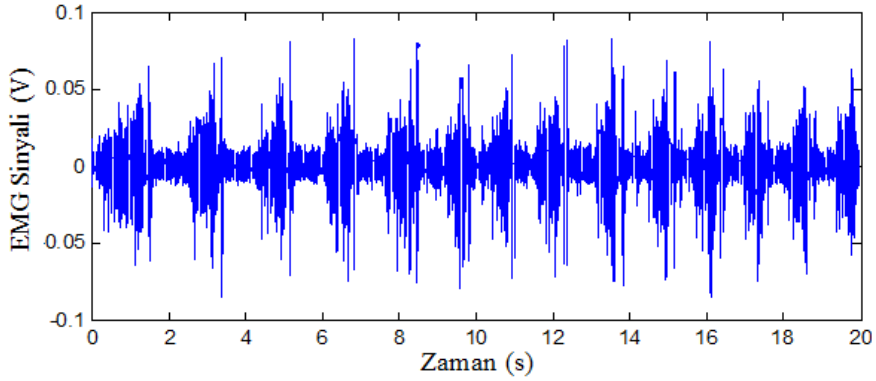
Şekil 6. Ayak bileği sertlik kestirimi için oluşturulan deney düzeneği (Experimental setup for ankle stiffness estimation)

enkoder ve ayak bileği ile pasif fren arasındaki etkileşim torklarını ölçebilen bir dinamik tork sensöründen oluşmaktadır. Bu deney düzeneği ile denek kişi oturur pozisyonda ayağını pasif orteze yerleştirmekte ve pasif frene karşı iş yapacak şekilde ayağını farklı hızlarda hareket ettirmektedir. Böylelikle ayak bileği ekleminin farklı konumlarına karşılık ayak bileği tarafından uygulanan tork değerleri ve tüm bu farklı hareketler esnasında ayak bileği kaslarından ölçülen ham EMG sinyalleri eş zamanlı olarak kayıt altına alınmaktadır. Sonuç olarak Şekil 6'da gösterilen deney düzeneği kullanılarak ayak bileği kaslarına ait Eş. 2'deki parametre kestirimleri kişiye özel yapılabilecektir. Parametre kestirimi için gerçekleştirilen testlerde denek kişi

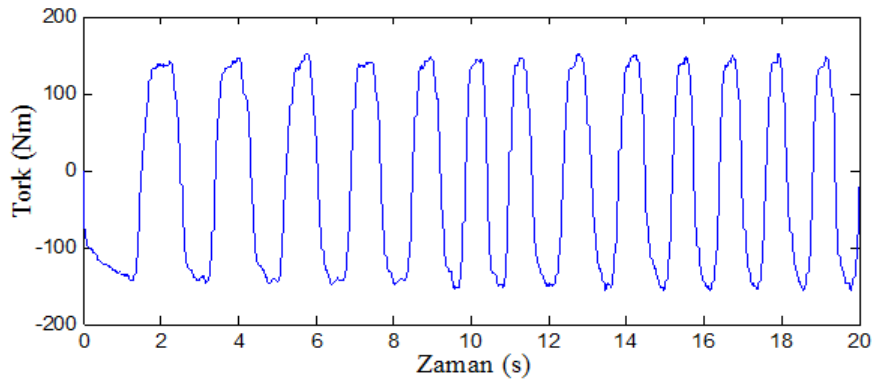
20 saniye boyunca pasif frenin zorlamalarına karşılık sagittal düzlemde ayak bileğini hareket ettirmiştir. Bu esnada ayak bileği kaslarının ham EMG verisi 1000 Hz'lik örnekleme frekansında ölçülmüş ve EMG sinyallerine karşılık gelen tork verileri kaydedilmiştir. Bu toplanan veriler ile Lineer Olmayan En Küçük Kareler Eğri Uydurma (Nonlinear Least Square Curve Fitting) yöntemi kullanılarak biyomekanik parametrelerin kestirimi yapılmıştır. Bu amaçla Eş. 2 hedef fonksiyon olarak tanımlanarak MATLAB® "lsqnonlin" [29] optimizasyon aracı kullanılmıştır. Medial Gastrocnemius (MG) ve Tibialis Anterior (TA) kaslarından ölçülen EMG sinyalleri ve bu harekete karşılık gelen tork verileri sırasıyla Şekil 7-9'da verilmiştir. Ancak parametre kestiriminde her



Şekil 7. Medial Gastrocnemius (MG) kasından alınan EMG sinyali
(Received EMG signal from Medial Gastrocnemius muscle)



Şekil 8. Tibialis Anterior (TA) kasından alınan EMG sinyali (Received EMG signal from Tibialis Anterior muscle)



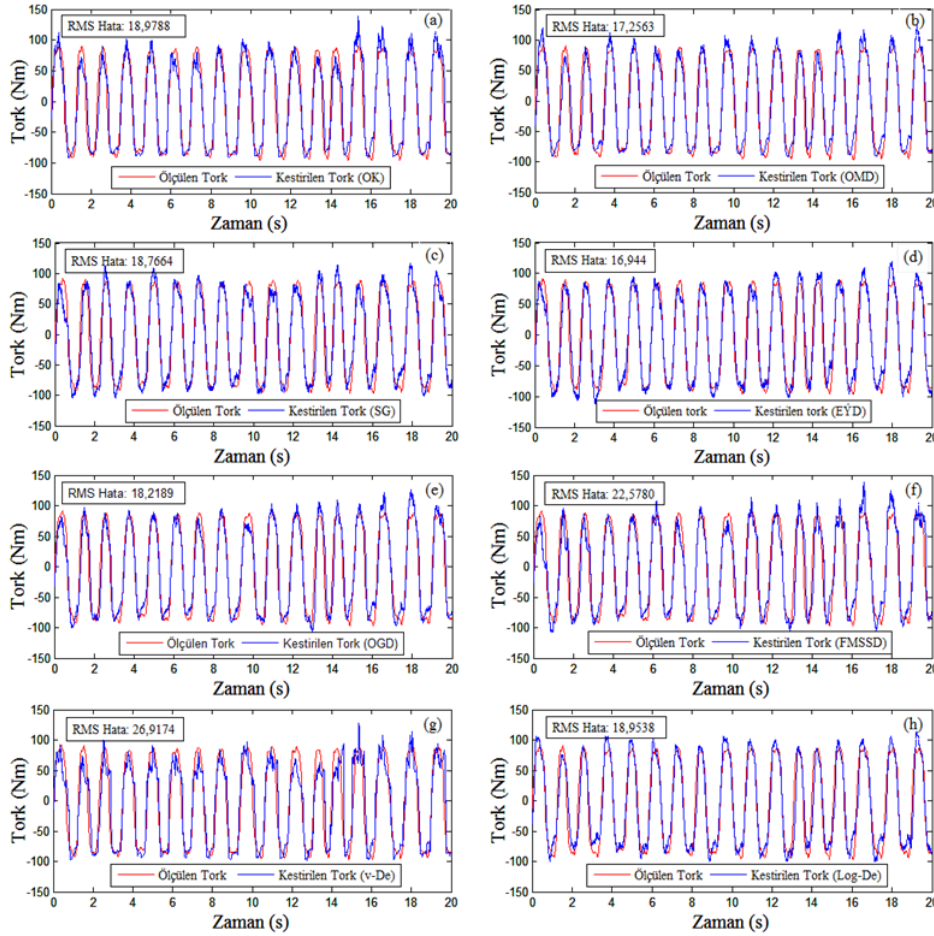
Şekil 9. Hareket esnasında ölçülen tork verileri (Measured torque values during motion)

bir öznitelik biçimi birbirinden farklı yapıda olduğundan, bu farklı özniteliklerin kullanılmasıyla tahmin edilen parametreler de birbirinden farklılık göstermektedir. Ölçülen tork verileri ve EMG sinyallerine karşılık gelen farklı özniteliklerin kullanımı ile tahmin edilen biyomekanik model parametreleri Tablo 2’de sunulmaktadır. Bu çalışmada tork sensöründen ölçülen tork verileri üzerine tahmin edilen parametrelerden hesaplanan tork değerleri çizdirilerek en iyi sonucu veren öznitelik çıkarım yöntemi

tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, gerçekleştirilen deneylerde ölçülen tork verileri üzerine tahmin edilen parametrelerden hesaplanan tork değerleri çizdirilmiş ve RMS hataları (Ortalama Karekök Hataları) hesaplanmıştır. Her bir yöntem için hesaplanan tork değerleri ile ölçülen tork değerleri sırasıyla Şekil 10’da gösterilmektedir. Ayrıca her bir grafik için hesaplanan RMS hataları Tablo 3’te sunulmaktadır. Hesaplanan RMS hata değerlerinden anlaşılacağı üzere Eğim İşaret Değişimi (EİD)

Tablo 2. Farklı öznitelik çıkarım yöntemleri kullanılarak biyomekanik parametrelerin tahmin edilmesi
(Estimation of biomechanics parameters by using different feature extraction methods)

	OK	OMD	SG	EİD	OGD	FMSSD	v-De	Log-De
a_1 (cm)	0,71	2,31	3,09	4,91	1,19	5,00	1,24	2,41
k_{01} (N/m)	93087	62225	161480	45624	16829	99016	98718	99857
k_{11} (N/m)	99988	99999	97052	96561	97878	99011	99997	99945
l_{01} (cm)	0,91	2,87	1,01	3,54	10,00	2,02	0,61	0,59
l_{11} (cm)	9,91	9,9	10	2,09	10,00	6,93	10	10
a_2 (cm)	4,99	3,76	0,13	3,1	4,54	5,00	4,99	1,2
k_{02} (N/m)	27117	41253	895770	94093	56445	99016	33202	654010
k_{12} (N/m)	98001	99311	99441	69097	99018	99285	84019	96851
l_{02} (cm)	2,01	2,68	10	5,29	4,55	2,08	3,56	3,54
l_{12} (cm)	4,78	9,81	2,45	9,91	9,26	0,41	9,25	10,00



Şekil 10. Farklı öznitelik çıkarım yöntemleri kullanılarak elde edilen tork ile ölçülen tork değerlerinin karşılaştırılması: a) OK, b) OMD, c) SG, d) EİD, e) OGD, f) FMSSD, g) v-De ve h) Log-De

(Comparison of torque values obtained using different feature extraction methods and measured torque values: a) OK, b) OMD, c) SG, d) EİD, e) OGD, f) FMSSD, g) v-De and Log-De)

yöntemi ile en iyi sonuçlar elde edilmektedir. Bu nedenle sertlik kestirimi için bu çalışmada EİD öznitelik çıkarma yöntemi tercih edilmiştir. Buna göre, EİD öznitelik çıkarma yöntemi ile bulunan biyomekanik parametreler ve Şekil 11'de gösterilen kişinin ayak bileğini hareket ettirme esnasında ölçülen ayak bileği açısı değerleri Eş. 3'te yerine konularak ayak bileği sertlik değerlerinin kestirimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kestirilen ayak bileği sertlik grafiği Şekil 12'de gösterilmektedir.

4. DIŞ İSKELET ROBOT TASARIMI VE KESTİRİLEN AYAK BİLEĞİ SERTLİK DEĞERLERİNİN ROBOT ÜZERİNDE GERÇEK ZAMANLI UYGULAMASI (DESIGN OF VARIABLE STIFFNESS ANKLE EXOSKELETON AND REAL-TIME APPLICATION OF ESTIMATED ANKLE STIFFNESS VALUE ON THE ROBOT)

4.1. VS-AnkleExo'nun Mekanik Tasarımı (Mechanical Design of VS-AnkleExo)

Daha önce ifade edildiği üzere ayak bileği eklemi bağlı bulunduğu kaslar sayesinde yürüme esnasında eklem sertliğini sürekli değiştirerek esnek bir hareket kabiliyeti sunmaktadır. Yürüme esnasında ayak bileği eklemine sertliğinin sürekli değiştiği yapılan biyomekanik çalışmalar

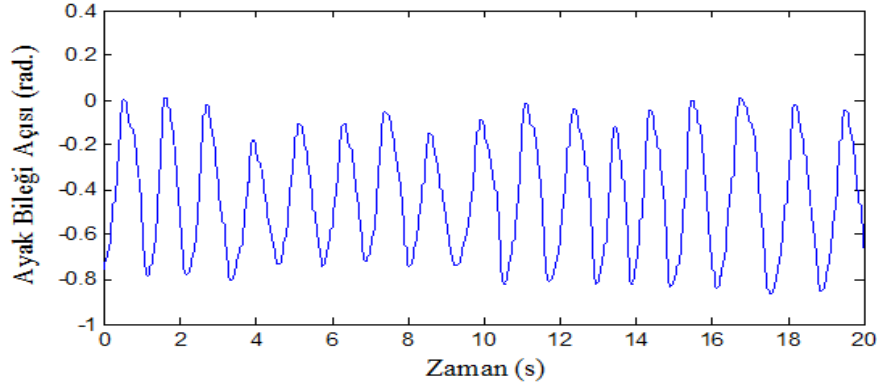
ile ortaya koyulmuştur [30]. Yürüme esnasında ayak bileğinin bu hareketini taklit etmek için insan ile sürekli etkileşim halinde çalışan bir dış iskelet robot tasarımında robot sertliğinin de anlık olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Ayak bileğinin yürüme esnasındaki bu hareketinden esinlenilerek VS-AnkleExo isimli sertliği değiştirilebilir ayak bileği dış iskelet robot tasarımı ortaya koyulmuştur [6]. VS-AnkleExo'nun tahrik birimi olan sertliği değiştirilebilir eyleyicinin şematik görünümü ve onun 3D katı modeli Şekil 13'te verilmektedir. VS-AnkleExo'nun sertlik değiştirme mantığı değişken iletim oranı ile sertlik değiştirmeye dayanmaktadır. Bu tasarımda mekanizmanın denge konumunu birinci motor (*M1*) ile kontrol edilirken, sertlik değişimi ikinci motor (*M2*) ile sağlanmaktadır. VS-AnkleExo tasarımında kullanıcı-robot ve zemin-robot arasında oluşan etkileşim torklarını ölçmek için iki farklı kapasitede yük hücresi kullanılmıştır.

4.2. Kestirilen Ayak Bileği Sertlik Değerlerinin VS-AnkleExo Üzerinde Gerçek Zamanlı Uygulanması (Real Time Application of Estimated Ankle Stiffness Value on VS-AnkleExo)

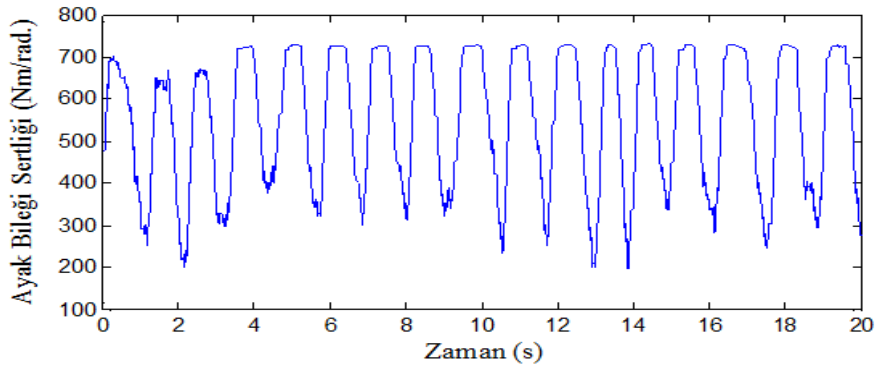
Bu bölümde kestirilen sertlik değerinin gerçek zamanlı olarak sertliği değiştirilebilir eyleyiciye referans girdi olarak gönderilmesi ve bu esnada VS-AnkleExo üzerinde kuvvet

Tablo 3. Farklı öznitelik çıkarma yöntemleri için RMS hataları (RMS errors for different feature extraction methods)

	OK	OMD	SG	EİD	OGD	FMSSD	v-De	Log-De
RMS Hataları	18,9788	17,2563	18,7664	16,944	18,2189	22,5780	26,9174	18,9538



Şekil 11. Deney esnasında ölçülen ayak bileği açısı (Measured angle of ankle during the experiment)

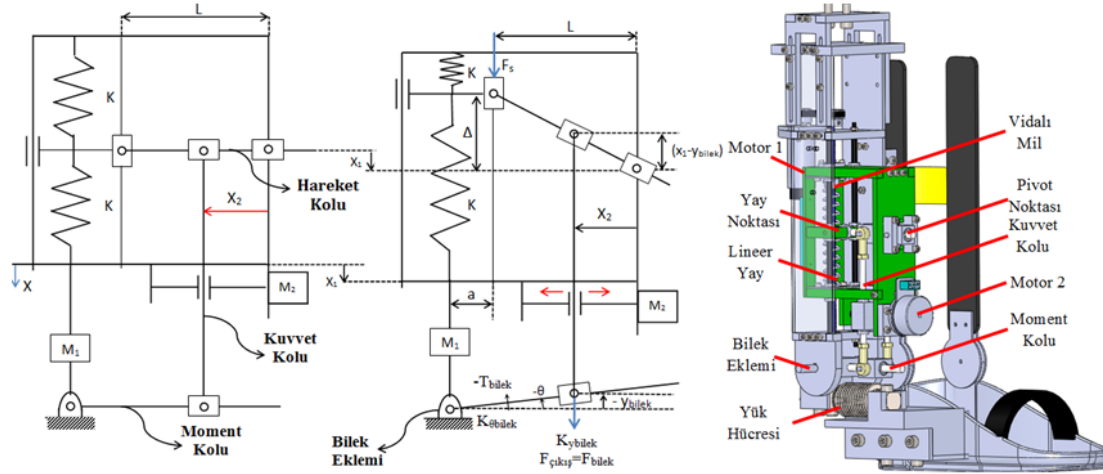


Şekil 12. Kestirilen ayak bileği sertlik değeri (Estimated stiffness value of ankle)

geri beslemeli bir empedans kontrol algoritmasının uygulanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama ile dış iskelet robotu giyen kullanıcının ayak bileği sertlik değerleri kişiye özel kestirebilmekte ve kestirilen bu sertlik değerleri gerçek zamanlı olarak SDE'ye referans sertlik değerleri olarak gönderilmektedir. Bu esnada empedans kontrol algoritması ile de robot kullanıcısının ayak bileği hareketinin takibi sağlanmaktadır. Burada sunulan çalışma ile VS-AnkleExo, kullanıcısının ayak bileği sertlik değerini ve ayak bileği açılmal konumunu birebir takip ederken, kullanıcı-robot arasındaki etkileşim torklarının olabildiğince düşük seviyelerde tutulabildiğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu uygulamada kullanılmak üzere Şekil 14'te gösterilen bir test düzeneği oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere VS-AnkleExo prototipi bir kullanıcı tarafından giyilmekte ve aynı zamanda cihaz kullanıcısının Tibialis Anterior (TA) ve Medial Gastrocnemius (MG) kaslarından EMG ölçümleri alınmaktadır. Burada gerçekleştirilen gerçek-zamanlı uygulamada, hareket esnasında kuvvet değerlerini minimize etmek için robot ekleminde kuvvet geri beslemeli bir

empedans kontrol algoritması uygulanmıştır. Bu amaçla geliştirilen kuvvet/tork geri besleme kontrol metodunun blok diyagramı Şekil 15'te verilmiştir.

Şekildeki blok diyagramı çok katmanlıdır. En içteki kontrol döngüsünde $G_{hız}$ kontrolcü, dıştaki kontrol döngüsünde G_{tork} kontrolcü ve en dıştaki kontrol döngüsünde $G_{empedans}$ kontrolcü kullanılmıştır. Empedans kontrolcü denge pozisyonu (θ_{ref}) etrafında istenen empedansa ($G_{empedans}$) göre tork kontrolcü için ayar-noktası (T_{ref}) üretmektedir. VS-AnkleExo'daki eyleyici göz önüne alındığında, tork kontrolcü için geri besleme sinyali (eyleyici tarafından üretilen) $T_{SDE} = K * (q_{m1} - q_{SDE})$ ile belirlenmektedir. Algoritmadaki tork kontrolcü ise hız kontrolcü için gereken ayar-noktasını (\dot{q}_{m1-ref}) üretmektedir. Empedans kontrol algoritmasının amacı kullanıcı-robot arasındaki etkileşim torkunu en aza indirmek olduğundan blok diyagramdaki $G_{empedans}$ ifadesi sıfır olarak alınmıştır. Blok diyagramındaki K ifadesi EMG sensörleri yardımıyla kestirilen ayak bileği sertliğini (K_{ref}) takip etmesi için ikinci motor ile değiştirilen



Şekil 13. VS-AnkleExo'nun şematik görünümü ve 3D katı modeli (Schematic view and 3D solid model of VS-AnkleExo)[6]

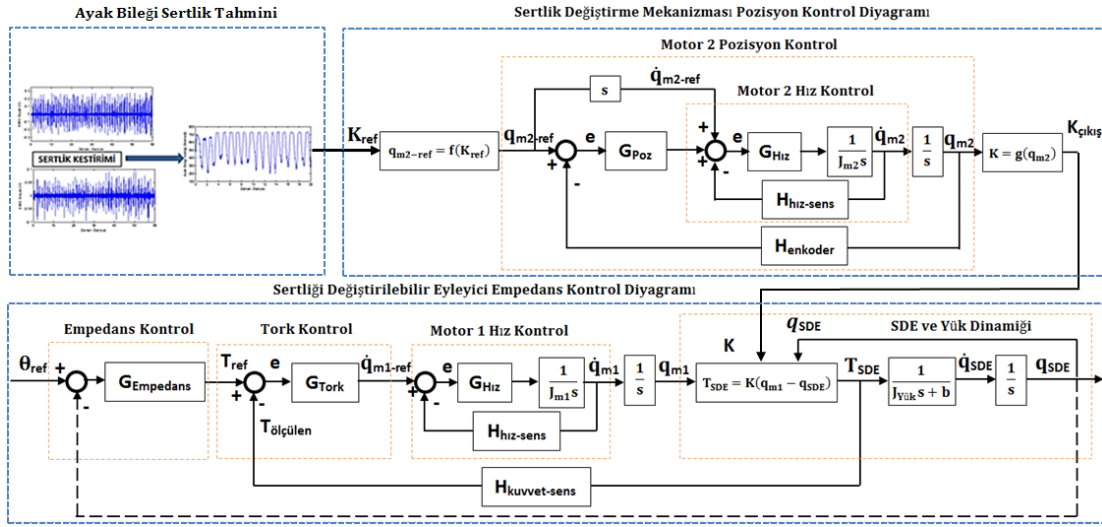


Şekil 14. Gerçek zamanlı uygulamalar için oluşturulan test düzeneği (Test setup created for real time applications)

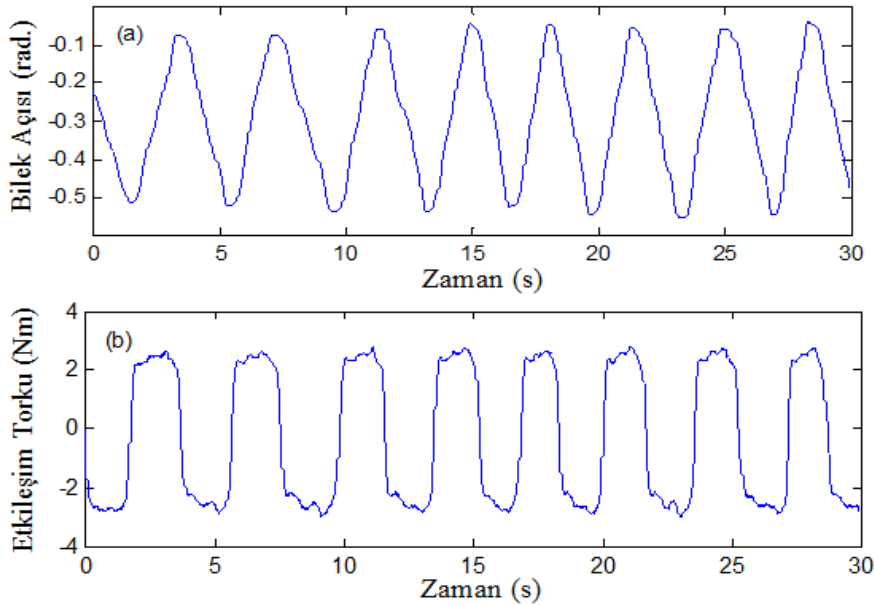
eyleyici sertliğini göstermektedir. Blok diyagramındaki $q_{m2-ref} = f(K_{ref})$ ifadesi ayak bileği sertliğinin anlık değerine göre ikinci motor tarafından kontrol edilen sertlik ayarlama mekanizmasının gitmesi gereken yeni pozisyonuna geçiş yapmak için kullanılan bir fonksiyon olup, Eş. 4'te verilmektedir. Bu denklemin nasıl elde edildiği ile ilgili ayrıntılı bilgi Kizilhan vd. [31] çalışmasında sunulmaktadır.

$$x_2 = \frac{(a+L)*L}{L + \cos \theta * \sqrt{\frac{K\theta_{bilek}}{2*K}}} \quad (4)$$

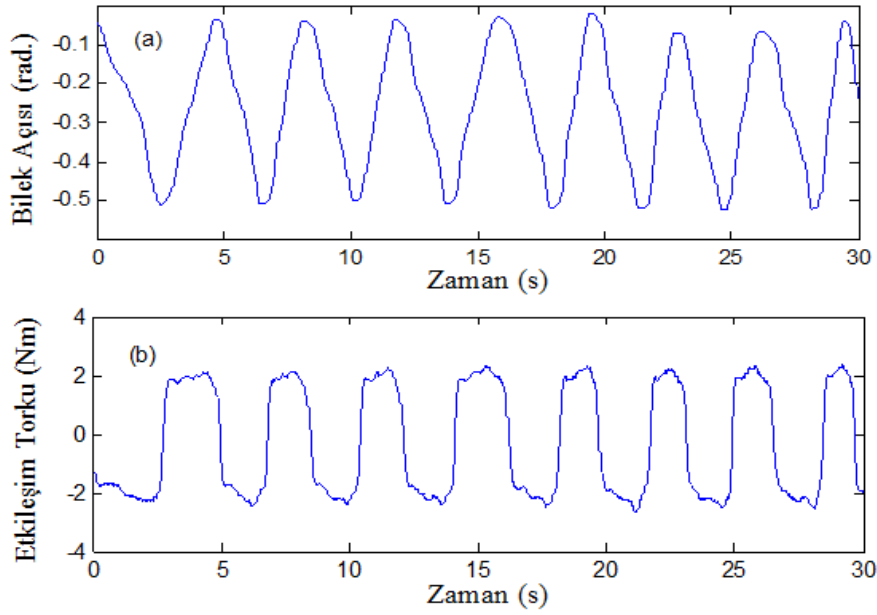
Bu çalışmada sunulan empedans kontrol algoritmasını test etmek için karşılaştırmalı iki deney yapılmıştır. Birinci deneyde cihazın sertlik değeri sabit bir orta sertlik değerine ayarlanmış ve kuvvet geri beslemeli empedans kontrol algoritması bu sabit sertlik değerinde uygulanmıştır. Bu deneyde VS-AnkleExo'yu giyen kullanıcı ayak bileğini farklı açılarda hareket ettirmiş, bu esnada ayak bileği açılal pozisyonu ve kullanıcı ile robot arasındaki (ölçülen kuvvet ile ayak bileği eklemine uzanan kuvvet kolu çarpılarak) etkileşim torqları hesaplanmıştır. Şekil 16 orta sertlik değerlerinde (yaklaşık 500 Nm/rad) yapılan deney sonuçlarını göstermektedir. İkinci deneyde ise ayak bileği



Şekil 15. VS-AnkleExo'nun empedans kontrolü ve kestirilen ayak bileği sertlik değerini takip etmesi için sertlik ayarlama mekanizmasının pozisyon kontrol diyagramı (Impedance control of VS-AnkleExo and position control diagram of the stiffness adjustment mechanism to follow the estimated ankle stiffness value)



Şekil 16. Sabit sertlik ile empedans kontrol deneyi; (a) bilek pozisyonu ve (b) kullanıcı-robot arasındaki etkileşim torqu (Impedance control experiment with constant stiffness; (a) ankle position and (b) interaction torque between user-robot)



Şekil 17. EMG tabanlı sertlik kestirimini kullanarak değişken sertlik ile empedans kontrol deneyleri; (a) bilek pozisyonu ve (b) kullanıcı-robot arasındaki etkileşim torku (Impedance control experiment with variable stiffness by using EMG based stiffness estimation ; (a) ankle position and (b) interaction torque between user-robot)

ekleminin EMG tabanlı sertlik kestirimi yapılmakta ve elde edilen sertlik değeri gerçek-zamanlı olarak cihazın sertlik değiştirme mekanizmasına referans girdi olarak gönderilmektedir. Kestirilen sertlik değerlerinin cihaz tarafından taklit edilmesi esnasında uygulanan empedans kontrol algoritması ile cihaz kullanıcısının ayak bileği açısız pozisyonu ve kullanıcı-robot arasındaki etkileşim torkları ölçülmüştür. İkinci deneyde elde edilen sonuçlar Şekil 17’de gösterilmektedir. Her iki deney sonucunda elde edilen etkileşim torkları incelendiğinde anlık olarak sertlik değiştirilmesinin normalde istenmeyen etkileşim torklarını biraz daha (mevcut duruma göre %25 oranında) düşürülebildiği gösterilmiştir. Bilindiği üzere ideal bir dış iskelet robot kullanımında bu etkileşim kuvveti ya da torklarının olabildiğince 0’a yakın olması hedeflenmektedir. Sonuç olarak gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada, sertliği değiştirilebilir bir eyleyici ile daha düşük seviyede etkileşim kuvvetleri sağlanarak cihazın kullanıcıya ait sertlik değerlerini kişiye özel gerçek-zamanlı olarak taklit edebildiği gösterilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmanın amacı EMG sinyal işleme yöntemleri ile elde edilen kas model parametreleri yardımıyla, ayak bileği eklemi sertlik değerinin dış iskelet robot kullanıcısına özel tahmin edilerek gerçek-zamanlı olarak uygulanabildiğini göstermektir. Bu çalışmada ilk olarak ayak bileği eklemi tanımlamak için bir kas-iskelet model yaklaşımı kullanılmıştır. Bu kas-iskelet modeli fleksiyon ve ekstansiyon hareketlerini sağlayan iki adet kas tarafından tahrik edilen bir ayak bileği ekleminden oluşmaktadır. Daha sonra fleksiyon ve ekstansiyon kasları Shin vd. [24] tarafından önerilen Mykin kas modeli ile modellenmiştir. Sinyal işleme yöntemleri ile elde edilen birtakım öznelik

değerleri ve tork sensöründen ölçülen veriler kullanılarak Mykin kas modelindeki parametreler kestirilmiştir. Kestirilen bu parametreler ile fleksiyon ve ekstansiyon kasları tarafından uygulanan gerilme kuvveti hesaplanmıştır. Hesaplanan gerilme kuvvetleri ile moment kolu uzunlukları çarpılarak her bir kas için tork değeri bulunmuştur. Fleksiyon yönü pozitif kabul edilerek, ilgili kasların torkları toplanarak ayak bileği için eklem torku bulunmuştur. Mykin kas modelindeki fiziksel parametrelerin kestirim aşamasında kullanılan öznelik çıkarım yöntemlerine bağlı olarak birbirinden farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Hangi öznelik çıkarım yönteminin en uygun olduğuna karar verebilmek adına doğrulama deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde, hesaplanan ayak bileği eklem torku ile ölçülen eklem torku karşılaştırılmış ve her bir öznelik çıkarım yöntemi için RMS hataları bulunmuştur. Buna göre EİD sinyal işleme yönteminin en uygun öznelik çıkarma yöntemi olduğuna karar verilmiştir. EİD sinyal işleme yöntemi ile bulunan biyomekanik parametreler ve kişinin ayak bileğini hareket ettirme esnasında ölçülen ayak bileği açısı değerleri kullanılarak ayak bileği ekleminin sertlik kestirimi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, kestirilen ayak bileği eklemi sertlik değeri 200 Nm/rad ile 700 Nm/rad arasında sürekli olarak değişmektedir. Jafari vd. [32] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada basma fazı boyunca ayak bileği eklemindeki sertlik değişimleri gösterilmektedir. Bu çalışmada ortaya koyulan ayak bileği sertlik kestirim değerleri ile ilgili çalışmada elde edilmiş olan sertlik değerlerinin uyduğu gözlemlenmiştir. Son olarak ayak bileği ekleminin kestirilen sertlik değeri gerçek-zamanlı olarak VS-AnkleExo’nun sertlik ayarlama mekanizmasına gönderilmiş ve kullanıcı-robot arasında minimum etkileşim torku elde etmek için cihaz üzerinde kuvvet geri beslemeli empedans kontrol algoritması uygulanması gerçekleştirilmiştir. Bu yürütülen son çalışma ile

VS-AnkleExo, kullanıcısının sertlik değerini sürekli değiştirerek ayak bileği pozisyonunu takip ederken kullanıcı-robot arasındaki etkileşim torklarını yaklaşık %25 oranında daha düşük seviyelerde tutabildiği gözlemlenmiştir. Söz konusu tüm bu yürütülen çalışmalar ile bir dış iskelet robot kullanıcısına ait biyomekanik özelliklerin dış iskelet robotlara gerçek-zamanlı olarak doğrudan aktarılması ve dış iskelet robotların kullanıcısına ait eklem sertliklerini birebir taklit etmesi literatürde bilindiği kadarıyla ilk defa gerçekleştirilmiştir. Bu gerçekleştirilen çalışmanın gelecek çalışmalara çok önemli katkılar sağlayabileceği öngörülmekte olup EMG sensörleri üzerinden gerçek-zamanlı ayak bileği sertlik kestirimi sayesinde dış iskelet robotu kullanacak olan kişinin tüm farklı hızlarda yürüme, koşma, zıplama ve merdiven çıkma gibi kişiye özgü hareketleri yapabilmesi sağlanacaktır.

TEŞEKKÜR (ANKNOWLEDGMENT)

Yazarlar bu makale ile ilgili olarak 213M297 no'lu "Biyomimetik bir alt uzuv dış iskelet robotun tasarımı ve denetimi" başlıklı kariyer projesi ile finansal destek sağlanmasından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunmaktadırlar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Migliore S.A., Brown E.A., DeWeerth S.P., Biologically inspired joint stiffness control, In Robotics and Automation, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference, 4508-4513, 2005.
- Cestari M., Sanz-Merodio D., Arevalo J.C., Garcia E., ARES, a variable stiffness actuator with embedded force sensor for the ATLAS exoskeleton, *Industrial Robot: An International Journal*, 41 (6), 518-526, 2014.
- Geeroms J., Flynn L., Jimenez-Fabian R., Vanderborght B., Lefeber D., Energetic analysis and optimization of a MACCEPA actuator in an ankle prosthesis, *Autonomous Robots*, 42 (1), 147-158, 2018.
- Zhu J., Wang Y., Jiang J., Sun B., Cao H., Unidirectional variable stiffness hydraulic actuator for load-carrying knee exoskeleton, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 1729881416686955, 14 (1), 2017.
- Liu L., Leonhardt S., Misgel B.J., Design and control of a mechanical rotary variable impedance actuator, *Mechatronics*, 39, 226-236, 2016.
- Baser O., Kizilhan H., Mechanical design and preliminary tests of VS-AnkleExo, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, 40 (442), 1-16, 2018.
- Kılıç E., Şekerci B., Kizilhan H., Başer Ö., Evaluation of position tracking control performance of a variable stiffness ankle exoskeleton robot with various controller types, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35 (3), 1551-1563, 2020.
- Demiray M.A., Başer Ö., Kılıç E., Alt Uzuv Dış İskelet Robot Eklemelerinde Kararlılık İçin Sönümlenme Katsayıları ve Momentlerinin Hesaplanması, *Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science*, 18 (SI: Biomechanics), 35-51, 2014.
- Nuckols R.W., Sawicki G.S., Impact of elastic ankle exoskeleton stiffness on neuromechanics and energetic of human walking across multiple speeds, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17:75, 2020.
- Nolte N., The Effect of Ankle Joint Rotational Stiffness and Localized Muscle Fatigue on Tibial Response During Impact, Master Thesis, University of Windsor, Faculty of Human Kinetics, Ontario, 2011.
- Ham R., Sugar T., Vanderborght, B., Hollander, K., Lefeber, D., Compliant actuator designs, *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 16 (3), 81-94, 2004.
- Burdet E., Osu R., Franklin D.W., Milner T.E., Kawato M. The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance, *Nature*, 414, 446-449, 2001.
- Roy A., Krebs H.I., Patterson S.L., Judkins T.N., Forrester L.W., Hogan V., Measurement of Human Ankle Stiffness Using the Anklebot, *Proceedings of the 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, June 12-15, Noordwijk, The Netherlands, 1-4244-1320-6, 2007.
- Van Eesbeek S., Van Der Helm F., Verhaegen M. De Vlugt, E., LPV subspace identification of time-variant joint impedance, In *Proceedings of the 6th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER 2013)*, San Diego, CA, USA, 6-8 November 2013, 343-346, 2013.
- Kearney R.E., Stein R.B., Parameswaran L., Identification of intrinsic and reflex contributions to human ankle stiffness dynamics, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 44, 493-504, 1997.
- Misgeld B.J., Zhang T., Lüken M.J., Leonhardt, S., Model-Based Estimation of Ankle Joint Stiffness, *Sensors*, 17(4), 713, 2017.
- Rouse E.J., Hargrove L.J., Perreault E.J., Kuiken T.A., Estimation of Human Ankle Impedance During the Stance Phase of Walking, *IEEE Transactions On Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 22 (4), 1534-4320, 2014.
- Sartori M., Reggiani M., Farina D., Lloyd D.G., EMG-driven forward-dynamic estimation of muscle force and joint moment about multiple degrees of freedom in the human lower extremity, *PLoS ONE*, 7, e52618, 2012.
- Lloyd D.G., Besier T.F., An EMG-driven musculoskeletal model to estimate muscle forces and knee joint moments in vivo, *J. Biomech*, 36, 765-776, 2013.
- Casadio M., Morasso P.G., Sanguineti V., Direct measurement of ankle stiffness during quiet standing: implications for control modelling and clinical application, *Gait & posture*, 21 (4), 410-424, 2005.
- Vlutters M., Boonstra T.A., Schouten A.C., van der Kooij H., Direct measurement of the intrinsic ankle stiffness during standing, *Journal of biomechanics*, 48 (7), 1258-1263, 2015.

22. Kawase T., Kambara H., Koike, Y., A Power Assist Device Based on Joint Equilibrium Point Estimation from EMG Signals, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 24 (1), 205-218, 2012.
23. Zhen Z., Zhen W., Songli Y., Yanan Z., Jinwu Q., Research On Control of an Exoskeletal Ankle With Surface Electromyography Signals, *The 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 1301-1304, 2008.
24. Shin D., Kim J., Koike Y., A Myokinetic Arm Model for Estimating Joint Torque and Stiffness From EMG Signals During Maintained Posture”, *J Neurophysiol*, 101, 387-401, 2009.
25. Gönen D., Karaoğlan A.D., Ocaktan M.A.B., Oral A., Atıcı H., Kaya B., A new risk assessment approach for the analysis of musculoskeletal disorders, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 33 (2) 423-438, 2018.
26. Kucuk H., Eminoglu I., Balci K., Classification of neuromuscular diseases with artificial intelligence methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1725-1741, 2019.
27. Phinyomark A., Phukpattaranont P., Limsakul C., Feature reduction and selection for EMG signal classification, *Expert Systems with Applications*, 39 (8), 7420-7431, 2012.
28. Kılıç E., Doğan E., Real-time feature extraction from EMG signals, *24th Signal Processing and Communication Application Conference*, 113-116, 2016.
29. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/lsgnonlin.html>, 2019.
30. Shamaei K., Sawicki G.S., Dollar A.M., Estimation of quasi-stiffness and propulsive work of the human ankle in the stance phase of walking, *PloS one* 2013, 8 (3), e59935, 2013.
31. Kizilhan H., Baser O., Kilic E., Ulusoy N., Comparison of controllable transmission ratio type variable stiffness actuator with antagonistic and pre-tension type actuators for the joints exoskeleton robots. In: *2015 12th international conference on informatics in control, automation and robotics (ICINCO)*, 2, 188-195, 2015
32. Jafari A., Tsagarakis N.G., Sardellitti I., Caldwell D.G., A new actuator with adjustable stiffness based on a variable ratio lever mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19 (1), 55-63, 2014.



Preparation of thermo-responsive shape memory copolyester thermoplastic elastomer (COPE) and poly(ethylene-co-vinyl acetate) polymer blends

Emre Tekay*

Department of Polymer Engineering, Yalova University, Yalova, 77200, Turkey

Highlights:

- Preparation of COPE/EVA blend through melt mixing
- Determination of shape memory properties
- Effect of composition on morphology

Keywords:

- Shape memory
- polymer blend
- COPE
- EVA
- morphological properties

Article Info:

Research Article
Received: 19.04.2020
Accepted: 13.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.722364

Correspondence:

Author: Emre Tekay
e-mail:
emre.tekay@yalova.edu.tr
phone: +90 226 815 5957

Graphical/Tabular Abstract

Shape memory polymers (SHP) are smart materials that can change their shape when stimulated with an external stimulus such as heat, humidity, magnetic field and electric field. Thermo-responsive shape memory polymers have the ability to change their temporary shape with their permanent shape when they are exposed to an external heat stimuli and this ability gives them great potential for sensor, actuator, medical and packaging applications. Thermally sensitive shape memory polymers need at least two functional components. One of them is the switch component and it is responsible for fixing the temporary shape. The other component is the elastomeric component and it provides required driving force to recover the permanent shape. In this study, thermo-responsive shape memory copolyester thermoplastic elastomer (COPE) and poly(ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) polymer blends were prepared and their shape memory characteristics were investigated.

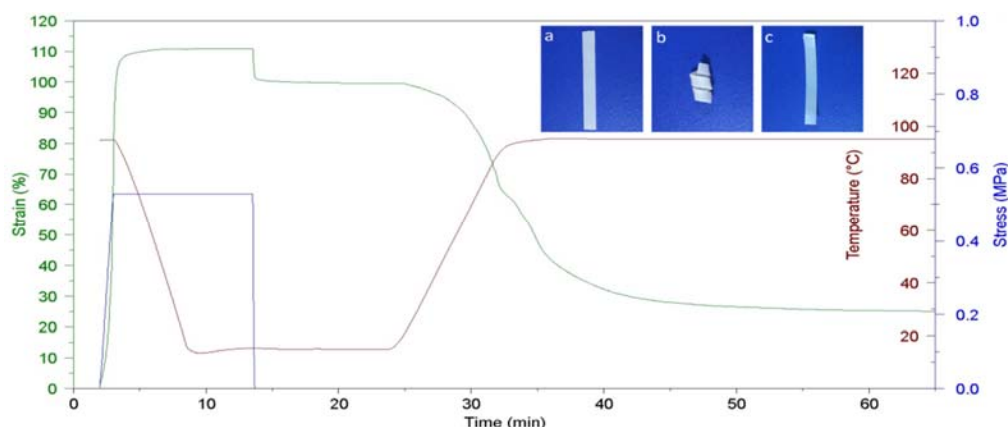


Figure A. Thermo-mechanical graph of the 50C-50E blend and photographs of shape memory behavior.

Purpose: The aim of this study is preparation of novel thermally responsive shape memory COPE/EVA polymers blends and report their characteristics.

Theory and Methods:

COPE/EVA polymer blends were prepared through melt mixing of switch component EVA and elastic component COPE. Morphological, thermal, mechanical and shape memory properties of the prepared blends were investigated.

Results:

Scanning Electron microscopy (SEM) analysis showed that the polymer blend containing 50 wt% COPE and 50 wt% EVA showed co-continuous morphology, while other compositions were found to exhibit droplet morphologies. Among the blends, the 30C-70E exhibited 94.88% shape fixing ratio and 89.20% shape recovery ratio. On the other hand, 50C-50E blend with relatively higher deformability, showed the optimum shape fixing and recovery ratios. The shape memory analysis of the 50C-50E polymer blend in hot water showed that after the material was deformed and cooled, it retained its temporary shape, and when it was reheated, it quickly returned to its permanent shape.

Conclusion:

Novel thermally responsive shape memory COPE/EVA polymer blends were produced via melt mixing method. According to the thermo-responsive shape memory property analyses, the shape fixing (R_f) and shape recovery (R_r) ratios were increased when the amount of EVA increase in the polymer blend.



Isıl-duyarlı şekil hafızalı kopoliester termoplastik elastomer (COPE) ve poli(etilen-ko-vinil asetat) (EVA) polimer harmanlarının hazırlanması

Emre Tekay*^{ID}

Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Polimer Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- COPE/EVA polimer harmanlarının eriyik harmanlama ile hazırlanması
- Şekil hafızası analizi
- Kompozisyonun morfoloji üzerine etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.04.2020

Kabul: 13.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.722364

Anahtar Kelimeler:

Şekil hafızası,
polimer harman,
COPE,
EVA,
morfolojik özellikler

ÖZET

Isıl-duyarlı şekil hafızalı polimerler (ŞHP) bir ısı uyarıcı varlığında şeklini değiştirebilme yeteneğine sahip olan akıllı malzemelerdir. Bu çalışmada, farklı oranlarda kopoliester termoplastik elastomer (COPE) ve poli(etilen-ko-vinil asetat) polimerleri kullanılarak, eriyik harmanlama yöntemiyle ısı-duyarlı şekil hafızalı polimer harmanlar hazırlanmıştır. Hazırlanan polimer harmanların morfolojik, ısı, mekanik ve şekil hafızası özelliği incelenmiştir. Ağırlıkça %50 COPE ve %50 EVA içeren polimer harman eş-sürekli morfolojisi gösterirken, diğer kompozisyonların damlacık morfoloji sergilediği belirlenmiştir. EVA varlığında COPE polimerinin erime ve kristalizasyon sıcaklığı artarken, EVA polimerinin erime ve kristalizasyon sıcaklıkları değişmemiştir. Isıl-duyarlı şekil hafızası analizleri sonucunda, polimer harman içerisindeki EVA miktarı arttıkça şekil sabitleme (R_f) ve şekil geri kazanım (R_r) oranlarının yükseldiği görülmüştür. 30C-70E polimer harmanının, %94,88 şekil sabitleme oranı ve %89,20 şekil geri-kazanım oranı ile en iyi şekil hafıza özelliğine sahip olduğu bulunmuştur. Diğer yandan, yüksek deforme edilebilirlik ve ortalama R_f ve R_r değerleriyle, 50C-50E polimer harmanı, optimum özellikler sergilemiştir. 50C-50E polimer harmanının sıcak su içerisindeki şekil hafızası analizi, malzemenin deforme edilip soğutulmasından sonra geçici şeklini koruduğunu ve tekrar ısıtıldığında hızlı bir şekilde kalıcı şekline büyük oranda geri döndüğünü göstermiştir.

Preparation of thermo-responsive shape memory copolyester thermoplastic elastomer (COPE) and poly(ethylene-co-vinyl acetate) polymer blends

H I G H L I G H T S

- Preparation of COPE/EVA blend through melt mixing
- Determination of shape memory properties
- Effect of composition on morphology

Article Info

Research Article

Received: 19.04.2020

Accepted: 13.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.722364

Keywords:

Shape memory,
polymer blend,
COPE,
EVA,
morphological properties

ABSTRACT

Thermo-responsive shape memory polymers (SMP) are smart materials that have the ability to change their shape in the presence of a heat stimuli. In this study, Thermo-responsive shape memory polymer blends which contain different portions of copolyester thermoplastic elastomer (COPE) and poly (ethylene-co-vinyl acetate) polymers were prepared by using melt mixing method. Morphological, thermal, mechanical and shape memory properties of the prepared blends were investigated. The polymer blend containing 50 wt% COPE and 50 wt% EVA showed co-continuous morphology, while other compositions were found to exhibit droplet morphology. While the melting and crystallization temperature of the COPE polymer increased in the presence of EVA, the melting and crystallization temperatures of the EVA polymer did not change. Thermo-responsive shape memory property analyses showed that the shape fixing (R_f) and shape recovery (R_r) ratios were increased when the amount of EVA increase in the polymer blend. 30C-70E blend exhibited 94.88% shape fixing ratio and 89.20% shape recovery ratio indicating the best shape-memory property. On the other hand, 50C-50E exhibited optimum properties with relatively higher deformability and moderate R_f and R_r values. The shape memory test of the 50C-50E polymer blend in hot water showed that after the material was deformed and cooled, it retained its temporary shape, and when it was reheated, it quickly returned to its permanent shape.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: emre.tekay@yalova.edu.tr / Tel: +90 226 815 5957

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Şekil hafızalı polimerler (ŞHP); ısı, nem, manyetik alan, elektrik alan gibi bir dış-uyarıcı ile uyarıldıklarında şekillerini değiştirebilen akıllı malzemelerdir [1, 2]. Isıya duyarlı şekil hafızalı polimerler ise bir ısı uyarıcı varlığında geçici şekillerini kalıcı şekilleriyle değiştirebilme kabiliyetine sahip polimerlerdir [3, 4]. Bu malzemeler geçiş sıcaklıklarının üzerinde bir sıcaklığa ısıtıldıklarında geçici şekillerinden kalıcı şekillerine dönüş yaparlar ve bu özellikleriyle sensör, aktüatör, ambalaj ve medikal uygulamaları için potansiyel taşımaktadırlar [1]. Isıl duyarlı şekil hafızalı polimerler en az iki fonksiyonel bileşene ihtiyaç duyarlar. Bunlardan biri faz değiştiren anahtar bileşendir ve geçici şeklin sabitlenmesinden sorumludur. Diğer bileşen olan elastomerik bileşen ise kolaylıkla deforme edilebilir ve şekil geri kazanımını sağlamak için gerekli itici gücü sağlar [5].

Şekil hafızalı polimerler yapısal olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi kovalent çapraz bağ veya fiziksel çapraz bağ içeren amorf ya da kristalin kopolimerler, diğeri ise polimer harmanlarıdır. Kopolimerler yüksek performanslı şekil hafızası özelliği sergilese de, sentezleri ve karakterizasyonları karmaşık ve zahmetlidir. Polimer harmanları, ŞHP üretiminde hazırlanış ve tasarım bakımından çok daha basit bir yol sunar. Şekil hafızalı polimer harmanlar genellikle, birbiriyle uyumsuz olan, bir elastomer bileşen ve faz değiştirebilen bir anahtar bileşenden oluşur. Elastomer bileşen herhangi bir kauçuk veya termoplastik elastomer olabilirken, anahtar bileşen amorf ya da kristalin bir polimer olabilir. Bileşenlerin uyumsuzluğu nedeniyle optimum şekil hafızası performansına, uygun faz morfolojisi ile ulaşılabilmektedir [3].

Çok fazlı polimer harmanlarda, şekil değiştirmenin gerçekleştiği sıcaklık (T_{trans}) olarak camsı geçiş sıcaklığı (T_g) yerine daha keskin ve belirlenmesi daha kolay olan erime sıcaklığı (T_m) tercih edilir [4]. Polimer harman, şekil değiştirme sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta ($T > T_{trans}$) deforme edildiğinde zincir segmentleri yer değiştirir ve üzerindeki yük kaldırılmadan şekil değiştirme sıcaklığının altında bir sıcaklığa ($T < T_{trans}$) soğutulursa geçici şekil sabitlenir ve kalıcı şekle dönmek için kullanılacak olan entropik enerji, sistem içerisinde depolanır. Sıcaklık tekrar şekil değiştirme sıcaklığının üzerine çıkarıldığında ($T > T_{trans}$), malzeme eski şekline geri döner [2]. Şekil hafızası özelliği gösteren poli(stiren-b-bütadien-b-stiren) (SBS)/poli(kaprolakton) (PCL), termoplastik poliüretan (TPU)/PCL, etilen-propilen-dien kauçuğu (EPDM) / poli(etilen-ko-1-octen) (PEO) [1-3], EVA/PCL, TPU/PEO, poli(laktik asit) (PLA)/ poli(vinil asetat) (PVAc) gibi polimer harmanları içeren çalışmalar literatürde raporlanmıştır [6-8].

Bu çalışma kapsamında, şekil hafızalı polimer harmanın şekil geri kazanımını sağlayacak elastomerik bileşen olarak termoplastik elastomer ailesinin bir üyesi olan ester bazlı

termoplastik elastomer (TPE-E) veya kopolioester (COPE) termoplastik elastomer olarak bilinen poly(eter-b-ester) kullanılmıştır. COPE'ler ilk kez Dupont tarafından Hytrell adıyla üretilmiş, sert kristalin poli(butilen tereftalat) (PBT) ve yumuşak amorf poli(eter glikol) segmentlerden oluşan üstün performanslı polimerlerdir [9]. Yüksek erime noktasına sahip kristalin PBT segmenti, düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip kristallenemeyen polieter segment için fiziksel çapraz bağ görevi görür [10]. COPE'ler kauçukların fiziksel özelliklerine ve termoplastiklerin kolay işlenebilirliğine sahiptir [11]. Sert segment/yumuşak segment oranı blok kopolimerin kristallliğini etkiler ve böylelikle polimere ait mekanik özelliklerin istenildiği gibi tasarlanmasına izin verir [8]. Bu malzemeler darbeye, yırtılmaya, sünmeye, aşınmaya karşı dirençlidirler ve bu özellikleriyle polikarbonat (PC), poli(etilen tereftalat) (PET) ve poli(vinil klorür) (PVC) gibi bir çok kırılğan polimerin özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır [11].

Isıl-duyarlı şekil hafızalı polimer harmanın şekil sabitleme ve şekil değişimini sağlayacak anahtar bileşen olarak ise yarı-kristal bir kopolimer EVA kullanılmıştır. EVA, etilen ve vinil asetatın kopolimerizasyonu ile elde edilen, içerdiği vinil asetat ko-monomer miktarına göre de elastomer veya plastik karakter kazanan bir yarı-kristalin kopolimerdir [12]. Bu özellikleriyle, EVA'nın ısı-duyarlı şekil hafızası özelliği sergileyen polimer harmanlarda kullanıldığı çalışmalar raporlanmıştır. Wang ve çalışma grubu, nitril kauçuğu (NBR) ve EVA kullanarak hazırladıkları polimer harmanda şekil sabitleme ve şekil geri kazanım oranlarını %95'ten daha yüksek bulmuşlardır [5]. Bir diğer çalışmada, Zhang ve çalışma grubu farklı oranlarda poli(l-laktik asit) (PLLA) ve EVA kullanarak hazırladıkları harmanlarda, PLLA miktarı arttıkça morfolojinin damlacık morfolojiden sürekli morfolojiye geçiş yaptığını ve harman içerisinde EVA miktarı arttıkça şekil sabitleme ve şekil geri kazanım oranının geliştiğini raporlamışlardır [13]. Lai ve çalışma grubu, farklı olefin blok kopolimerler (OBC) ve EVA kullanarak hazırladıkları harmanlarda %80'in üzerinde şekil sabitleme ve %90'ın üzerinde şekil geri kazanım oranları elde ettiklerini vurgulamışlardır [14].

Bu çalışma kapsamında literatürden farklı olarak, değişik oranlarda bir termoplastik elastomer olan COPE ve bir yarı-kristalin polimer olan EVA polimerleri kullanılarak eriyik harmanlama yöntemiyle yeni ısı-duyarlı şekil hafızalı polimer harmanları hazırlanmıştır. Hazırlanan malzemelerin; ısı-duyarlı şekil hafızası performansları, mekanik, reolojik ve morfolojik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Malzemeler (Materials)

Isıl-duyarlı ŞHP harmanların üretiminde kullanılan COPE polimeri, Hytrell G3548L (sertlik 35 Shore D, eriyik akış indeksi 10 g/10min 190°C/2,16 kg) ticari koduyla Dupont

(ABD) firmasından ve ağırlıkça %18 vinil asetat içeren EVA polimeri, Alcludia PA-538 (sertlik 38 Shore D, eriyik akış indeksi 2 g/10min 190°C/2,16 kg) ticari koduyla Repsol (İspanya) firmasından temin edildi. Kloroform ve toluen Sigma-Aldrich (ABD) firmasından satın alındı.

2.2. ŞHP Harmanların Hazırlanması (Preparation of SMP Blends)

Değişik oranlarda COPE ve EVA içeren polimer harmanlar eriyik harmanlama yöntemiyle dahili karıştırıcı (RTX-M40 Kökbir Makina, Türkiye) kullanılarak üretildi. Eriyik harmanlama işlemi 180°C sıcaklık, 80 rpm rotor hızı ve 8 min karıştırma süresiyle gerçekleştirildi. Hazırlanan polimer harmanlara ait isim kodları ve kompozisyonları Tablo 1’de verilmiştir. Elde edilen polimer harmanlar bir sıcak pres (Gülner Makina, Türkiye) yardımıyla 190°C sıcaklık, 110 bar basınç altında 2 min sıcak preslenerek eritildi ve daha sonra 15°C sıcaklık, 130 bar basınç ile 3 min preslenerek soğutulularak 50x50x1mm³ (plaka-1) ve 70x70x0,35 mm³ (plaka-2) şekillerinde kalıplandı.

Tablo 1. Hazırlanan ŞHP harmanlara ait kompozisyonlar
(Compositions of prepared SMP blends).

Kod	COPE Miktarı (ağırlıkça %)	EVA Miktarı (ağırlıkça %)
30C-70E	30	70
40C-60E	40	60
50C-50E	50	50
60C-40E	60	40
70C-30E	70	30

2.3. ŞHP Harmanların Karakterizasyonu (Characterization of SMP Blends)

ŞHP harmanların morfolojik özellikleri, sıcak presle şekillendirilmiş numunelerin sıvı azot altında kırılmış yüzeyleri aşındırıldıktan sonra Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi ile incelendi. 30C-70E ve 40C-60E polimer harmanlarının yüzeyleri kloroform ile oda sıcaklığında 15 min, 70C-30E ve 60C-40E harmanlarının yüzeyleri ise toluen ile 50°C sıcaklıkta 20 min bekletilerek aşındırıldı. 50C-50E polimer harmanının yüzeyi ise her iki çözücü ile ayrı ayrı aşındırıldı. Aşındırılmış yüzeyleri altın ile kaplanan numunelerin SEM analizleri, Inspect S50 (FEI Inc. -ABD) cihazıyla gerçekleştirildi.

Polimer harmanı oluşturan COPE ve EVA polimerleri arasındaki etkileşimler FTIR (Fourier transform infrared) spektroskopisi (Perkin Elmer 1600 FTIR-ATR – ABD) ile incelendi. FTIR analizinden önce analizi yapılacak olan saf COPE, saf EVA ve 50C-50E harmanı 3 h süreyle 80°C’de vakum etüvünde kurutuldu.

ŞHP harmanların dönüşüm sıcaklığı (T_{trans}) ve kullanılan polimerlerin diğer geçiş sıcaklıkları Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizleriyle, DSC-Q200 (TA Instruments, ABD) cihazı kullanılarak, inert azot gazı atmosferi altında belirlendi. Analizler üç basamakta

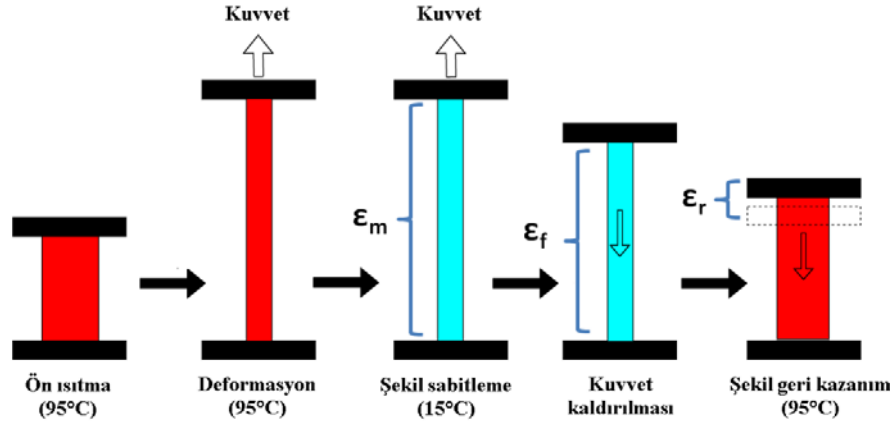
gerçekleştirildi; ilk basamakta numuneler oda sıcaklığından 210°C’ye 20°C/min hızla ısıtıldı ve bu sıcaklıkta 1 min bekletilerek ısıl geçmişleri silindi. İkinci basamakta -75°C sıcaklığa 10°C/min hızla soğutuldu ve üçüncü basamakta 10°C/min hızla tekrar 210°C’ye ısıtıldı. Erime sıcaklıkları (T_m) endotermik pik maksimumlardan, kristalizasyon sıcaklıkları (T_c) ise ekzotermik pik maksimum değerlerinden bulundu. EVA polimeri içerisindeki polietilene (PE) ait ve COPE polimeri içerisindeki PBT’ye ait kristallenme dereceleri (X_c), DSC analizinin üçüncü basamağında elde edilen erime piklerinin erime entalpileri kullanılarak ve Eş. 1’den yararlanılarak hesaplandı.

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{f0}} \times \frac{1}{W} \times 100 \quad (1)$$

Eşitlikte, ΔH_f ilgili polimere ait erime entalpisi, ΔH_{f0} ilgili polimerin %100 kristalin haline ait erime entalpisini, W ilgili polimerin polimer harman içerisindeki ağırlık oranını temsil etmektedir. Hesaplamalarda, polietilen ve PBT için ΔH_{f0} değerleri sırasıyla 293 J/g [15] ve 144,5 J/g [10] olarak alındı.

Üretilen polimer harmanların statik mekanik özellikleri 1 kN yük hücreesine sahip Zwick/Roell universal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilen çekme testleriyle incelendi. Çekme testleri oda sıcaklığında ve 50 mm/min çekme hızıyla gerçekleştirildi. Test numuneleri sıcak preste üretilen plaka-2’den ISO 527-5a standardına uygun bıçak kullanılarak kesildi.

Polimer harmanların ısıl-duyarlı şekil hafızası performansları DMA-Q800 (TA Instruments, ABD) Dinamik Mekanik Analiz cihazıyla çekme modunda ve kuvvet kontrolü yöntemiyle belirlendi. Test örnekleri sıcak preste üretilen plaka-2’den 5x25x0,35 mm³ ölçülerinde kesilerek gerçekleştirildi. Test prosedürü dört basamaklı olarak gerçekleştirildi; 1) *Deformasyon*: test örnekleri sabit hızla EVA polimerinin erime sıcaklığının biraz üzerinde belirlenen dönüşüm sıcaklığına (T_{trans}) ısıtıldı. T_{trans} sıcaklığı DSC analiziyle EVA polimerinin erime sürecinin tamamlandığı sıcaklığın üzerinde bir sıcaklık olan 95°C olarak belirlendi. Test örneği bu sıcaklıkta, sıcaklık dengelenene kadar 2 min tutuldu ve daha sonra sabit kuvvetle çekilerek deforme edildi. 2) *Şekil Sabitleme*: Deformasyona uğramış haldeki örnek, üzerindeki kuvvet sürdürülerek şekil sabitleme sıcaklığına (T_{fix}) kadar soğutuldu. T_{fix} sıcaklığı DSC analiziyle EVA polimerinin kristalizasyon sürecinin tamamlandığı sıcaklığın altında bir sıcaklık olan 15°C olarak belirlendi. Test örneği bu sıcaklıkta 5 min tutularak, geçici şeklini alması sağlandı (ϵ_m). 3) *Kuvvetin kaldırılması*: Şekil sabitleme sıcaklığındaki örneğin üzerindeki gerilim kaldırıldı ve 10 min beklenerek geçici şekildeki sabitlenen deformasyon belirlendi (ϵ_f). 4) *Şekil Geri Kazanım*: Örnek tekrar T_{trans} sıcaklığı olan 95°C’ye 10°C/min hızla ısıtıldı ve bu sıcaklıkta 30 min beklenerek polimer harmanın ilk şekline geri dönüşü izlendi. Şekil hafızası performansının analizi Şekil 1’de şematize edilmiştir. Geri dönüş adımı tamamlandıktan sonra kalıcı



Şekil 1. Şekil hafızası analiz prosedürü şeması (Scheme for procedure of shape memory analysis).

gerinim (deformasyon) miktarı (ϵ_r) belirlendi. Elde edilen veriler kullanılarak polimer harmanlara ait şekil sabitleme oranı (R_f) ve şekil geri kazanım oranı (R_r) Eş. 2 ve Eş. 3 kullanılarak belirlendi [16].

$$R_r = \frac{\epsilon_m - \epsilon_r}{\epsilon_m} \quad (2)$$

$$R_f = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_m} \quad (3)$$

COPE/EVA polimer harmanlarının sıcak su ortamındaki şekil hafızası performansı, sıcak su banyosu kullanılarak incelendi. Bu amaçla, seçilen numunenin sıcak preste hazırlanan plaka-1 numunesinden $5 \times 50 \times 1 \text{ mm}^3$ boyutlarında kesilen örnek, 95°C (T_{trans}) sıcaklığa sahip su içerisine daldırılarak 10s süreyle ısıtıldıktan sonra helis şeklinde deforme edilerek, üzerindeki yük kaldırılmadan 15°C (T_{fix}) sıcaklığa sahip su içerisine daldırılarak 30s süreyle soğutuldu ve geçici şekli verildi. Helis şeklindeki polimer harman, tekrar 95°C sıcaklığa sahip su içerisine daldırılarak örneğin eski şekline dönüşü izlendi.

Polimer harmanların reolojik özellikleri bir paralel disk reometre yardımıyla (DHR-1 TA Instruments, ABD) frekans taraması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Analiz prosedürü olarak; 0,15 ile 100 rad/s frekans aralığı, 0,1 gerinim ve 180°C sıcaklık kullanılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Morfolojik Karakterizasyon (Morphological Characterization)

Polimer harmanların sıvı azot altında kırılmış ve yüzeyleri aşındırılmış SEM görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2a, b ve c, toluen kullanılarak EVA fazının uzaklaştırılmasıyla, Şekil 2d,e ve f ise kloroform kullanılarak COPE fazının uzaklaştırılmasıyla elde edilmiştir. Görüntülerden açıkça görüldüğü üzere, polar COPE ve göreceli daha az polar EVA polimerleri arasındaki uyumsuzluktan dolayı oluşan yüksek ara yüzey gerilimi nedeniyle, polimer harmanlar bütün kompozisyonlar için faz-ayrılmış yapı sergilemiştir [9, 17,

18]. Düşük yükleme oranlarından (ağırlıkça %30) yüksek yükleme oranlarına gidildikçe, hem COPE hem de EVA fazının küresel damlacık-benzeri yapıdan, eş-sürekli yapıya ve daha sonra matris faza dönüştüğü görülmektedir. 70C-30E harmanında küresel damlacıklar halinde dağılan EVA fazı (Şekil 2a), 60C-40E harmanında artan EVA miktarı ile daha büyük bölgeler oluşturarak eş-sürekli benzeri morfoloji (Şekil 2b) oluşturmuştur. 50C-50E kompozisyonunda EVA fazı COPE fazı ile eş-sürekli faz oluşturmuş (Şekil 2c ve f) ve daha yüksek EVA yüklemelerinde (ağırlıkça %60 ve %70) ise EVA fazı matris faza, COPE fazı ise dağılan faza (Şekil 2d ve e) dönüşmüştür. Polimer harmanlarda kullanılan polimerler arasındaki viskozite farkı, harmanın morfolojisinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Sürekli fazın viskozitesi, dağılan fazdan yüksek ise difüzyon kısıtlamasından dolayı dağılan faz daha küçük parçacıklar halinde ve daha düzenli bir dağılım sergiler. Eğer dağılan fazın viskozitesi daha yüksek ise dağılım, daha büyük parçacıklar halinde ve düzensiz şekilde gerçekleşecektir [19]. Şekil 2d ve f 'de görülen fibrilli COPE fazı, düşük viskoziteli COPE polimerinin göreceli yüksek viskoziteli EVA fazı içinde uzama akışı gerçekleştirmesinden kaynaklanmış olabilir [9, 20]. Yine viskozite farkı nedeniyle düşük yükleme oranında (ağırlıkça %30), EVA fazının oluşturduğu damlacıklar (Şekil 2a) göreceli olarak COPE fazının oluşturduğu damlacıklardan (Şekil 2d) daha büyüktür. Bu durum, eriyik harmanlama sırasında yüksek viskoziteli EVA fazının daha düşük viskoziteli COPE fazını daha küçük parçalara ayırması ve birbirinden ayrılan parçaların tekrar birleşmesinin COPE fazı tarafından engellenmesinden kaynaklanmış olabilir. Morfolojik analizler sonucu EVA baskın kompozisyonların uyumluluk açısından daha iyi olduğu söylenebilir [20].

3.2. FTIR Analizi (FTIR analysis)

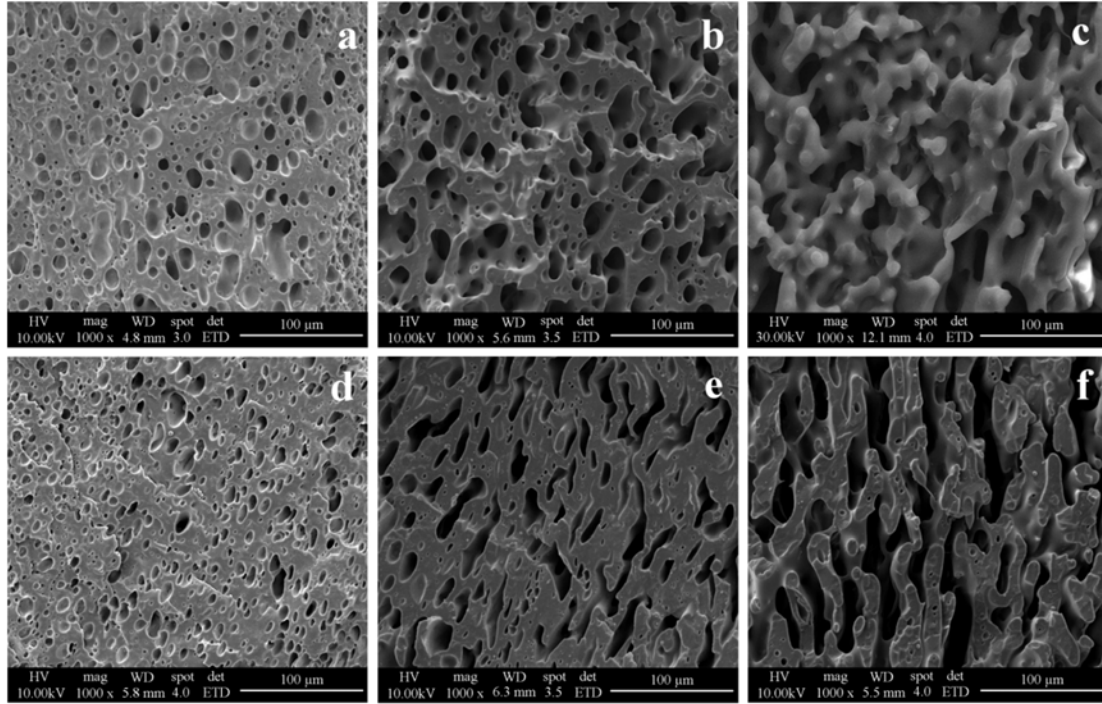
COPE ve EVA polimerleri arasındaki etkileşimler, 50C-50E harmanına ait FTIR analiziyle incelenmiş olup analize ait spektrumlar Şekil 3'de verilmiştir. Bununla birlikte, eriyik harmanlama sırasında COPE ve EVA arasında olası transesterifikasyon ile aşılama ihtimalini değerlendirmek için, 50C-50E harmanından COPE fazı kloroform ile uzaklaştırılmış ve kalan polimerin (50C-50E (A)), FTIR

analizi gerçekleştirilmiştir. COPE fazının uzaklaştırılmasından sonra kalan EVA fazına ait spektrumda COPE polimerine ait karakteristik piklere rastlanılmaması, harmanlama koşullarında COPE'nin EVA polimerine aşılama reaksiyonunun gerçekleşmediğini göstermektedir. Diğer yandan, COPE polimerine ait 1714 cm^{-1} 'deki karbonil ve 1099 cm^{-1} 'deki eter gerilme piklerinin [21, 22], 50C-50E harmanında sırasıyla 1716 cm^{-1} ve 1102 cm^{-1} değerlerine kayması, iki polimeri arasındaki dipol-dipol etkileşimlerden kaynaklanmış olabilir [23]. Buna paralel olarak, EVA polimerine ait 1018 cm^{-1} 'deki C-O gerilim piki, 50C-50E harmanında 1020 cm^{-1} 'e kaymıştır. Bu durum, COPE polimerinin karboksilik asit uç gruplarında bulunan hidroksil

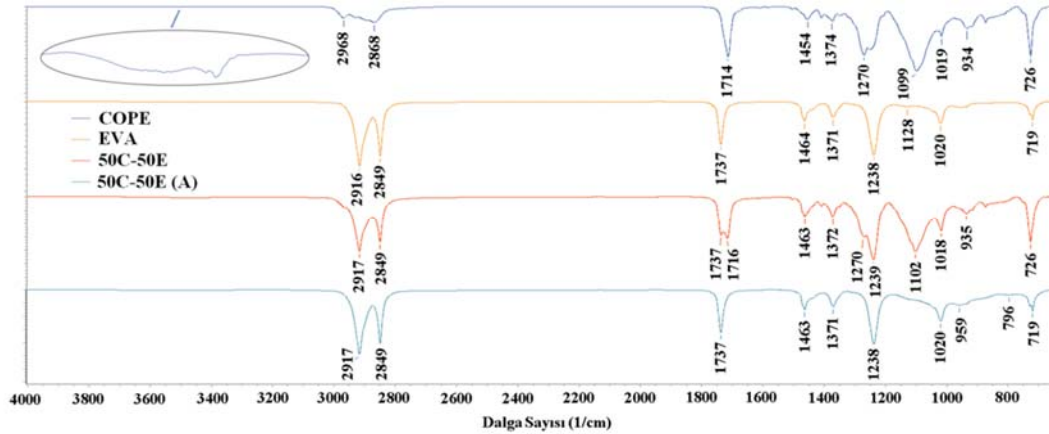
grupları ($3450\text{-}3750\text{ cm}^{-1}$ aralığında görülen geniş pik) [24] ile EVA'nın ester oksijeni arasında hidrojen bağı kurması veya COPE üzerindeki polar gruplarla gerçekleştirdiği dipol-dipol etkileşimlerinden kaynaklanmış olabilir.

3.3. DSC Analizi (DSC Analysis)

Polimer harmanlara ve saf polimerlere ait DSC analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 4'te saf polimerlere ve COPE/EVA harmanlarına ait endotermik termogramlar ve Şekil 5'te ekzotermik termogramlar verilmiştir. Şekil 4'te EVA kopolimerine ait pik maksimum sıcaklıkları (T_m) incelendiğinde, COPE varlığının erime



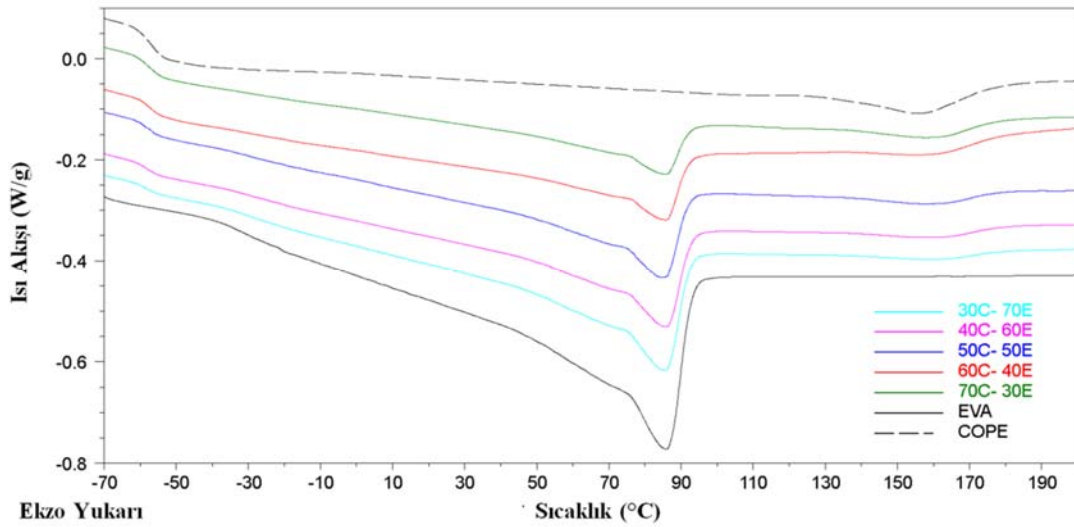
Şekil 2. ŞHP harmanların aşındırılmış yüzey SEM görüntüleri (1000x magnifikasyon); a)70C-30E, b) 60C-40E, c) 50C-50E(polimer harmandaki COPE fazı), d) 30C-70E, e)40C-60E ve f) 50C-50E(polimer harmanındaki EVA fazı)
(The etched surface of SMP blends; a)70C-30E, b) 60C-40E, c) 50C-50E (COPE phase in the blend), d) 30C-70E, e)40C-60E ve d) 50C-50E (EVA phase in the blend)



Şekil 3. Saf COPE, saf EVA, 50C-50E harmanı ve aşındırılmış 50C-50E harmanına ait FTIR spektrumları
(The FTIR spectra of neat COPE, neat EVA, 50C-50E blend and etched 50C-50E blend).

Tablo 2. Polimer harmanlara ve saf polimerlere ait DSC analiz sonuçları
(results of DSC analysis of polymer blends and neat polymers)

Malzeme	T _{gEVA} °C	T _{cEVA} °C	T _{mEVA} °C	ΔH _{fEVA} J/g	X _{CEVA} %	T _{gCOPE} °C	T _{cCOPE} °C	T _{mCOPE} °C	ΔH _{fCOPE} J/g	X _{CCOPE} %
70C-30E	-29,0	67,1	86,0	12,5	14,2	-58,6	124,1	160,1	4,1	4,0
60C-40E	-28,7	67,2	86,0	16,4	14,0	-58,0	124,1	160,6	3,8	4,3
50C-50E	-29,5	67,1	84,3	21,5	14,7	-57,9	123,4	159,8	3,2	4,5
40C-60E	-28,9	67,0	86,1	25,2	14,3	-58,2	125,7	161,6	2,7	4,6
30C-70E	-29,1	67,2	85,8	29,5	14,4	-59,0	124,4	161,6	2,0	4,7
COPE	...	...	...	...	...	-56,6	108,7	156,6	8,5	5,9
EVA	-32,1	66,6	86,2	42,1	14,4	...	...	...	...	...

**Şekil 4.** Polimer harmanlara ve saf polimerlere ait endotermik erime pikleri
(Endothermic melting peaks of the polymer blends and neat polymers)

sıcaklığını çok etkilemediği söylenebilir. Endotermik erime sürecinin hem saf EVA hem de polimer harmanlarda 95°C'nin hemen öncesinde tamamlandığı izlenmiştir. Böylelikle, ısı-duyarlı şekil hafızalı polimer harmanlar için dönüşüm sıcaklığı (T_{trans}) 95°C olarak belirlenmiştir. EVA polimerinin erime entalpilerinden yararlanılarak hesaplanan kristalizasyon dereceleri karşılaştırıldığında ise COPE elastomerinin varlığının EVA polimeri yapısındaki polietilen segmentin kristallenmesi üzerine etkisinin olmadığı görülmüştür.

COPE termoplastik elastomerinin erime sıcaklığı incelendiğinde ise, EVA polimeri varlığında PBT segmentin erime sıcaklığının yükselme eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bu durum, PBT polimeri üzerindeki karboksilik asit ve karbonil (C=O) gruplarının (Şekil 2), EVA polimerine ait ester oksijeni ve karbonil (C=O) gruplarıyla olan etkileşimler ve iki polimer arasında kurulabilecek olan olası fiziksel etkileşimler sayesinde gerçekleşmiş olabilir. Erime sıcaklığının aksine, EVA varlığında COPE elastomerinin kristalizasyon derecesi azalmaktadır (Tablo 2). EVA polimeri ile COPE arasındaki ikincil etkileşimler, COPE üzerindeki PBT blokların kristallenmesini engellemiş olabilir. Ancak, PBT kristalizasyon derecesi azalırken erime sıcaklığının

yükselmesi, PBT segmentin saf haline göre daha az sayıda ve daha büyük sferülitler oluşturmasıyla açıklanabilir [25].

Şekil 5'te saf polimerlere ve polimer harmanlara ait ekzotermik kristalizasyon pikleri görülmektedir. EVA'nın kristalizasyon sıcaklığı ve kristalizasyon derecesinin COPE varlığından etkilenmediği belirlenmiştir. Bütün polimer harmanlarda, kristalizasyon pik maksimum sıcaklıkları 67°C dolayında değişmektedir ve kristalizasyon yaklaşık 35°C sıcaklıkta tamamlanmaktadır. Kristalizasyonun tamamlandığı bu sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklık olan 15°C, COPE/EVA şekil hafızalı polimer harmanları için şekil sabitleme sıcaklığı (T_{fix}) olarak belirlenmiştir. COPE termoplastik elastomerin PBT segmentine ait kristalizasyon sıcaklığı incelendiğinde (Şekil-3b), polimer harmanlarda, EVA varlığında COPE'nin kristalizasyon pik maksimum sıcaklığının 108°C'den 125°C'ye kadar yükseldiği görülmektedir. Bu durum, yüksek eriyik viskozitesine sahip EVA polimerinin düşük viskoziteli COPE için kristallenmeyi başlatabileceği bir nükleasyon ajanı gibi davranmasından kaynaklanmış olabilir [25-27].

Harmanları oluşturan polimerlerin camsı geçiş sıcaklıkları (T_g) Tablo 2'de verilmiştir. EVA polimerine ait T_g değerinin COPE varlığında yaklaşık 3°C yükseldiği görülmektedir. Bu

durum, EVA içindeki amorf bölgede bulunan polar yapılı vinil asetat gruplarının COPE'nin polar yapılı kristalin PBT bloklarıyla etkileşiminin sonucunda hareketlerinin kısıtlanmasından kaynaklandığı olasıdır. Yumuşak amorf EVA faz ile sert kristalin PBT blok arasındaki bu etkileşimler aynı zamanda COPE'nin PBT blokunun kristallik oranının azalmasına da nedeni olabilir. PBT bloklardaki kristallik oranının azalması, COPE'nin yumuşak segmentine ait camsı geçiş sıcaklığının (-56, 55°C) da yaklaşık 2°C daha düşük sıcaklıklara inmesine neden olmuş olabilir.

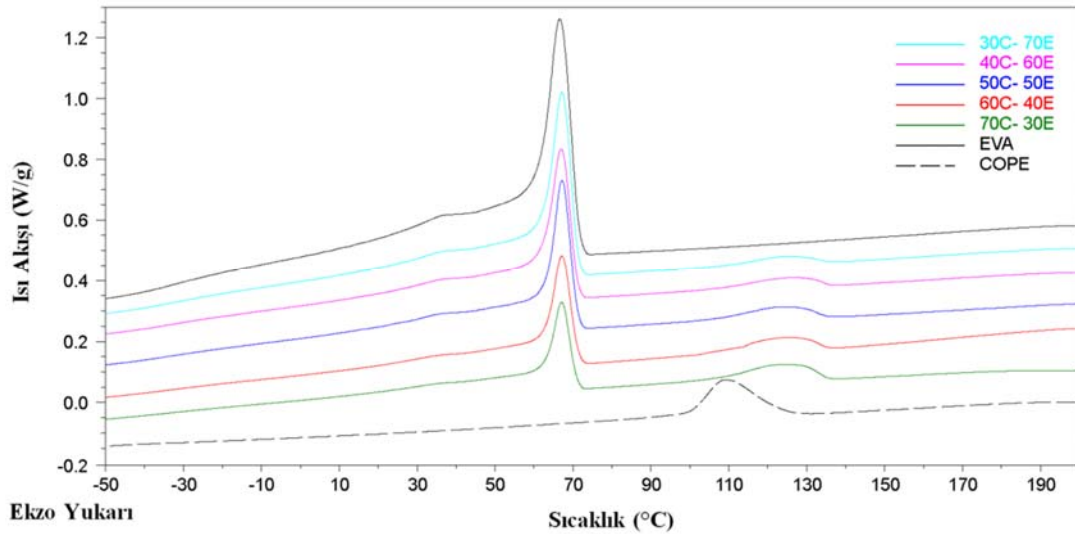
3.4. Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

Polimer harmanlar ve saf polimerlerin statik mekanik özellikleri, oda sıcaklığında gerçekleştirilen çekme testleriyle analiz edilmiştir. Analize ait sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Hazırlanan bütün polimer harman kompozisyonları saf EVA ve saf COPE'ye göre daha düşük çekme mukavemeti, kopma uzaması ve tokluk değeri sergilemiştir. Bu durum, EVA ve COPE arasındaki uyumsuzluk nedeniyle ara yüzey etkileşimlerinin azlığından ve saf polimerler içerisindeki sürekliliğin azalmasından kaynaklanmaktadır [19]. EVA'nın baskın olduğu harmanlarda mekanik özelliklerin, COPE fazının baskın olduğu harmanlara göre daha iyi olması, yüksek viskoziteli

EVA fazının düşük viskoziteli COPE fazını daha küçük parçacıklar halinde dağıtması ve bu harmanlarda polimerler arasındaki etkileşimlerin daha yüksek olmasından ve böylece uygulanan gerilimin fazlar arasında birbirine aktarılabilmesinden kaynaklanabilir (Şekil 2) [11]. En düşük çekme mukavemeti, kopma uzaması ve tokluk değerini her iki fazın da sürekli morfoloji gösterdiği C50-E50 harmanı sergilemiştir (Şekil 2). Bu durum, polimer harman içerisinde herhangi bir fazın matris özelliği sergilememesi nedeniyle, uygulanan gerilimin iki polimer faz arasındaki zayıf etkileşimler tarafından karşılanmasından ve neticesinde erken kırılmanın oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu durum, polimerlerden birinin matris ve diğerinin dağılan faz olduğu harmanlarda, yukarıda bahsedilen özelliklerin C50-E50 harmanına göre göreceli daha yüksek değerler sergilemesiyle de örtüşmektedir. Elastik modül değerleri beklenildiği üzere harmanı oluşturan iki polimerin modül değerlerinin arasında değerler almaktadır. Polimer harmanda göreceli daha sert bileşen olan EVA (38D Shore) miktarı arttıkça ve yumuşak COPE (35D Shore) miktarı azaldıkça modül değerinin arttığı belirlenmiştir [11].

3.5. Şekil Hafızası Özellikleri (Shape Memory Properties)

Polimer harmanlara ait şekil sabitleme (R_f) ve şekil geri kazanım (R_r) oranları DMA cihazı kullanılarak çekme



Şekil 5. Polimer harmanlara ve saf polimerlere ait ekzotermik kristalizasyon pikleri
(Exothermic crystallization peaks of the polymer blends and neat polymers)

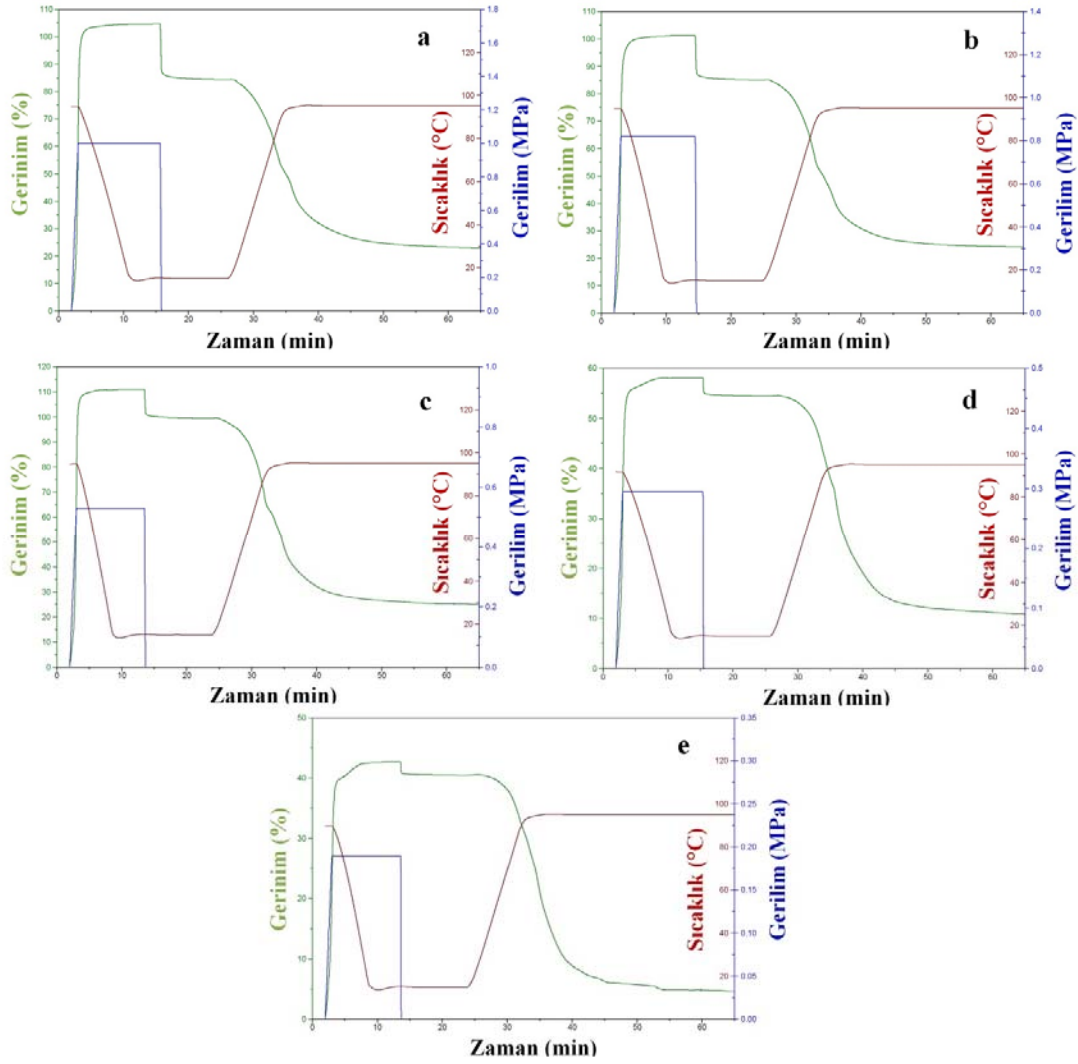
Tablo 3. Polimer harmanlara ve saf polimerlere ait çekme test sonuçları
(Tensile test results of polymer blends and neat polymers)

Malzeme	Elastik Modül MPa	Çekme Mukavemeti MPa	Kopma Uzaması %	Tokluk Nmm
COPE	32,3 ± 0,8	13,8 ± 0,8	813,1 ± 87,9	4077,0 ± 834,8
EVA	42,8 ± 2,9	19,3 ± 2,7	602,8 ± 148,8	3926,1 ± 1079,3
70C-30E	34,0 ± 0,8	5,1 ± 0,3	322,6 ± 46,5	844,9 ± 144,7
60C-40E	35,1 ± 1,5	4,9 ± 0,1	284,8 ± 0,7	722,3 ± 6,2
50C-50E	36,8 ± 2,0	4,7 ± 0,6	188,9 ± 35,2	478,8 ± 108,3
40C-60E	37,9 ± 0,5	6,8 ± 0,9	375,2 ± 42	1102,9 ± 202,5
30C-70E	38,3 ± 0,6	8,0 ± 0,7	379,6 ± 25,4	1345,1 ± 113,6

modunda ve kuvvet kontrolü metoduyla belirlenmiştir. Şekil sabitleme ve şekil geri-kazanım çevrimi, gerilim ve sıcaklık değişkenlerine bağlı olarak gerinim (deformasyon) değerlerinin ölçümleriyle gerçekleştirilmiştir. Analize ait termomekanik grafikler Şekil 6'te ve analiz sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Polimer harmanlar öncelikle, anahtar bileşen olan EVA'nın erime sıcaklığının üzerindeki 95°C'ye (T_{trans}) ısıtılmış ve sabit gerilimle deforme edilmiştir. Deforme haldeki harmanların üzerlerindeki yük kaldırılmadan EVA'nın kristalizasyonunun tamamlandığı şekil sabitleme sıcaklığı (T_{fix}) 15°C'ye soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 5 min bekletilerek malzemenin geçici şeklini alması sağlanmıştır (ϵ_m). COPE polimerinin matris olduğu 70C-30E ve 60C-40E ile eş-sürekli morfolojiye sahip 50C-50E polimer harmanları başlangıç boyutlarının yaklaşık %100'ü kadar deforme edilebilirken, EVA polimerinin matris olduğu 40C-60E ve 30C-70E harmanları ise, deformasyonun EVA polimerinin erime sıcaklığının üzerinde (yüksek viskoz karakter) gerçekleşmesinden dolayı sırasıyla ancak %58 ve %48

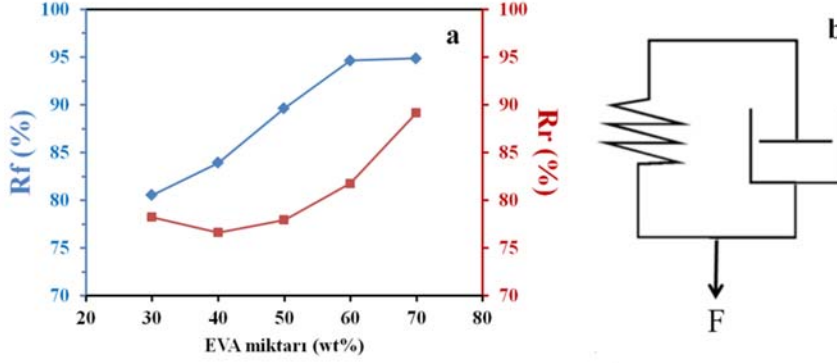
deforme edilebilmiştir. Süre sonunda, soğuyan malzemenin üzerindeki yük kaldırılmış ve harmanın geçici şeklini tamamen alması için 10 min beklenmiştir. Böylelikle, malzemenin geçici şekli hangi derecede koruduğu saptanarak (ϵ_f), malzemenin şekil sabitleme oranı (R_f) Eş. 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Malzemenin şeklinin tamamen sabitlenmesinin ardından sistem tekrar T_{trans} sıcaklığına ısıtılarak şekil hafızalı polimer harmanların sabit şekillerine geri dönmeleri beklenmiştir. Şekil geri kazanımı tamamlanan malzemelerin üzerinde kalan kalıcı deformasyon (ϵ_r) belirlenmiş ve Eş. 2 kullanılarak polimer harmanların şekil geri-kazanım oranları (R_r) hesaplanmıştır. Şekil hafızası analizleri sonucunda elde edilen R_f ve R_r oranları Tablo 4'te ve bu oranların EVA içeriğine göre değişimleri Şekil 7a'da verilmiştir.

Polimer harmanların şekil hafızası özelliği Voigt modeli ile açıklanabilir (Şekil 7b). Modelde birbirine paralel olarak bağlı bulunan bir yay (elastik bileşen) ve bir yağ kutusu



Şekil 6. COPE/EVA polimer harmanlarının şekil hafızası davranışları a) 70C-30E b) 60C-40E c) 50C-50E d) 40C-60E, e) 30C-70E

(Shape memory behavior of COPE/EVA polymer blends a) 70C-30E b) 60C-40E c) 50C-50E d) 40C-60E and e) 30C-70E).



Şekil 7. a) EVA miktarının R_f ve R_r oranlarına etkisi b) Voigt modeli (a) effects of EVA content on R_f and R_r b) Voigt model).

(viskoz bileşen) bulunmaktadır. Polimer harmanlarda elastik bileşen olan yay elastomer fazı ve viskoz bileşen olan yağ kutusu ise anahtar bileşeni temsil etmektedir. Sistem bir dış gerilim ile deforme edildiğinde, eğer deformasyon süresi gecikme süresinden daha uzun olursa yağ kutusu da yay ile birlikte aynı gerinimde deformasyona uğrar. Yük kaldırılırsa, yay tarafından depolanan enerji sayesinde sistem orjinal haline geri döner. Eğer yük kaldırılmadan önce yağ kutusunun viskozitesi çok yüksek olursa, şekil geri kazanımı çok yavaşlar. Bu durum, deforme edilerek T_{fix} sıcaklığına soğutulan polimer harmanın şekil sabitleme sürecini açıklamaktadır. Sistem tekrar T_{trans} sıcaklığına ısıtıldığında ise anahtar bileşenin erimesi sonucu yağ kutusunun viskozitesi tekrar azalır ve elastomer bileşen olan yayı depoladığı enerji sayesinde malzeme eski şeklini tekrar kazanır [7].

Tablo 4. Polimer harmanlara ait şekil hafızası performans testleri sonuçları
(Shape memory performance test results of polymer blends)

Malzeme	R_f (%)	R_r (%)
70C-30E	80,54	78,26
60C-40E	83,94	76,64
50C-50E	89,64	77,96
40C-60E	94,66	81,78
30C-70E	94,88	89,20

Isıl-duyarlı şekil hafızalı polimer harmanlarda genellikle, elastik bileşen miktarının artmasıyla şekil geri-kazanım performansı (R_r), anahtar bileşen miktarının artmasıyla ise geçici şeklin sabitlenmesi performansının (R_f) gelişmesi beklenir [1]. Bu durum, kristalin anahtar fazın deformasyon sonrası aldığı şekli yüksek oranda koruyabilme kabiliyetinden ve kauçuğumsu fazın deformasyon sırasında uygulanan enerjiyi depolayıp, daha sonra anahtar fazın eriyip yumuşaması sonrasında bu enerjiyi yüksek entropiye sahip olduğu deforme pozisyonundan daha düşük entropiye sahip olduğu eski haline geri dönüş için kullanabilme yeteneği ile açıklanabilir.

COPE/EVA polimer harmanlarının şekil sabitleme oranları (R_f) incelendiğinde, polimer harman içerisindeki EVA oranı artmasıyla, harmanın R_f değerinin doğru orantılı olarak

arttığı görülmektedir (Tablo 4 ve Şekil 7b). En düşük R_r oranını %80,54 değeriyle 70C-30E kompozisyonu ve en yüksek R_f oranını ise %94,88 değeriyle 30C-70E sergilemiştir. Düşük oranda EVA yüklemelerinde, COPE matris içerisinde damlacık formunda bulunan EVA partiküllerinin, uygulanan deformasyon sırasında eski haline dönmeye çalışan COPE elastomerinin deformasyona karşı uyguladığı geri dönme kuvvetini karşılamaya yetmemesi şekil sabitleme oranını düşürmektedir. Ancak, polimer harman içindeki EVA miktarının artmasıyla, EVA partiküllerinin birleşerek büyümesi ve COPE miktarındaki azalma sonucu geri dönme kuvvetinin de azalması neticesinde R_f oranı artmıştır [7].

Şekil geri-kazanım oranları (R_r) oranları incelendiğinde (Tablo 4 ve Şekil 7a), elastomer bileşen olan COPE polimerinin matris olduğu harmanlar olan 60C-40E ve 70C-30E için R_r değeri beklenildiği gibi COPE miktarının azalmasıyla doğru orantılı olarak azalma göstermiştir.. Ancak, ağırlıkça %40'tan daha yüksek oranda EVA yüklemelerinde, R_r değerleri EVA yükleme oranıyla doğru orantılı olarak artmıştır. Bu durum, 50C-50E kompozisyonunda COPE ve EVA polimerlerinin eş-sürekli morfoloji sergilemeleri (Şekil 2c ve f) ile elastomer bileşen olan COPE ve kendiliğinden ısı-duyarlı şekil hafızası özelliği gösterebilen EVA'nın [28, 29] oluşturduğu sinerjistik etkiden kaynaklanmış olabilir. Daha yüksek EVA yüklemelerinde ise 40C-60E ve 30C-70E polimer harmanlarında R_r değerlerinin, beklenenin aksine daha yüksek değerler almasının nedeni, bu harmanlarda T_{trans} sıcaklığında elde edilen deformasyonların (ϵ_m) diğer kompozisyonlarda elde edilen deformasyonlara göre daha düşük olması olabilir [5]. Ayrıca, bu harmanlar içerisinde matris bileşen olan EVA polimerinin (Şekil 2d ve e) kendiliğinden şekil hafızası özelliği göstermesi etkili olmuş olabilir [28, 29].

Hazırlanan polimer harmanların şekil hafızası performansları genel olarak değerlendirildiğinde, yüksek deforme edilebilirlik (ϵ_m) ile birlikte, ortalama R_f ve R_r değerleri sergileyen 50C-50E kompozisyonu öne çıkmaktadır. 50C-50E polimer harmanının sıcak su ortamındaki şekil hafızası davranışı, sıcak su banyosu

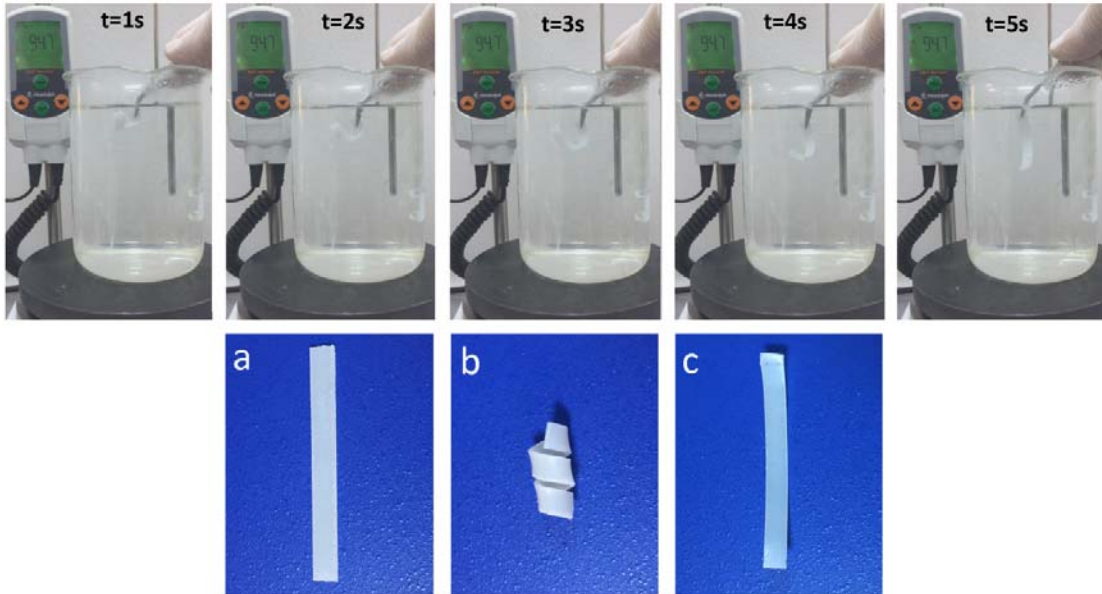
kullanılarak incelenmiştir ve yapılan analize ait görüntüler Şekil 8’de verilmiştir. Polimer harmana ait örnek, öncelikle dönüşüm sıcaklığı olan 95°C sıcaklıktaki suya daldırılarak ve bu sıcaklıkta 10 s süreyle beklenerek EVA fazın erimesi sağlanmıştır. Dönüşüm sıcaklığının üzerindeki örnek, helis şeklinde deforme edilerek şekil sabitleme sıcaklığı olan 15°C’deki suya daldırılarak geçici şeklin sabitlenmesi için 30s beklenmiştir (Şekil 8b). Helis şeklindeki örneğin, tekrar 95°C sıcaklıktaki suya daldırıldığında 5s içerisinde (Şekil 8b) eski şeklini büyük oranda geri kazandığı görülmüştür (Şekil 8c). Bu özellikleriyle hazırlanan COPE/EVA polimer harmanlarının mevcut ısı-duyarlı şekil hafızalı polimerik malzemelere alternatif olabileceği düşünülmektedir.

3.6. Reolojik Özellikler (Rheological Properties)

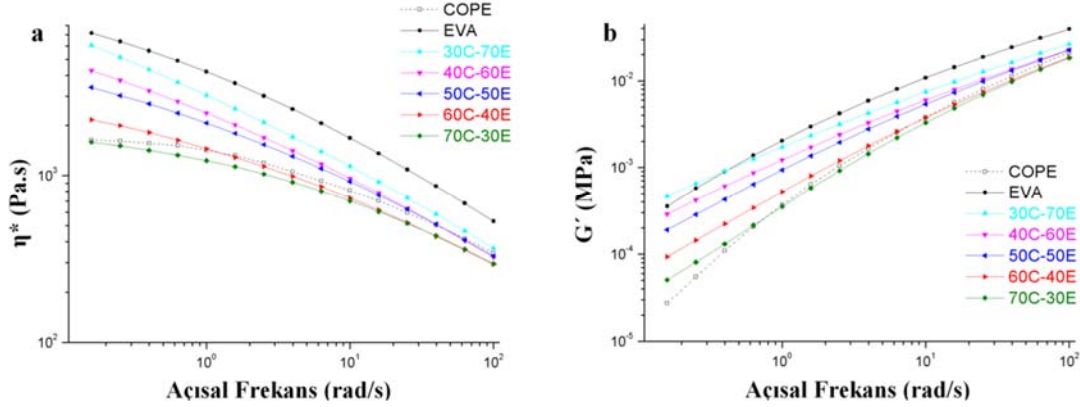
COPE, EVA ve polimer harmanların reolojik özellikleri paralel reometre yardımıyla 180°C’de frekans taraması şeklinde gerçekleştirmiş olup, Şekil 9’da kompleks viskozite (η^*) ve depolama modülü (G') değerlerinin açısal frekansla değişim grafikleri verilmiştir. Saf COPE düşük kayma frekansı bölgesinde newtonsal davranış göstermekle birlikte artan frekanslarda kayma incelmeleri sergilemiştir [30]. Diğer yandan, saf EVA ve COPE/EVA polimer harmanların tamamı artan kayma frekansıyla azalan viskozite göstererek newtonsal olmayan kayma incelmeleri sergilemiştir (Şekil 9a). EVA polimeri COPE polimerine göre daha yüksek viskozite değerleri sergilemekle birlikte, yüksek frekanslarda COPE polimeriyle karşılaştırıldığında daha büyük oranda kayma incelmeleri göstermiştir. Bununla birlikte, harmanların viskoziteleri, yüksek viskoziteye sahip EVA’nın harman içindeki miktarı ile doğru orantılı olarak yükselmiştir. Yine düşük frekans değerlerinde, EVA içerisinde ağırlıkça %50 COPE bileşimine kadar viskozite değerindeki azalma, bu orandan sonra daha yüksek şekilde gerçekleşmiştir. Bu

durum büyük olasılıkla, düşük viskoziteli COPE polimerinin harman içerisindeki durumunun sürekli, EVA fazının ise dağılan faz durumuna geçmesinden kaynaklanmaktadır. Saf COPE’nin düşük frekanslarda sergilediği frekanstan bağımsız newtonsal davranış, COPE/EVA harmanlarında yerini kayma hassas davranışa bırakmış ve frekans arttıkça viskozite azalmıştır. 70C-30E ve 60C-40E harmanlarının saf COPE’den daha düşük viskozite sergilmesi ise, büyük olasılıkla, COPE ile uyumsuz EVA fazının damlacık morfolojisinin iki polimer arasındaki ara yüzey enerjisini düşürmesi ve fazlar arasındaki düşük etkileşimden dolayı ara yüzey kaymasından kaynaklanmaktadır [19, 30]. Bununla birlikte, EVA damlacıklarının COPE matris içerisinde, kayma deformasyonu sırasında kayma yönünde yönlenebilir ve COPE fazı için kaydırıcı etki göstermesi de bu harmanların viskozitelerinin azalmasına neden olmuş olabilir [31, 32].

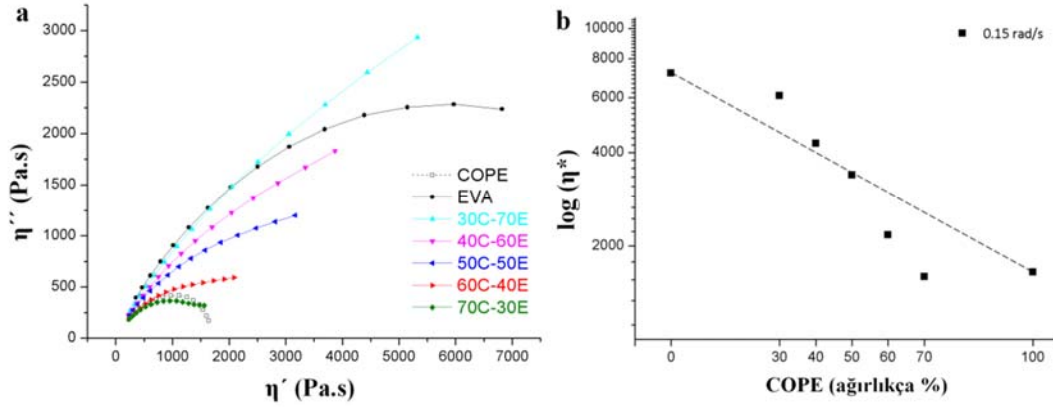
Saf polimerler ve harmanların depolama modülleri artan frekans değerleriyle yükselmiştir (Şekil 9b). Düşük frekans bölgesinde, 30C-70E harmanı, saf EVA’dan daha yüksek modül değeri sergilemiştir. Bu durum, bu kompozisyonda uyumluluğun bir miktar gelişmesi sonucu iki polimere ait moleküller arasındaki dolaşıklıkların artması sonucu modül değerinin yükselmesine neden olmuş olabilir [32]. Bununla birlikte, harmanların düşük frekans bölgesindeki modül değerlerinin kayma hassaslığı, saf COPE’ye kıyasla daha düşük bulunmuştur. Bu durum, EVA fazının COPE’nin elastik karakterini geliştirdiğini ve relaksasyonun geciktirdiğini göstermektedir [33]. Yüksek frekans bölgesinde, beklenildiği gibi depolama modülleri değerleri artan frekans ile artmıştır ancak, kompleks viskozite değerlerinde olduğu gibi 70C-30E ve 60C-40E harmanlarının modül değerleri, saf COPE’den daha düşük değerler almıştır. Bu durum da bu kompozisyonlardaki uyumsuzluğun yüksek olduğunu ve



Şekil 8. 50C-50E polimer harmanının sıcak su içinde şekil hafızası davranışı (Üstte) şekil geri kazanım süreci, (Altta a) sabit şekil b) geçici şekil ve c) geri kazanılan şekil (Shape memory behavior of 50C-50E polymer blend in hot water (Above) process of shape recovery (Below) a) permanent shape b) temporary shape and c) recovered shape).



Şekil 9. Saf COPE, saf EVA ve polimer harmanlara ait reoloji analiz grafikleri a) kompleks viskozite-frekans eğrileri ve b) depolama modülü-frekans eğrileri (Rheological analyses graphs of neat COPE, neat EVA and polymer blends a) Complex viscosity versus frequency plots b) Storage modulus versus frequency).



Şekil 10. a) Cole-cole eğrisi b) Kompleks viskozitenin COPE miktarıyla değişimi grafiği
(a) Cole-cole plot b) Complex viscosity versus COPE content curve).

uygulanan kayma geriliminin fazlar arasındaki ara yüzeyden birbirine aktarılamadığını göstermektedir. Polimer harmanlarda, COPE ve EVA polimerleri arasındaki etkileşimler, farklı yaklaşımlar kullanılarak reolojik veriler yardımıyla incelenmiştir. Cole-cole grafiği çoğunlukla polimer-polimer harmanları ve polimer kompozitler gibi iki fazlı sistemleri incelemek için kullanılır. Saf polimerlerin ve COPE/EVA harmanlarına ait cole-cole grafiği, Şekil 10a'da verilmektedir. Grafikte, η' , kompleks viskoziteye ait ($\eta^* = \eta' - i\eta''$) dinamik viskozite ($\eta' = G'' / \omega$) bileşenini ve η'' , sanal viskoziteyi ($\eta'' = G' / \omega$) temsil etmektedir [34]. Uyumlu polimer harmanları için, cole-cole grafikleri yarım daire şeklinde gözlenir ve harman kompozisyonlarından bağımsız olarak aynı yarıçapı sürdürür, bununla birlikte yarım daireden sapmalar uyumsuzluğun göstergesidir [34, 35]. COPE/EVA harmanları ve saf polimerlerin cole-cole grafikleri Şekil 10a'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, bütün harmanların, ölçüm aralığında yarım daire şeklinden saptığı ve grafiklerin harman kompozisyonlarına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu durum, bütün COPE/EVA harman kompozisyonları için uyumsuzluğun varlığını göstermektedir [36]. Uyumsuz polimerlerden oluşan harmanlarda, fazlar arasındaki etkileşimleri incelemek için kullanılan bir diğer yaklaşım ise kompleks

viskozitenin harman kompozisyonu ile değişim grafiğidir. COPE/EVA harmanlarına ait 0,15 rad/s'de ölçülen kompleks viskozite değerlerinin COPE miktarı ile değişim grafiği Şekil 10b'de verilmiştir. Düşük frekans değerlerinde, uygulanan kayma gerilimi nedeniyle oluşan molekül yığılmasının viskozite ve elastisite üzerine etkisi daha azdır ve polimerler arasındaki ara yüzey etkileşimlerinin incelenmesinde kullanılabilir [37]. Uyumsuz polimerler bu yaklaşıma göre üç farklı davranış gösterebilir; a) fazlar arasında güçlü etkileşimlerin görüldüğü homojen harmanların gösterdiği pozitif sapma, b) etkileşimlerin düşük olduğu negatif sapma ve c) etkileşimlerin kompozisyona bağlı olduğu pozitif-negatif sapma [37]. PEO/EVA harmanları, EVA'nın sürekli faz olduğu ağırlıkça %50 COPE içeriğine kadar referans çizgisinden pozitif sapma gösterirken, daha yüksek COPE yüklemelerinde fazlar arasındaki etkileşimler azalmış ve viskozite değerleri negatif sapmalar göstermiştir [19, 37].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, değişik oranlarda COPE ve EVA polimerleri içeren ısı-duyarlı polimer harmanları hazırlanmıştır. SEM karakterizasyonu ile, bileşen oranının 50/50 olduğunda polimer harmanın eş-sürekli morfoloji

sergilediği, diğer bileşim oranlarında ise fazlardan birinin diğeri içerisinde damlacıklar halinde dağıldığını görülmüştür. FTIR analizi, EVA ve COPE arasında eriyik harmanlama sırasında aşılama reaksiyonunun olmadığını, ancak iki polimerin polar grupları arasında ikincil etkileşimlerin olabileceğini göstermiştir. EVA varlığında COPE'nin erime ve kristalizasyon sıcaklıklarının yükselmesine rağmen, EVA'nın erime ve kristalizasyon sıcaklıklarında belirgin bir değişim görülmemiştir. Reolojik analizler sonucunda polimerlerin uyumsuz olduğu, bununla birlikte fazlar arasındaki etkileşimlerin kompozisyona bağlı olarak değişebileceği belirlenmiştir. COPE/EVA polimer harmanlarının ısı-duyarlı şekil hafızası analizleri, harman içinde EVA konsantrasyonu arttıkça hem şekil sabitleme oranının hem de şekil geri-kazanım oranının geliştiğini ortaya koymuştur. Optimum şekil hafızası özelliğine sahip olan 50C-50E polimer harmanının, sıcak su içerisinde gerçekleştirilen şekil hafızası analizinde, malzemenin geçici şeklini koruduğu ve ısıtıldığında hızlı bir şekilde eski şeklini büyük oranda kazandığı belirlenmiştir. Bu özellikleriyle, yeni COPE/EVA şekil hafızalı polimer harmanlarının aktüatör ve sensör uygulamaları için potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Jing X., Mi H.-Y., Huang H.-X., Turng L.-S., Shape memory thermoplastic polyurethane (TPU)/poly (ϵ -caprolactone)(PCL) blends as self-knotting sutures, *J. Mech. Behav. Biomed.*, 64 94-103, 2016.
- Chatterjee T., Dey P., Nando G. B., Naskar K., Thermo-responsive shape memory polymer blends based on alpha olefin and ethylene propylene diene rubber, *Polymer*, 78 180-192, 2015.
- Zhang H., Wang H., Zhong W., Du Q., A novel type of shape memory polymer blend and the shape memory mechanism, *Polymer*, 50 (6), 1596-1601, 2009.
- Hoehner R., Raidt T., Rose M., Katzenberg F., Tiller J. C., Recoverable strain storage capacity of shape memory polyethylene, *J Polym Sci, Part B: Polym Phys*, 51 (13), 1033-1040, 2013.
- Wang L., Hua J., Wang Z., Facile design of heat-triggered shape memory ethylene-vinyl acetate copolymer/nitrile-butadiene thermoplastic vulcanizates via zinc dimethacrylate induced interfacial compatibilization, *Polym Test*, 76 481-489, 2019.
- Han J. L., Lai S. M., Chiu Y. T., Two-way multi-shape memory properties of peroxide crosslinked ethylene vinyl-acetate copolymer (EVA)/polycaprolactone (PCL) blends, *Polym Adv Technol*, 29 (7), 2010-2024, 2018.
- Kurahashi E., Sugimoto H., Nakanishi E., Nagata K., Inomata K., Shape memory properties of polyurethane/poly (oxyethylene) blends, *Soft Matter*, 8 (2), 496-503, 2012.
- Liu C., Qin H., Mather P., Review of progress in shape-memory polymers, *J Mater Chem*, 17 (16), 1543-1558, 2007.
- Praharaj Bhatnagar M., Mahanwar P., Investigating the compatibility of thermoplastic polyester elastomer/high-density polyethylene blends and its effect on the horizontal flame propagation, *Plast Rubber Compos*, 49 (2), 66-78, 2020.
- Wegner G., Fujii T., Meyer W., Lieser G., Structure and properties of segmented polyether-esters. II. Crystallization behavior of polyether-esters with random distribution of hard segment length, *Angew Makromol Chem*, 74 (1), 295-316, 1978.
- Nagarajan V., Mohanty A. K., Misra M., Blends of polylactic acid with thermoplastic copolyester elastomer: effect of functionalized terpolymer type on reactive toughening, *Polym Eng Sci*, 58 (3), 280-290, 2018.
- Lopes Pereira E. C., Fernandes M. E. C., Pontes K., Soares B. G., Influence of protonic ionic liquid on the dispersion of carbon nanotube in PLA/EVA blends and blend compatibilization, *Front Mater*, 6 234, 2019.
- Zhang Z.-x., He Z.-z., Yang J.-h., Huang T., Zhang N., Wang Y., Crystallization controlled shape memory behaviors of dynamically vulcanized poly (l-lactide)/poly (ethylene vinyl acetate) blends, *Polym Test*, 51 82-92, 2016.
- Lai S.-M., Li C.-H., Kao H.-C., Liu L.-C., Shape Memory Properties of Melt-Blended Olefin Block Copolymer (OBC)/Ethylene-Vinyl Acetate Blends, *J Macromol Sci B*, 58 (1), 174-191, 2019.
- Brogly M., Nardin M., Schultz J., Effect of vinylacetate content on crystallinity and second-order transitions in ethylene—vinylacetate copolymers, *J Appl Polym Sci*, 64 (10), 1903-1912, 1997.
- Wei Y., Huang R., Dong P., Qi X.-D., Fu Q., Preparation of polylactide/poly (ether) urethane blends with excellent electro-actuated shape memory via incorporating carbon black and carbon nanotubes hybrids fillers, *Chin J Polym Sci*, 36 (10), 1175-1186, 2018.
- Tekay E., Nugay N., Nugay T., Şen S., Revolution/rotation-type mixing-assisted masterbatch process for polypropylene-based high-impact ternary nanocomposites, *Polym Compos*, 40 (1), 24-36, 2019.
- Doğu S., Tekay E., Şen S., Effects of EVA-g-MA and EVACO compatibilizers/tougheners on morphological and mechanical properties of PP/EVA/HNT blend polymer nanocomposites, *J Compos Mater*, 54 (16), 2195-2215, 2019.
- Aravind I., Ahn K. H., Ranganathaiah C., Thomas S., Rheology, morphology, mechanical properties and free volume of poly (trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends, *Ind Eng Chem Res*, 48 (22), 9942-9951, 2009.
- Jafari S.-H., Hesabi M.-N., Khonakdar H. A., Asl-Rahimi M., Correlation of rheology and morphology and estimation of interfacial tension of immiscible COC/EVA blends, *J Polym Res*, 18 (4), 821-831, 2011.
- Erdem M., Novel N-vinylimidazole based copolymeric hydrogels: Synthesis, characterization and swelling properties, *Journal of the Faculty of Engineering and*

- Architecture of Gazi University, 34 (3), 1470-1481, 2019.
22. Eren Ş., Poyraz B., Gökçe N., Şamandar A., Aykanat B., Subaşı S., Investigation of the initiator effect on mechanical, thermal and chemical properties of polyesters used composite material production, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1383-1396, 2018.
 23. George G., Selvakumar M., Mahendran A., Anandhan S., Structure–property relationship of halloysite nanotubes/ethylene–vinyl acetate–carbon monoxide terpolymer nanocomposites, J Thermoplast Compos Mater, 30 (1), 121-140, 2017.
 24. Kadam P., Kute R., Mhaske S., Effect of nano-alumina concentration on the properties of poly (vinyl chloride)/thermoplastic polyester elastomer blend system, Iran Polym J, 22 (8), 549-560, 2013.
 25. Lucas-Freile A. d., Sancho-Querol S., Yáñez-Pacios A. J., Marín-Perales L., Martín-Martínez J. M., Blends of ethylene-co-vinyl acetate and poly (3-hydroxybutyrate) with adhesion property, Express Polym Lett, 12 (7), 600-615, 2018.
 26. Tábi T., The application of the synergistic effect between the crystal structure of poly (lactic acid)(PLA) and the presence of ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) to produce highly ductile PLA/EVA blends, J Therm Anal Calorim, 138 (2), 1287-1297, 2019.
 27. Liu L., Wang Y., Xiang F., Li Y., Han L., Zhou Z., Effects of functionalized multiwalled carbon nanotubes on the morphologies and mechanical properties of PP/EVA blend, J Polym Sci, Part B: Polym Phys, 47 (15), 1481-1491, 2009.
 28. Wu X., Huang W., Tan H., Characterization of shape recovery via creeping and shape memory effect in ether-vinyl acetate copolymer (EVA), J Polym Res, 20 (8), 150, 2013.
 29. Lai S.-M., Huang P.-H., Kao H.-C., Liu L.-C., Shape Memory Properties of Melt-Blended Ethylene Vinyl Acetate (Eva)/Metallocene Polyethylene Eco-Blends, J Macromol Sci B, 56 (2), 97-113, 2017.
 30. Ellis C. L., Barry C. M., A study of the synergism of poly (vinyl chloride)/polyether-ester blends, J Vinyl Add Techn, 2 (4), 326-329, 1996.
 31. Choi G. D., Jo W. H., Kim H. G., The effect of the viscosity ratio of dispersed phase to matrix on the rheological, morphological, and mechanical properties of polymer blends containing a LCP, J Appl Polym Sci, 59 (3), 443-452, 1996.
 32. Durmus A., Alanalp M. B., Aydin I., Investigation of rheological behaviors of polyolefin blend type thermoplastic elastomers for quantifying microstructure-property relationships, Korea-Aust Rheol J, 31 (2), 97-110, 2019.
 33. Filippone G., Netti P., Acierio D., Microstructural evolutions of LDPE/PA6 blends by rheological and rheo-optical analyses: Influence of flow and compatibilizer on break-up and coalescence processes, Polymer, 48 (2), 564-573, 2007.
 34. López Manchado M. A., Biagiotti J., Kenny J. M., Rheological behavior and processability of polypropylene blends with rubber ethylene propylene diene terpolymer, J Appl Polym Sci, 81 (1), 1-10, 2001.
 35. Bazli L., Khavandi A., Boutorabi M. A., Karrabi M., Correlation between viscoelastic behavior and morphology of nanocomposites based on SR/EPDM blends compatibilized by maleic anhydride, Polymer, 113 156-166, 2017.
 36. Dordinejad A. K., Jafari S. H., Miscibility analysis in LLDPE/LDPE blends via thermorheological analysis: Correlation with branching structure, Polym Eng Sci, 54 (5), 1081-1088, 2014.
 37. Chen Y., Zou H., Liang M., Thermal, rheological, morphological and mechanical properties of high density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (HDPE/EVA) blends, Polym Sci Ser A, 56 (4), 465-471, 2014.



Effect of multi-directional hot forging on mechanical and tribological properties of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy

Yasin Alemdağ*^{ID}, Sadun Karabıyık^{ID}, Gençğa Pürçek^{ID}

Mechanical Engineering Department, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61080, Turkey

Highlights:

- Multi-Directional forging resulted in the breaking up the silicon particles and the elimination of dendritic structure
- Multi-Directional forging increased the tensile properties and ductility of the tested alloy
- Multi-Directional forging increased the friction coefficient and mass loss of the of the tested alloy

Keywords:

- Al-Si alloys
- Multi-directional forging
- Friction and wear

Article Info:

Research Article
Received:06.02.2019
Accepted: 21.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.523117

Acknowledgement:

This study was performed at Karadeniz Technical University Mechanical Engineering Department. The author would like thank to all technicians in the department for their valuable help.

Correspondence:

Author: Yasin Alemdağ
e-mail: yalemdag@ktu.edu.tr
phone: +90 462 377 4134

Graphical/Tabular Abstract

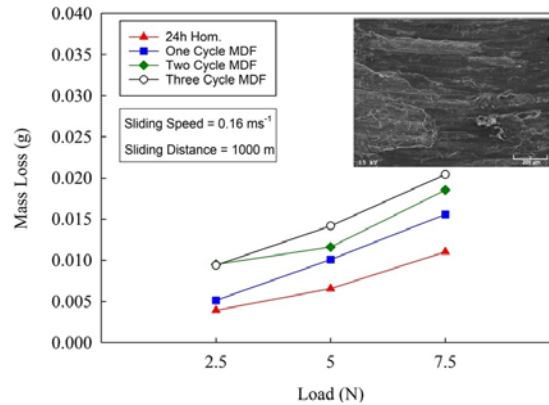


Figure A. The curves showing the mass loss of the alloy versus with applied forging cycle and load with a reperanstative image of its worn surface

Purpose:

The purpose of this study is to investigate the effect of multi-directional hot forging on the mechanical and tribological properties of the Al-7Si-4Zn-3Cu alloy.

Theory and Methods:

The main theory of this study is to improve the strength, ductility and wear performance of the Al-7Si-4Zn-3Cu with severe plastic deformation technique. For this aim, the alloy was forged in open die on three main axis at 200 °C using hydraulic press with capacity of 150 tons. The microstructure of the alloy was examined with optical microscopy while its mechanical properties were determined by the tensile and Brinell hardness tests. The friction and wear tests were carried out using a ball-on-disc type tribometer. These tests were performed at constant sliding speed and distance under different load. Worn surface of the alloy, ball surface and wear debris were examined with SEM-EDS.

Results:

Multi-directional hot forging resulted in both breaking up the silicon particles and elimination of dendritic structure of the alloy. This process increased the yield and tensile strength with percentage elongation of the alloy but decreased its hardness. The highest yield and tensile strength were obtained from the alloy forged two cycles, while the alloy forged three cycles showed a lowest hardness but highest percentage elongation. On the other hand, the alloy hot forged states exhibited the higher friction coefficient and lower wear resistance than that of its homogenized state. After the wear test, smeared and delaminated layer were observed on the worn surface of the alloy in all test conditions.

Conclusions:

The main conclusions of this study were summarized as:

The multi-directional hot forging resulted in the breaking up the silicon particles and the elimination of the dendritic structure. The multi-directional hot forging gave rise to an increase in the strength and ductility of the Al-7Si-4Zn-3Cu alloy. The multi-directional hot forging caused to an increase in friction coefficient and mass loss of the tested alloy. The friction coefficient of the alloy decreased as the load increased but its mass loss exhibited a reverse trend. Smearing and delamination were observed to be effective wear mechanisms of the alloy in all states.



Çok yönlü sıcak dövme işleminin Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisi

Yasin Alemdağ*^{ID}, Sadun Karabiyik^{ID}, Genççağa Pürçek^{ID}

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 61080, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çok yönlü dövme işlemi silisyum parçacıklarının parçalanmasına ve dendritik yapının ortadan kalkmasına yol açmıştır
- Çok yönlü dövme işlemi alaşımın mekanik ve süneklik özelliklerini iyileştirmiştir
- Çok yönlü dövme işlemi alaşımın sürtünme katsayısını ve aşınma kaybını artırmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.02.2019

Kabul: 21.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.523117

Anahtar Kelimeler:

Al-Si alaşımları,
çok yönlü dövme,
sürtünme ve aşınma

ÖZET

Bu çalışmada farklı çevrim sayılarında çok yönlü sıcak dövme işlemine tabi tutulmuş Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Çok yönlü sıcak dövme işlemi alaşımın içyapısında bulunan silisyum parçacıklarının parçalanmasına ve dendritik yapının ortadan kalkmasına yol açmıştır. Bu işlem Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerlerini artırmış, sertliğini ise düşürmüştür. En yüksek akma ve çekme dayanımı iki çevrim dövme uygulanmış alaşımdan, en düşük sertlik ve en yüksek kopma uzaması üç çevrim uygulanmış alaşımdan elde edilmiştir. Diğer taraftan çok yönlü sıcak dövülmüş alaşım, homojenize edilmiş durumuna göre daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma direnci sergilemiştir. Aşınma deneyi sonucunda alaşımların yüzeylerinde sıvanmış tabakaların oluştuğu ve soyulmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu gözlem sıvanmanın ve soyulmanın hem homojenize edilmiş hem de dövme işlemi uygulanmış numuneler için etkin aşınma mekanizmaları olduğunu göstermiştir.

Effect of multi-directional hot forging on mechanical and tribological properties of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy

H I G H L I G H T S

- Multi-Directional forging resulted in the breaking up the silicon particles and elimination of dendritic structure
- Multi-Directional forging improved the mechanical properties and ductility of the tested alloy
- Multi-Directional forging increased the friction coefficient and mass loss of the of the tested alloy

Article Info

Research Article

Received:06.02.2019

Accepted: 21.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.523117

Keywords:

Al-Si alloys,
multi-directional forging,
friction and wear

ABSTRACT

In this study, mechanical and tribological properties of multi-directional hot forged Al-7Si-4Zn-3Cu alloy at different cycles were investigated. Multi-directional hot forging resulted in both breaking up the silicon particles and the elimination of dendritic structure of the alloy. This process increased the yield and tensile strength with percentage elongation of the alloy but decreased its hardness. The highest yield and tensile strength were obtained from the alloy forged two cycles, while the alloy forged three cycles showed a lowest hardness but the highest percentage elongation. On the other hand, hot forged alloy exhibited higher friction coefficient and lower wear resistance than those of its homogenized state. After the wear test, smeared and delaminated layers were observed on the worn surface of the alloy in all test conditions. This observation showed that smearing and delamination were effective wear mechanisms of the alloy in all states.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: yalemdag@ktu.edu.tr, skarabiyik@ktu.edu.tr, purcek@ktu.edu.tr / Tel: +90 462 377 4134

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Al-Si alaşımları düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, düşük genleşme katsayısı, iyi dökülebilirlik ve yüksek aşınma direnci gibi üstün özelliklere sahiptir [1, 2]. Bu alaşımlar içerdikleri silisyum oranına göre ötektik, ötektik altı ve ötektik üstü olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [1]. Ötektik alaşımlar %12 oranında, ötektik altı alaşımlar %12'nin altında, ötektik üstü alaşımlar ise %12'nin üzerinde silisyum içermektedir [1]. Bunlar arasında ötektik ve ötektik altı alaşımlar içten yanmalı motor parçalarının imalatında ve kaymalı yatak yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Ötektik altı alaşımlar arasında Al-7Si alaşımlar daha çok tercih edilmektedir [3, 4]. Bu alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Bu çalışmalarda genellikle alaşımlama ve ısıtılma işleminin söz konusu özelliklere etkisi araştırılmaktadır [5-7]. Alaşımlama ve ısıtılma işleminin sonradan söz konusu alaşımların mukavemet ve süneklik özelliklerinin bir miktar arttığı belirlenmiş ancak bu değerlerin pek çok uygulama için yeterli seviyede olmadığı kanaatine varılmıştır [8]. Özellikle düşük süneklik değerleri bu alaşımların şekillendirilmesinde bir dezavantaj olarak ortaya konulmuştur. Bu durum söz konusu alaşımların mukavemet özelliklerinin yanı sıra sünekliğinin de geliştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Literatürde bu iki özelliğin geliştirilmesi amacıyla farklı tür aşırı plastik deformasyon yöntemleri geliştirilmiştir ve bunların alaşımlama ve ısıtılma yöntemlerine göre daha üstün rol oynadıkları görülmüştür [9-11].

Aşırı plastik deformasyon yöntemleri eş kanallı açısız presleme (EKAP), yüksek basınç altında burma (YBB), birikimli hadde bağı (BHB) ve çok yönlü dövme (ÇYD) gibi işlemlerden oluşmaktadır [9-14]. Bunlardan ilk ikisinin kalıp ve takım maliyetlerinin yüksek olması, parça boyutlarının sınırlı olması ve karmaşık geometriye sahip parçalar için uygun olmaması gibi nedenlerinden dolayı endüstriyel kullanımları sınırlıdır [13, 14]. Ancak 1990'lı yılların başında geliştirilen çok yönlü dövme yöntemi nispeten ince taneli malzemelerin endüstriyel kullanım boyutlarında üretilmesine olanak sağlamıştır [12, 13]. Bu yöntem titanyum, magnezyum, nikel ve alüminyum gibi alaşımlara başarıyla uygulanmış, deformasyon ve sıcaklığın tane incelmeye üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir [12, 15-18]. Söz konusu yöntemleri kullanarak yapılan çalışmaların daha çok metallerin mukavemet ve süneklik özelliklerini geliştirmeye yönelik olduğu görülmüştür. Ancak bu yöntemlerle proses edilmiş metallerin sürtünme ve aşınma özellikleri sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır. Bu çalışmaların bazılarında göre aşırı plastik deformasyon yöntemlerinin malzemelerin aşınma direncini artırdığı, bazılarında göre ise düşürdüğü görülmüştür [19]. Aşınma direncindeki artış deformasyon sonucunda sertlikte meydana gelen artışa, düşüş ise bu işlemden sonra enerji bakımından dengesiz tane sınırlarının oluşumuna dayandırılarak açıklanmıştır [19]. Son yıllarda gerek otomotiv gerekse havacılık sektöründe alüminyum-

silisyum esaslı alaşımların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle piston yapımında, motor gömleği imalatında ve kaymalı yatak uygulamalarında, otomobil jantı yapımında bu alaşımlara olan ilgi giderek artmaktadır [2, 20]. Bu kapsamda geleneksel bileşimlere sahip alaşımların yanı sıra bu alaşımlarla rekabet edebilecek yeni alaşımların geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada üçlü Al-7Si-Zn ve dördü Al-7Si-Zn-Cu alaşımları geliştirilmiş, bunlar arasında dördü alaşımların hem mekanik hem de tribolojik açıdan üçlü alaşımlara göre daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir [3, 4]. Ancak bu alaşımların düşük süneklik sergilemesi ve çoğu uygulamalar için mukavemetinin yetersiz olması kullanım alanını kısıtlamaktadır. Al-Si esaslı alaşımlar üzerine yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde bu alaşımların süneklik ve mukavemet özelliklerinin aşırı plastik deformasyon yöntemleriyle iyileştirilebildiği göze çarpmaktadır [11, 21, 22]. Ancak söz konusu iyileşmenin alaşımların sürtünme ve aşınma davranışları üzerindeki etkilerinin yeterli ölçüde araştırılmadığı görülmektedir. Bu durumlar dikkate alınarak, bu çalışmada aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan çok yönlü sıcak dövme işleminin yeni geliştirilen Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının hem mukavemet hem de tribolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Alaşımın Üretimi ve Çok Yönlü Dövme İşlemi (Production of Alloy and Multi Directional Forging)

Bu çalışmada kullanılan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımı kokil kalıba döküm yöntemi ile üretildi. Alaşımın üretiminde ticari saflıkta alüminyum (%99,7), yüksek saflıkta (%99,9) çinko, Al-12Si ve Al-50Cu ön alaşımı kullanıldı. Söz konusu malzemeler bir elektrikli ergitme ocağında 690°C'de ergitildikten sonra oda sıcaklığında tutulan orta karbonlu çelikten imal edilmiş 57x72x180mm boyutlarına sahip bir kalıba dökülerek katılaştırıldı. Katılaştırmanın ardından alaşımlar kalıptan çıkarıldı ve spektral analiz yöntemi ile kimyasal bileşimleri belirlendi. Bu alaşımdan talaşlı imalat yöntemi ile 40x40x20mm boyutuna sahip numuneler üretildi. Bu numuneler 450°C sıcaklıkta 24 saat boyunca homojenleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra fırın içerisinde soğumaya bırakıldı.

Homojenize edilen numuneler yüksek basınca dayanıklı bir gres ile yağlandıktan sonra bir doğrultuda serbest şekil değişimine olanak sağlayan ve dıştan bir sıcaklık hücresi ile ısıtılan kalıp içerisine yerleştirildi. Kalıbın ısıtılmasında kullanılan hücrenin sıcaklığı bir kontrol ünitesi ile sabit bir değere ayarlandı. Numunenin sıcaklığı tam ortasına yerleştirilen bir termo elaman ile ölçüldü. Sistematik ön deneyler neticesinde en uygun dövme işlemi sıcaklığı 200°C olarak belirlendi. Benzeş sıcaklık kavramından yararlanarak bu sıcaklıkta yapılan dövme işleminin sıcak işlem olduğu tespit edildi [15]. Numune sıcaklığı 200°C'ye ulaştığında dövme işlemi aşamasına geçildi ve bu işlem 150 tonluk bir

hidrolik preste 1mm/s'lik zımba hızında gerçekleştirildi. Dövme işlemi her bir pasoda numunenin 40mm'ye karşılık gelen boyutunda %50 deformasyon oluşturacak şekilde uygulandı. Bu deformasyonun numunede oluşturduğu birim şekil değişimi değeri 0,69 olarak hesaplandı. Birinci pasodan sonra numune uzun kenarı üste gelecek şekilde 90° döndürüldükten sonra ikinci ve ardından da üçüncü pasoya geçilerek bir çevrim tamamlandı. Söz konusu işlemin üç pasoya karşılık gelen bir çevrimi Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Numuneler bir, iki ve üç çevrime karşılık gelen 3, 6 ve 9 pasolarda dövme işlemine tabi tutuldu.

2.2. Yapısal Özellikler ve Mekanik Deneyler (Microstructural Examination and Mechanical Tests)

Homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemi uygulanmış durumdaki numunelerden alınan örnekler zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulduktan sonra sodyum hidroksit çözeltisi (%6'lık NaOH + 94ml saf su) içerisinde dağlandı. Bu numuneler optik mikroskopta incelendikten sonra içyapılarını gösteren fotoğrafları çekildi.

Çekme deneyleri için numunelerden tel erozyon yöntemi ile ölçüm bölgesinin boyutları 12x3x1,5mm olan yassı biçimde örnekler üretildi. Bu örnekler oda sıcaklığında $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ değerindeki deformasyon hızında çekme deneyine tabi tutuldu. Çekme işlemi sırasında örneklerin ölçü uzunluğunda meydana gelen uzama bir video ekstansometre ile ölçülerek yüzde uzama değerine dönüştürüldü. Numunelerin sertliği Brinell sertlik ölçme yöntemi ile 62,5 kg yük ve 2,5mm çapında bilye uç kullanılarak ölçüldü. Çekme deneyleri her bir durum için en az beş numune kullanılarak yapılırken, sertlik deneyleri her bir numunenin farklı bölgelerinden en az 10 ölçüm alınarak gerçekleştirildi. Ölçülen değerlerin ortalaması alınarak gerek homojenize edilmiş gerekse dövülmüş durumdaki numunelerin mekanik özellikleri belirlendi.

2.3. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri (Friction and Wear Tests)

Numunelerin homojenize edilmiş ve dövülmüş durumdaki sürtünme ve aşınma deneyleri ASTM: G99 standardına uygun olarak UTS firması (www.uts-design.com) tarafından geliştirilmiş olan bilye-disk esaslı bir test cihazı kullanılarak yapıldı. Söz konusu cihazın şematik resmi Şekil 2'de gösterilmektedir. Sürtünme ve aşınma deneyleri için homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş numunelerden tel erozyon ile 20mmx20mm boyutlarında ve 7mm kalınlığında örnekler hazırlandı. Söz konusu örneklerin yüzeyleri bu deneylerden önce otomatik zımparalama ve parlatma makinesi kullanılarak düzgen hale getirildi. Deneylerde aşındırıcı yüzey olarak 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş 6mm çapında bilye kullanıldı. Sürtünme ve aşınma deneyleri $0,16 \text{ ms}^{-1}$ kayma hızında ve 2,5 N ile 7,5 N arasında değişen yüklerde 1000 m'lik yola karşılık gelen kayma mesafesinde yapıldı. Bir yük hücresi yardımıyla ölçülen sürtünme kuvveti bir yazılım ile sürtünme katsayısına dönüştürüldü. Aşınma deneyleri için örnekler hem deney öncesinde hem de deney sonrasında

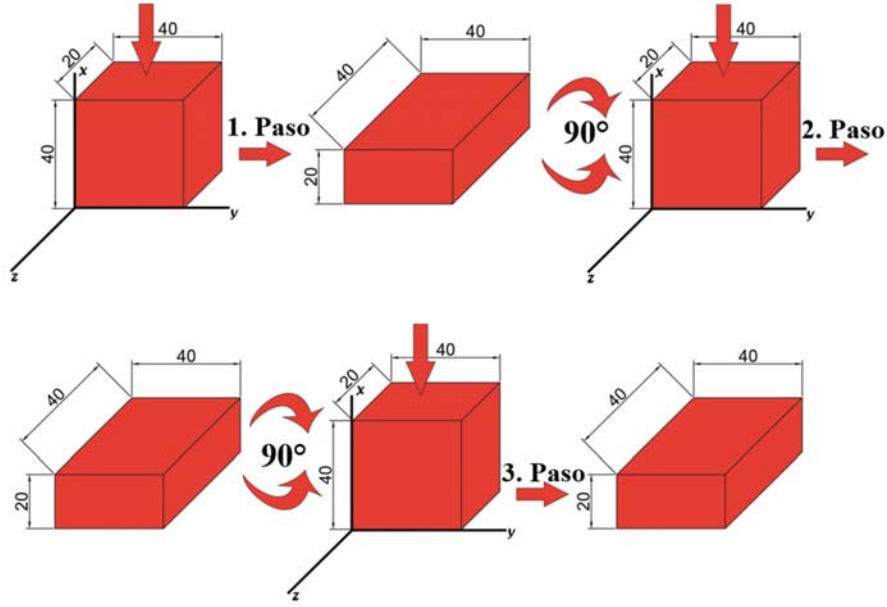
ultrasonik olarak alkol-aseton karışımı içerisinde temizlendi. Temizlenen örneklerin kütleleri $0,01 \text{ mg}$ 'lık hassasiyete sahip bir terazi ile ölçüldü. Kütle ölçüm değerleri arasındaki fark bu örneklerde aşınma sonucu meydana gelen kütle kaybı olarak belirlendi. Aşınma deneyine tabi tutulan örneklerin aşınmış yüzeyleri ile bu yüzeylerden kopan parçacıklar enerji dispersif spektrometresine sahip bir taramalı elektron mikroskobu ile incelendi.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

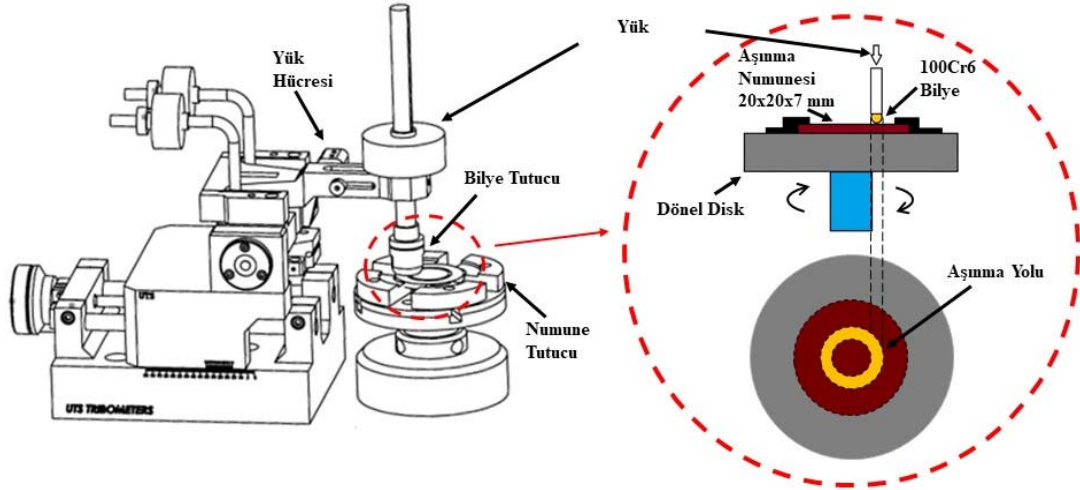
3.1. Yapısal İncelemelerden ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular (Microstructural Examination and Mechanical Test Results)

Homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş numunelerin içyapılarını gösteren optik mikroskop görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Homojenize edilmiş durumdaki numunenin içyapısının ötektik silisyum parçacıkları tarafından sarılmış kısmen dendritik görünüme sahip alüminyumca zengin α fazı, çok az miktarda birincil silisyum parçacıkları ile bakırca zengin θ (CuAl_2) fazından oluştuğu görülmüştür, (Şekil 3a). Ötektik silisyum parçacıklarının ince ve uzun, birincil silisyum parçacıklarının ise geniş ve köşeli bir görünüm sergiledikleri belirlenmiştir. Çok yönlü sıcak dövme işlemi sonucunda hem silisyum parçacıklarının parçalanarak küçüldüğü hem de dendritik yapının tamamen ortadan kalktığı görülmüştür, (Şekil 3b, Şekil 3d). Çevrim sayısı arttıkça silisyum parçacıkların daha çok incelendiği ve yapı içerisine nispeten homojen dağıldığı gözlenmiştir, (Şekil 3c, Şekil 3d). Silisyum parçacıklarının parçalanması bunların sert ve gevrek oluşlarına, dendritik yapının ortadan kalkması ise alüminyum esaslı alaşımlarda sıcak deformasyon sırasında ortaya çıkan dinamik yeniden kristalleşme mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir [23, 24]. Şöyle ki elmas kübik yapısına sahip silisyumun sertliği yüksek ancak sünekliliği oldukça düşüktür [25]. Bu karakteristik özelliklerinden dolayı dövme işlemi sırasında uygulanan gerilme, söz konusu parçacıkların parçalanmasına yol açmıştır. Bu parçalanma sonucunda birden çok parçaya ayrılan silisyumlar her bir çevrimde üç farklı doğrultuda yapılan dövme işlemi ile matris içerisine nispeten homojen olarak dağılmıştır. Diğer taraftan sıcak koşullarda aşırı plastik deformasyona tabi tutulan alüminyum esaslı alaşımlarda dinamik yeniden kristalleşmenin meydana geldiği bilinmektedir [23, 26]. Bu durum söz konusu alaşımda yeni kristallerin oluşumuna ve dolayısıyla dendritik yapısının ortadan kalkmasına yol açmış olabilir.

Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının homojenize edilmiş ve çok yönlü dövülmüş durumdaki çekme ve sertlik deneyi sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Söz konusu alaşımın bir çevrim çok yönlü dövme işlemi sonucunda çekme dayanımının değişmediği ancak akma dayanımının 132 MPa değerinden 185 MPa çıkararak yaklaşık %40'lık bir artış sergilediği belirlenmiştir. İki çevrim sonunda ise hem akma hem de çekme dayanımı en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Bu çevrim sonunda akma dayanımı 203 MPa, çekme



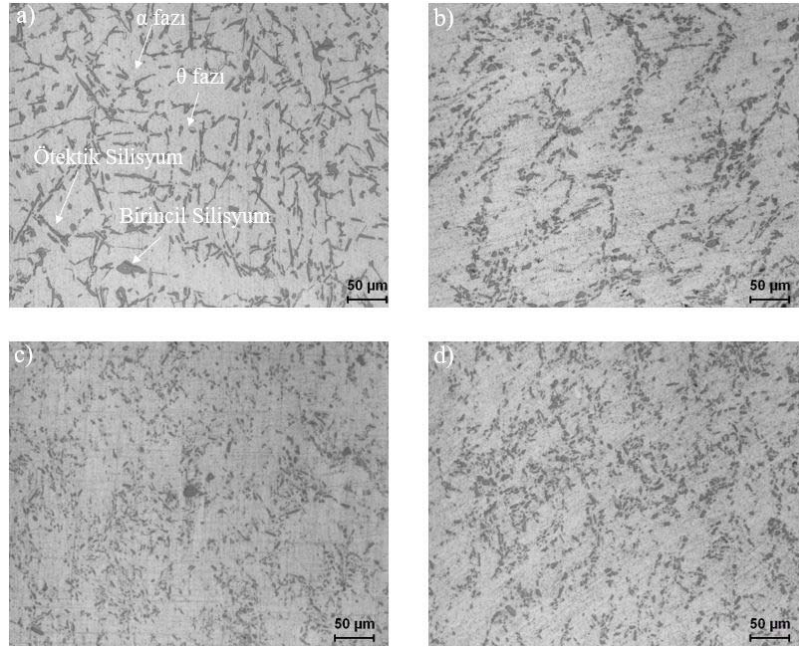
Şekil 1. Çok yönlü dövme işlemine ait bir çevrimin şematik gösterimi (A schematic illustration of one cycle multi directional forging)



Şekil 2. Bilye disk esaslı aşınma deney düzeneğinin ve test bölgesinin şematik gösterimi.
(A schematic illustration of the ball-on-disc type machine and test region.)

dayanımı ise 239 MPa olarak belirlenmiştir. Bu veriler iki çevrim çok yönlü dövme işleminin homojenize edilmiş durumdaki alaşımın akma ve çekme dayanımlarını sırasıyla yaklaşık %53 ve %10 oranında artırdığını göstermiştir. Üç çevrim sonucunda ise akma ve çekme dayanımlarının iki çevrim sonucunda elden elde edilen sonuçlara göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan bu işlem sonucunda elde edilen değerler homojenize durumdaki alaşımın değerleri ile karşılaştırıldığında, işlemin alaşımın akma dayanımını %31 oranında artırdığı, çekme dayanımı üzerinde ise önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Çok yönlü dövme işleminin homojenize edilmiş durumdaki alaşımın sertliğini düşürdüğü kopma uzaması değerlerini ise artırdığı belirlenmiştir. Sertlikteki düşüş bir ve iki çevrim sonunda yaklaşık %5-6 aralığında değişirken, üç çevrim sonunda %12,5 oranında olup en düşük değerine ulaşmıştır.

Homojenize edilmiş durumdaki alaşımın kopma uzaması değerinin ise bir çevrimlik çok yönlü dövme işleminden sonra %88, iki ve üç çevrimlik işlemlerinden sonra sırasıyla %211 ve %356 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu veriler incelendiğinde çok yönlü dövme işleminde çevrim sayısının artırılmasının alaşımın çekme dayanımından daha çok akma dayanımı, sertlik ve kopma uzaması değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar silisyum parçacıklarının morfolojisine, dağılımına ve ana matriste ortaya çıkan dinamik yeniden kristalleşme mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir [23]. Mikroskobik incelemeler ince ve uzun silisyum parçacıklarının homojenize edilmiş durumdaki alaşımın dendritler arası bölgelerinde toplandığını göstermiştir, (Şekil 3a). Bu parçacıkların hem keskin uçları hem de bunların yüzeyleri ile matris arasındaki ara yüzey bağının düşük



Şekil 3. Homojenize edilmiş (a) bir (b) iki (c) ve üç çevrim (d) çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımına ait optik mikroskop görüntüleri.

(Optical microscopy images of homogenized (a) one cycle (b) two cycle (c) and three cycle (d) multi directional forged Al-7Si-4Zn-3Cu alloy.)

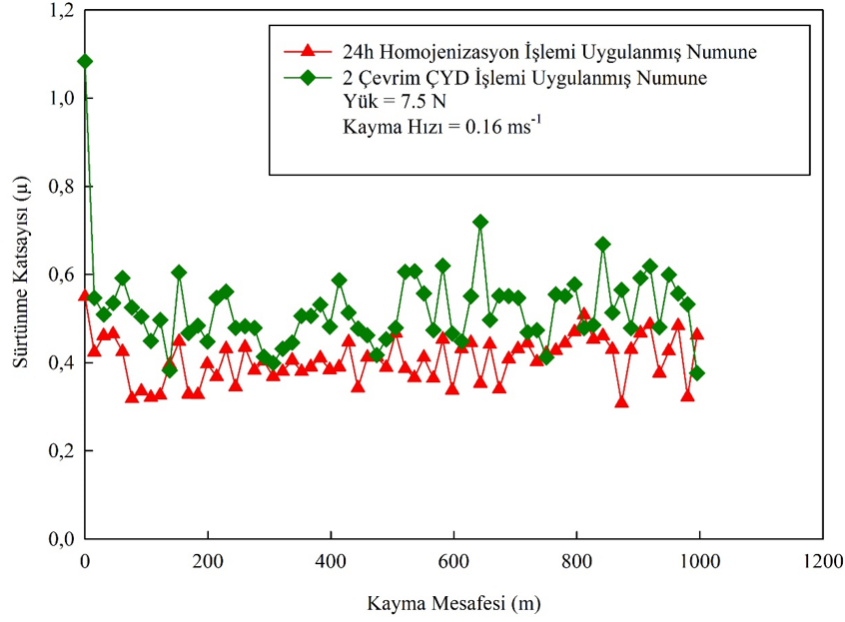
Tablo 1. Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının mekanik deney sonuçları (Mechanical test results of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy.)

Numune Durumu	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Sertlik (BHN)	Kopma Uzaması (%)
24s Hom.	216±3	132±2	72±1	4,02±1
1 Çevrim	217±1	185±4	68±1	7,57±1
2 Çevrim	239±4	203±3	69±1	12,53±1
3 Çevrim	219±1	173±3	63±2	18,35±1

olması bu bölgelerde çatlak oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Ancak dövme işlemi ile bu parçacıkların parçalandığı ve uygulanan çevrim sayısına bağlı olarak yapı içerisine nispeten homojen bir biçimde dağılmaya başladığı görülmüştür, (Şekil 3b, Şekil 3d). Bu durum söz konusu parçacıkların dövme işlemi uygulanmış alaşıma ait numunelerinde çatlak oluşturma eğilimini düşürerek bunların hem mukavemetinin hem de sünekliğinin artmasına yol açmış olabilir. Diğer taraftan çok yönlü dövme işlemi uygulanmış numunelerde süneklik sürekli artarken akma ve çekme dayanımında ikinci çevrimden sonra önemli bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Akma ve çekme dayanımının ikinci çevrime kadar olan artışında hem silisyum parçacıklarının boyutunun küçülmesinin hem de ince taneli bir yapının oluşmasının, ikinci çevrimden sonra bu değerlerdeki düşüşte ise oluşan yeni kristallerin büyümesinin etkin olabileceği düşünülmektedir. Nitekim dövülmüş durumdaki numunelerde en yüksek sertlik düşüşünün ikinci çevrimden sonra meydana geldiği görülmüştür. Dövülmüş durumdaki numunelerin homojenize edilmiş durumuna göre daha düşük sertlik sergilemeleri bu numunelerde yeniden kristallerin oluşumuna ilişkin bir dayanak olarak gösterilebilir.

3.2. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular (Friction and Wear Test Results)

Farklı yüklerde, sabit kayma hızı ve mesafesinde sürtünme deneyine tabi tutulan örneklerin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerinin benzer davranışlar sergilediği görülmüştür. Bu davranış şekli 7,5 N'luk yük altında deneye tabi tutulan homojenize durumdaki alaşım ile iki çevrim çok yönlü dövme işlemi uygulanmış alaşımın sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimleri gösterilen eğrilerde verilmiştir, (Şekil 4). Söz konusu eğriler, alaşımın her durumundaki sürtünme katsayısının çalışmanın başlangıç aşamasında ani bir biçimde artarak bir tepe noktasından geçtikten sonra azalıp nispeten kararlı bir duruma ulaştığını göstermiştir. Ancak numunelerin bu bölgedeki sürtünme katsayılarının dalgalı bir değişim sergilediği görülmüştür. Bu sonuçlar sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanına bağlı olarak açıklanabilir [3, 27-29]. Çalışmanın başlangıç aşamasında yüzeylerin geometrisinden dolayı temas alanı düşük olup bu alanda ortaya çıkan basınç oldukça yüksektir. Bu aşamadaki yüksek basınç nedeniyle numune yüzeyinde ortaya çıkan deformasyon kaymayı zorlaştırarak sürtünme katsayısının



Şekil 4. Homojenize edilmiş ve sıcak dövülmüş durumdaki alaşımın sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler.

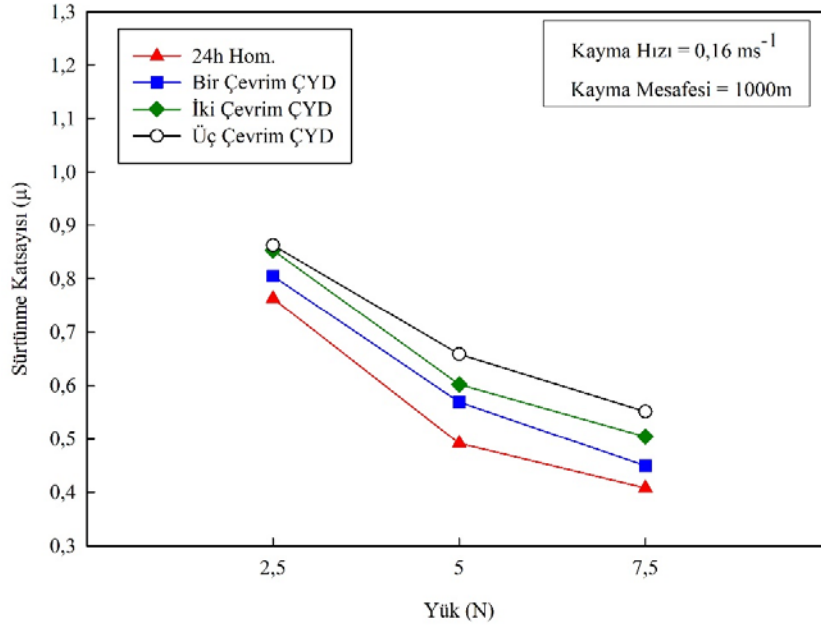
(Variation in friction coefficient of the homogenised and two cycle hot forged samples as a function of sliding distance)

artmasına yol açmaktadır. Kayma mesafesi arttıkça temas alanı artmakta ve basınç azalmaktadır. Bu durum ise sürtünme katsayısının azalarak kararlı bir duruma ulaşmasını sağlamaktadır. Ancak kararlı durumda yüzeyden kopan parçacıkların temas yüzeyleri arasındaki hareketi sürtünme katsayısının bu süreçte dalgalı bir değişim sergilemesine neden olmaktadır [27-29]. Numunelerin kararlı bölgedeki ortalama sürtünme katsayılarının uygulanan yüke göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 5'te verilmiştir. Bu eğriler numunelerin sürtünme katsayısının artan yük ile azaldığını göstermiştir. Sürtünme katsayısının artan yük ile azalması gerçek temas alanının artmasından kaynaklanmış olabilir. Diğer taraftan çok yönlü dövme işlemine tabi tutulan numunelerin homojenize edilmiş durumuna göre daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısı ile arttığı gözlenmiştir. Bu bulgular dövme uygulanmış numunelerin sertliğindeki düşüşe ve sünekliğinde meydana gelen artışa dayandırılarak açıklanabilir [30]. Dövme işlemi uygulanmış numunelerin sertliğinin düşük sünekliğinin yüksek olması kayma esnasında temas yüzeyleri arasındaki adezyonu artırmaktadır. Bu durum söz konusu temas yüzeyleri arasındaki izafi harekete karşı bir direnç oluşturarak sürtünme katsayısının artmasına yol açmaktadır [30-32].

Aşınma deneyine tabi tutulan homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş alaşıma ait numunelerde meydana gelen kütle kaybının uygulanan yüke göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 6'da verilmiştir. Bu eğrilerden yola çıkarak alaşımın her durumundaki kütle kaybının artan yük ile arttığı belirlenmiştir. Ayrıca numunelere uygulanan dövme çevrim sayısı arttıkça aşınma nedeniyle oluşan kütle kaybının arttığı görülmüştür. Nitekim

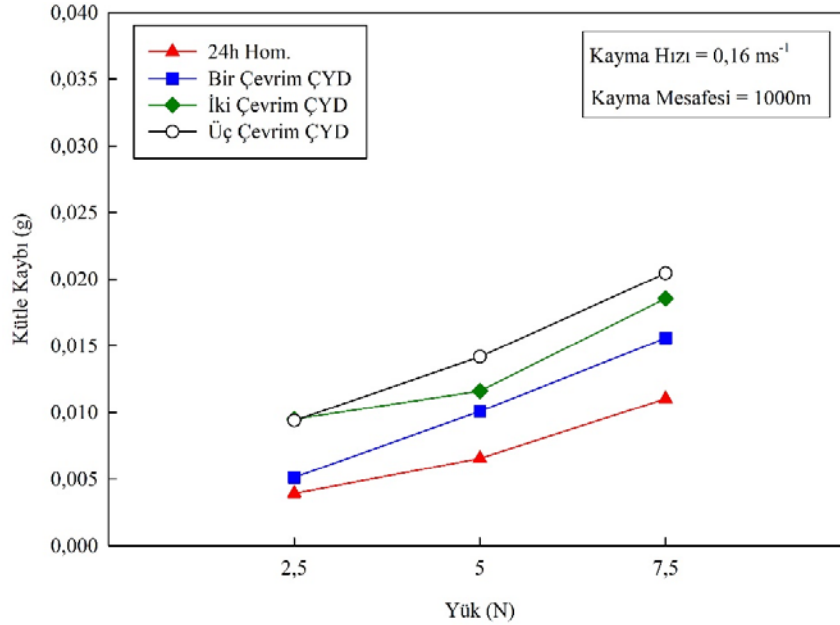
en düşük kütle kaybını homojenize edilmiş durumdaki alaşım sergilerken, en yüksek kütle kaybının üç çevrim dövme işlemi uygulanmış alaşımda meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar Archard yaklaşımına dayandırılarak açıklanabilir [33, 34]. Söz konusu yaklaşıma göre aşınma kaybı artan yük ile doğru, malzemenin sertliği ile ters orantılı olarak bir değişim sergiler. Artan yük ile aşınma kaybında meydana gelen artış yüzeyler arasındaki adezyonun artmasından kaynaklanmaktadır. Adezyonun artması kayma işlemi sırasında yüksek oranda aşınma parçacığının yüzeyden ayrılmasına, dolayısıyla aşınma kaybının artmasına yol açmaktadır. Diğer taraftan artan dövme çevrim sayısı ile numunelerin sertliğinin azalması, sünekliğinin ise artması yüzeyler arasındaki adezyonu kolaylaştırabilir. Bu numunelerde adezyonun kolaylaşması söz konusu numunelerin homojenize edilmiş durumuna göre daha yüksek kütle kaybı sergilemesine yol açmış olabilir.

Homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş numunelerin aşınma yüzeylerinin birbirine benzer bir görünüm sergiledikleri gözlenmiştir. Yapılan incelemelerde numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının oluştuğu ve bazı bölgelerde soyulmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu durum homojenize edilmiş ve üç çevrim dövme işlemi uygulanmış alaşıma ait aşınma örneklerinin aşınmış yüzeylerini gösteren SEM fotoğraflarında gösterilmiştir, (Şekil 7a, Şekil 7b). Ayrıca sıvanmış tabakanın kimyasal bileşimini gösteren EDS analiz sonuçları da bu şekiller üzerinde verilmiştir. Bu sonuçlar sıvanmış tabakanın yüksek oranda alüminyum ve oksijen ile silisyum, çinko, bakır ve çok az miktarda demir ve krom içerdiğini göstermiştir. Numunelerde meydana gelen aşınma mekanizmasının tam olarak belirlenebilmesi için, homojenize edilmiş ve üç çevrim dövme işlemi uygulanmış



Şekil 5. Homojenize edilmiş ve sıcak dövülmüş durumdaki alaşımın ortalama sürtünme katsayısının uygulanan çevrim sayısına ve yüke göre değişimlerini gösteren eğriler.

(The change in friction coefficient of the homogenized and hot forged Al-7Si-4Zn-3Cu alloy samples with respect to applied cycle and load.)

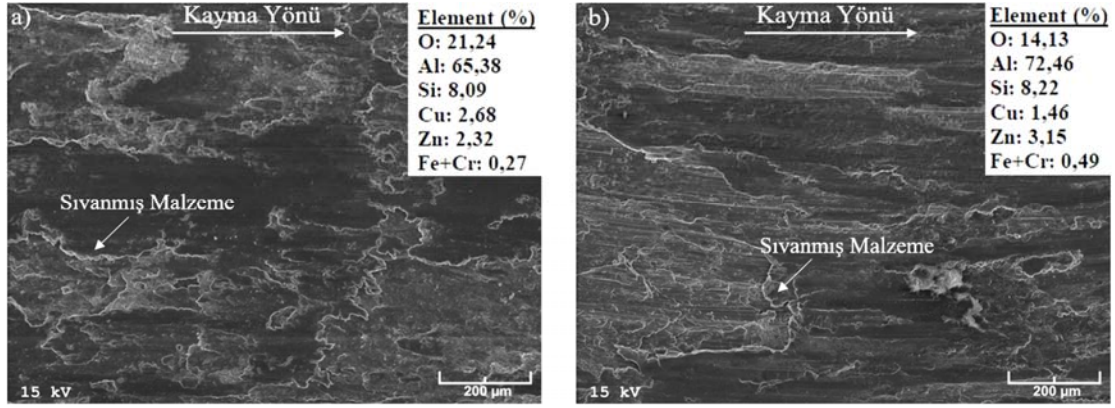


Şekil 6. Homojenize edilmiş ve sıcak dövülmüş durumdaki alaşımda aşınma sonucu meydana gelen kütle kaybının uygulanan çevrim sayısına ve yüke göre değişimlerini gösteren eğriler.

(The curves showing the mass loss of homogenised and hot forged samples versus with applied cycle and load.)

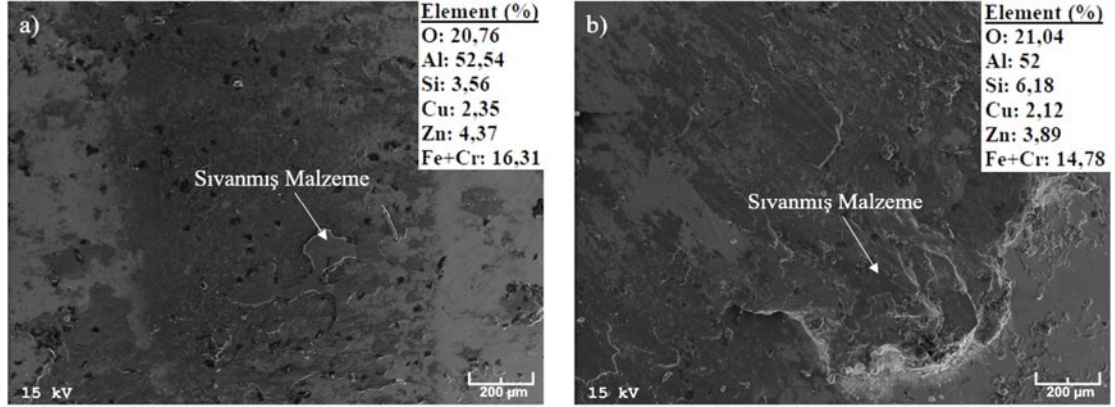
alaşıma ait numunelerin aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcı bilyelerin yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 9'da ise aşınma sonucu bu numunelerden kopan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri verilmiştir. Ayrıca bilye yüzeyleri ile aşınma parçacıklarının EDS analiz sonuçları da bu şekiller üzerinde gösterilmiştir. Şekil 8'deki fotoğraflar numunelerin aşınmış yüzeylerinde oluşan sıvanmış tabakaya benzer bir tabakanın bilye yüzeylerinde de oluştuğunu göstermiştir. Şekil 9'daki

fotoğraflarda ise aşınma sonucu kopan parçacıkların irili ufaklı toz biçimindeki parçacıklar ile nispeten büyük boyutlu yassı parçacıklardan oluştuğu görülmüştür. Diğer taraftan, bilye yüzeylerinde oluşan sıvama tabakası ile özellikle yassı biçimindeki aşınma parçacıklarının kimyasal bileşimlerinin aşınma yüzeylerinde oluşan sıvama tabakasının kimyasal bileşimi ile hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çok yönlü dövme işlemine tabi tutulan numunelerin aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin yüzeylerinde daha belirgin



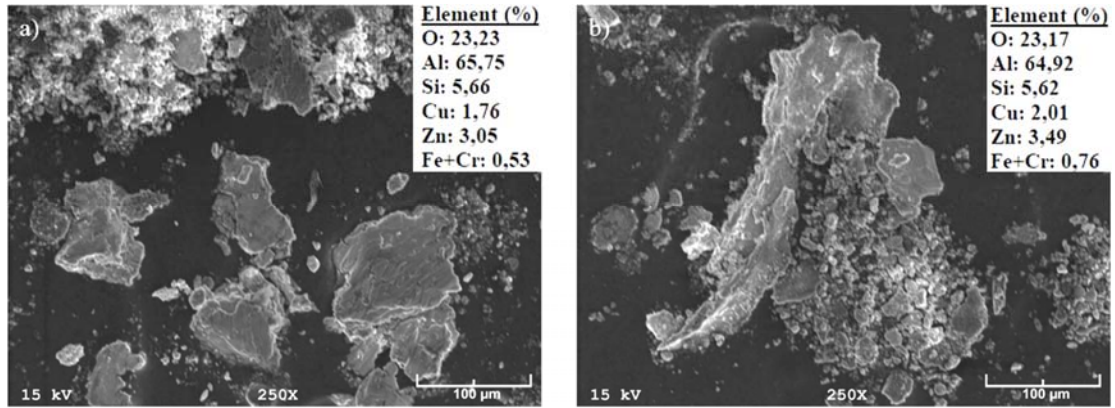
Şekil 7. (a) Homojenize edilmiş ve (b) üç çevrim dövme işlemi uygulanmış alaşıma ait aşınma örneklerinin aşınmış yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları ve EDS analizleri.

(SEM images and EDS analysis of worn surfaces of: a) 24h homogenised, b) three cycle forged alloy samples.)



Şekil 8. Homojenize edilmiş (a) ve üç çevrim dövme işlemi uygulanmış (b) alaşıma ait numunelerin aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcı bilyelerin yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları ve EDS analizleri.

(SEM images and EDS analysis of ball surfaces used for the wear of a) 24h homogenised and b) three cycle forged samples.)



Şekil 9. Homojenize edilmiş (a) ve üç çevrim dövme işlemi uygulanmış numunelerin aşınma deneyi sonucunda numunelerden kopan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri ve EDS analizleri.

(SEM images and EDS analysis of wear debris of a) 24h homogenised and b) three cycle forged samples after their wear test.)

sıvama tabakalarının oluştuğu, ayrıca bu numunelerden kopan aşınma parçacıklarının boyutlarının arttığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar Al-Si esaslı alaşımın aşınma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çalışmanın başlangıç aşamasında temas yüzeyleri arasındaki yüksek basınç bu yüzeylerin birbirine yapışmasına yol

açmaktadır. Harekete başladıktan sonra ortaya çıkan kesme kuvveti etkisiyle yapışan yüzeylerde kırılmalar meydana gelmekte ve bunun sonucunda aşınma parçacıkları oluşmaktadır. Bu parçacıklar kayma sırasında önce bilye yüzeyine, daha sonra geri dönerek numune yüzeyine sıvanmaktadır. Bu durum söz konusu numunelerin ve

bunların aşınmasında kullanılan bilyelerin yüzeylerinde bir sıvama tabakasının oluşumuna yol açmaktadır [3, 29, 35, 36]. Ancak çalışmanın ilerleyen zamanlarında sürtünme ısısında meydana gelen artış, sıvama tabakasının oksitlenme hızını artırarak gevrekleşmesine neden olmaktadır [37, 38]. Gevrekliği artan sıvama tabakası kritik bir kalınlığa ulaştığında kırılarak yassı biçiminde büyük boyutlu aşınma parçacıklarının oluşumuna yol açmaktadır. Söz konusu parçacıkların bir kısmı merkezkaç kuvvetinin etkisiyle aşınma yolu üzerinden uzaklaşırken, bir kısmı ise temas yüzeyleri arasında yuvarlanırken parçalanıp daha ince parçalara ayrılmaktadır [38, 39]. Nitekim EDS analizleri yassı biçimdeki parçacıkların sıvama tabakasının kırılması sonucu yüzeyden uzaklaşan parçacıklar olduğunu, ince toz biçimindeki parçacıkların ise yüzeyler arasında kalanların parçalanması sonucunda oluştuğunu göstermektedir. Diğer taraftan dövülmüş durumdaki numunelerin yüzeylerinde oluşan sıvanmış tabakanın aynı alaşımın homojenize edilmiş durumuna göre daha belirgin bir görünüm sergilemesi ve aşınma parçacıklarının boyutunun artması bu numunelerde dövme işleminden sonra meydana gelen sertlik düşüşüne ve süneklik artışına dayandırılarak açıklanabilir. Numunelerin sertlik değerlerindeki düşüş ve süneklik değerlerindeki artış transfer olan aşınma parçacıklarının numune yüzeyine sıvanmasını kolaylaştırmakta ve böylece sıvama tabakasının belirginleşmesine yol açmaktadır. Ancak daha önce ifade edildiği gibi sıvama tabakası belirli bir kalınlığa ulaştığında kırılarak büyük boyutlu aşınma parçacıklarının oluşumuna neden olmaktadır [28, 30, 32].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Çok yönlü sıcak dövme işlemi silisyum parçacıklarının parçalanmasının yanı sıra dendritik yapının ortadan kalkmasına yol açmıştır.
- Çok yönlü sıcak dövme işlemi Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının akma ve çekme dayanımı ile sünekliğini artırmış, sertliğini ise düşürmüştür. En yüksek akma ve çekme dayanımını iki çevrim dövme işlemi uygulanmış alaşım sergilerken, üç çevrim dövme uygulanmış alaşımın en düşük sertlik ile en yüksek sünekliğe sahip olduğu belirlenmiştir.
- Çok yönlü sıcak dövme işlemi alaşımın hem sürtünme katsayısını hem de bu alaşımlarda aşınma sonucu meydana gelen kütle kaybını artırmıştır. Diğer bir ifadeyle çok yönlü sıcak dövme işlemi Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının sürtünme ve aşınma özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Nitekim en düşük sürtünme katsayısı ve kütle kaybı homojenize edilmiş durumdaki alaşımdan, en yüksek sürtünme katsayısı ve kütle kaybı ise üç çevrim sıcak dövme işlemine tabi tutulmuş alaşımdan elde edilmiştir.
- Alaşımın bütün durumlarındaki sürtünme katsayısı artan yük ile azalmış, kütle kaybı ise artmıştır.
- Aşınma deneyleri sonucunda sıvanmanın (adezyon) ve soyulmanın (delaminasyon) hem homojenize edilmiş hem de dövme işlemi uygulanmış numuneler için etkin aşınma mekanizmaları olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. Yazar değerli katkılarını esirgemeyen tüm teknisyenlere teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ye, H., An overview of the development of Al-Si-Alloy based material for engine applications, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12 (3), 288-297, 2003.
2. Hirsch, J., Recent development in aluminium for automotive applications, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24 (7), 1995-2002, 2014.
3. Alemdağ, Y. ve Beder, M., Microstructural, mechanical and tribological properties of Al-7Si-(0-5)Zn alloys, *Materials & Design*, 63, 159-167, 2014.
4. Alemdağ, Y., Beder, M., Dry sliding wear properties of Al-7Si-4Zn-(0-5) Cu alloys, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 21, 154-165, 2015.
5. Birol, Y., Semisolid processing of near-eutectic and hypereutectic Al-Si-Cu alloys, *Journal of Materials Science*, 43 (10), 3577-3581, 2008.
6. Kori, S.A., Murty, B.S. ve Chakraborty, M., Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium, *Materials Science and Engineering: A*, 283 (1), 94-104, 2000.
7. Hekimoğlu A.P., Turan Y.E., İsmailoğlu İ.İ., Akyol M.E. ve Şen E., Effect of grain refinement with boron on the microstructure and mechanical properties of Al-30Zn alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 523-534, 2019.
8. Basavakumar, K.G., Mukunda, P.G. ve Chakraborty, M., Influence of grain refinement and modification on microstructure and mechanical properties of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu cast alloys, *Materials Characterization*, 59 (3), 283-289, 2008.
9. Cao, Y., Ni, S., Liao, X., Song, M. ve Zhu, Y., Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 133, 1-59, 2018.
10. Estrin, Y. ve Vinogradov, A., Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science, *Acta Materialia*, 61 (3), 782-817, 2013.
11. Purcek, G., Saray, O. ve Kul, O., Microstructural evolution and mechanical properties of severely deformed Al-12Si casting alloy by equal-channel angular extrusion, *Metals and Materials International*, 16 (1), 145-154, 2010.
12. Suresh, M., Sharma, A., More, A.M., Kalsar, R., Bisht, A., Nayan, N. ve Suwas, S., Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on the evolution of texture, microstructure and mechanical properties in the Al-Cu-Li alloy AA2195, *Journal of Alloys and Compounds*, 785, 972-983, 2019.
13. Sabirov, I., Murashkin, M.Y. ve Valiev, R.Z., Nanostructured aluminium alloys produced by severe

- plastic deformation: New horizons in development, *Materials Science and Engineering: A*, 560, 1-24, 2013.
14. Cherukuri, B., Nedkova, T.S. ve Srinivasan, R., A comparison of the properties of SPD-processed AA-6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, 410-411, 394-397, 2005.
 15. Zhu, Q.F., Wang, J., Li, L., Ban, C.Y., Zhao, Z.H. ve Cui, J.Z., Effect of Forging Temperature on Deformability and Structure Evolution of High Purity Aluminium during Multi-Directional Forging Process, *Materials Science Forum*, 877, 371-379, 2017.
 16. Zhang, Z.X., Qu, S.J., Feng, A.H., Hu, X. ve Shen, J., Microstructural mechanisms during multidirectional isothermal forging of as-cast Ti-6Al-4V alloy with an initial lamellar microstructure, *Journal of Alloys and Compounds*, 773, 277-287, 2019.
 17. Djavanroodi, F., Ebrahimi, M. ve Nayfeh, J.F., Tribological and mechanical investigation of multi-directional forged nickel, *Scientific Reports*, 9 (1), 241, 2019.
 18. Wei, J., Jiang, S., Chen, Z. ve Liu, C., Increasing strength and ductility of a Mg-9Al alloy by dynamic precipitation assisted grain refinement during multi-directional forging, *Materials Science and Engineering: A*, 780, 139192, 2020.
 19. Gao, N., Wang, C.T., Wood, R.J.K. ve Langdon, T.G., Tribological properties of ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation, *Journal of Materials Science*, 47 (12), 4779-4797, 2012.
 20. Larouche, D. ve Javidani, M., Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components, *International Materials Reviews*, 59 (3), 132-158, 2014.
 21. Gutierrez-Urrutia, I., Muñoz-Morris, M.A. ve Morris, D.G., Contribution of microstructural parameters to strengthening in an ultrafine-grained Al-7% Si alloy processed by severe deformation, *Acta Materialia*, 55 (4), 1319-1330, 2007.
 22. Alemdağ, Y., Karabıyık, S., Yanar, H. ve Pürçek, G., Mechanical Properties of Multi-Directional Forged Al-7Si-4Zn-3Cu Alloy, *Defect and Diffusion Forum*, 385, 250-255, 2018.
 23. Kapoor, R., Sarkar, A., Yogi, R., Shekhawat, S.K., Samajdar, I. ve Chakravarty, J.K., Softening of Al during multi-axial forging in a channel die, *Materials Science and Engineering: A*, 560, 404-412, 2013.
 24. Stemler, P.M.A., Flausino, P.C.A., Pereira, P.H.R., de Faria, C.G., Almeida, N.G.S., Aguilar, M.T.P. ve Cetlin, P.R., Mechanical behavior and microstructures of aluminum in the Multi-Axial Compression (MAC) with and without specimen re-machining, *Materials Letters*, 237, 84-87, 2019.
 25. Hegde, S. ve Prabhu, K.N., Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys, *Journal of Materials Science*, 43 (9), 3009-3027, 2008.
 26. Naser, T.S.B., Bobor, K. ve Krállics, G., Tensile behavior of multiple forged 6082 Al alloy, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 58 (2), 113-117, 2014.
 27. Clarke, J. ve Sarkar, A.D., Wear characteristics of as-cast binary aluminium-silicon alloys, *Wear*, 54 (1), 7-16, 1979.
 28. Lee, P.P., Savaskan, T. ve Laufer, E., Wear resistance and microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu alloys, *Wear*, 117 (1), 79-89, 1987.
 29. Dey, S.K., Perry, T.A. ve Alpas, A.T., Micromechanisms of low load wear in an Al-18.5% Si alloy, *Wear*, 267 (1-4), 515-524, 2009.
 30. Torabian, H., Patak, J.P. ve Tiwari, S.N., Effect of hardness on wear rates of Al-Si alloys, *Journal of Materials Science Letters*, 14 (23), 1631-1632, 1995.
 31. Bai, B.N.P. ve Biswas, S.K., Mechanism of wear in dry sliding of a hypoeutectic aluminum alloy, *Lubrication Engineering*, 43 (1), 57-61, 1987.
 32. Li, X.Y. ve Tandon, K.N., Mechanical mixing induced by sliding wear of an Al-Si alloy against M2 steel, *Wear*, 225, 640-648, 1999.
 33. Dwivedi, D.K., Adhesive wear behaviour of cast aluminium-silicon alloys: Overview, *Materials & Design*, 31 (5), 2517-2531, 2010.
 34. Sarkar, A. ve Clarke, J., Friction and wear of aluminium-silicon alloys, *Wear*, 61 (1), 157-167, 1980.
 35. Alemdağ, Y. ve Savaşkan, T., Effects of silicon content on the mechanical properties and lubricated wear behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5) Si alloys, *Tribology Letters*, 29 (3), 221-227, 2008.
 36. Hekimoğlu A.P. ve Savaşkan T., Lubricated wear characteristics of Zn-15Al-3Cu-1Si alloy and SAE 660 bronze, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 145-154, 2018.
 37. Xu, C.L., Yang, Y.F., Wang, H.Y. ve Jiang, Q.C., Effects of modification and heat-treatment on the abrasive wear behavior of hypereutectic Al-Si alloys, *Journal of Materials Science*, 42 (15), 6331-6338, 2007.
 38. Wilson, S. ve Alpas, A.T., Thermal effects on mild wear transitions in dry sliding of an aluminum alloy, *Wear*, 225, 440-449, 1999.
 39. Mahato, A., Perry, T.A., Jayaram, V. ve Biswas, S.K., Pressure and thermally induced stages of wear in dry sliding of a steel ball against an aluminium-silicon alloy flat, *Wear*, 268 (9-10), 1080-1090, 2010.



Experimental investigation of the effects of hydrophobic impeller surfaces on the centrifugal pump performance

Mustafa Özbey^{1*}, Mevlüt Gürbüz¹, Uğur Karakurt²

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ondokuz Mayıs University, Samsun, 55139, Turkey

²Graduate School of Sciences, Ondokuz Mayıs University, Samsun, 55139, Turkey

Highlights:

- Hydrophobic impeller reduced the pump specific speed about 10%.
- FEP, PFA and PTFE coated hydrophobic impellers increased the head-flowrate capacity about 10%.
- The hydrophobic impeller, which has 110° contact angle, increased the pump efficiency about 5,3%.

Keywords:

- Centrifugal pump
- Pump performance
- Hydraulic efficiency
- Hydrophobic surface
- Polymer coating

Article Info:

Research Article
Received: 10.04.2019
Accepted: 20.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.551887

Acknowledgement:

DOMAK Pompa ve Makina
San. A. Ş.

Correspondence:

Author: Mustafa Özbey
e-mail: mozbey@omu.edu.tr
phone: +90 362 312 1919 /
1316

Graphical/Tabular Abstract

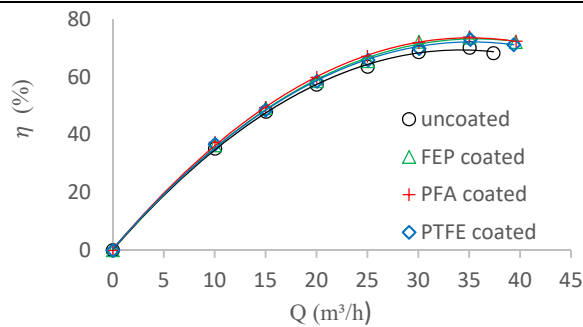


Figure A. Pump η -Q performance curves

Purpose: The experimental investigation of the effects of the hydrophobic surfaces obtained by coating the impeller wet surfaces of a centrifugal pump without change its design on the pump capacity and efficiency.

Theory and Methods:

The wet surfaces of the impeller of a centrifugal pump were coated by the total 3 different polymer composite materials based carbon as polytetra fluoro ethylene (PTFE), fluorinated ethylene propylene (FEP) and perfluoro alkoxy polymer (PFA) in order to hydrophobic surfaces.

Results:

The hydrophobicity of the coated surfaces was determined by measuring the contact angles respectively as 95°, 105° and 110°. The performance curves of the pump were experimentally determined, and the hydrophobic impeller surfaces reduced the pump specific speed by about 10% compared to the uncoated conventional impeller. Therewithal, it was determined about 10% increase in head-flow rate capacity and respectively 4%, 5% and 5,3% increases in efficiency of the PTFE, FEP and PFA coated impellers.

Conclusion:

In this study, the effects of the hydrophobic impeller of a centrifugal type pump with a dimensionless specific speed of about 10 on pump capacity and efficiency were investigated experimentally. Hydrophobicity of the impeller wet surfaces coated by polytetra fluoro ethylene (PTFE), fluorinated ethylene propylene (FEP) and perfluoro alkoxy polymer (PFA) materials are measured, respectively as contact angle of 95°, 105° and 110°. The specific speeds of the same type and sized pumps with hydrophobic impellers coated with FEP, PFA and PTFE materials are determined as 8,97, 9,05 and 9,07, respectively. In general, it has been found that hydrophobic impellers with contact angles in the range of about 95°-110° reduce the specific speed of the pump by about 10%, increase the pump flow capacity about 6%, and the pressure head about 13% through the whole operating range. It was concluded that, therefore, the hydrophobic impeller increased the pump pressure and flowrate capacity about 10% in the same revolution speed. The best efficiency values of PTFE, FEP and PFA hydrophobic surfaces compared to uncoated impeller were determined as 4%, 5% and 5,3%, respectively. The PFA hydrophobic impeller, which has the highest contact angle, has the highest increase in pump efficiency.



Hidrofobik çark yüzeylerinin santrifüj tip bir pompa performansına etkilerinin deneysel incelenmesi

Mustafa Özbey^{1*}, Mevlüt Gürbüz¹, Uğur Karakurt²

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 55139, Atakum, Samsun, Türkiye

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 55139, Atakum, Samsun, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Hidrofobik yüzey elde etmek
- Santrifüj pompa kapasitesini iyileştirmek
- Santrifüj pompa verimini artırmak

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 10.04.2019
Kabul: 20.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.551887

Anahtar Kelimeler:

Santrifüj pompa, hidroforobik yüzey, pompa performansı, hidrolik verim, polimer kaplama

ÖZET

Nüfusun ve sanayileşmenin artmasına paralel olarak her geçen gün artan elektrik enerjisi ihtiyacı mevcut enerjiyi daha verimli kullanmayı gerekli kılmaktadır. Bundan dolayı, bu çalışmada santrifüj tip bir pompa çarkının mevcut tasarımı değiştirilmeden ıslak yüzeyleri hidroforobik özellik kazandırılacak şekilde kaplanarak pompa kapasitesi ve verimi üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çarkın ıslak yüzeyleri politetra florasetilen (PTFE), floroidetilen propilen (FEP) ve perfloro alkoksi (PFA) olmak üzere 3 farklı karbon bazlı polimer malzeme ile kaplanmıştır. Kaplanan yüzeylerin temas açısı sırasıyla 95°, 105° ve 110° ölçülerek hidroforobikliği belirlenmiştir. Deneysel olarak pompa performans eğrileri elde edilerek PTFE, FEP ve PFA kaplamalı hidroforobik çark yüzeylerin kaplamasız konvansiyonel çarka kıyasla pompa özgül hızını yaklaşık %10 düşürdüğü, dolayısıyla kapasitesini %10, verimini ise sırasıyla yaklaşık %4, %5 ve %5,3 artırdığı belirlenmiştir.

Experimental investigation of the effects of hydrophobic impeller surfaces on the centrifugal pump performance

H I G H L I G H T S

- Obtaining hydrophobic surface
- Enhancing centrifugal pump capacity
- Increasing centrifugal pump efficiency

Article Info

Research Article
Received: 10.04.2019
Accepted: 20.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.551887

Keywords:

Centrifugal pump, hydrophobic surface, pump performance, hydraulic efficiency, polymer coating

ABSTRACT

Increasing daily demand for electricity due to population and industrialization makes it necessary to use our existing energy more efficiently. Therefore, in this study the effects of the hydrophobic surfaces obtained by coating the impeller of a centrifugal pump without change its design were experimentally investigated to improve the pump capacity and efficiency. The wet surfaces of the impeller of a centrifugal pump were coated by the total 3 different polymer composite materials-based carbon aspoly tetra fluoro ethylene (PTFE), fluorinated ethylene propylene (FEP) and perfluoro alkoxy polymer (PFA). The hydrophobicity of the coated surfaces was determined by measuring the contact angles respectively as 95°, 105° and 110°. The performance curves of the pump were experimentally determined, and the hydrophobic impeller surfaces reduce the pump specific speed by about 10% compared to the uncoated conventional impeller. Therewithal, it was determined about 10% increase in head-flow rate capacity and respectively 4%, 5%, 5,3% increases in efficiency of the PTFE, FEP and PFA coated impellers.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: mozbey@omu.edu.tr, mgurbuz@omu.edu.tr, ugurkarakurt@hotmail.com / Tel: +90 362 312 1919 /1316

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile farklı metal yüzeylere fonksiyonellik kazandırabilmek için hidrofobik yüzey elde etme konusunda ileri malzemeler ve yöntemler geliştirilmiştir. Bu düşük yüzey enerjili malzemeler ile konvansiyonel metal yüzeyler kaplanarak günlük hayatımızda ve endüstriyel uygulamalarda hızla artan bir oranda faydalı uygulamaları yaygınlaşmaktadır. Yapışmayan mutfak gereçleri, su tutmayan tekstil ürünleri, kendi kendini temizleyen ürünler bunlara birer örnektir. Diğer endüstriyel uygulamaları ise sürtünme direncinin azaltılması ile korozyonu önlemek, ısı transferini iyileştirmek, buzlanmayı önlemek, donmayı geciktirmek ve genel olarak enerji tasarrufu sağlamak ve performans iyileştirmek amaçlı uygulama alanları da giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada ise santrifüj tip bir pompanın çarkının ıslak yüzeyleri hidrofobik bir malzeme ile kaplanarak elde edilen hidrofobik yüzeyin sürtünme direncini azaltarak pompa kapasitesi ve verimine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

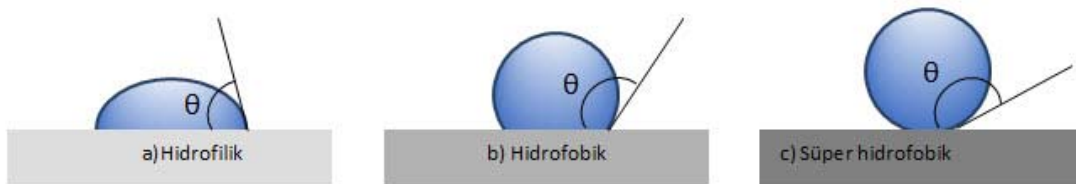
Pompalar, hemen hemen tüm endüstriyel sektörlerde en yaygın kullanılan makinalardır. Dünya genelinde kullanılan pompaların %60'a kadarı yaklaşık olarak %10-%40 verim aralığında çalışmaktadırlar [1] ve dünyada tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %20'si [2], Türkiye'de ise yaklaşık %10'u pompalar ve diğer turbo makinalar tarafından tüketilmektedir [3]. Pompa verimindeki küçük bir artışın, büyük ölçüde enerji tasarrufu sağlama potansiyeli mevcuttur.

Pompalar, bir çark vasıtasıyla mekanik enerjiyi hidrolik enerjisine dönüştüren, yani sıvı akışkanı basınçlandırarak kazandırdığı enerji ile belli bir basınçta ve debide iletilmesini sağlayan makinalardır. Pompa verimi, sahip olduğu mekanik enerjisini akışkana aktarabildiği oranda gerçekleşir. Pompalarda hidrolik enerji kaybına başlıca sürtünme sebep olur. Sürtünme kayıpları, pompa kapasitesini yani debi ve basıncı dolayısıyla da verimini dikkate değer ölçüde etkiler. Çark, mekanik enerjisini akışkana aktarırken geometrisi sayesinde oluşturduğu basınç kuvvetlerinin olumlu etkisi yanı sıra sürtünme kuvvetlerinin sebep olduğu basınç kaybı verim üzerine olumsuz etki eder. Sürtünme kayıpları akışkanın viskozitesi yanı sıra yüzey özelliklerine de bağlıdır ki burada yüzey ile sıvı akışkan arasındaki yüzey gerilimi de önemli rol oynamaktadır. Hidrolik sürtünme yüzeyin normal doğrultusundaki hız gradyanı, deformasyon hızı ve akışkanın dinamik viskozitesine bağlıdır.

Deformasyon hızı akışkanın yüzeye yapışması ile de ilgilidir. Akışkan hidrofilik yüzeye yapışarak yüzeyde kayma olmama şartı sağlanır. Öte yandan, hidrofobik yüzeylerde yüzey üzerinde bir kayma hızı gelişir ve bu durum yüzey üzerinde meydana gelen deformasyon hızını, yani hız gradyanını azaltarak kayma gerilmesinin dolayısıyla sürtünmenin azalmasına sebep olur [4]. Bu durum yüzeyin sıvı ile yaptığı yüzey gerilimi ile ilgilidir ve dolayısıyla yüzey karakteristiğine de bağlıdır.

Su damlaları polimer bazlı, ticari adı teflon olan politetra floraitilen (PTFE) gibi bazı yüzeylere yapışmazlar, yüzeye tutunamayarak yüzey üzerinde yuvarlanırlar ve hiç iz bırakmazlar [5]. Bu durum yüzeyin su damlasını ittiği veya yüzeyi ıslatmadığı şeklinde tarif edilir ve bu fiziksel özellik yüzeyin ıslatılabilirliği olarak tanımlanır. Bu özellik Şekil 1'de gösterildiği gibi su damlasının yüzey ile temas noktasında yaptığı açı ile karakterize edilir, dolayısıyla temas açısı yüzeyin ıslatılabilirliğinin bir ölçüsüdür. Eğer temas açısı $\theta < 90^\circ$ ise yüzey hidrofilik ve yüzey ıslatılabilir, $\theta > 90^\circ$ ise hidrofobik olarak tanımlanır ve yüzey ıslatılabilir değildir [6]. Temas açısı, yani hidrofobiklik arttıkça sıvı damlası ile yüzey arasındaki temas alanı azalır ve sıvı damlası yüzey üzerinde daha kolay yuvarlanır. Bu sayede hidrolik sürtünme dikkate değer ölçüde azalır.

Son zamanlarda mevcut literatürden hidrofobik yüzeylerin özellikle basınç kayıpları üzerine etkilerini inceleyen sayısal ve deneysel çalışmaların giderek arttığı dikkat çekmektedir. Ou ve Rothstein [7] süperhidrofobik yüzeye sahip mikro kanallardaki hız profili gelişimi ve sürtünme kuvvetleri üzerine mikropartikül görüntü hız ölçer (m-PIV) ile yaptıkları deneysel çalışmalarında yüzeyde kayma olmama şartının hidrofobik yüzeylerde ortadan kalktığını, yüzey üzerindeki kayma hızının ortalama akım hızının %60 oranında olduğunu ve bu durumun yüzey üzerinde gelişen hız gradyanını, yani deformasyon hızını azalttığını, bu sayede de sürtünme kuvvetlerinin önemli derecede düştüğünü göstermişlerdir. Choi vd. [8] ise süperhidrofobik yüzeylerle ilgili benzer bir çalışmada sürtünme kayıplarının %20-%30 kadar düştüğünü, Daniello vd. [9] pürüzsüz konvansiyonel yüzeye kıyasla süperhidrofobik yüzeyli mikro kanalda türbülanslı akım için birim uzunluk başına basınç kaybının %50'den daha fazla azaldığını, Park vd. [10] da yine türbülanslı akımda süperhidrofobik yüzeylerin konvansiyonel pürüzsüz yüzeye kıyasla sürtünme direncini %75 oranında düşürdüğünü ortaya koymuşlardır. Truesdall



Şekil 1. Yüzeyin ıslatılabilirliği (Wettability of surface)

vd. [11] ise yüzeylerden biri süperhidrofobik olan iki paralel plaka arasında düşük Reynolds sayılı viskoz akımda sürtünme direncinin %20 azaldığını belirlemiştir. Moaven vd. [12] ise benzer olarak alüminyum disk yüzeyine süperhidrofobik özellik kazandırarak kaplamasız yüzeye kıyasla sürtünme direncinin %15-%30 kadar azaldığını belirlemiştir. Ayrıca, hidrofobik yüzeylerin sürtünme direncini büyük ölçüde azalttığına dikkat çekerek pompalama gücünü azaltmak için büyük bir potansiyel arz ettiğine dikkat çekmişlerdir.

Volkov vd. [13] santrifüj tip bir pompanın hidrofobik çarkının pompa performansı üzerine etkilerini araştırdıkları deneysel çalışmalarında hidrofobikliğin sürtünme etkilerini %23 kadar azaltarak pompa verimini %2-%6 oranında artırdığını belirlemiştir. Diğer bir çalışmada ise Volkov vd. [14] 33 ve 330 özgül hızı sahip hidrofobik çarkın pompa verimini sırasıyla %7,5 ve %0,5 oranında, pompa performansını da %6 ve %9 oranında artırdığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, yüksek özgül hızı sahip santrifüj tip bir pompanın hidrofobiklikle sağlanan kapasite ve verimindeki artışın göreceli olarak düşük olduğuna dikkat çekmişlerdir. Kocaaslan vd. [15] ise tasarladıkları boyutsuz özgül hızı yaklaşık 5 olan bir santrifüj tip pompanın çark ve salyangozunun ıslak yüzeylerini poliüretan boya ile kaplayarak kaplamasız olana kıyasla hidrolik verimin %2,6 kadar arttığını belirlemiştir.

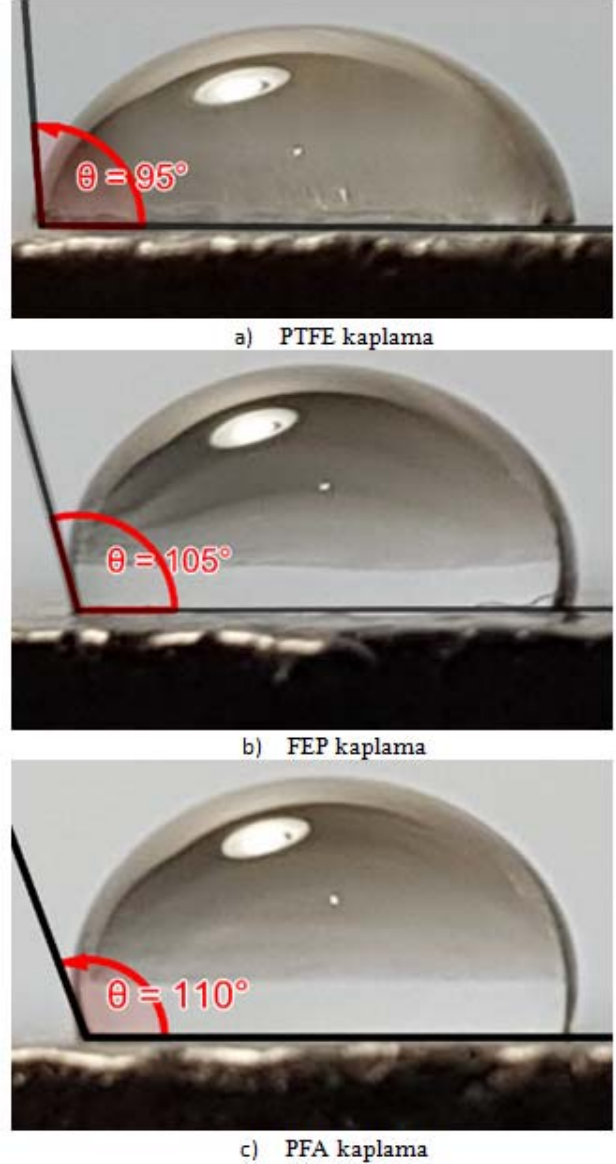
Ancak, hidrofobik yüzeylerin sahip olduğu potansiyelin pompa performansına etkilerini inceleyen çalışmalar yeterince mevcut değildir. Malzeme teknolojisinin gelişmesiyle düşük yüzey gerilimine sahip, yani hidrofobik yüzey elde etmek için endüstride oldukça farklı kaplama malzemeleri geliştirilmektedir. Bu noktadan yola çıkılarak bu çalışmada endüstride oldukça yaygın kullanılan santrifüj tip pompalarda endüstriyel olarak kolay uygulanabilen farklı kaplama malzemeleri ile ıslak çark yüzeyleri kaplanarak elde edilen hidrofobikliğin pompa kapasitesi ve verimine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Kaplama malzemesi (Coating material)

Bu çalışmada kaplama malzemesi olarak floropolimer esaslı olan politetra florasetilen (PTFE), floroidetilen propilen (FEP) ve perfloro alkoksi (PFA) olarak 3 farklı solüsyon kullanılmıştır. Bu polimerler flor atomlarıyla doymuş uzun ve düz karbon zincirlerinden meydana gelmektedir. Atomlar arasındaki kuvvetli bağlar sebebiyle oldukça yüksek hidrofobik ve aşınma dayanımı özelliklerine sahiptirler. Düşük mekanik sürtünme katsayısı ve yüksek kimyasal dirence sahip malzeme olan bu floro polimerlerin yapışma özelliği de oldukça yüksektir. Diğer polimerlere göre daha yüksek sıcaklık dayanımları ve geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahip olmaları sebebiyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. PTFE, FEP ve PFA polimer solüsyonlar ile aynı tip ve boyutlardaki 3 adet pompa çarkının ıslak yüzeyleri spreý yöntemi ile kaplanmıştır.

Kaplamanın bağlayıcılığını artırmak için 400°C'de 10 dakika süre ile fırında ısıl işleme tabii tutulmuştur. Kaplanan yüzeylerin hidrofobikliği temas açısı ölçülerek Şekil 2'de verildiği gibi PTFE, FEP ve PFA kaplamalar için sırasıyla 95°, 105° ve 110° olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Kaplama yüzeyi temas açısı
(Contact angle of coating surface)

2.2. Pompa performans deneyleri (Pump performance experiments)

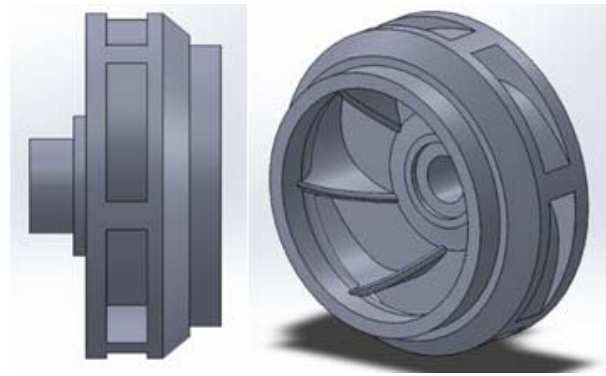
Bu çalışmada, DOMAK Pompa ve Mak. San. A.Ş.'nin tasarımı ve imalatı olan geri eğimli kanatlara sahip SLG3 1,5HP tipi santrifüj pompa kullanılmıştır. Pompa çarkının geometrik özellikleri Tablo 1'de, perspektif görünümü ise Şekil 3'te verilmiştir.

Aynı tip ve boyuttaki biri konvansiyonel yani kaplamasız çarka sahip, üç adet de polimer solüsyon malzemeler ile ıslak yüzeyleri kaplanmış çarka sahip, aynı salyangoz gövde

içinde çarklar değiştirilmek suretiyle pompaların performans testleri DOMAK Pompa ve Mak. San. A.Ş. de mevcut, şematik görünümü Şekil 4’de verilen performans test düzeneğinde yapılmıştır.

Tablo 1. Pompa tasarım parametreleri
(Pump design parameters)

Çark giriş çapı, mm	785
Çark çıkış çapı, mm	1114
Kanat giriş genişliği, mm	282
Kanat çıkış genişliği, mm	132
Kanat sayısı	8
Kanat kalınlığı, mm	4,5



Şekil 3. Pompa çarkının perspektif görünümü
(Perspective view of the pump impeller)

Deneyler, 2800 rpm sabit hızda pompa çıkış kesitindeki sürgülü vana ile debi kontrol edilerek değişen debiye göre debi, basınç ve elektrik motorunun sabit voltaj ile çektiği amper ölçülerek yapılmıştır. Pompa basıncı, pompa giriş ve çıkış kesitlerindeki statik basınçlar basınç algılayıcılar ile ölçülüp farkı alınarak belirlenmiştir. Pompa debisi ise basma hattında konuşlandırılmış elektromanyetik debimetre kullanılarak ölçülmüştür. Pompanın hidrolik gücü Eş. 1’de verilen bağıntı kullanılarak belirlenmiştir.

$$P_h = Q\Delta P = \rho gQH \quad (1)$$

Burada, K-tipi termal çift kullanılarak sıcaklığı 15°C olarak ölçülen çalışma suyunun yoğunluk değeri esas alınmıştır. Elektrik motorunun faz açısı ($\cos \alpha$) için üretici firmasının verdiği 0,93 değeri esas alınarak pompanın tükettiği elektrik gücü Eş. 2’de verilen bağıntı kullanılarak belirlenmiştir. Eş. 3’te verdiği gibi elektrik motorunun verimi üretici firmasının verdiği %73,6 değeri esas alınarak pompanın mekanik gücü belirlenmiştir. Pompa verimi ise Eş. 4’te verdiği gibi hidrolik gücün mekanik güce oranı alınarak belirlenmiştir.

$$P_e = VI \cos \alpha \quad (2)$$

$$P_m = P_e \eta_e \quad (3)$$

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_m} \times 100 \quad (4)$$

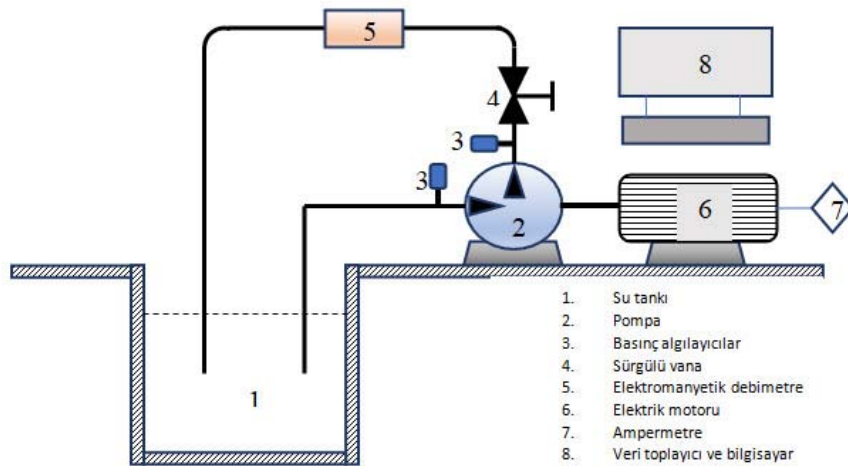
Ölçülen büyüklükler ile doğrulukları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Ölçülen parametreler ve doğruluk verileri
(Measured parameters and their accuracy data)

Ölçülen parametreler	Doğruluk
Basınç, Pa	±%0,075
Debi, m ³ /s	±%0,2
Amper, A	±%0,12
Voltaj, V	±%0,15
Sıcaklık, °C	±1,5
Yoğunluk, kg/m ³	±%0,02
Devir hızı, rpm	±%0,1

Belirlenen fiziksel büyüklüklerde ölçüm aletlerinin doğruluğundan kaynaklanan belirsizlikler mevcuttur. Bu belirsizlikler Eş. 5 [16] kullanılarak belirlenip Tablo 3’te verilmiştir.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$



Şekil 4. Pompa test düzeneğinin şematik görünümü (Schematic view of the pump experimental set-up)

Burada, R: hesaplanan büyüklük, x: bu büyüklüğe etki eden bağımsız değişkenler, w_x : bağımsız değişkenlere ait belirsizlik, w_R ise hesaplanan büyüklüğün belirsizliğidir. Pompanın tükettiği elektrik gücünün ve mekanik gücün belirsizliği belirlenirken faz açısı ve elektrik motorunun verimi üretici firmanın verdiği değerler esas alındığından değişken olarak ele alınmamıştır.

Tablo 3. Hesaplanan parametreler ve belirsizlikleri
(Calculated parameters and their uncertainties)

Hesaplanan parametreler	Belirsizlik
Hidrolik güç, kW	$\pm\%0,22$
Elektriksel güç, kW	$\pm\%0,19$
Mekanik güç, kW	$\pm\%0,19$
Verim, %	$\pm\%0,29$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Şekil 5’de verilen pompa basıncı ve debi karakteristik eğrilerinden hidrofobik çarka sahip pompaların basınç ve debi kapasitelerinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Kısılma basıncının, yani debi sıfırken ki pompa basıncının 13 mSS’dan yaklaşık 14,5 mSS basınca arttığı, en fazla debinin de 37 m³/h’den 40 m³/h’debiye arttığı, dolayısıyla hidrofobik çarkın pompanın basınç ve debi kapasitesini sırasıyla%11,5 ve %8 oranında artırdığı görülmektedir.

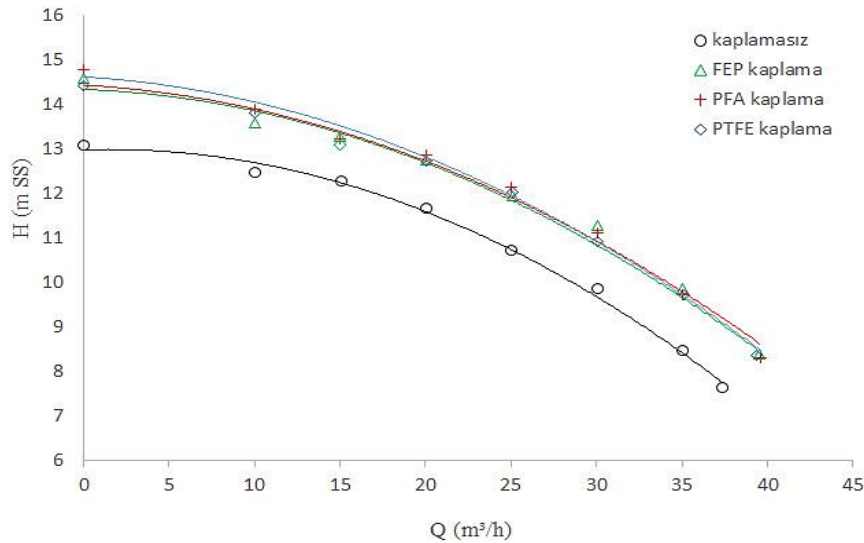
Pompanın basınç ve debi kapasitesi ile ilgili bir boyutsuz performans parametresi olan özgül hız, bir birim hacim akışkana birim kütle için bir birim potansiyel enerji kazandırmak için gerekli dönme hızı olarak tanımlanır. Kaplamasız konvansiyonel pompanın en iyi verim noktasında belirlenen özgül hızı boyutsuz olarak 10,06’dır. FEP, PFA ve PTFE malzemeler ile kaplanan hidrofobik çarka sahip aynı tip ve boyutlardaki pompaların özgül hızları ise sırasıyla 8,97- 9,05 ve 9,07’dir. Dolayısıyla, yaklaşık 95°-110° aralığında temas açısına sahip hidrofobik çarkların

pompanın özgül hızını yaklaşık %10 kadar azalttığı, yani aynı devirde pompa basınç ve debi kapasitesini yaklaşık%10 kadar artırdığı belirlenmiştir.

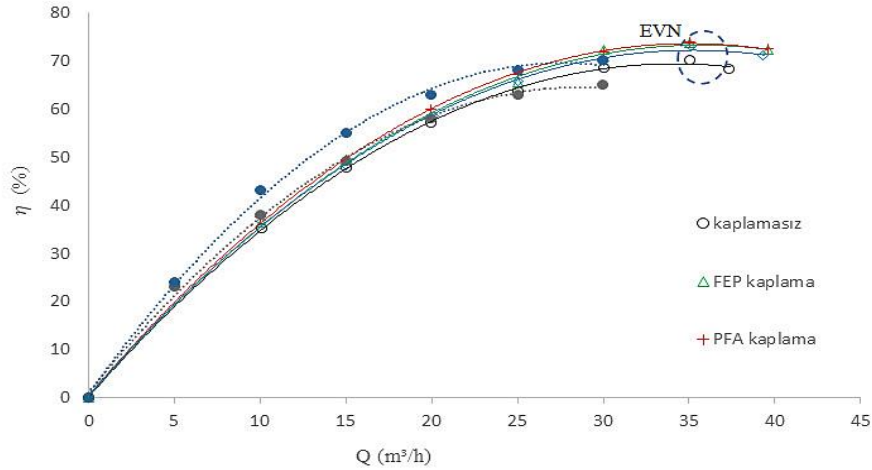
Pompa hidrolik veriminin ise debiye göre değişimi Şekil 6’da verilmiştir. En yüksek verime sahip nokta en iyi verim noktası (EVN) olarak tanımlanır ki en iyi verim değerini hidrofobik çarka sahip pompaların dikkate değer ölçüde arttığı görülmektedir. PTFE, FEP ve PFA hidrofobik malzemeler ile kaplanan çarka sahip aynı tip ve boyutlardaki pompaların en iyi verim değerini yaklaşık %70,1’den sırasıyla %72,9 -%73,6 ve %73,8’e artırdığı belirlenmiştir. PTFE, FEP ve PFA hidrofobik yüzeylerin kaplamasız çarka kıyasla en iyi verim değerlerindeki artış sırasıyla %4, %5 ve %5,3’tür. Buradan test edilen hidrofobik çarklar arasında en yüksek temas açısına sahip PFA hidrofobik çarkın verimi en fazla artırdığı görülmektedir. Diğer taraftan verimdeki artışın yüksek verimlerde daha fazla olduğu, yani hidrofobik çark yüzeylerinin yüksek debilerde verimi daha fazla oranda artırdığı görülmektedir.

Bir pompanın kapasitesi, tasarımı yani geometrisi ve boyutları yanı sıra kullanıldığı sistem karakteristiklerine de bağlıdır. Şekil 6’dan görüldüğü gibi direncin yüksek olduğu bir sistemde daha düşük bir debi verirken buna karşın daha yüksek basınç sağlamaktadır. Benzer şekilde bir pompanın verimi de tasarımının yanı sıra kapasitesine, dolayısıyla sistemde karşılaştığı dirence de bağlıdır. Hidrofobik yüzeylerin pompa kapasitesini, hem en fazla verdiği debi olarak hem de tüm çalışma aralığı boyunca basıncını belirgin bir şekilde artırdığı Şekil 5’den görülmektedir. Diğer taraftan Şekil 6’dan hidrofobik çarkın pompa hidrolik verimini debi arttıkça daha fazla oranda artırdığı görülmektedir.

Volkov vd. [13] hidrofobik yüzeylerin hidrolik sürtünmeyi %23 kadar azalttığını, pompa verimini ise Şekil 6’da görüldüğü gibi %2-6 oranında artırdığını ortaya koymuşlardır. Buna ilaveten, Kocaaslan vd. [15]



Şekil 5. Pompa H-Q performans eğrileri (Pump H-Q performance curves)



Şekil 6. Pompa η -Q performans eğrileri (Pump η -Q performance curves)

tasarladıkları santrifüj tip pompanın çark ve salyangozunun ıslak yüzeylerini poliüretan boya ile kaplayarak pompa hidrolik veriminde %2,6 kadar bir artış sağlamışlardır. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü de önemli rol oynamakla beraber sadece çarkı floropolimer esaslı malzeme ile kaplayarak verimde %5,3 kadar bir artış elde edilmiştir. Pompa salyangozunun ıslak yüzeyleri de kaplandığı durumda verim artışının %10 kadar olacağı öngörülmektedir. Bu da gösteriyor ki polimer kaplamalara kıyasla floropolimer malzemelerin pompa performansını iyileştirme potansiyeli daha yüksektir. Öte yandan polimer malzemelerin pompalarda dayanımı ve kullanım ömrü tartışmalıdır.

Enerji verimliliği sağlaması açısından pompaların en iyi verim noktasında çalışacak şekilde seçilmesi ve çalıştırılması önem arz etmektedir. Bu noktada, hidrofobik çarka sahip pompaların en iyi verim noktasında çalıştıklarında hidrofobikliğin sağladığı verim artışından en fazla yararlanılacağı belirlenmiştir. En iyi verim noktasından sıfır debi noktasına doğru yaklaştıkça, yani düşük debilerde hidrofobik yüzeylerin sağladığı verim artışından dikkate değer ölçüde istifade edilemeyeceği görülmektedir.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

g	: yerçekimi ivmesi, m/s^2
EVN	: En iyi verim noktası
FEP	: floroidetilen propilen
H	: pompa manometrik basıncı, mSS
Q	: hacimsel debi, m^3/s
N	: devir hızı, rpm
N_{SQ}	: özgül hız, boyutsuz, $N_{SQ} = N \sqrt{Q} / (gH)^{3/4}$
P	: statik basınç, Pa
P_e	: elektrik gücü, W
P_h	: hidrolik güç, W
P_m	: mekanik güç, W
ΔP	: pompa basıncı, Pa
PFA	: perfloro alkoksi

PTFE : politetra florasetilen

SS : su sütunu

ρ : yoğunluk, kg/m^3

V : voltaj, V

I : amper, A

η : pompa genel verimi, %

η_h : pompa hidrolik verimi, %

η_e : elektrik motoru verimi, %

θ : temas açısı, $^\circ$

α : faz açısı, $^\circ$

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada boyutsuz özgül hızı yaklaşık 10 olan santrifüj tip bir pompanın hidrofobik çark ıslak yüzeylerinin pompa kapasitesine ve verimine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. PTFE, FEP ve PFA malzemeler ile çark ıslak yüzeylerine sırasıyla 95° , 105° ve 110° temas açısı ölçüsünde hidrofobiklik kazandırılmıştır. FEP, PFA ve PTFE malzemeler ile kaplanan hidrofobik çarklara sahip aynı tip ve boyutlardaki pompaların özgül hızları ise sırasıyla 8,97-9,05 ve 9,07'dir. Genel olarak, yaklaşık 95° - 110° aralığında temas açısına sahip hidrofobik çarkların pompanın özgül hızını yaklaşık %10 kadar azalttığı, pompa debi kapasitesini yaklaşık %6, tüm çalışma aralığı boyunca basıncını ise %13 oranında artırdığı belirlenmiştir. Buradan hidrofobik çarkın aynı devirde pompa basınç ve debi kapasitesini genel olarak %10 kadar artırdığı sonucuna varılmıştır. Pompa hidrolik veriminin ise debi arttıkça daha fazla oranda arttığı belirlenmiştir. PTFE, FEP ve PFA hidrofobik yüzeylerin, kaplamasız çarka kıyasla en iyi verim değerlerindeki artış sırasıyla %4, %5 ve %5,3 olarak belirlenmiştir. Test edilenler arasında en yüksek temas açısına sahip PFA hidrofobik çarkın pompa verimini en fazla artırdığı görülmektedir.

Enerji verimliliği sağlaması açısından pompaların en iyi verim noktasında çalışacak şekilde seçilmesi ve çalıştırılması önem arz etmektedir. Bu noktada, hidrofobik çarka sahip pompaların en iyi verim noktasında veya yakın

noktalarda çalıştıklarında hidrofobikliğin sağladığı verim artışından en fazla yararlanılacağı görülmektedir. En iyi verim noktasından sıfır debi noktasına doğru yaklaşan bölgede çalışan, yani düşük debilerde hidrofobik yüzeylerin sağladığı verim artışından dikkate değer ölçüde istifade edilemeyeceği görülmektedir.

Çalışmalarımız, daha yüksek hidrofobikliğe sahip yüzeyler elde etmek için kompozit polimer malzemeler sentezlenerek pompaların tüm ıslak yüzeylerinin pompa performansına etkisi yanı sıra hidrofobik kaplama malzemesinin dayanımı ve kullanım ömrü üzerine devam etmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Mevcut olanaklarını karşılıksız olarak kullanma imkânı tanıyan DOMAK Pompa ve Mak. San. A.Ş. (<http://www.domak.com.tr>) yönetim ve teknik personeline destek ve katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems, Europump and Hydraulic Institute, 2000.
2. Perez J., Chiva S., Segala W., Morales R., Negro C., Julia E. and Hernandez L., Performance analysis of flow in a impellerdiffuser centrifugal pumps using CFD: Simulation and experimental data comparisons, European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal, 1-18, 2010.
3. Golcu M., Pancar Y. and Sekmen Y., Energy saving in a deep well pump with splitter blade, Energy Conversion Management, 47 (5), 638–651, 2006.
4. Pochyly F., Fialová S., Kozubková M., Zavadil L., Study of the adhesive coefficient effect on the hydraulic losses and cavitation, International Journal of Fluid Machinery and Systems, 3 (4), 386-395, 2010.
5. Yuan X. D., Yang X. J., A study on friction and wear properties of PTFE coatings under vacuum conditions, Wear, 269 (3-4), 291–297, 2010.
6. Zhang P., Lv F.Y., A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications, Energy, 82, 1068-1087, 2015.
7. Ou J., Rothstein J. P., Direct velocity measurements of the flow past drag reducing ultra hydrophobic surfaces, Physics of Fluids, 17 (10), 10.1063/1.2109867, 2005.
8. Choi C. H., Ulmanella U., Kim J., Ho C. M., Kim C. J., Effective slip and friction reduction in nanogated super hydrophobic microchannels, Physics of Fluids, 18 (8), 10.1063/1.2337669, 2006.
9. Daniello R.J., Waterhouse N.E., Rothstein J P., Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces, Physics of Fluids, 21 (8), 10.1063/1.3207885, 2009.
10. Park H., Sun G., Kim C. J., Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface grating parameters, Journal of Fluid Mechanics, 747, 722-734, 2014.
11. Truesdell R., Mammoli A., Vorobieff P., van Swol F., Brinker C. J., Drag reduction on a patterned superhydrophobic surface, Physical Review Letters, 97 (4), 044504, 2006.
12. Moaven K., Rad M., Taeibi-Rahni M., Experimental investigation of viscous drag reduction of super hydrophobic nano-coating in laminar and turbulent flows, Experimental Thermal and Fluid Science, 51, 239-243, 2013.
13. Volkov A. V., Parygin A. G., Lukin M. V., Ryzhenkov A. V., Khovanov G. P., Naumov A. V., Soukal J., Pochyly F., Fialova S., Analysis of the effect of hydrophobic properties of surfaces in the flow part of centrifugal pumps on their operational performance, Thermal Engineering, 62 (11), 817–824, 2015.
14. Volkov A. V., Parygin A. G., Naumov A. V., Vikhlyantsev A. A., Soukal J., Sedlár M., Komárek M., Influence of hydrophibization of impellers of centrifugal pumps on their operating characteristics, thermal engineering, 63 (12), 841–847, 2016.
15. Kocaaslan O., Ozgoren M., Aksoy M. H. and Babayigit O., Experimental and numerical investigation of coating effect on pump impeller and volute, Journal of Applied Fluid Mechanics, 9 (5), 2475-2487, 2016.
16. Holman J. P., Gajda W. J., Experimental methods for engineers, McGraw-Hill, 5th Edition, 1989.



Treatment of sunflower oil industry wastewater by coagulation-flocculation and electro-Fenton methods

Baran Özyurt¹, Şule Camcıoğlu*¹, Toprak Karatokuş¹, Ceren Yüksek¹, Hale Hapoğlu¹
Ankara University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Tandoğan, Ankara, 06100, Turkey

Highlights:

- Application of electro-Fenton system to vegetable oil industry wastewater
- Determination of optimal operating conditions
- Obtaining water of dischargeable quality with treatment by means of sequential coagulation-flocculation-electro-Fenton method

Keywords:

- Sunflower oil industry wastewater
- Coagulation-flocculation
- Electro-Fenton
- Graphite electrode

Article Info:

Research Article
Received: 15.04.2019
Accepted: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.553847

Acknowledgement:

This work was supported by Ankara University Scientific Research Projects Coordination Unit under the project number 16B0443001.

Correspondence:

Author: Şule Camcıoğlu
e-mail: camcioglu@eng.ankara.edu.tr
phone: +90 312 203 3465

Graphical/Tabular Abstract

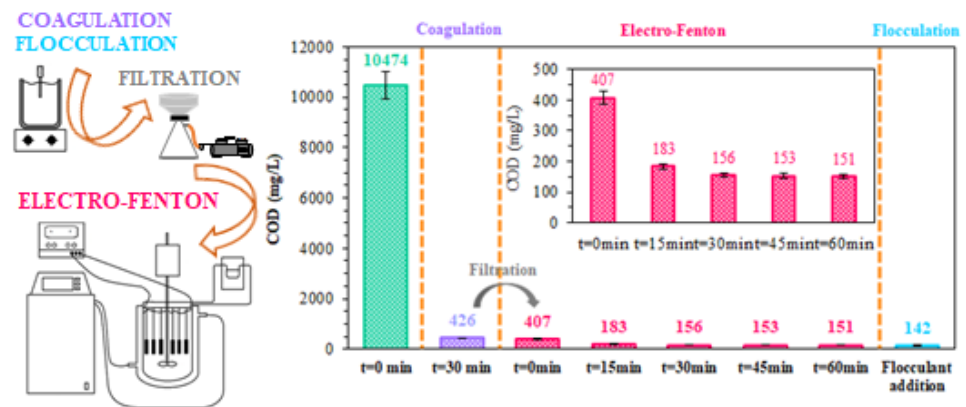


Figure A. Sequential operation of coagulation-flocculation and electro-Fenton processes

Purpose: In this work, coagulant concentration, flocculant concentration and pH effects on removal efficiency of coagulation-flocculation method and effects of current intensity, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ concentration, H_2O_2 concentration and pH on energy consumption and removal efficiency of electro-Fenton method and their sequential operation was investigated for the treatment of sunflower oil industry wastewater.

Theory and Methods: In order to determine optimum coagulant concentration, flocculant concentration and pH, coagulation-flocculation studies were carried out under 4, 10, 16 g/L as the concentrations of PACl and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ coagulants, 0.06, 0.18, 0.3 g/L as the concentrations of anionic commercial polyelectrolyte, 4, 6, 8 as pH values, respectively. Electro-Fenton studies were carried out under 1, 2.5, 4 A current intensity, 4.5, 9, 18 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ concentration, 117, 293, 469 mM H_2O_2 concentration, and 3, 5.5, 8 pH conditions to determine optimal values of the operational parameters. Sequential operation was performed with following steps; addition of coagulant to wastewater at optimum concentration, adjustment of pH to its optimum value, filtration, filtrate transfer to the electro-Fenton reactor, optimum amount of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and 3 ml saturated NaCl addition, adjustment of pH to its optimum value, addition of optimum amount of H_2O_2 , setting optimum current intensity. After treatment, optimum amount of flocculant was added to the reactor and the final pH was adjusted to 8. COD analyses were performed in accordance with Standard Method SM 5220 D and energy consumption per m^3 of wastewater was calculated.

Results: Optimum parameters were determined as 10 g/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, 0.06 g/L flocculant concentration, pH 6 for coagulation-flocculation method and 97% COD removal was achieved. Optimum operational conditions for electro-Fenton method were obtained as 1 A, 9 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 469 mM H_2O_2 , 21.73 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ molar ratio and pH 3. Treatment under optimum conditions revealed 99% COD removal and 2.37 kWh/ m^3 energy consumption for electro-Fenton method. Sequential coagulation-flocculation-electro-Fenton method under optimum conditions resulted in 98% COD removal and 0.48 kWh/ m^3 energy consumption at 15 min operation.

Conclusion: Results show that sunflower oil industry wastewater treatment by means of sequential coagulation-flocculation and electro-Fenton processes yielded higher COD removal and lower power consumption in comparison with previously published studies reported in the literature



Ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının koagülasyon-flokülasyon ve elektro-Fenton yöntemleriyle arıtılması

Baran Özyurt^{ID}, Şule Camcıoğlu*^{ID}, Toprak Karatokuş^{ID}, Ceren Yüksek^{ID}, Hale Hapoğlu^{ID}
Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Tandoğan, Ankara, 06100, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Elektro-Fenton sisteminin bitkisel yağ endüstrisi atık sularına uygulanması
- En uygun işletme koşullarının belirlenmesi
- Ardışık koagülasyon-flokülasyon-elektro-Fenton yöntemi ile deşarj edilebilir kalitede su eldesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 15.04.2019
Kabul: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.553847

Anahtar Kelimeler:

Ayçiçek yağı endüstrisi atık suyu,
koagülasyon-flokülasyon,
elektro-Fenton,
grafit elektrot

ÖZET

Bitkisel yağların üretimi sırasında oluşan yüksek miktarda organik kirlilik içeren endüstriyel atık sular, alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce arıtılmalıdır. Yapılan çalışmada koagülasyon-flokülasyon ve elektro-Fenton yöntemleri ve iki yöntemin ardışık işletimi ile ayçiçek yağı endüstrisi atık suyunun arıtımı gerçekleştirilmiştir. Koagülasyon-flokülasyon yöntemiyle arıtımda en uygun koagülant türü ve derişimi, flokülant derişimi ve pH'ın belirlenmesi amacıyla PACl ve Al₂(SO₄)₃.18H₂O koagülantları kullanılarak 4, 10, 16 g/L değerlerinde, flokülant olarak anyonik ticari polielektrolit kullanılarak 0,06, 0,18 ve 0,3 g/L değerlerinde ve pH 4, 6, 8 koşullarında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en uygun değerlerde (10 g/L Al₂(SO₄)₃.18H₂O, 0,06 g/L flokülant, pH 6) yapılan çalışmada %97 kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimine ulaşılmıştır. Elektro-Fenton yöntemi ile yapılan arıtım çalışmalarında 1, 2,5, 4 A akım şiddeti, 4,5, 9, 18 g/L FeSO₄.7H₂O derişimi, 32,71, 81,77, 130,84 mM H₂O₂ derişimi, 3, 5,5, 8 pH değerleri çalışılmış ve en uygun işletim koşulları 1 A akım şiddeti, 9 g/L FeSO₄.7H₂O, 130,84 mM H₂O₂, 6,06 H₂O₂/Fe²⁺ mol oranı ve pH 3 olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda yapılan çalışmada %99 KOİ giderimi ve 2,37 kWh/m³ enerji tüketimi elde edilmiştir. Belirlenen en uygun işletim koşullarında ardışık koagülasyon-flokülasyon-elektro-Fenton yöntemi ile yapılan arıtımda ise 15 min sonunda %98 KOİ giderimi ve 0,48 kWh/m³ enerji tüketimi değerlerine ulaşılmış olup arıtım sonundaki KOİ değeri (183 mg/L) deşarj sınırlarının altında olduğundan deşarj edilebilir kalitede su eldesi sağlanmıştır.

Treatment of sunflower oil industry wastewater by coagulation-flocculation and electro-Fenton methods

H I G H L I G H T S

- Application of electro-Fenton system to vegetable oil industry wastewater
- Determination of optimal operating conditions
- Obtaining water of dischargeable quality with treatment by means of sequential coagulation-flocculation-electro-Fenton method

Article Info

Research Article
Received: 15.04.2019
Accepted: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.553847

Keywords:

Sunflower oil industry
wastewater,
coagulation-flocculation,
electro-Fenton,
graphite electrode

ABSTRACT

High levels of organic pollutant containing industrial wastewaters which are generated during the production of vegetable oils must be treated before discharge to the receiving environments. In this work, treatment of sunflower oil industry wastewater was performed via coagulation-flocculation, electro-Fenton and sequential operation of these two methods. To determine optimum coagulant concentration, flocculant concentration and pH, coagulation-flocculation studies were carried out under 4, 10, 16 g/L PACl and Al₂(SO₄)₃.18H₂O coagulant concentrations, 0.06, 0.18, 0.3 g/L anionic commercial polyelectrolyte concentrations and 4, 6, 8 pH values, respectively. Results showed a COD removal of 97% under optimum conditions of 10 g/L Al₂(SO₄)₃.18H₂O, 0.06 g/L flocculant concentration and pH 6. Electro-Fenton studies were performed under 1, 2.5, 4 A current intensity, 4.5, 9, 18 g/L FeSO₄.7H₂O concentration, 32.71, 81.77, 130.84 mM H₂O₂ concentration, and 3, 5.5, 8 pH conditions. Optimum operating conditions for electro-Fenton method were obtained as 1 A, 9 g/L FeSO₄.7H₂O, 130.84 mM H₂O₂, 6.06 H₂O₂/Fe²⁺ molar ratio and pH 3. Treatment under optimum conditions revealed 99% COD removal and 2.37 kWh/m³ energy consumption for electro-Fenton method. Sequential coagulation-flocculation-electro-Fenton method under optimum conditions resulted in 98% COD removal and 0.48 kWh/m³ energy consumption at 15 min operation, thus the treated water is dischargeable since COD value (183 mg/L) is below discharge limits.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: bozyurt@ankara.edu.tr, camcioglu@eng.ankara.edu.tr, toprrakkaratokus@kabsan.com.tr, cerennyuksekk@gmail.com, hapoglu@eng.ankara.edu.tr / Tel: +90 312 203 3465

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda sanayileşme ve kentleşmenin hızla gelişmesiyle, petrol rafinasyonu, çelik üretimi, gıda, tekstil ve deri sanayi gibi çeşitli endüstri kollarında yüksek miktarda yağlı atık su açığa çıkmaktadır [1, 2]. Endüstri dallarına ve yapılan üretime bağlı olarak kirlilik parametreleri değişiklik göstermekte olup farklı karakterde atık sular oluşmaktadır [3]. Bu endüstri kollarından biri olan bitkisel yağ endüstrisinde soya fasulyesi, yer fıstığı, ayçiçeği, susam gibi tohumlardan rafine bitkisel yağlar elde etmek için yağlı tohumlara ön işlem uygulanması, yağların üretimi, rafine edilmesi ve modifikasyonu gibi birçok teknolojik süreç gerçekleştirilmektedir [4, 5]. Bitkisel yağ üretiminde oluşan atık sular, genellikle fosfatidler açısından zengin yağlı tohumlara uygulanan mülaj giderme, serbest yağ asitlerinin bazlarla nötralizasyonu şeklinde uygulanan asit giderme ve koku giderme adımlarında oluşmaktadır [4]. Kazanların boşaltılması ve ağartma toprağının yağdan arındırılmasıyla oluşan yıkama suyu da atıklara katkı yapmaktadır [6]. Söz konusu atık sularla ilişkilendirilen kirleticiler yağlar, çözünmüş organik bileşenler, proses kimyasalları, katılar, bakteriler, çözünmüş mineraller ve tuzluluk şeklinde sıralanmaktadır [7]. Sularda bulunabilecek her türlü maddenin derişimi belirli bir değerin üzerine çıktığı zaman sağlık için zararlıdır [8]. Bu atık sular arıtılmadan alıcı ortamlara verildiğinde yüzey ve yeraltı sularını kirleterek su ekosisteminde yaşayan canlıları ve insan sağlığını tehlikeye sokmakta [9], [10], bunun yanı sıra su yüzeyinden oksijen aktarımının azalmasına bağlı olarak suda yaşayan canlıların ölümü [11], toprak yapısının bozulması ve atık su tasfiye tesislerinde pompa ve boruların tıkanması gibi olumsuz etkilere neden olmaktadır [12]. Türkiye’de 2016 yılında yerli tohumdan 786000 ton, ithal tohumdan 620000 ton olmak üzere toplamda 1406000 ton bitkisel yağ üretimi gerçekleştirilmiştir [13]. Yağlı tohum işleme tesislerinde yüksek miktarda üretime bağlı olarak oluşan büyük hacimlerdeki atık sular alıcı ortamlar ve su kaynakları için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle söz konusu atık suların yüksek KOİ ve çözünmüş katı madde içerikleri ile oldukça değişken pH değerleri nedeniyle alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce arıtılmaları zorunludur [14, 15].

Literatürde bitkisel yağ üretimi atık sularının adsorpsiyon [16], ters ozmoz [17], membran filtrasyonu [18], koagülasyon [6], sedimentasyon [7], siklon ayırma [7], kimyasal oksidasyon [7] ve anaerobik [19] yöntemlerle arıtımına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Siklon ayırma yönteminde geniş arıtma kapasitesi, küçük sistem hacmi, işletme kolaylığı ve kurulum avantajları olmasına rağmen yöntemde güçlü merkezkaç kuvveti oluşturmak için yüksek enerji gereksinimi, ince yağ tanecikleri için düşük ayırma verimi ve yüksek bakım maliyetleri dezavantajlar olarak bilinmektedir. Adsorpsiyon yönteminde basit işletme özelliği, iyi giderim verimi ve düşük işletme maliyeti olumlu özellikler olarak gözüke de ince yağ tanecikleri için düşük ayırma verimi, yağ sorbentlerinin maliyetinin yüksek olması ve yüksek yağ derişiminde verimin azalması olumsuz yönler

olarak sıralanmaktadır. Membran filtrasyonu yönteminde yağ giderim veriminin iyi olması ve kimyasal eklemesi olmamasından dolayı yağlı çamur oluşmamasına karşın ön işleme gereksinim olması ve tıkanma sorunundan dolayı membran performansının düşmesi yöntem için dezavantaj olarak gözükmektedir. Atık sularda dağınık halde bulunan parçacıklar mekanik yöntemlerle kolaylıkla uzaklaştırılırken koloidal parçacıklar giderilememektedir [20]. Kimyasal oksidasyon yöntemi ise yağ giderim veriminin iyi olması, kirleticilerin hızlı tahribatı ve kolay işletim özellikleri ile ön plana çıkmasına rağmen yükseltgen madde maliyetinin yüksek olması, istenmeyen yan ürünler oluşması ve yükseltgenlerin uygulanmasıyla ilgili güvenlik endişeleri dezavantajlarına sahiptir [7]. Biyolojik arıtım proseslerinin kullanılabilmesi için biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ)’nin KOİ’ye oranı 0,6’dan büyük olmalıdır [4]. Bununla birlikte, bitkisel yağ endüstrisinden kaynaklanan atık suların BOİ/KOİ oranı genellikle 0,2 civarındadır ve bu biyolojik olarak parçalanma için yararlı olan mikro organizmaların yok edilmesine neden olabilir [17]. Özetle, bu yöntemler yüksek maliyetlidir ve genellikle bir ön arıtım gerektirmektedir. Bu nedenlerden dolayı endüstriyel anlamda kolay kurulum [21] ve daha az kalma süresi gerektiren, deri tabaklama, tekstil, gıda, ilaç, petrol rafinasyonu, kağıt geri kazanım, katı atık sızıntı suyu gibi yüksek kirlilik yükü içeren atık suların arıtımında, çözünmüş, askıda ve koloidal kirleticilerin gideriminde verimliliğini kanıtlamış [22] fiziko-kimyasal yöntemler öne çıkmaktadır [23]. Bitkisel yağ endüstrisi atık sularının arıtımında kullanılan fiziko-kimyasal yöntemler hem tek başına hem de mekanik, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle birlikte uygulanmaktadır. Söz konusu yöntemde askıda katı, koloidal maddeler ve yağlı parçacıklar kararsız hale getirilmekte ve böylece kümelenmeleri sağlanmaktadır [24]. Daha büyük floklar oluşturmak için kümelenmeleri nedeniyle, flokların yoğunluğu suyun yoğunluğundan fazla olmakta ve böylelikle floklar çökerek giderilmektedir [25]. Bu tür kirleticileri gidermek için koagülasyon-flokülasyon yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır [20]. Yüksek giderim verimlerine ulaşılabilen bu yöntemde kimyasal maliyetleri ve ikincil kirlilik olarak oluşan çamurun bertarafındaki zorluklar dezavantaj olarak görülmektedir [7, 26].

Tepkime süresince üretilen reaktif yükseltgen türlerle organik kimyasalları parçalayan elektrokimyasal ileri oksidasyon yöntemleri, bitkisel yağ üretim atık sularının arıtımında uygulanan yöntemlerdeki kısıtlamaları yenmek için umut verici bir yaklaşım olarak görülmektedir [26, 27]. Literatürde çeşitli bitkisel yağ atık sularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtımı üzerine çalışmalar mevcuttur [28, 29]. Elektrokimyasal bir yöntem olan elektro-Fenton prosesi, geleneksel Fenton yöntemi ile elektrokimyasal oksidasyonu birleştiren bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Elektrik akımı Fenton reaktifinin olduğu yerde üretilmesini sağlamakta, bu sayede kullanılan H₂O₂ ve demir tuzlarının (Fe²⁺ ve Fe³⁺) miktarında önemli ölçüde azalma sağlanmaktadır [30, 31]. Elektro-Fenton yönteminde iki farklı düzenleme söz konusudur. İlk düzenlemede Fenton reaktifleri tepkime

ortamına dışardan eklenmekte ve yüksek katalitik aktiviteye sahip inert elektrotlar anot materyali olarak kullanılmakta iken ikinci düzenlemede dışarıdan sadece H₂O₂ ilavesi yapılmakta ve Fe²⁺ iyonları kurban demir anotlar aracılığıyla sağlanmaktadır. Elektro-Fenton yönteminde temiz enerji kaynağı olarak elektrik kullanıldığından ikincil kirlilik oluşmamakta, yöntem ayrıca zararlı reaktifler barındırmadığından atık su arıtımında çevre dostu olarak düşünülmektedir [32]. Tüm bu özelliklerinin yanında iyi tasarlanmış elektro-Fenton arıtımı ile elektrokimyasal oksidasyon, elektrokoagülasyon, elektroflotasyon gibi birçok işlev gerçekleştirilebilmekte olup bu prosesler karmaşık kirleticilerin gideriminde sinerjik olarak hareket etmektedir [33]. Söz konusu yöntemin dezavantajları uzun arıtma süresi ve fazla miktarda askıda katı madde bulunması durumunda yüksek akım yoğunluğu gereksinimleri olarak belirtilmektedir [34].

Bu çalışmada ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının koagülasyon-flokülasyon ve düşük maliyetli grafit-grafit elektro-Fenton yöntemleri ile arıtımında en uygun işletme koşullarının belirlenmesinin ardından bu yöntemlerin ardışık olarak uygulanmasına dayanan yeni bir yaklaşım ile mevcut arıtım yöntemlerine kıyasla daha hızlı sonuç veren ve yüksek kirletici giderimi ile düşük arıtım maliyeti avantajlarına sahip endüstriyel olarak uygulanabilir bir atık su arıtım yönteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca çalışmada Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde (SKKY) sıvı yağ rafinasyonu atık suları için belirtilen deşarj standartlarından daha düşük değerler elde edilmesi amaçlanmıştır.

2. KOAGÜLASYON- FLOKÜLASYON YÖNTEMİ (COAGULATION-FLOCCULATION METHOD)

Koagülasyon-flokülasyon yöntemi, çoğunlukla katyonik inorganik metal tuzlarının koagülant, uzun zincirli iyonik olmayan veya anyonik polimerlerin de flokülant olarak kullanıldığı iki aşamalı bir proses olarak tanımlanan geleneksel atık su arıtım yöntemlerindedir [35, 36]. Atık sulardaki askıda katı maddelerin çoğunun sulu ortamda negatif yük taşıdığı bilinmektedir. İnorganik koagülant ilavesinden sonra metal tuzları, negatif yüklü kolloidal partiküller tarafından adsorplanan katyonik türler oluşturmak için izoelektrik noktada atık su içinde hızla hidroliz olmaktadır [35]. Koagülasyon yönteminin etki şekli, yük nötralizasyonu olarak bilinen negatif yüklü kolloidlerin yüklerinin katyonik hidroliz ürünleri tarafından nötrlenmesi ve çökelti oluşumu olarak bilinen safsızlıkların amorf hidroksit çökeleğinde birleşmesi olmak üzere iki farklı mekanizma ile açıklanmaktadır [37, 38]. Bu mekanizmaların önemi koagülantın çözünürlük sınırlarına ve dolayısıyla pH ve koagülant miktarı gibi faktörlere bağlı olmaktadır [36]. Çöken metal hidroksitlerinin yüzey yük karakteristikleri koagülasyonda büyük öneme sahiptir ve görünür yüzey yükünün sıfır olduğu bir izoelektrik nokta göstermektedirler. İzoelektrik noktanın altındaki pH değerlerinde çökelti pozitif yüklü iken yüksek pH değerlerinde negatif yüklüdür. pH ile birlikte değişen yükler koagülasyon prosesini önemli ölçüde etkilemektedir [37]. Yük nötralizasyonu pozitif yüklü koagülantlar ile negatif yüklü kolloidler arasında çökeltme ile sonuçlanan bir kimyasal tepkime dolayısıyla

gerçekleşmektedir. Koagülasyonun yük nötralizasyonu ile gerçekleşmesi için dar bir pH aralığı (4-5,5) uygundur. Çökelti oluşum mekanizması ise koşulların amorf katı faz Al(OH)_{3(k)}'in hızlı bir şekilde oluşumuna elverişli olduğu pH 6-8 aralığında gerçekleşmektedir [38].

Koagülasyon süreci, düşük sıcaklıkta meydana geldiğinde küçük floklarla sonuçlanabildiğinden veya fiziksel kuvvetlere maruz kaldığında dağılan, kırılabilir floklar üretilmediğinden her zaman başarılı sonuçlar vermemektedir. Sadece bu sorunların üstesinden gelmek değil aynı zamanda arıtılmış atık suyun kalitesini arttırmak ve oluşan flokların hızlı çökmesini sağlamak gerekmektedir. Bu nedenle, çökeltme, yüzdürme ve filtreleme adımlarında giderimlerini kolaylaştırmak amacıyla daha büyük ve daha yoğun floklar oluşturmak için koagülantlar tarafından oluşturulan ve yavaş çökme özelliğine sahip flokların bir araya getirilmesi ve kümelenmesi için anyonik/iyonik olmayan polimerik flokülantlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Flokülant kullanımı sadece oluşturulan flokların yoğunluğunu ve dayanıklılığını arttırmakla kalmaz, aynı zamanda koagülant tüketimini azaltır ve çalışmanın güvenilirliği ile arıtma tesisinin verimini de artırır [35].

3. ELEKTRO-FENTON YÖNTEMİ (ELECTRO-FENTON METHOD)

Fe²⁺ iyonları anodik çözünme (Reaksiyon (R1)) ve Fe³⁺ iyonlarının katotta indirgenmesiyle oluşturulur (Reaksiyon (R2)) [39].



Fe²⁺ iyonlarının dışarıdan eklenmesi durumunda, elektro-Fenton çalışmalarında anot olarak Pt, bor katkılı elmas ve grafit gibi elektrotlar kullanılmaktadır. Bu materyaller suyun yükseltgenmesini sağlamak ve anot yüzeyinde organik kirlilik gideriminde yardımcı olan hidroksil radikalleri oluşturmaktadır (Reaksiyon (R3)) [40]. Ayrıca anot yüzeyinde Reaksiyon (R4)'te verilen ve akım veriminin düşmesine neden olan oksijen oluşum reaksiyonu gerçekleşmektedir.

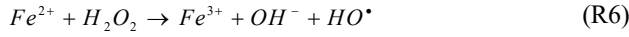


Oksijenin iki veya dört elektron sistemi ile elektrokimyasal indirgenmesi katotta gerçekleşmektedir [41]. Asidik çözeltilerde katot yüzeyinde Reaksiyon (R5)'e göre gerçekleşen oksijenin iki elektron indirgenme süreci ile H₂O₂ üretilmektedir. Bu şekilde H₂O₂ oluşumu çoğunlukla katot materyaline bağlıdır [40].



Oksijenin sudaki çözünürlüğünün az olması ve asidik koşullarda akım veriminin düşük olmasından dolayı Reaksiyon (R5) ile verilen H₂O₂ üretimi yavaştır [39]. Daha asidik koşullarda (pH ≤ 2), katot yüzeyinde hidrojen

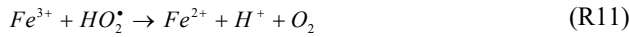
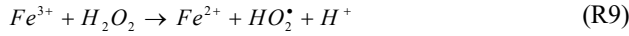
oluşumu gerçekleşmekte ve bu durum katot yüzeyinde oksijenin indirgenmesi (Reaksiyon (R5)) ve Fe^{2+} iyonlarının rejenerasyonu (Reaksiyon (R2)) için mevcut olan aktif bölgelerin önemli bir şekilde azalmasına neden olmaktadır [33]. Ortamda tepkime stokiyometrisi gereği Fe^{2+} oluşumu asidik pH'larda gerçekleşebilmekte ve böylece $Fe(OH)_3$ çamurunun oluşumunun önüne geçilmektedir [39]. Hidroksil radikali üretimi, çözelti yığımında elektrokimyasal Fenton tepkimesi ile gerçekleşmektedir (Reaksiyon (R6)) [42].



Hidroksil radikali oksitleme yeteneği en yüksek radikaldır ve organik maddeleri kolaylıkla parçalayabilir [43, 44]. Tepkime ortamında hidroksil radikali üretimi yüksek tepkimeye girebilirlik ve kuvvetli seçici olmayan oksidasyon sağlamaktadır [33]. Fenton reaksiyonu ile organik kirliliklerin giderim mekanizması Reaksiyon (R6), (R7) ve (R8)'de verilmiştir. Burada RH organik kirliticileri simgelemektedir [32].



Katalitik Fenton tepkimesi (Reaksiyon (R6)), Fe^{3+} türlerinin katotta H_2O_2 , organik radikal ara ürünler (R^*) ve/veya hidroperoksil radikali (HO_2^*) ile indirgenmesi sonucunda Fe^{2+} rejenerasyonu ile ilerlemektedir [45].



Reaksiyon (R9) ve (R11) ile verilen tepkimeler Fenton tepkimesinden (Reaksiyon (R6)) daha yavaştır [46]. Buna ek olarak Reaksiyon (R9)'da verilen tepkimede oksitleme gücü hidroksil radikaline göre daha düşük olan HO_2^* oluşumu için H_2O_2 tüketilmektedir. Bu nedenle bu tepkime Fenton tepkimesi ile rekabet eden bir tepkime olarak görülmektedir [46]. Ayrıca, aşırı miktarda H_2O_2 ve Fe^{2+} varlığında başka parazit tepkimeler de (Reaksiyon (R12) ve (R13))

oluşabilmektedir. Sonuç olarak $[H_2O_2]/[Fe^{2+}]$ oranının her durum için optimize edilmesi gerekmektedir [46].



İyi tasarlanmış bir elektro-Fenton sistemi elektrokimyasal oksidasyon, elektrokoagülasyon, elektroflotasyon ve elektro-indirgeme gibi birçok işlemi gerçekleştirebilmektedir. Genelde elektro-Fenton sisteminde çözelti pH'ı uzun süreli tepkimeyle birlikte belirgin bir şekilde artma eğilimindedir ve Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonlarının pH'a bağlı olarak $Fe(OH)_n$ yapılarına dönüştüğü elektrokoagülasyon mekanizması gelişmekte olup kirlilikler elektrostatik çekim ve/veya kompleksleşme tepkimeleri ile giderilmektedir [33, 43].

4. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

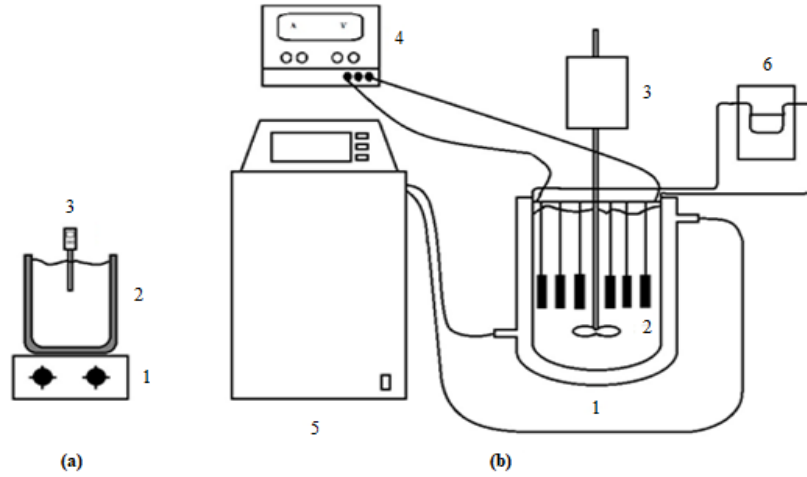
Deneysel çalışmalarda kullanılan atık su Edirne'de yer alan ve ayçiçek yağı üretimi yapan bir fabrikadan temin edilmiştir. Araştırmanın yapıldığı atık su karakteristik özelliklerinin zamanla değişmemesi, yöntemler üzerinde etkisi olan parametrelerinin etkisinin incelenmesi açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle atık su numuneleri tarafımıza ulaştıktan sonra her deney için tek seferde kullanılacak miktarlarda şişelere doldurulmuş ve 4°C'de buzdolabında muhafaza edilmiştir. Numune alımında kompozit yöntemin uygulandığı bu atık suya ait karakteristik özellikler ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde bu tip atık sular için belirtilen deşarj limitleri Tablo 1'de verilmiştir [47]. KOİ, renk ve toplam askıda katı madde analizleri sırasıyla SM 5220 D, SM 2120 C ve SM 2540 D numaralı Standart Yöntemlere uygun olacak şekilde yapılmıştır [48].

4.1. Koagülasyon-Flokülasyon Deney Yöntemi (Experimental Procedure of Coagulation-Flocculation)

Ayçiçek yağı endüstrisi atık suyunun koagülasyon-flokülasyon yöntemiyle arıtımında kullanılacak en uygun koagülant türü, derişimi, pH ve flokülant derişiminin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda koagülant olarak PACl ve $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, flokülant olarak anyonik polielektrolit (Flochem 3016) kullanılmıştır. Şekil 1a'da görülen deney sisteminde ısıtıcılı

Tablo 1. Ayçiçek yağı endüstrisi atık suyu karakteristik özellikleri ve deşarj limitleri
(Characteristics of sunflower oil industry wastewater and discharge limits)

Parametre	Değer		Deşarj Limiti
	Minimum	Maksimum	
pH	7,16	7,26	6-9
İletkenlik (mS/cm)	1,66	1,86	-
Bulanıklık (NTU)	7624	7626	-
KOİ (mg/L)	11500	11700	200
Renk (PCU)	60074	60194	-
Toplam askıda katı madde (mg/L)	6891	6909	-



Şekil 1. (a) Koagülasyon-flokülasyon deney sistemi (1. Manyetik karıştırıcı 2. Beher 3. pH metre) (b) Elektro-Fenton deney sistemi (1. Reaktör 2. Elektrotlar 3. Mekanik karıştırıcı 4. Doğru akım güç kaynağı 5. Su sirkülatörü 6. Sirkülasyon pompası) ((a) Coagulation-flocculation experimental setup (1. Magnetic stirrer 2. Beaker 3. pH meter)) (b) Electro-Fenton experimental setup (1. Reactor, 2. Electrodes 3. Mechanical stirrer, 4. Direct current power supply 5. Water circulator, 6. Circulation pump)

manyetik karıştırıcı üzerinde (MTOPS MS300HS) karıştırılan 500 ml hacimdeki atık suya koagülant eklenmiş, 1 M H₂SO₄ ve 1 M Ca(OH)₂ çözeltileri kullanılarak atık su numunesinin pH ayarlaması yapılmış ve 5 min süre ile 1200 rpm hızda karıştırılmıştır. Ardından atık su numunesine flokülant eklenmiş ve atık su 25 min süre ile 200 rpm hızda karıştırılmıştır. 30 min çöktürmenin ardından numune alınarak SM 5220 D numaralı Standart Yönteme uygun olacak şekilde KOİ analizleri yapılmıştır.

Koagülant türü ve derişiminin etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda 4 g/L, 10 g/L, 16 g/L derişimlerde çalışılmış, bu çalışmalarda flokülant derişimi 0,18 g/L ve pH değeri 6 olarak orta nokta değerlerine ayarlanmıştır. Flokülant derişiminin etkisinin incelendiği çalışmalarda 0,06 g/L, 0,18 g/L, 0,3 g/L derişimlerde çalışılmış, bu çalışmalarda koagülant derişimi en uygun değerinde ve pH 6 orta nokta değerine ayarlanmıştır. pH etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda 4, 6, 8 değerlerinde çalışılmış, bu çalışmalarda koagülant ve flokülant derişimleri en uygun değerlerine ayarlanmıştır.

4.2. Elektro-Fenton Deney Yöntemi (Experimental Procedure of Electro-Fenton)

Ayçiçek yağı endüstrisi atık suyunun elektro-Fenton yöntemiyle arıtımında uygulanacak en uygun akım şiddetinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda 1,5 L atık su numunesine ilk olarak FeSO₄.7H₂O ilave edilmiştir. Ardından atık suyun iletkenliğinde, 0,3 mS/cm artış sağlayan, 3 ml 6,11 M NaCl çözeltisi eklenerek ve atık suyun pH'ı 1 M H₂SO₄ ve 1 M Ca(OH)₂ kullanılarak ayarlanmıştır. 2 L hacme sahip ceketli yarı-kesikli cam reaktörde toplam 0,0392 m² yüzey alanına sahip 3 adet katot ve 3 adet anot olmak üzere toplam 6 adet dikdörtgen grafit elektrot ile çalışılmıştır. Reaktör içinde homojen dağılımın sağlanması için mekanik karıştırıcı (MTOPS MS3040) ve reaktör çalışma sıcaklığının 25°C'yi geçmemesi amacıyla ceketten geçen suyun sıcaklığını ayarlamak için ısıtmalı/soğutmalı su

sirkülatörü (Hoefer RCB 20-PLUS) kullanılmıştır. Akım şiddeti doğru akım güç kaynağı (Marxlow PS305D) kullanılarak ayarlanmış ve ardından atık suya %30'luk (w/w) H₂O₂ eklenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında 15 min aralıklarla numuneler alınmış, bu numunelerin pH'ı, oksidasyon adımıyla oluşan Fe³⁺ tuzlarının koagülasyon ve sedimentasyonla diğer kirleticilerin giderimini de sağlaması amacıyla 8'e ayarlanmış [49] ve SM 5220 D numaralı Standart Yönteme uygun olacak şekilde KOİ analizleri yapılmıştır. Birim KOİ giderimi başına enerji tüketimi aşağıda verilen E_{ş. 1} kullanılarak hesaplanmıştır [34].

$$\text{Güç tüketimi (kWh / kg KOİ}_g) = \frac{I \times V_m \times t \times 1000}{([\text{KOİ}]_0 - [\text{KOİ}]_t) \times V_A} \quad (1)$$

Burada I, A biriminde uygulanan akım şiddetini, V_m, V biriminde uygulanan ortalama potansiyel farkını, t, h biriminde arıtım süresini, [KOİ]₀ ve [KOİ]_t, mg/L biriminde atık suyun sırasıyla ilk ve arıtım sonundaki KOİ değerlerini, KOİ_g mg/L biriminde giderilen KOİ miktarını, V_A, L biriminde arıtılan atık su hacmini göstermektedir.

Akım şiddetinin etkisinin incelendiği çalışmalarda 1 A, 2,5 A, 4 A değerlerinde çalışılmış, bu çalışmalarda FeSO₄.7H₂O miktarı 9 g/L (32,37 mM), H₂O₂ miktarı 8,33 ml/L (81,77 mM) ve pH 5,5 olarak orta nokta değerlerine ayarlanmıştır. En uygun FeSO₄.7H₂O miktarının belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda 4,5 g/L (16,19 mM), 9 g/L (32,37 mM), 18 g/L (64,74 mM) değerlerinde çalışılmış, akım şiddeti en uygun değerinde, H₂O₂ miktarı 8,33 ml/L (81,77 mM) ve pH 5,5 olarak orta nokta değerlerinde tutulmuştur. H₂O₂ miktarının etkisinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda 3,33 ml/L (32,71 mM), 8,33 ml/L (81,77 mM), 13,33 ml/L (130,84 mM) değerlerinde çalışılmış, akım şiddeti ve FeSO₄.7H₂O miktarı en uygun değerlerine, pH 5,5 olarak orta nokta değerine ayarlanmıştır. pH etkisinin incelendiği çalışmalarda ise 3, 5,5, 8 değerlerinde çalışılmış, akım

şiddeti, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ miktarı ve H_2O_2 miktarı en uygun değerlerine ayarlanmıştır.

4.3. Ardışık Koagülasyon-Flokülasyon Elektro-Fenton

Deney Yöntemi

(Experimental Procedure of Sequential Coagulation-Flocculation Electro-Fenton)

Koagülasyon-flokülasyon yöntemi için en uygun koagülant türü ve derişimi, flokülant derişimi ve pH; elektro-Fenton yöntemi için ise en uygun akım şiddeti, FeSO_4 miktarı, H_2O_2 miktarı ve pH belirlendikten sonra bu değerlerde ardışık işletim gerçekleştirilmiştir.

2 L hacimdeki atık suya seçilen en uygun derişimde koagülant eklenmiş ve atık su numunesinin pH'ı koagülasyon-flokülasyon yöntemi için belirlenen en uygun değerine ayarlanmıştır. Önce 5 min süre ile 1200 rpm hızda, sonra 25 min süre ile 200 rpm hızda karıştırılmıştır. 30 min çöktürmenin ardından vakum filtrasyon düzeneğinde 1,2 µm gözenek çaplı bağlayıcısız cam elyaf filtre ile süzülen atık suyun 1,5 L'si elektro-Fenton sistemine aktarılmıştır. Atık suya önce belirlenen en uygun miktarda $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, ardından 3 ml 6,11 M NaCl eklenmiştir. Atık su numunesinin pH'ı elektro-Fenton yöntemi için belirlenen en uygun değerine ayarlanmış, daha sonra bulunmuş en uygun miktarda H_2O_2 ilave edilmiştir. Akım değeri en uygun değerine ayarlanarak 60 min süre ile elektro-Fenton arıtımı gerçekleştirilmiş, atık sudan 15 min aralıklarla numuneler alınarak her bir numunenin pH'ı 8'e ayarlanmıştır. Arıtım tamamlandıktan sonra reaktöre belirlenen en uygun miktarda flokülant eklenmiş, ardından 25 min süre ile 200 rpm hızda karıştırılmıştır. 30 min çöktürmenin ardından numune alınarak SM 5220 D numaralı Standart Yönteme uygun olacak şekilde KOİ analizleri yapılmıştır.

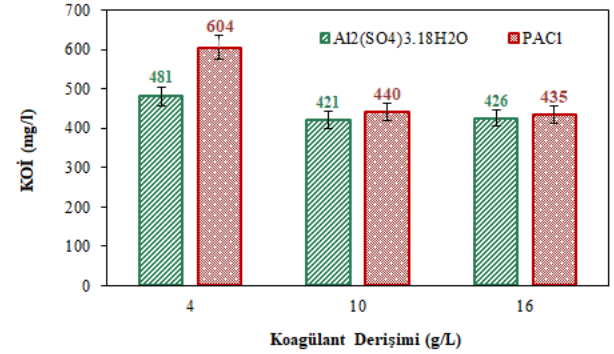
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

5.1. Koagülasyon-Flokülasyon Yönteminin En Uygun İşletme Parametrelerinin Belirlenmesi

(Determination of Optimum Operating Parameters of Coagulation-Flocculation Method)

Ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının koagülasyon-flokülasyon yöntemi ile arıtımında en uygun koagülant türü ve derişiminin belirlenmesi amacıyla PACI ve $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ koagülantları ile yapılan çalışmaların sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2, en uygun derişim değerinin belirlenmesi açısından incelendiğinde en düşük KOİ değerinin her iki koagülant için de 10 ve 16 g/L derişimde elde edildiği görülmektedir. Söz konusu iki derişimin sağlamış olduğu KOİ değerleri arasında anlamlı bir fark bulunmadığı için hem arıtım sonrasında oluşması muhtemel çamur miktarı hem de kullanılan kimyasalların maliyeti göz önünde bulundurularak 10 g/L derişim değerinde çalışmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür. 10 g/L derişim koşulunda yapılan çalışmalar kullanılacak en uygun koagülantın belirlenmesi açısından incelendiğinde ise en düşük KOİ değerinin $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ koagülantı

kullanıldığında elde edildiği ve bu sonucun Devletoglu vd. [50] tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.



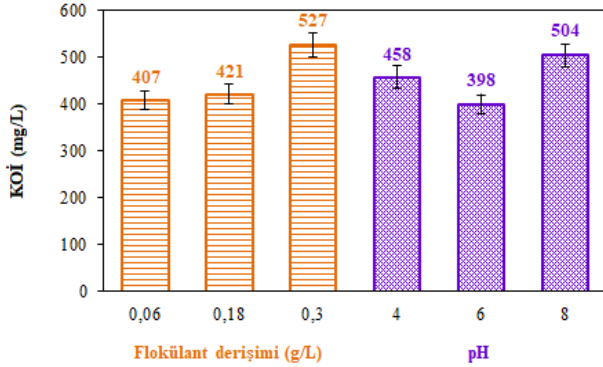
Şekil 2. PACI ve $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ derişiminin koagülasyon-flokülasyon yönteminde KOİ değerine etkisi (Flokülant derişimi= 0,18 g/L, pH= 6)

(Effects of PACI and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ concentration on COD in coagulation-flocculation method) (Flocculant concentration= 0.18 g/L, pH= 6)

Şekil 3'te ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının koagülasyon-flokülasyon yöntemi ile arıtımında en uygun flokülant derişiminin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmaların sonuçları verilmiştir. Şekil incelendiğinde flokülant derişiminin 0,06 g/L'den 0,3 g/L değerine artırılmasının KOİ değerinde artış ile sonuçlandığı görülmektedir. Flokülant yük derişimi atık su içinde mevcut olan kolloidlerin toplam yükünden daha yüksek olduğunda, kolloidal kararlılığın kararsız hale geldiği floklaştırıcının yük geri dönüşü olgusu söz konusu olmaktadır [51]. Bu durum atık su içerisinde fazla miktarda flokülant olduğunda yüklerin tersine dönmesine ve dağılmasına bağlı olarak flokların parçalandığını göstermektedir [52]. Çalışmada en düşük KOİ değeri 0,06 g/L flokülant kullanıldığında elde edildiği için bu değer en uygun flokülant derişimi olarak seçilmiştir.

Ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının koagülasyon-flokülasyon yöntemi ile arıtımında en uygun pH değerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmaların sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en düşük KOİ değerine pH 6'da ulaşılmış olup söz konusu pH değeri SKKY deşarj limit aralığında yer almaktadır. Hafif asidik ve nötral pH'ta koagülasyon ile kirletici gideriminde iyi sonuçlar alınmaktadır [53]. Bu durum çözünmüş organik maddelerin koagülasyon yöntemi ile arıtımında farklı pH'larda iki ayrı mekanizmanın gerçekleşmesi ile açıklanabilir. Düşük pH'ta anyonik organik moleküller metal kanyonları ile etkileşime girmekte ve çözünmeyen metal bileşikleri oluşturmaktadırlar. Yüksek pH değerlerinde ise organik maddeler metal hidroksitlerin floklarına adsorplanmakta ve çökmektedirler [54]. Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde 10 g/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ koagülant, 0,06 g/L flokülant ve pH 6 koşullarında koagülasyon-flokülasyon yöntemiyle elde edilen en yüksek KOİ gideriminin %97 (398 mg KOİ/L) olduğu

görülmektedir. Bu değer SKKY’de belirtilen deşarj limiti 200 mg KOİ/L değerinden yüksek olup, arıtılan su deşarj edilebilir nitelikte değildir. Koagülasyon-flokülasyon yöntemi ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının arıtımı için tek başına yeterli olmamakla birlikte, organik kirlilik yükünün önemli bir kısmını giderebilmesi nedeniyle biyolojik arıtım veya ileri oksidasyon teknikleri ile arıtım öncesinde faydalı bir ön işlem olarak değerlendirilebilmektedir.



Şekil 3. Koagülasyon-flokülasyon yönteminde flokülant derişimi ve pH’ın KOİ değerine etkisi ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ derişimi= 10 g/L)

(Effect of flocculant concentration and pH on COD in coagulation-flocculation method) ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ concentration= 10 g/L)

5.2. Elektro-Fenton Yönteminin En Uygun İşletme Parametrelerinin Belirlenmesi

(Determination of Optimum Operating Parameters of Electro-Fenton Method)

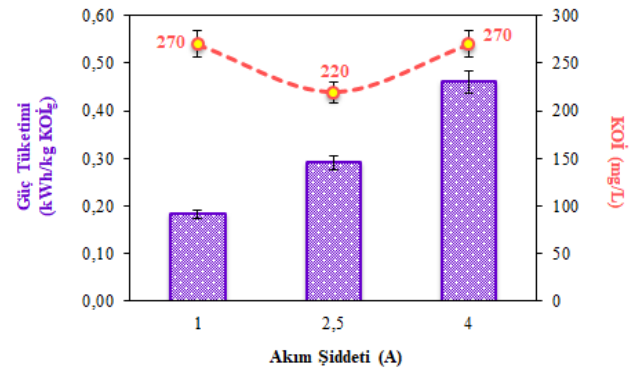
Ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının elektro-Fenton yöntemi ile arıtımında en uygun akım şiddetinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmaların sonuçları Şekil 4’te verilmiştir. Şekil 4, KOİ sonuçları dikkate alınarak değerlendirildiğinde akım şiddetinin artırmanın belirli bir değere kadar olumlu etki yarattığı, bu noktadan sonra ise KOİ değerinde artışa sebep olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar belli bir akım şiddetinin üstünde çalışılması durumunda KOİ gideriminde azalma gözlemlendiğini vurgulayan Turan vd. [55] tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur.

Akım şiddetindeki artış, Fenton’un iki reaktifinden biri olan demir iyonunun elektrojenasyonu yoluyla HO^* üretimini arttırmaktadır. Bilindiği gibi elektro-Fenton işlemine akım şiddeti ve H_2O_2 derişimi HO^* üretiminden sorumludur. 1 A ve 2,5 A akım şiddetinde çalışıldığında sırasıyla 270 mg/L ve 220 mg/L KOİ değerleri elde edilmiştir. Ancak görüldüğü gibi, 4 A akım şiddeti değerinde KOİ giderim verimi azalmıştır. Bu bulgular, akım şiddetinin en uygun değerinin üstünde çalışıldığında aşırı miktarda elektrojenere edilmiş demir iyonunun Reaksiyon (R13)’e dayanarak hidroksil radikalini harcadığını ve zararlı bir etkisi olduğunu göstermektedir [56]. Artan akım şiddetiyle katot yüzeyinde hidrojen oluşumu artmakta, ve bu durum Reaksiyon (R5) ve Reaksiyon (R2) için mevcut olan aktif bölgelerin önemli bir şekilde azalmasına neden olmaktadır. Babuponnusami ve

Muthukumar [57], artan akım şiddetiyle KOİ giderimindeki azalmayı hidroksil radikallerinin Reaksiyon (R14) uyarınca H_2O_2 ’ye dimerleşmesine ve tepkime ortamındaki H_2O_2 ’nin Reaksiyon (R15) uyarınca harcanmasına bağlamıştır.



Şekil 4 aynı zamanda akım şiddetinin güç tüketimi üzerindeki etkisini ifade eden verileri içermektedir. Akım şiddetinin 1 A, 2,5 A ve 4 A değerlerinde uygulandığı çalışmalarda güç tüketimleri sırasıyla 0,18 kWh/kg KOİ_g, 0,29 kWh/kg KOİ_g ve 0,46 kWh/kg KOİ_g olarak elde edilmiştir. Bilindiği gibi akım şiddeti arttığında uygulanan voltaj da artmakta, ısı oluşumu ve yüksek güç tüketimi gibi yan etkilere maruz kalınmaması için akım şiddetini sınırlamak gerekmektedir [58]. Bu nedenle elde edilen sonuçlar hem atık suyun arıtım sonundaki KOİ değeri hem de güç tüketimi ve arıtım maliyeti açısından değerlendirilmiş ve en uygun akım şiddeti değeri 1 A olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Elektro-Fenton yönteminde akım şiddetinin güç tüketimi ve KOİ üzerine etkisi ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$ derişimi= 9 g/L, H_2O_2 derişimi= 81,77 mM, pH= 5,5)

(Effect of current intensity on power consumption and COD in electro-Fenton method) ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$ concentration= 9 g/L, H_2O_2 concentration= 81.77 mM, pH= 5.5)

Ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının elektro-Fenton yöntemi ile arıtımında en uygun $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ derişiminin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmaların sonuçları Şekil 5’te verilmiştir. $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ derişimi 4,5 g/L (16,19 mM), 9 g/L (32,37 mM), 18 g/L (64,74 mM) iken KOİ değerleri sırasıyla 308 mg/L, 270 mg/L, 330 mg/L, güç tüketimleri ise sırasıyla 0,25 kWh/kg KOİ_g, 0,18 kWh/kg KOİ_g ve 0,23 kWh/kg KOİ_g olarak bulunmuştur.

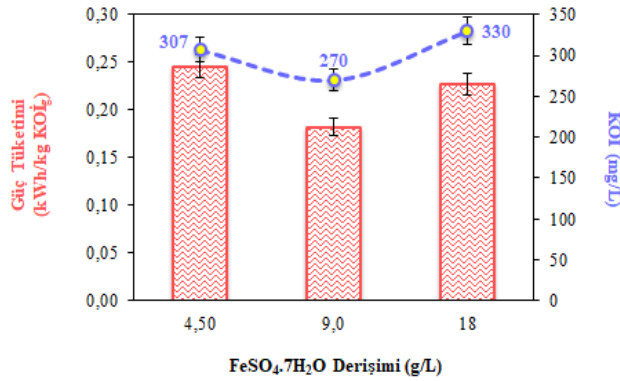
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ derişimini arttırmak belli bir değere kadar hem atık suyun arıtım sonundaki KOİ değeri hem de güç tüketimi üzerinde olumlu bir etki yaratmış, bu değer üstündeki derişimlerde KOİ ve güç tüketimi değerlerinde artış görülmüştür. Mousavi vd. [59] çalışmalarında en uygun değer üstündeki Fe^{2+} derişimlerinde elde edilen KOİ gideriminin en uygun değerde çalışıldığında elde edilen değerden daha düşük

olduğunu belirterek bu durumu Reaksiyon (R16) ve (R17)'de görüldüğü gibi H₂O₂ veya Fe²⁺ molekülü ile gerçekleşen tepkimeler sonucunda HO• radikallerinin harcanmasıyla açıklamışlardır.



FeSO₄.7H₂O derişiminin atık suyun arıtım sonundaki KOİ değeri ve birim KOİ giderimi başına güç tüketimi üzerine etkisi incelendiğinde en uygun değerin 9 g/L FeSO₄.7H₂O olduğu görülmüştür. FeSO₄.7H₂O derişiminin düşük değerlerinde Fenton tepkimesinin gerçekleşmesi için gerekli Fe²⁺ iyonu sağlanamazken, FeSO₄.7H₂O derişiminin yüksek durumda ise Reaksiyon (R13) uyarınca HO• radikalleri harcanmaktadır. Her iki durumda da KOİ giderim verimi düşük olduğundan dolayı birim KOİ giderimi başına enerji tüketiminde artış meydana gelmektedir.

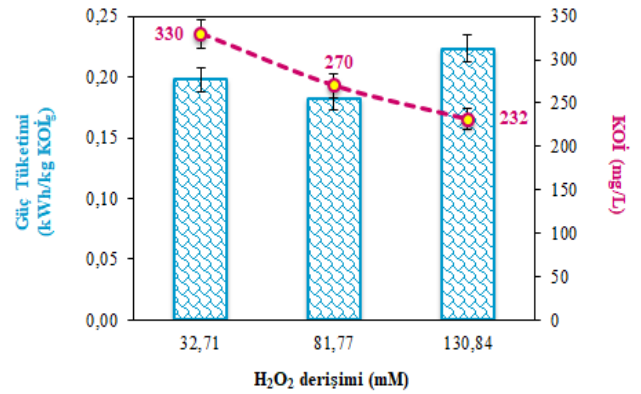
Bu sebeple Fe²⁺ molar derişimi ile H₂O₂ molar derişimi arasında uygun bir oran belirlenmesi hem kirlenici giderimi hem de enerji verimliliği açısından esastır.



Şekil 5. Elektro-Fenton yönteminde FeSO₄.7H₂O derişiminin güç tüketimi ve KOİ üzerine etkisi (Akım şiddeti= 1 A, H₂O₂ derişimi= 81,77 mM, pH= 5,5) (Effect of FeSO₄.7H₂O concentration on power consumption and COD in electro-Fenton method) (Current intensity= 1 A, H₂O₂ concentration= 81.77 mM, pH= 5.5)

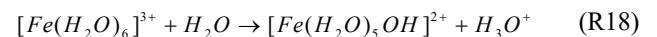
Şekil 6 ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının elektro-Fenton yöntemiyle arıtımında H₂O₂ derişiminin atık suyun arıtım sonundaki KOİ değeri ve enerji tüketimi üzerindeki etkisini göstermektedir. H₂O₂ derişimi 32,71 mM (3,33 ml/L), 81,77 mM (8,33 ml/L) ve 130,84 mM (13,33 ml/L) iken KOİ değerleri sırasıyla 330 mg/L, 270 mg/L, 232 mg/L, güç tüketimleri ise sırasıyla 0,20 kWh/kg KOİ_g, 0,18 kWh/kg KOİ_g ve 0,22 kWh/kg KOİ_g olarak elde edilmiştir. Sonuçlar atık suyun arıtım sonundaki KOİ değerinin eklenen H₂O₂ miktarına bağlı olarak azaldığını göstermiş olup Can [60] tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. KOİ giderimindeki bu artış organik bileşiklerin parçalanmasını sağlayan hidroksil radikalının daha fazla üretilmesi ile doğrudan ilişkilidir [56]. H₂O₂ derişiminin güç

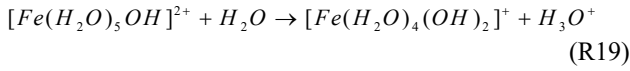
tüketimi üzerindeki etkilerine ait sonuçlar incelendiğinde derişimin 32,71 mM değerinden 81,77 mM değerine çıkarılması ile atık suyun arıtım sonundaki KOİ değeri ve güç tüketiminin azaldığı görülmüştür. H₂O₂ derişiminin 81,77 mM'dan 130,84 mM'a çıkarılması ise atık suyun iletkenliğinde meydana gelen azalma sebebiyle sabit akım koşulunu sağlamak için gerekli potansiyel farkının yükselmesine, dolayısıyla akım veriminin azalmasına ve güç tüketiminin artmasına sebep olmuş, bu durum H₂O₂ derişiminin atık suyun arıtım sonundaki KOİ değeri üzerindeki etkisinin önüne geçerek güç tüketiminin daha baskın özellik göstermesi ile sonuçlanmıştır. KOİ değerleri ve güç tüketimleri bir arada değerlendirildiğinde SKKY'de belirtilen deşarj limitine daha yakın bir sonuç elde edildiğinden ve güç tüketimi değerleri arasındaki farkın çok fazla olmaması nedeniyle en uygun H₂O₂ derişiminin 130,84 mM olmasına karar verilmiştir.



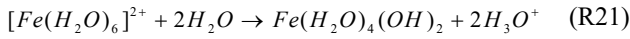
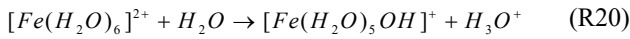
Şekil 6. Elektro-Fenton yönteminde H₂O₂ derişiminin güç tüketimi ve KOİ üzerine etkisi (Akım şiddeti= 1 A, FeSO₄.7H₂O derişimi= 9 g/L, pH= 5,5) (Effect of H₂O₂ concentration on power consumption and COD in electro-Fenton method) (Current intensity= 1 A, FeSO₄.7H₂O concentration= 9 g/L, pH= 5.5)

Ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının elektro-Fenton yöntemiyle arıtımında en uygun pH değerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmaların sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. pH 3, 5,5 ve 8 değerlerinde gerçekleştirilen çalışmalarda KOİ değerleri sırasıyla 174 mg/L, 232 mg/L, 769 mg/L ve güç tüketimleri sırasıyla 0,22 kWh/kg KOİ_g, 0,22 kWh/kg KOİ_g, 0,24 kWh/kg KOİ_g bulunmuştur. Şekil 7 incelendiğinde en düşük KOİ değerinin pH 3 koşulunda elde edildiği ve elektro-Fenton yönteminin atık suyun başlangıç pH değerine önemli ölçüde bağlı olduğu görülmüştür. Farklı pH değerlerinde oluşan demir türleri bu pH'larda hidroksil radikallerinin oluşumunu etkileyen en temel parametredir. pH 3'te atık suya eklenen Fe³⁺ iyonu atık suda ağırlıklı olarak [Fe(H₂O)₆]³⁺ şeklinde bulunmakta olup Reaksiyon (R18) ve Reaksiyon (R19)'da görüldüğü gibi hidroliz olmaktadır. Daha basit bir tanımlama için söz konusu hidroliz ürünleri olan [Fe(H₂O)₆]³⁺, [Fe(H₂O)₅(OH)]²⁺ ve [Fe(H₂O)₄(OH)₂]⁺ bileşikleri Fe³⁺ olarak tanımlanmaktadır [61].

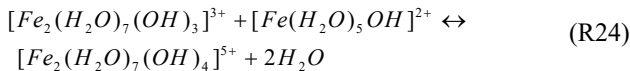
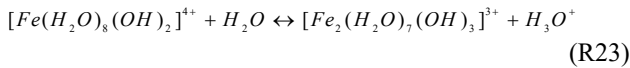
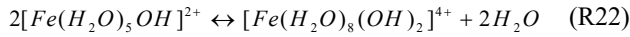




Asidik koşullarda Fe^{2+} iyonu atık suda çoğunlukla $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$ şeklinde bulunmakta olup Reaksiyon (R20) ve Reaksiyon (R21)'e göre hidroliz olmaktadır. Hidroliz ürünleri olan $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$, $[Fe(H_2O)_5(OH)]^{+}$ ve $Fe(H_2O)_4(OH)_2$ bileşikleri, su molekülleri atılarak sırasıyla Fe^{2+} , $FeOH^{+}$ ve $Fe(OH)_2$ olarak kısaltılmaktadır. pH 3'ten küçük olduğunda bu bileşikler arasında en baskın bulunan demir türü Fe^{2+} olarak bilinmektedir [39]. Bu nedenle Fenton reaksiyonlarının genellikle pH 3 koşulunda gerçekleşmesiyle daha yüksek kirletici giderim verimi elde edilmektedir.



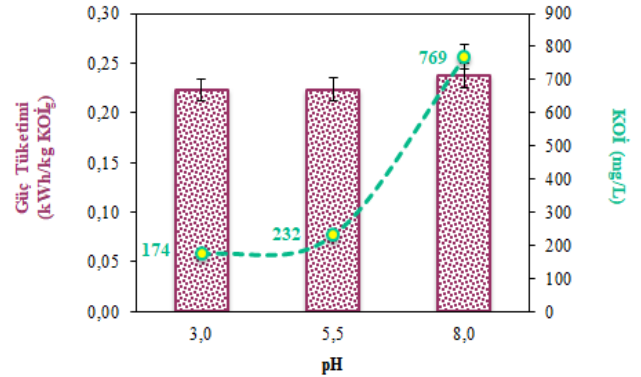
pH 3 değerinin üstüne çıkmaya başladığında Fe^{3+} bileşikleri ortamda $[Fe(H_2O)_8(OH)_2]^{4+}$, $[Fe_2(H_2O)_7(OH)_3]^{3+}$ ve $[Fe_2(H_2O)_7(OH)_4]^{5+}$ şeklinde bulunmaktadır (Reaksiyon (R22)-(R24)). Bu bileşikler pH 4-8 aralığında neredeyse tamamen çözünmez olduklarından dolayı ortamda hidroksil radikallerinin üretiminden çok organik kirleticilerin koagülasyonuna neden olmaktadır [62]. Ayrıca pH'ın 3'ten büyük olduğu durumda sisteme oksijen beslemesi yapılması halinde Reaksiyon (R25)'ten görüleceği üzere Fe^{2+} iyonlarının Fe^{3+} iyonlarına oksidasyonu, Fenton reaksiyonları için gerekli olan Fe^{2+} iyonlarının miktarını azalttığından elektro-Fenton sisteminin verimini düşürmektedir [61].



Bunlara ek olarak hidrojen peroksit bazik çözeltilerde kararsızdır ve su ve oksijen vermek üzere parçalanarak oksidasyon yeteneğini kaybetmektedir. Dolayısıyla bazik pH'larda giderim verimi hidroksil radikallerinin üretimi için gerekli olan reaktiflerin başlangıç miktarından bağımsız hale gelmekte ve bu durum daha düşük kirletici giderim veriminin elde edilmesine neden olmaktadır [63].

Elde edilen sonuçlar KOİ gideriminin pH'ın 3 değerine doğru azaltılmasıyla arttığını göstermektedir. Bu durum, pH > 3 koşulunda, H_2O_2 'nin Fe^{2+} tarafından HO^{\bullet} 'ne ayrıştırılmadığı, dolayısıyla H_2O_2 ile Fe^{2+} arasındaki reaksiyon hızının ve böylece giderim veriminin azaldığını göstermektedir [64]. Bu durumda birim KOİ giderimi başına

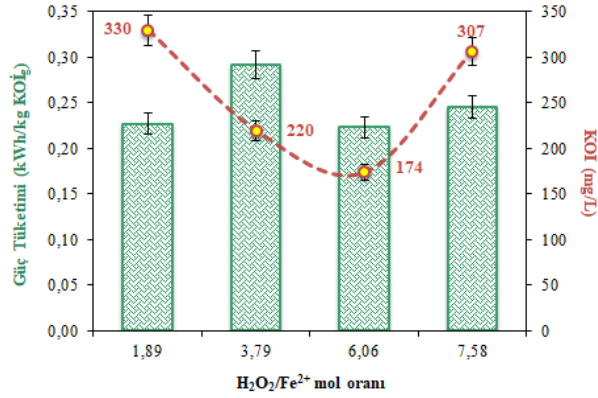
tüketilen enerji artacaktır. Bunun yanı sıra atık suyun başlangıç pH değerini 3'e ayarlamak için gerekli olan asit miktarı fazla olduğundan, ortama eklenen iyon derişiminin artışı atık suyun iletkenliğinde bir miktar artışa sebep olarak sabit akımın sağlanması için gerekli potansiyel farkında düşüş yarattığından dolayı düşük pH değerlerinde yüksek pH değerlerine kıyasla güç tüketiminde bir miktar azalma sağlanmaktadır.



Şekil 7. Elektro-Fenton yönteminde pH'ın güç tüketimi ve KOİ üzerine etkisi (Akım şiddeti= 1 A, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ derişimi= 9 g/L, H_2O_2 derişimi= 130,84 mM) (Effect of pH on power consumption and COD in electro-Fenton method) (Current intensity= 1 A, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ concentration= 9 g/L, H_2O_2 concentration= 130.84 mM)

Elektro-Fenton yönteminde demir ve hidrojen peroksit giderim verimini ve işletme maliyetini belirleyen iki temel kimyasaldır. Kullanılan kimyasalların miktarı, reaktiflerin mutlak derişimi ve molar oranları açısından da değerlendirilmelidir. Organik kirlilik yaratan maddelerin giderimi, kullanılan kimyasalların atık sudaki derişimi arttıkça iyileşmesine rağmen derişim eşik seviyesinin üzerine çıktığında giderim veriminde anlamlı bir değişim olmadığı gözlemlenmektedir. Elektro-Fenton yönteminde aşırı miktarda bulunan demir, toplam çözünmüş katı miktarı ve elektriksel iletkenlikte artışa sebep olmakta, aşırı miktarda hidrojen peroksit ise oluşan çamurun çökmesini engelleyen gaz kabarcıkları üretimine katkıda bulunmaktadır [65]. Bu nedenle Fenton reaktiflerinin mutlak en uygun değerlerinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmada 4 farklı H_2O_2/Fe^{2+} mol oranının atık suyun arıtım sonundaki KOİ değeri ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. H_2O_2/Fe^{2+} mol oranı 1,89 değerinden 6,06 değerine yükseldiğinde KOİ değeri 330 mg/L'den 174 mg/L değerine düşmüştür. Bu değer SKKY'de belirtilen deşarj limiti 200 mg KOİ/L değerinden düşük olup, arıtılan su deşarj edilebilir niteliktedir. Giderim verimindeki bu artış atık suda Fenton reaksiyonlarının gerçekleşmesi, bunu takiben organik bileşikleri oksitleyen kuvvetli reaktif hidroksil radikallerinin oluşması ve oksidasyon hızının yükselmesi ile açıklanmaktadır [66, 67]. H_2O_2/Fe^{2+} mol oranının 6,06 değerinden 7,58 değerine artışı KOİ değerinin artması ve dolayısıyla giderim veriminin azalması ile sonuçlanmıştır. Bu durum Fenton reaksiyonlarının mekanizmasındaki değişime bağlıdır. Ortamda H_2O_2

miktarının fazla olması daha fazla hidroksil radikalının üretimi ile sonuçlanmamakta, aksine aşırı H_2O_2 organik maddelerle rekabet ederek hidroperoksil radikali oluşturmak üzere hidroksil radikali ile reaksiyona girmektedir (Reaksiyon (R12)). Oluşan hidroperoksil radikalının oksitleme gücü hidroksil radikalından daha az olduğu için giderim veriminde düşüş gözlemlenmektedir [67, 68]. Bununla birlikte hidrojen peroksitin fazlası su ve oksijene parçalanarak hidroksil radikali derişimi ve elektro-Fenton arıtım verimini düşürmektedir [69].



Şekil 8. Elektro-Fenton yönteminde H_2O_2/Fe^{2+} mol oranının güç tüketimi ve KOİ üzerine etkisi
(Effect of H_2O_2/Fe^{2+} molar ratio on power consumption and COD in electro-Fenton method)

H_2O_2/Fe^{2+} mol oranının artışı ile atık suyun iletkenliğinde azalma meydana gelmekte, dolayısıyla sabit akım koşulunu sağlamak için gerekli potansiyel farkı yükselmekte ve birim arıtılan atık su hacmi başına güç tüketimi artmaktadır. Ancak H_2O_2/Fe^{2+} mol oranı için uygun değerin tespiti, KOİ giderim veriminde artışa istinaden iletkenlik üzerindeki etkinin önüne geçerek birim KOİ giderimi başına güç tüketiminin azalması ile sonuçlanmıştır. Elektro-Fenton yöntemi ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının arıtımı için tek başına yeterli bir yöntem olmakla birlikte, arıtılan birim atık su hacmi başına enerji tüketiminin azaltılması endüstriyel uygulanabilirlik açısından önemli bir kriterdir. Bu sebeple elektro-Fenton yönteminin koagülasyon-flokülasyon yöntemi gibi bir ön arıtım işleminin ardından ikinci arıtım olarak kullanılması pratik bir uygulama olacaktır.

5.3. Ardışık Koagülasyon-Flokülasyon & Elektro-Fenton Yöntemi ile Arıtım

(Treatment by Sequential Coagulation-Flocculation-Electro-Fenton Method)

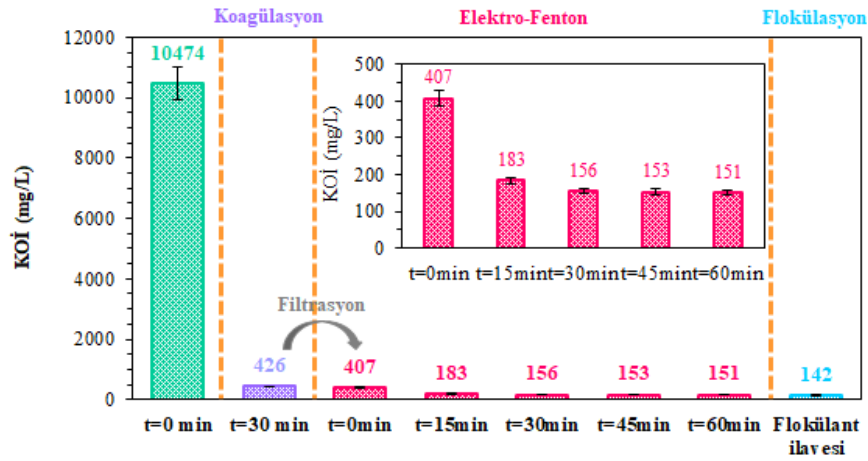
Koagülasyon-flokülasyon yöntemi ile arıtımda atık suyun arıtım sonundaki en düşük KOİ değeri ve güç tüketimi göz önünde bulundurularak 10 g/L $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, 0,06 g/L flokülant ve pH 6 koşullarında çalışılması uygun bulunmuş, bu parametrelerle yapılan çalışmada arıtım sonundaki KOİ değeri 398 mg/L olarak elde edilmiştir. Elektro-Fenton yönteminde en uygun işletme parametreleri 1 A akım şiddeti, 9 g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 130,84 mM H_2O_2 , pH 3 olarak bulunmuş ve bu koşullarda gerçekleştirilen çalışmada 174 mg/L KOİ

değeri ve 0,22 kWh/kg KOİ_g (2,37 kWh/m³) güç tüketimi elde edilmiştir. Söz konusu iki yöntemin arıtım veriminin ayrı ayrı değerlendirilmesinin ardından bulunan en uygun koşullarda ardışık işletimin etkisi de incelenmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmada atık su ardışık işletimin ilk basamağı olan koagülasyon yöntemi ile arıtıldıktan sonra çöktürme ve filtrasyon işlemi uygulanmış ve sonrasında elektro-Fenton yöntemine tabi tutulmuştur. Koagülasyon yöntemi ile 30 min süren arıtım sonunda KOİ değeri 426 mg/L değerine düşmüştür. Ön arıtım uygulanmış atık su süzütüsü elektro-Fenton yöntemi ile 60 min süresince arıtılmış, bu sürenin sonunda flokülasyon uygulaması yapılmıştır. Ardışık arıtım sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere elektro-Fenton yönteminde 30 min arıtmadan sonra KOİ değerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. 60 min elektro-Fenton uygulamasını takiben atık suya flokülant ilavesi yapıldığında KOİ değeri 156 mg/L'den 142 mg/L değerine inmiş ancak bu işlemin arıtıma çamur miktarını azaltmak dışında anlamlı bir katkı yapmadığı gözlemlenmiştir. Ülkemizde Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği uyarınca sıvı yağ rafinasyonu atık sularının alıcı ortamlara deşarj limiti KOİ değeri için 200 mg/L olarak belirlemiştir. Ardışık işletimin elektro-Fenton basamağında 15 min işletme süresi sonunda KOİ 183 mg/L değeri ile deşarj limitinin altına inmiş, güç tüketimi 2,15 kWh/kg KOİ_g (0,48 kWh/m³) olarak elde edilmiştir. Güç tüketimi ve arıtım maliyeti de göz önüne alınarak arıtıma bu süre itibarı ile son verilmesi uygun bulunmuştur. Ardışık koagülasyon-elektro-Fenton-flokülasyon sisteminde 10 g/L $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ve ardından 9 g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ uygulanmasının sonucunda gerçekleşen arıtımda oluşan çamur miktarı 16,19 kg kuru çamur/m³ olarak belirlenmiştir. Arıtım sonucunda oluşan çamurun, içeriği itibarıyla, adsorban olarak kullanılabilceği belirtilmiştir [70].

5.4. Elde Edilen Sonuçların Literatürde Yapılan Çalışmalarla Karşılaştırılması

(Comparison of the Results with the Previously Published Studies)

Elde edilen sonuçlar, Tablo 2'de görüldüğü gibi literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Ahmad vd. [38] çalışmalarında palm yağı atık suyu kullanmışlar ve 15 g/L $Al_2(SO_4)_3$, 0,3 g/L flokülant ve pH 6 koşullarında gerçekleştirdikleri koagülasyon-flokülasyon çalışmasında %78 oranında su geri kazanımı elde etmişlerdir. Kurt vd. [71] tabakhane endüstrisi atık sularının elektro-Fenton yöntemi ile arıtımında demir anot ve katot kullanarak 1670 mg/L H_2O_2 , 15 W, pH 3 koşullarında gerçekleştirdikleri çalışmada 12 min sonunda %73 KOİ giderimi ve 3,6 kWh/kg KOİ_g güç tüketimi sonuçlarına ulaşmışlardır. Can [60] meyve suyu üretim tesisi atık sularının elektro-Fenton yöntemiyle arıtımında demir anot ve katot kullanarak 0,5 A, 40 ml/L H_2O_2 , pH 3,5 koşullarında 25 min süre sonunda %84 KOİ giderimi ile 0,77 kWh/kg KOİ_g güç tüketimi elde etmişlerdir. Tezcan Ün vd. [29] demir anot ve katot kullandıkları zeytin deşarjı atık sularının PACl katkılı elektro-Fenton arıtımı amacıyla 75 mA/cm², 0,5 g/L PACl, 23 ml/L H_2O_2 işletme parametreleri altında 180 min süre ile gerçekleştirdikleri çalışmada %86 KOİ giderimi sağlarken 188 kWh/m³ güç tüketimi elde



Şekil 9. Ardışık koagülasyon-elektro-Fenton-flokülasyon yöntemi ile arıtmada KOİ değerinin değişimi (Variation in COD values during treatment by consecutive coagulation- electro-Fenton- flocculation method)

Tablo 2. Literatürde yayınlanmış benzer çalışmaların karşılaştırması (Comparison of previously published similar studies)

Kaynak	Atık su	Yöntem	Deney koşulları	Elde edilen sonuçlar
Ahmad vd. [38]	Palm yağı atık suyu	Koagülasyon- Flokülasyon PACl katkıli	15 g/L Al ₂ (SO ₄) ₃ 0,3 g/L flokülant pH= 6 75 mA/cm ²	%78 su geri kazanımı
Tezcan Ün vd. [29]	Zeytin değirmeni atık suyu	elektro-Fenton Anot: Demir Katot: Demir	0,5 g/L PACl 23 ml/L H ₂ O ₂ 180 min 0,5 A	%86 KOİ giderimi 188 kWh/m ³
Can [60]	Meyve suyu üretim tesisi atık suyu	Elektro-Fenton Anot: Demir Katot: Demir	40 ml/L H ₂ O ₂ pH=3,5 25 min 1670 mg/L H ₂ O ₂	%84 KOİ Giderimi 0,77 kWh/kg KOİ _g
Kurt vd. [71]	Tabakhane endüstrisi atık suyu	Elektro-Fenton Anot: Demir Katot: Demir	15 W pH= 3 12 min	%73 KOİ giderimi 3,6 kWh/kg KOİ _g
Mevcut çalışma	Ayçiçek yağı endüstrisi atık suyu	Koagülasyon- Flokülasyon	10 g/L Al ₂ (SO ₄) ₃ 0,06 g/L flokülant pH= 6 30 min	398 mg KOİ/L %97 KOİ giderimi
		Elektro-Fenton Anot: Grafit Katot: Grafit	1 A 9 g/L FeSO ₄ 13,33 ml/L H ₂ O ₂ pH= 3 60 min	174 mg KOİ/L %99 KOİ giderimi 0,22 kWh/kg KOİ _g 2,37 kWh/m ³
		<u>Ardışık işletim</u> Koagülasyon	10 g/L Al ₂ (SO ₄) ₃ pH= 6 30 min	183 mg KOİ/L %98 KOİ giderimi 2,15 kWh/kg KOİ _g 0,48 kWh/m ³
		Elektro-Fenton	1 A 9 g/L FeSO ₄ 13,33 ml/L H ₂ O ₂ pH= 3 15 min	
		Flokülasyon	0,06 g/L flokülant	

etmişlerdir. Mevcut çalışmada ise ayçiçek yağı endüstrisi atık suların koagülasyon-flokülasyon, elektro-Fenton ve ardışık yöntemle arıtımı incelenmiş ve yukarıdaki bölümlerde anlatılan en uygun koşullarda çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Özetle verilecek olursa koagülasyon-

flokülasyon yönteminde 10 g/L Al₂(SO₄)₃.18H₂O, 0,06 g/L flokülant, pH 6 koşullarında 30 min sonunda %97 KOİ giderimi (398 mg KOİ/L) ve elektro-Fenton yönteminde grafit anot ve katotlar kullanılarak 1 A, 9 g/L FeSO₄.7H₂O, 13,33 ml/L H₂O₂, pH 3 işletme parametreleri ile

Tablo 3. Çalışılan üç arıtım yöntemi ile elde edilen değerler ve bu değerlerin deşarj değeri ile karşılaştırılması
(Values obtained by three treatment methods studied and comparison of these values with the discharge value)

Arıtım yöntemi	Arıtım verimi	Arıtılmış su kalitesi	Deşarj değeri
Koagülasyon-flokülasyon (10 g/L Al ₂ (SO ₄) ₃ , 0,06 g/L flokülant, pH= 6, 30 min)	%97 KOİ giderimi	398 mg KOİ/L	200 mg KOİ/L
Elektro-Fenton (1 A, 9 g/L FeSO ₄ , 13,33 ml/L H ₂ O ₂ , pH= 3, 60 min)	%99 KOİ giderimi	174 mg KOİ/L	200 mg KOİ/L
Koagülasyon-flokülasyon-elektro-Fenton (Koagülasyon: 10 g/L Al ₂ (SO ₄) ₃ , pH= 6, 30 min) (Elektro-Fenton: 1 A, 9 g/L FeSO ₄ , 13,33 ml/L H ₂ O ₂ , pH= 3, 15 min) (Flokülasyon: 0,06 g/L flokülant)	%98 KOİ giderimi	183 mg KOİ/L	200 mg KOİ/L

çalışıldığında 60 min süren arıtımın sonunda %99 KOİ giderimi (174 mg KOİ/L) ve 0,22 kWh/kg KOİ_g (2,37 kWh/m³) güç tüketimi elde edilmiştir. Bu iki yöntemin en uygun işletme değerlerinde ardışık uygulanması sonucunda ise %98 KOİ giderimi (183 mg KOİ/L) ve 2,15 kWh/kg KOİ_g (0,48 kWh/m³) güç tüketimi bulunmuştur. Sonuçlar incelendiğinde mevcut koagülasyon-flokülasyon ve elektro-Fenton çalışmalarında literatürde yer alan benzer çalışmalara kıyasla daha yüksek kirlenici giderimi ile daha düşük güç tüketimi değerine ulaşılmıştır.

Koagülasyon-flokülasyon ve elektro-Fenton yöntemlerinin en uygun koşullarında yapılan arıtım çalışmaları için işletme maliyetleri sırasıyla 1,42 USD/m³, 2,92 USD/m³ olarak hesaplanmış, ardışık işletim için toplam çamur bertaraf maliyeti ise 3,83 USD/m³ olarak bulunmuştur. Literatürde palm yağı atık sularının koagülasyon ve elektrokoagülasyon yöntemleri ile arıtımının yapıldığı bir çalışmada elektrokoagülasyon maliyeti 6,76 baht/m³, koagülasyon maliyeti 29,88 baht/m³, iki yöntem için toplam çamur bertaraf maliyeti 41,5 baht/m³ olarak bulunmuştur [28]. Biyodizel atık sularının koagülasyon ve elektrokoagülasyon yöntemleri ile arıtıldığı bir çalışmada arıtım maliyetleri sırasıyla 1,11 USD/m³ ve 1,78 USD/m³ olarak elde edilmiştir [72]. Mevcut çalışmada elde edilen maliyet değerlerinin literatürde bulunan çalışmalara uyumlu olduğu görülmüştür.

6. SİMGELER (SYMBOLS)

BOİ	: Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
KOİ ₀	: Başlangıç KOİ değeri
KOİ _g	: Giderilen KOİ değeri
KOİ _t	: Arıtım sonundaki KOİ değeri
SKKY	: Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
I	: Uygulanan akım şiddeti
PCU	: Platin-Kobalt birimi
t	: Arıtım süresi
V _A	: Arıtılan atık su hacmi
V _m	: Uygulanan ortalama potansiyel farkı

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmada ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının koagülasyon-flokülasyon ve elektro-Fenton yöntemleri ile

arıtımında en uygun işletme koşullarının bulunması ve bu koşullarda yapılan çalışmalar ile atık suyun KOİ değerinin alıcı ortamlara deşarj limit değerinin altına düşürülmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda koagülasyon-flokülasyon yöntemi için belirlenen en uygun koşullarda gerçekleştirilen deneysel çalışmada atık suyun arıtım sonundaki KOİ değeri 398 mg/L olarak bulunmuştur. En uygun koşullarda gerçekleştirilen elektro-Fenton yönteminde ise arıtım sonundaki KOİ değeri 174 mg/L olarak elde edilmiştir. Bu değer deşarj limitlerinin altında olup 0,22 kWh/kg KOİ_g (2,37 kWh/m³) güç tüketimi meydana getirmiştir. Koagülasyon ön arıtımının ardından elektro-Fenton yönteminin uygulanması şeklinde söz konusu iki arıtım yöntemi ardışık gerçekleştirildiğinde ise 15 min elektro-Fenton arıtımı sonunda atık suyun KOİ değeri 183 mg/L ve güç tüketimi 2,15 kWh/kg KOİ_g (0,48 kWh/m³) olarak elde edilmiştir. Her üç arıtım yöntemiyle elde edilen en iyi arıtım verimleri ve arıtılmış su kalitesi deşarj sınır değerleriyle kıyaslamayı da içerecek şekilde Tablo 3'te verilmiştir. Ardışık işletimde ulaşılan KOİ değeri deşarj sınırlarının altında olmakla birlikte elektro-Fenton yönteminin tek başına uygulanmasına kıyasla birim arıtılan atık su hacmi başına enerji tüketiminin %80 azaltıldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle yapılan çalışma kapsamında ayçiçek yağı endüstrisi atık sularının arıtımında ardışık koagülasyon-flokülasyon ve elektro-Fenton yöntemlerinin kullanımının yüksek kirlenici giderimi ve düşük güç tüketimi gibi avantajlara sahip olduğu görülmüştür.

İSKİ yönetmeliğine göre çıkış sularının tam arıtmayla ve denize deşarjla sonlanan kanalizasyona deşarj sınır değerleri sırasıyla 1000 mg KOİ/L ve 600 mg KOİ/L, pH değer aralığı ise her iki durum için 6-12 olarak belirlenmiştir [73]. İZSU yönetmeliğine göre atık suların şehir atık su altyapı tesislerine deşarjında öngörülen atık su standartlarında KOİ değeri 800 mg/L ve pH aralığı 6,5-9 olarak belirtilmiştir [74]. Bu çalışma kapsamında koagülasyon-flokülasyon, elektro-Fenton ve bu iki yöntemin ardışık uygulanması şeklinde gerçekleştirilen üç farklı arıtım sonucunda ilgili yönetmeliklerde verilen limit değerlerin başarı ile sağlandığı görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar ardışık koagülasyon-flokülasyon ve elektro-Fenton yönteminin, yöntemlerin tek başına

uygulanmasına kıyasla daha avantajlı olduğunu gösterdiğinden yeni çalışmalar yapılarak ardışık yöntem için işletme parametrelerinin optimizasyonu çalışmalarının detaylı olarak irdelenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu araştırma Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: 16B0443001

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Suzuki Y., Maruyama T., Removal of emulsified oil from water by coagulation and foam separation, *Sep. Sci. Technol.*, 40 (16), 3407–3418, 2005.
2. Kajitvichyanukul P., Hung Y.T., Wang L.K., Membrane Technologies for Oil–Water Separation, Membrane and Desalination Technologies, Cilt 13, Editörler: Wang L.K., Chen J.P., Hung Y.T., Shammas N.K., Humana Press, Totowa, NJ, 639–668, 2011.
3. Bayhan Y.K., Değermenci G.D., Investigation of kinetic and removal of organic matter from cosmetic wastewaters by fenton process, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (1), 181-188, 2017.
4. Tezcan Un U., Koparal A.S., Bakir Ogutveren U., Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes, *J. Environ. Manage.*, 90 (1), 428–433, 2009.
5. Chipasa K.B., Limits of physicochemical treatment of wastewater in the vegetable oil refining industry, *Polish Journal of Environmental Studies*, 10 (3), 141-147, 2001.
6. Azbar N., Yonar T., Comparative evaluation of a laboratory and full-scale treatment alternatives for the vegetable oil refining industry wastewater (VORW), *Process Biochem.*, 39 (7), 869–875, 2004.
7. An C., Huang G., Yao Y., Zhao S., Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review, *Sci. Total Environ.*, 579, 537–556, 2017.
8. Murathan A., Koçyiğit H., Removal of cadmium ions from aqueous solutions in fixed beds by using horse chestnut and oak valonia, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (2), 303-306, 2013.
9. Fox C.H., O'Hara P.D., Bertazzon S., Morgan K., Underwood F.E., Paquet P.C., A preliminary spatial assessment of risk: Marine birds and chronic oil pollution on Canada's Pacific coast, *Sci. Total Environ.*, 573, 799–809, 2016.
10. Phillips L., Johnson M., Deener K., Bonanni C., EPA's Exposure Assessment Toolbox (EPA-Expo-Box), *Journal of Environmental Informatics*, 25 (2), 81-84, 2015.
11. Ergin G., Önel S., Determination and removal of copper ions (Cu^{2+}) in the waste electrolyte in an electrochemical machining application, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (3), 487-494, 2014.
12. Bari S., Lim T.H., Yu C.W., Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emission of a diesel engine, *Renewable Energy*, 27 (3), 339–351, 2002.
13. Onat B., Arıoğlu H., Güllüoğlu L., Kurt C., Bakal H., Dünya ve Türkiye'de yağlı tohum ve ham yağ üretimine bir bakış, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi*, 20, 149–153, 2017.
14. Demirci Y., Pekel L.C., Altınten A., Alpbaz M., Simultaneous control of pH, conductivity and temperature with fuzzy control method in the electrocoagulation reactors, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (4), 987-996, 2016.
15. Açıkgöz Ç., Design of laboratory/pilot-scale membrane bioreactor (mbr) system and manufacture, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 43-50, 2018.
16. Sabah E., Çınar M., Çelik M.S., Decolorization of vegetable oils: Adsorption mechanism of β -carotene on acid-activated sepiolite, *Food Chem.*, 100 (4), 1661–1668, 2007.
17. Sridhar S., Kale A., Khan A.A., Reverse osmosis of edible vegetable oil industry effluent, *J. Membr. Sci.*, 205 (1), 83–90, 2002.
18. Mohammadi T., Esmaeelifar A., Wastewater treatment of a vegetable oil factory by a hybrid ultrafiltration-activated carbon process, *J. Membr. Sci.*, 254 (1), 129–137, 2005.
19. Saatci Y., Arslan E.I., Konar V., Removal of total lipids and fatty acids from sunflower oil factory effluent by UASB reactor, *Bioresour. Technol.*, 87 (3), 269–272, 2003.
20. Radoiu M.T., Martin D.I., Calinescu I., Iovu H., Preparation of polyelectrolytes for wastewater treatment, *J. Hazard. Mater.*, 106 (1), 27–37, 2004.
21. Bilen M., Ateş Ç., Bayraktar B., Determination of optimal conditions in boron factory wastewater chemical treatment process via response surface methodology, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 267-278, 2018.
22. Louhichi G., Bousselmi L., Ghrabi A., Khouni I., Process optimization via response surface methodology in the physico-chemical treatment of vegetable oil refinery wastewater, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26 (19), 18993–19011, 2019.
23. Daghrrir R., Drogui P., François Blais J., Mercier G., Hybrid process combining electrocoagulation and electro-oxidation processes for the treatment of restaurant wastewaters, *J. Environ. Eng.*, 138 (11), 1146–1156, 2012.
24. Özyonar F., Karagözoğlu B., Removal of turbidity from drinking water by electrocoagulation and chemical coagulation, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (1), 81-89, 2012.
25. Jamaly S., Giwa A., Hasan S.W., Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities, *J. Environ. Sci.*, 37, 15–30, 2015.

26. Sharma S., Aygun A., Simsek H., Electrochemical treatment of sunflower oil refinery wastewater and optimization of the parameters using response surface methodology, *Chemosphere*, 249, 126511, 2020.
27. Davarnejad R., Sabzehei M., Parvizi F., Heidari S., Rashidi A., Study on soybean oil plant wastewater treatment using the electro-Fenton technique, *Chem. Eng. Technol.*, 42 (12), 2717–2725, 2019.
28. Phalakornkule C., Mangmeemak J., Intrachod K., Nuntakumjorn B., Pretreatment of palm oil mill effluent by electrocoagulation and coagulation., *ScienceAsia*, 36 (2), 142–149, 2010.
29. Tezcan Ün Ü., Uğur S., Koparal A.S., Bakir Ögütveren Ü., Electrocoagulation of olive mill wastewaters, *Sep. Purif. Technol.*, 52 (1), 136–141, 2006.
30. Sirés I., Brillas E., Oturan M.A., Rodrigo M.A., Panizza M., Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow. A review, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 21 (14), 8336–8367, 2014.
31. Plakas K. V., Sklari S.D., Yiankakis D.A., Sideropoulos G.T., Zaspalis V.T., Karabelas A.J., Removal of organic micropollutants from drinking water by a novel electro-Fenton filter: Pilot-scale studies, *Water Res.*, 91, 183–194, 2016.
32. Nidheesh P.V, Gandhimathi R., Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview, *Desalination*, 299, 1–15, 2012.
33. Sun M., Chen F., Qu J., Liu H., Liu R., Optimization and control of Electro-Fenton process by pH inflection points: A case of treating acrylic fiber manufacturing wastewater, *Chem. Eng. J.*, 269, 399–407, 2015.
34. Özyurt B., Camcıoğlu Ş., Hapoğlu H., A consecutive electrocoagulation and electrooxidation treatment for pulp and paper mill wastewater, *Desalin. Water Treat.*, 93, 214–228, 2017.
35. Lee C.S., Robinson J., Chong M.F., A review on application of flocculants in wastewater treatment, *Process Saf. Environ. Prot.*, 92 (6), 489–508, 2014.
36. Harif T., Khai M., Adin A., Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/flocculation mechanisms and resulting floc characteristics, *Water Res.*, 46 (10), 3177–3188, 2012.
37. Camcıoğlu Ş., Özyurt B., Zeybek Z., Hapoğlu H., Experimental application of one step ahead advanced pH control to water-based paint wastewater treatment, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 655-664, 2016.
38. Ahmad A.L., Ismail S., Bhatia S., Optimization of coagulation–flocculation process for palm oil mill effluent using response surface methodology, *Environ. Sci. Technol.*, 39 (8), 2828–2834, 2005.
39. Pignatello J.J., Oliveros E., MacKay A., Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the fenton reaction and related chemistry, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36 (1), 1–84, 2006.
40. Nidheesh P.V., Gandhimathi R., Removal of Rhodamine B from aqueous solution using graphite-graphite electro-Fenton system, *Desalin. Water Treat.*, 52 (10–12), 1872–1877, 2014.
41. Wang C.T., Hu J.L., Chou W.L., Kuo Y.M., Removal of color from real dyeing wastewater by Electro-Fenton technology using a three-dimensional graphite cathode, *J. Hazard. Mater.*, 152 (2), 601–606, 2008.
42. Panizza M., Oturan M.A., Degradation of Alizarin Red by electro-Fenton process using a graphite-felt cathode, *Electrochim. Acta*, 56 (20), 7084–7087, 2011.
43. Atmaca E., Treatment of landfill leachate by using electro-Fenton method, *J. Hazard. Mater.*, 163 (1), 109–114, 2009.
44. Palas B., Ersöz G., Atalay S., Investigation of the kinetics of the micropollutant removal by using environmentally friendly wastewater treatment methods: Fenton like oxidation of Methylene Blue in the presence of LaFeO₃ perovskite type of catalysts, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1181-1191, 2017.
45. Brillas E., Sauleda R., Casado J., Degradation of 4-chlorophenol by anodic oxidation, electro-Fenton, photoelectro-Fenton, and peroxi-coagulation processes, *J. Electrochem. Soc.*, 145 (3), 759–765, 1998.
46. Moreira F.C., Boaventura R.A.R., Brillas E., Vilar V.J.P., Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters, *Appl. Catal. B*, 202, 217–261, 2017.
47. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7221&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>. Yayın tarihi Aralık 12, 2004. Erişim tarihi Ağustos 6, 2020.
48. Eaton A.D., Clesceri L.S., Rice E.W. ve Greenberg A.E., Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 21. Baskı, American Public Health Association, A.B.D., 2005.
49. Gökkuş Ö., Çiner F., Investigation of color and cod removal from wastewater containing Disperse Yellow 119 and Disperse Red 167 using fenton oxidation process, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (1), 49-55, 2010.
50. Dovletoglu O., Philippopoulos C., Grigoropoulou H., Coagulation for treatment of paint industry wastewater., *J. Environ. Sci. Health Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.*, 37 (7), 1361–1377, 2002.
51. Bhatia S., Othman Z., Ahmad A.L., Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using Moringa oleifera seeds as natural coagulant, *J. Hazard. Mater.*, 145 (1–2), 120–126, 2007.
52. Birjandi N., Younesi H., Bahramifar N., Ghafari S., Zinatizadeh A.A., Sethupathi S., Optimization of coagulation-flocculation treatment on paper-recycling wastewater: Application of response surface methodology, *J. Environ. Sci. Health. Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.*, 48 (12), 1573–1582, 2013.
53. Freitas T.K.F.S., Oliveira V.M., de Souza M.T.F., Geraldino H.C.L., Almeida V.C., Fávoro S.L., Garcia J.C., Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant, *Ind. Crops Prod.*, 76, 538–544, 2015.

54. Irfan M., Butt T., Imtiaz N., Abbas N., Khan R.A., Shafique A., The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate, *Arab. J. Chem.*, 10, S2307–S2318, 2017.
55. Bakaraki Turan, N., Sari Erkan, H., Onkal Engin, G., The investigation of shale gas wastewater treatment by electro-Fenton process: Statistical optimization of operational parameters, *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 203–213, 2017.
56. Jaafarzadeh N., Ghanbari F., Ahmadi M., Omidinasab M., Efficient integrated processes for pulp and paper wastewater treatment and phytotoxicity reduction: Permanganate, electro-Fenton and $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{UV}/\text{peroxymonosulfate}$, *Chem. Eng. J.*, 308, 142–150, 2017.
57. Babuponnusami A., Muthukumar K., Advanced oxidation of phenol: A comparison between Fenton, electro-Fenton, sono-electro-Fenton and photo-electro-Fenton processes, *Chem. Eng. J.*, 183, 1–9, 2012.
58. Gümüş D., Akbal F., Comparison of Fenton and electro-Fenton processes for oxidation of phenol, *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 252–258, 2016.
59. Mousavi S. A., Nazari S., Applying response surface methodology to optimize the Fenton oxidation process in the removal of reactive red 2, *Polish Journal of Environmental Studies*, 26 (2), 765–772, 2017.
60. Can O. T., COD removal from fruit-juice production wastewater by electrooxidation electrocoagulation and electro-Fenton processes, *Desalin. Water Treat.*, 52 (1–3), 65–73, 2014.
61. Nidheesh P.V, Gandhimathi R., Effect of solution pH on the performance of three electrolytic advanced oxidation processes for the treatment of textile wastewater and sludge characteristics, *RSC Adv.*, 4 (53), 27946–27954, 2014.
62. Neyens E., Baeyens J., A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique, *J. Hazard. Mater.*, 98 (1–3), 33–50, 2003.
63. Wang S., A comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater, *Dyes Pigm.*, 76 (3), 714–720, 2008.
64. Thirugnanasambandham K., Kandasamy S., Sivakumar V., Kumar R.K., Mohanavelu R., Modeling of by-product recovery and performance evaluation of Electro-Fenton treatment technique to treat poultry wastewater, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 46, 89–97, 2015.
65. Hermosilla D., Cortijo M., Huang C.P., Optimizing the treatment of landfill leachate by conventional Fenton and photo-Fenton processes, *Sci. Total Environ.*, 407 (11), 3473–3481, 2009.
66. Moussavi G., Aghanejad M., The performance of electrochemical peroxidation process for COD reduction and biodegradability improvement of the wastewater from a paper recycling plant, *Sep. Purif. Technol.*, 132, 182–186, 2014.
67. Thirugnanasambandham K., Sivakumar V., Modeling and optimization of advanced oxidation treatment of beer industry wastewater using Electro-Fenton process, *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 34 (4), 1072–1079, 2015.
68. Shen Y., Xu Q., Gao D., Shi H., Degradation of an anthraquinone dye by ozone/Fenton: Response surface approach and degradation pathway, *Ozone: Science and Engineering*, 39 (4), 219–232, 2017.
69. Davarnejad R., Nikseresht M., Ajideh I., An efficient technique for dairy wastewater treatment, *Int. J. Dairy Technol.*, 71 (2), 532–538, 2018.
70. Yilmaz A. E., Boncukcuoğlu R., Kocakerim M., Karakaş İ. H., Waste utilization: The removal of textile dye (Bomplex Red CR-L) from aqueous solution on sludge waste from electrocoagulation as adsorbent, *Desalination*, 277 (1), 156–163, 2011.
71. Kurt U., Apaydin O., Gonullu M.T., Reduction of COD in wastewater from an organized tannery industrial region by Electro-Fenton process, *J. Hazard. Mater.*, 143 (1–2), 33–40, 2007.
72. Ngamlerdpokin K., Kumjadpai S., Chatanon P., Tungmanee U., Chuenchuanom S., Jaruwat P., Lertsathitphongs P., Hunsom M., Remediation of biodiesel wastewater by chemical- and electro-coagulation: A comparative study, *J. Environ. Manage.*, 92 (10), 2454–2460, 2011.
73. İSKİ Genel Müdürlüğü. İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği. <https://www.iski.gov.tr/web/assets/SayfalarDocs/Mevzuat%20ve%20Y%C3%B6netmelikler/%C4%B0SK%C4%B0%20ATIKSULARIN%20KANALIZASYONUNA%20DE%20YARIN%20Y%C3%96NETMELIK%20B0C4%9E%20B0-14012019.pdf>. Yayın tarihi Ocak 24, 2013. Erişim tarihi Temmuz 25, 2020.
74. İZSU. Atık Suların Kanalizasyon Şebekesine Deşarj Yönetmeliği. <https://www.izsu.gov.tr/tr/atiksularindesarjyonnetmeligi/51/119>. Yayın tarihi Haziran 2, 2016. Erişim tarihi Temmuz 25, 2020.



Mixed-integer programming models for 1.5-dimensional cutting problem with technical constraints

Tuğba Saraç*^{ID}, Müjgan Sağır^{ID}

Department of Industrial Engineering, Eskisehir Osmangazi University, 26480 Eskisehir, Turkey

Highlights:

- Developing a new mathematical model for 1.5 dimensional cutting problem with technical constraints.
- Linearization of the nonlinear model.
- Comparison of the performances of developed mathematical models.

Keywords:

- 1.5 dimensional cutting problem
- Mixed-Integer programming models

Article Info:

Research Article
Received: 28.01.2020
Accepted: 25.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.681190

Correspondence:

Author: Tuğba Saraç
e-mail: tsarac@ogu.edu.tr
phone: +90 222 239 3750

Graphical/Tabular Abstract

Table A. M1, M2 and M3 models' comparison

no	c	(non-linear)				(linear)				(with pre-derived cutting plan)			
		M1		M2		M3		M3					
		f_1	f_2	f	t	f_1	f_2	f	s	f_1	f_2	f	t
1	≤ 2	1274	3	0.77	28	1274	3	0.77	1	1274	3	0.77	1
	≤ 3	1326	2	0.62	31	1326	2	0.62	1	1326	2	0.62	1
2	≤ 2	-	-	-	200000	2850	5	0.97	8793	2850	5	0.97	2
	≤ 3	-	-	-	200000	2719	4	0.84	2493	2719	4	0.84	41
3	≤ 2	-	-	-	200000	3144	10	0.82	66049*	3101	10	0.81	1279
	≤ 3	-	-	-	200000	3353	7	0.69	5000*	3191	7	0.67°	200000
4	≤ 2	-	-	-	200000	-	-	-	5000*	2762	15	0.67+	200000
	≤ 3	-	-	-	200000	-	-	-	5000*	-	-	-	200000

* stopped before time limit due to lack of memory / ° absolute gap is 0.03% / + absolute gap is 11.3%.

Purpose:

To develop an integrated mathematical model that generates cutting patterns and finds the best patterns for 1.5-dimensional cutting stock problems with order type and strip number constraints.

Theory and Methods:

Generating cutting patterns is a difficult task for cutting stock problems. Many studies first generate the patterns and then use a solution method to find the best patterns. An integrated mathematical model (M1) that generates cutting patterns and finds the best ones is developed for 1.5-dimensional cutting stock problem with order type and strip number constraints. This new model is then linearized (M2) due to its nonlinear structure. A third model (M3) using pre-derived cutting plans is also developed, and test problems are generated randomly to compare them.

Results:

Developed models are compared by using derived test problems. The model using pre-derived cutting plans solved all problems in less time than other models as expected. However, deriving the cutting plans in advance is a significant challenge and requires time. On the other hand, the linear model that derives the cutting plans itself can find a solution up to a certain size in a reasonable time. The summary of the obtained results is given in Table A.

Conclusion:

The linearization of the mathematical model of 1.5-dimensional cutting stock problem where cutting patterns are also derived by the model is an important acquisition for both the literature and the production processes.



Teknik kısıtlı 1,5 boyutlu kesme problemi için karma tamsayılı matematiksel modeller

Tuğba Saraç*^{ID}, Müjgan Sağır^{ID}

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26040 Eskişehir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Teknik kısıtlı 1,5 boyutlu kesme problemi için yeni bir matematiksel model geliştirilmesi
- Doğrusal olmayan modelin doğrusallaştırılması
- Geliştirilen matematiksel modellerin performanslarının karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 28.01.2020

Kabul: 25.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.681190

Anahtar Kelimeler:

1,5 boyutlu kesme problemi,
karma tamsayı programlama
modelleri

ÖZET

Kesme problemlerinin çözümünde genellikle önce kesme planları türetilip daha sonra hangi kesme planlarının kullanılacağı belirlenmektedir. Öte yandan tüm kesme planlarını türetmenin güçlüğü ve kesme planı sayısının genellikle çok fazla olması bu konuda karşılaşılan en temel problemlerdir. Bu çalışmada parça çeşidi ve şerit sayısı kısıtlı 1,5 boyutlu kesme problemi için kesme planlarını da türeten bütünlük bir matematiksel model geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan bu model, çözüm güçlüğünü ortadan kaldırmak üzere doğrusallaştırılmıştır. Rassal olarak türetilen test problemleri kullanılarak, önerilen her iki modelle elde edilen sonuçlar, kesme planlarının önceden türetildiği klasik modelle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kesme planlarını da kendisi türeten doğrusal modelin belirli büyüklüğe kadar makul sürede çözülebildiğini göstermiştir. Özellikle, problem için geliştirilen matematiksel modelin doğrusal yapıya kavuşturulmasının, literatür için önemli bir kazanım olacağı düşünülmektedir.

Mixed-integer programming models for 1.5-dimensional cutting problem with technical constraints

H I G H L I G H T S

- Developing a new mathematical model for 1.5 dimensional cutting problem with technical constraints
- Linearization of the nonlinear model
- Comparison of the performances of developed mathematical models

Article Info

Research Article

Received: 28.01.2020

Accepted: 25.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.681190

Keywords:

1.5 dimensional cutting
problem,
mixed-integer programming
models

ABSTRACT

In solving cutting stock problems, generally, cutting patterns are generated first, and then it is determined which cutting plans will be used. On the other hand, the difficulty of generating all cutting patterns and often the large number of cutting patterns are the main problems encountered in this regard. In this study an integrated mathematical model that generates cutting patterns and finds the best patterns is developed for 1.5-dimensional cutting stock problems with order type and strip number constraints. This non-linear model has been linearized to eliminate solution difficulties. The performance of both models is compared with the performance of the model that uses the previously generated cutting patterns by using the randomly generated test problems. Obtained results show that the linear model, which also generates the cutting patterns itself, can be solved in a reasonable time up to a certain size. In particular, we believe that linearization of the nonlinear mathematical model for the problem will be an important contribution for the literature.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: tsarac@ogu.edu.tr, msagir@ogu.edu.tr / Tel: +90 222 239 3750

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Cam, kağıt, tekstil, metal ve mobilya benzeri endüstri alanlarında, boyutları bilinen bir malzemeden, çeşitli biçim, miktar ve boyutlara sahip daha küçük parçaların kesilerek kullanılması gerekmektedir. Bu tür problemler, genel olarak, *kesme problemleri (cutting stock problems)* olarak adlandırılmaktadır. Kesilecek malzemeye *ana malzeme*, ana malzemeden kesilen küçük parçalara *sipariş parçası* ve sipariş parçalarının, ana malzeme üzerinde her farklı yerleşimine ise *kesme planı (pattern)* denilmektedir.

Kesme işlemini karakterize eden önemli bazı diğer kavramlar; kısıtlı/kısıtsız, giyotin kesme, kademeli/kademesiz kesme ve ortogonal/ortogonal olmayan kesme olarak sayılabilir. *Giyotin kesmede*, ana malzeme bir kenarından diğer kenarına kadar kesilir. Her adımda kesilen sipariş parçası ikiye ayrılır [1]. Bir kesme planında bir sipariş parçasının tekrar sayısı sınırlı değilse *kısıtsız giyotin kesme*, sınırlı ise *kısıtlı giyotin kesme* denir [2]. Dikdörtgen sipariş parçaların ana malzeme kenarlarına paralel (*ortogonal*) ya da herhangi bir açı ile (*ortogonal olmayan* bir şekilde) kesilmesi mümkündür [3]. Kesme sayısında bir sınır varsa *kademeli*, aksi halde *kademesiz* giyotin kesme söz konusudur [1] *İki kademeli kesme*, giyotinle kesmenin özel bir durumudur. Bu türde tüm kesmeler iki aşamada tamamlanır. İlk aşamada tüm enine (boyuna) kesmeler, ikinci aşamada ise tüm boyuna (enine) kesmeler tamamlanır.

Wascher vd. [4] 2005 yılında kesme problemleri için bir sınıflandırma önermiştir. Bu çalışmada kesme problemleri boyut, atama tipi, ana malzeme çeşitliliği, kesilecek sipariş parçası çeşitliliği ve kesilecek sipariş parçalarının şekli olarak beş ölçüte göre sınıflandırılmıştır.

Bir kesme probleminin en önemli karakteristiği; ana malzemenin ve sipariş parçalarının, kesme planlarının oluşturulması aşamasında göz önünde bulundurulması gereken *boyut* sayısıdır. Kağıt rulolar, metal çubuklar gibi sipariş parçalarının kesimi *bir boyutlu*; palet yerleştirme, büyük dikdörtgen ana malzemelerden küçük dikdörtgen sipariş parçalarının kesilmesi gibi problemler *iki boyutlu*; konteynır yerleştirme, ambalaj kutularına yerleştirme gibi problemler *üç boyutludur*. Dört boyutlu problemler, üç boyutlu bir kesme problemine zaman boyutunun da katılması ile ortaya çıkabilir [5].

Son on yılda kesme problemlerini ele alan ve matematiksel modellemeye yer veren çalışmalar incelenmiştir. Gramani vd. [6] iki boyutlu kesme problemi ve parti büyüklüğü belirleme problemleri için kesme planlarının önceden türetilmesine gereksinim duymayan, bütünlük bir doğrusal karma tamsayılı matematiksel model geliştirmişlerdir. Problemin çözümü için Lagrange gevşetmesi temelli bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Berberler ve Nuriyev [7], bir boyutlu kesme problemini alt küme toplamı (*subset-sum*) problemi olarak modellemişler ve problemin çözümü için bir dinamik programlama algoritması önermişlerdir. Cherri vd.

[8] kesme sonrası oluşacak firelerin sonradan kullanılabilir boyutlarda olmasını ele alan bir boyutlu kesme problemleri konulu çalışmaları kapsayan bir yayın taraması yapmışlardır. Kim vd. [9], teknik kısıtları olan iki boyutlu kesme problemi için doğrusal karma tamsayılı bir matematiksel model önermişlerdir. Problemin çözümü için sırt çantası temelli bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Furini vd. [10], giyotin kısıtlı iki boyutlu kesme problemi için doğrusal karma tamsayılı bir matematiksel model önermişlerdir. Lin vd. [11], Bir boyutlu kesme problemi için bir genetik algoritma geliştirilmişlerdir. Coelho vd. [12] bir boyutlu kesme problemi için kesme planlarının önceden türetilmesini gerektirmeyen doğrusal karma tamsayılı bir matematiksel model önermişlerdir. Sonradan kullanılması mümkün olan firelerin ele alındığı çalışmada problemin çözümü için iki sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Vanzela vd. [13], iki boyutlu kesme problemi ve parti büyüklüğü belirleme problemlerini birlikte ele almışlardır. Problemin çözümü için kolon türetme yöntemini kullanmışlardır. Melega vd. [14], parti büyüklüğü belirleme ve kesme problemini birlikte ele alan çalışmaları kapsayan bir yayın taraması yapmışlardır. Tanır vd. [15], kesilen parçaların bölünebildiği ve sonradan birleştirilebildiği bir boyutlu kesme problemini ele almışlardır. Bu problem için bir matematiksel model ve dinamik programlama temelli bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Christofletti vd. [16], üç boyutlu kesme problemi ve parti büyüklüğü belirleme problemini birlikte ele almışlardır. Ele alınan problem için doğrusal karma tamsayılı bir matematiksel model önermişlerdir. Kokten ve Sel [17], 1,5 boyutlu kesme ve ana malzeme seçimi problemi için doğrusal olmayan karma tamsayılı bir matematiksel model geliştirmişlerdir.

Son on yılda kesme problemlerini ele alan ve matematiksel modellemeye yer veren çalışmalar incelendiğinde genellikle bir ve iki boyutlu problemlerin ele alındığı, bir buçuk ve üç boyutlu kesme problemlerinin daha az çalışıldığı göze çarpmaktadır.

İzleyen kısımda bu çalışmanın konusu olan bir buçuk boyutlu problemlerle ilgili literatür ayrıca tartışılmaktadır.

Bir buçuk boyutlu problemler, iki boyutlu problemlerin özel bir durumudur. Dikdörtgen malzemeler çok uzun rulolar üzerine yerleştirileceği zaman bu tip problemler ortaya çıkar [18]. Dikdörtgen sipariş parçaları kesiliyor olmasına rağmen, problem iki boyutlu değildir, çünkü ana malzeme boyunca uzanan yan fire, bir boyutu ile tanımlanabilmektedir ancak problem, kesilecek sipariş parçalarının yerleştirilmesi sırasında hem boy hem de enlerinin göz önünde bulundurulma zorunluluğu nedeniyle bir boyutlu problemden karmaşıktır [19].

Song vd. [20] 1,5 boyutlu problemi farklı tanımlamıştır. Buna göre 1,5 boyutlu kesme problemi büyük dikdörtgen stok malzemelerinden daha küçük dikdörtgen sipariş malzemelerinin kesilmesi olup, bu problemde müşterilerin istediği sipariş parçasının boyu, bazen, ana malzemenin

boyundan daha uzun olabilmektedir. Bu durumda toplam uzunlukları sipariş parçasının boyunu karşılayacak şekilde birkaç ana malzeme bir araya getirilir. Bu problemde, ana malzemelerin birleştirilebileceği varsayımı nedeniyle bu problem 1,5 boyutlu kesme problemi olarak tanımlanmıştır.

Kesme problemleri konusunda literatüre çok önemli katkılarda bulunan Dyckhoff vd. [3] tek boyutlu kesme probleminin sürekli formda olanını, bir artı yarım boyutlu, 1,5 boyutlu olarak adlandırmıştır. Dyckhoff'un sınıflandırmasındaki bu tanımlama literatürde fazla yer almamış, karşı gelen problemler, 1,5 boyutlu kesme problemi yerine, "bir boyutlu ve çeşitli boylardaki ana malzemelerin kesildiği problemler" olarak tanımlanmıştır [21]. Üstelik izleyen yıllarda Dyckhoff problemleri boyutlarına göre sınıflandırırken tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve N-boyutlu ($N > 3$) problemler olarak gruplanmış, 1,5 boyutlu kesme probleminin tanımına yer vermemiştir [5].

Bir lisansüstü tez çalışmasında 1,5 boyutlu kesme problemi "açık boyut problemi" olarak yer almış, problem, bir boyutu sabit diğer boyutu açık olan dikdörtgen şeklindeki bir stok malzemesine, kesilecek sipariş parçası kümesindeki tüm sipariş parçalarını, fireyi enküçükleyecek şekilde atamak olarak tanımlanmıştır [22].

Yukarıdaki üç tanımda da ([3, 21, 22]) 1,5 boyutlu problem, eni sabit, uzunluğu sürekli formda kabul edilebilecek stok malzemesine dikdörtgen sipariş parçalarının yerleştirilmesi şeklindedir. Bu problem, literatürde, diğer kesme problemleri kadar yer almamış olmakla birlikte, özellikle kağıt, metal, sac levha gibi girdisi olan üretim ortamlarında önemli bir alana sahiptir.

Saraç ve Sağır [23], şerit sayısı ve parça çeşidi kısıtlı 1,5 boyutlu kesme ve ana malzeme seçimi problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. İlk aşamada kesme planları şerit sayısı ve parça çeşidi kısıtları altında tam sayımlama ile türetilmiş ikinci aşamada ise hangi kesme planlarının ve ana malzemelerin seçileceğini belirlemek üzere iki amaçlı doğrusal olmayan, karma tamsayılı bir matematiksel model önerilmiştir. Matematiksel model ile gerçek hayat problemlerinin çözülememesi nedeniyle bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Gasimov vd. [24], 1,5 boyutlu kesme ve ana malzeme seçimi problemi için yeni bir çok amaçlı doğrusal karma tamsayılı matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu model kesme planlarının önceden türetilmesini gerektirmektedir. Kokten ve Sel [17], 1,5 boyutlu kesme ve ana malzeme seçimi problemi için doğrusal olmayan karma tamsayılı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Problemin çözümü için iki aşamalı her aşamada alt modellerin sırayla çözüldüğü bir ayrıştırma yöntemi kullanmışlardır.

1,5 boyutlu kesme problemlerini ele alan ve matematiksel model öneren çalışmalar incelendiğinde, Saraç ve Sağır [23] ve Kökten ve Sel [17] tarafından önerilen matematiksel modellerin doğrusal olmayan yapıda olduğu göze

çarpmaktadır. Gasimov vd. [24] tarafından önerilen model doğrusal karma tamsayılı yapıdadır ancak şerit sayısı ve ürün çeşidi kısıtlarını dikkate almamaktadır ve kesme planlarının önceden türetilmesine gereksinim duymaktadır. Dolayısıyla, kesme planlarının önceden türetilmesine gereksinim duymayan, parça çeşidi ve şerit sayısı kısıtlı 1,5 boyutlu kesme problemi modelleri ilk defa bu çalışmada önerilmiştir.

İzleyen bölümde, sipariş parçası çeşidi ve şerit sayısı kısıtlı 1,5 boyutlu kesme problemi tanımlanmıştır. Üçüncü, dördüncü ve beşinci bölümlerde sırasıyla, geliştirilen M1, M2 ve M3 modelleri sunulmuştur. Altıncı bölümde geliştirilen matematiksel modellerin çözüm performansları test problemleri üzerinde denenerek elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Son bölümde ise sonuç ve öneriler tartışılmıştır.

2. SİPARİŞ PARÇASI ÇEŞİDİ VE ŞERİT SAYISI KISITLI 1,5 BOYUTLU KESME PROBLEMİ (1.5 DIMENSIONAL CUTTING PROBLEM WITH ORDER PIECE TYPE AND STRIP NUMBER CONSTRAINTS)

Farklı boyutlara sahip dikdörtgen biçimindeki n adet sipariş parçasının, G enine sahip bir ana malzemenin kesilmesi söz konusudur. Ana malzemenin boyu (L), kesme planları oluşturulurken boy kısıtını ihmal etmeyi mümkün kılacak kadar uzundur. Bu nedenle kesme planları, sadece en kısıt dikkate alınarak oluşturulur. Daha sonra bir kesme planında yer alan her farklı sipariş parçası için ayrı ayrı toplam boylar hesaplanır. Bunlardan enbüyüğü kesme planının boyunu belirler. Ana malzemenin boyuna paralel keserek şeritlere ayırabilecek bıçak sayısı ($t-1$) sınırlıdır. Bu nedenle ana malzeme en fazla t adet şeride kesilebilir. Bir başka deyişle ana malzemeye enden en fazla t adet sipariş parçası yerleştirilebilir. Sipariş parçaları kesilirken döndürülemezler yani sipariş parçasının eni, ana malzemenin enine, boyu boyuna paralel olacak şekilde kesme yapılmalıdır. Ayrıca bir kesme planında yer alabilecek en fazla sipariş parçası çeşidi (c) sınırlıdır. Literatürde sipariş parçası çeşidi ve şerit sayısı kısıtlı 1,5 boyutlu kesme problemini dikkate alan sadece bir çalışmaya [23] erişilmiştir. Saraç ve Sağır [23], söz konusu çalışmalarında problemin çözümü için ilk aşamada sipariş parçası çeşidi ve şerit sayısı kısıtları altında tüm mümkün kesme planlarını tam sayımlama ile türetmiş, ikinci aşamada ise en uygun kesme planlarını seçmek üzere bir matematiksel model önermişlerdir. Ancak önceden türetilmiş kesme planlarını kullanarak talebi karşılayan eniyi kesme planlarını araştıran bu modelin, NP-zor yapıda olması sebebi ile çözümü için bir Genetik Algoritma önerilmiştir. İlgili çalışmada geliştirilmeye açık üç nokta bulunmaktadır: (1) [23]'de sunulan makalede, kesme planlarının 1 metre olduğu kabul edilmekte ve kesme planlarına küsuratlı parça yerleşimine izin verilmektedir. Kesme planları art arda sıralandığında küsuratlı parçalar bir araya gelerek tam parçaları oluşturmaktadır. Sadece son kesme planında küsuratlı bir parça kullanımı var ise aslında bu bir fire olmasına rağmen modelde fire olarak hesaba dâhil edilememektedir. Bu oran problem çözümünde çok küçük kaldığı için ihmal edilmiştir. Oluşabilecek fark, her ne kadar küçük bir değer de olsa, talebin karşılanmış görünmesine

rağmen bazı sipariş parçalarının üretim adetlerinin talebin altında kalması riskini yaratmaktadır. Ayrıca her bir kesme planının toplam boyunun bir metrenin katları biçiminde olma zorunluluğu bazı kesme planları için gereksiz fireler oluşabilmektedir. (2) Her kesme planı değişikliği üretimde kesintiye yol açacağı için üreticiler genellikle mümkün olduğunca az sayıda kesme planı değişikliği yaparak üretimi tamamlamayı tercih etmektedirler. Ancak söz konusu çalışmada önerilen matematiksel modelde bu eğilim dikkate alınmamıştır. Bu nedenle toplam fireyi küçültebilmek için sık sık kesme planı değişikliği gerektiren çözümler elde edilmesi mümkündür. (3) İlgili çalışmada kesme planlarının önceden türetilmesine gereksinim duyulmaktadır. Ancak tüm mümkün kesme planlarının türetilmesi zahmetli bir aşamadır ve problemin boyutu arttıkça türetililecek kesme planlarının sayısı da üstel olarak artmaktadır.

Bu çalışmada, literatürde sipariş parçası çeşidi ve şerit sayısı kısıtlı 1,5 boyutlu kesme problemini ele almış tek çalışma olan ve yukarıda değinilen Saraç ve Sağır [23]'dan farklı olarak, (1) geliştirilen modellerde kesme planlarının fireleri tam olarak hesaplanabilmektedir. (2) Üretimde yaşanacak kesintileri en aza indirebilmek için modele, toplam firenin enküçüklenmesi amacının yanı sıra toplam kullanılacak kesme planı sayısının enküçüklenmesi amacı da eklenmiştir. (3) Kesme planlarının önceden türetilmesini gerektiren iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı yerine kesme planlarını kendisi oluşturabilen matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller izleyen bölümlerde ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

3. M1 MODELİ: 1,5 BOYUTLU KESME PROBLEMİ İÇİN KESME PLANLARININ ÖNCEDEN TÜRETİLMESİNE GEREKSİNİM DUYMAYAN MODEL

(M1 MODEL: A MATHEMATICAL MODEL FOR 1.5 DIMENSIONAL CUTTING PROBLEM)

İndisler

j : sipariş parçası indisi $j \in \{1, \dots, n\}$
 k : kesme planı indisi $k \in \{1, \dots, m\}$

Parametreler

n : sipariş parçası sayısı
 m : en fazla türetililecek kesme planı sayısı
 e_j : j . sipariş parçasının eni (cm)
 b_j : j . sipariş parçasının boyu (cm)
 d_j : j . sipariş parçasının talebi (adet)
 G : ana malzemenin eni (cm)
 L : ana malzemenin boyu (cm)
 t : bir kesme planında enden kesilebilecek en fazla sipariş parçası sayısı (adet)
 c : bir kesme planında yer alabilecek en fazla sipariş parçası çeşidi (adet)

Karar değişkenleri

μ_{jk} : j . sipariş parçasından k . kesme planında yer alan toplam miktar (adet)
 γ_{jk} : j . sipariş parçasından k . kesme planında enden yer alan miktar (adet)
 γ_{jk} : j . sipariş parçasından k . kesme planında boydan yer alan miktar (adet)
 z_k : k . kesme planı kullanılıyorsa 1, kullanılmıyorsa 0
 w_{jk} : j . sipariş parçası k . kesme planında yer alıyorsa 1, almıyorsa 0
 x_k : k . kesme planından kullanılacak net miktar (cm)

(M1):

Kısıtlar

$$\gamma_{jk} \leq \frac{x_k}{b_j} \quad \forall j, k \quad (1)$$

$$\mu_{jk} \leq \gamma_{jk} \gamma_{jk} \quad \forall j, k \quad (2)$$

$$\sum_k \mu_{jk} \geq d_j \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j e_j \gamma_{jk} \leq G z_k \quad \forall k \quad (4)$$

$$\sum_k x_k \leq L \quad (5)$$

$$x_k \geq z_k \quad \forall k \quad (6)$$

$$x_k \leq L z_k \quad \forall k \quad (7)$$

$$\gamma_{jk} \geq w_{jk} \quad \forall j, k \quad (8)$$

$$\gamma_{jk} \leq t w_{jk} \quad \forall j, k \quad (9)$$

$$\sum_j w_{jk} \leq c \quad \forall k \quad (10)$$

$$\sum_j \gamma_{jk} \leq t \quad \forall k \quad (11)$$

$$x_k \geq 0 \quad \forall k \quad (12)$$

$$\gamma_{jk} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall j, k \quad (13)$$

$$\mu_{jk} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall j, k \quad (14)$$

$$z_k \in \{0,1\} \quad \forall k \quad (15)$$

$$w_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j, k \quad (16)$$

Amaç fonksiyonları

$$f_1 = \text{enk} \sum_k x_k \quad (17)$$

$$f_2 = \text{enk} \sum_k z_k \quad (18)$$

Birleştirilmiş amaç fonksiyonu

$$f = \text{enk} \sum_k \frac{x_k}{L} + \sum_k \frac{z_k}{m} \quad (19)$$

1'nolu kısıt kesme planında bir sipariş parçasının boydan kaç adet yer aldığı (y_{jk}), 2'nolu kısıt ise bir sipariş parçasının bir kesme planında toplamda kaç adet yer aldığı hesaplanması içindir. 3'nolu kısıt talep kısıtıdır. Bir kesme planına yerleştirilen tüm sipariş parçalarının toplam eninin ana sipariş parçasının enini aşmaması 4'nolu kısıt ile sağlanmaktadır. 5'nolu kısıt toplam kullanılan kesme planı miktarının ana malzemenin boyunu aşmaması içindir. 6, 7'nolu kısıtlar x_k ve z_k için, 8, 9'nolu kısıtlar ise y_{jk} ve w_{jk} için ilişki kısıtıdır. Buna göre kullanılmayan bir kesme planı için o kesme planının kullanım miktarı değişkeni değer alamayacak, bir sipariş parçası bir kesme planında yer almıyorsa da o sipariş parçasının o kesme planında enden kaç tane yer aldığı değişkeni değer alamayacaktır. 10'nolu kısıt teknik kısıt olup, bir kesme planında en fazla c tane farklı sipariş parçasının yer alabileceğini göstermektedir. 11'nolu kısıt teknik kısıt olup, bir sipariş parçası bir kesme planında yer alıyorsa, ana malzemenin enine en fazla t şerit halinde yerleştirilebileceğini gösterir. (12-16) kısıtları işaret kısıtlarıdır. Problemde (17, 18) ile verilen iki tane amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. İlki kullanılan kesme planlarının toplam boyunun değeri ise kullanılan kesme planı çeşidinin enküçüklenmesi içindir. Bu iki amaç fonksiyonu 19'nolu denklemde görüldüğü gibi, ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir.

Yukarıda verilen M1 modeli, 2'nolu kısıttan görüldüğü gibi doğrusal olmayan yapıdadır. Bu kısıtta y_{jk} ve γ_{jk} ile gösterilen ve sırasıyla, j. sipariş parçasından k. kesme planında enden yer alan miktar (adet) ve j. sipariş parçasından k. kesme planında boydan yer alan miktar (adet) olarak tanımlanan karar değişkenlerinin çarpım ifadesi yer almaktadır. 2'nolu kısıt matematiksel model kısmında da açıklandığı gibi bir sipariş parçasının bir kesme planında toplamda kaç adet yer aldığı hesaplanması içindir. Görüldüğü gibi bu kısıtta iki karar değişkeninin çarpımı yer aldığı için doğrusallık bozulmaktadır. Bu model doğrusallaştırılarak izleyen bölümde detayları verilecek olan M2 modeli elde edilmiştir.

4. M2 MODELİ: M1 MODELİNİN

DOĞRUSALLAŞTIRILMASI

(M2 MODEL: LINEARIZATION OF M1 MODEL)

M1 modelinde j sipariş parçasının k kesme planında toplamda kaç adet yer aldığı (μ_{jk}) hesaplanması için kullanılan (2) numaralı kısıt y_{jk} ve γ_{jk} karar değişkenlerinin çarpımını içerdiğinden doğrusal değildir. Bu kısıtı doğrusallaştırabilmek için M2 modelinde s_{jkr} karar değişkeni tanımlanmıştır. s_{jkr} j. sipariş parçası, k. kesme planında enden r sıra yer alıyorsa 1, almıyorsa 0 değerini alan bir 0-1 karar değişkenidir. α_{jk} değişkeni ise M2 modelinde yeni tanımlanmış olan bir diğer değişkendir ve j. sipariş parçasından k. kesme planının toplam kullanım miktarına boydan sığan miktarı göstermektedir. M1 modelindeki 2'nolu kısıt yerine M2 modelinde 23'nolu kısıt önerilmiştir. Bu kısıtta j parçasının enden yer aldığı sıra sayısı olan r değeri kesme planına boydan sığındığı değer olan

α_{jk} karar değişkeni ile çarpılarak μ_{jk} değeri doğrusal bir ilişki ile hesaplanabilir duruma gelmiştir.

M1 modelinin doğrusallaştırılması ile elde edilen M2 modeli aşağıda verilmiştir. Sadece M1 modelinde verilmemiş olan indis, parametre ve karar değişkenleri tanımlanmıştır.

İndis

r : sipariş parçasının kesme planında enden yer aldığı adet indisi $r \in \{1, \dots, e_{nj} \{q_j\}\}$

Parametreler

q_j : j. sipariş parçasının ana malzeme enine en fazla sığabileceği miktar (adet) $q_j = \left\lfloor \frac{G}{e_j} \right\rfloor$

M' : yeterince büyük pozitif sayı $M' = \left\lfloor \frac{G}{e_j} \right\rfloor \left\lfloor \frac{L}{b_j} \right\rfloor$

M'' : yeterince büyük pozitif sayı $M'' = e_{nj} q_j$

Karar değişkenleri

s_{jkr} : j. sipariş parçasından k. kesme planında enden r sıra yer alıyorsa 1, almıyorsa 0

α_{jk} : j. sipariş parçasından k. kesme planının toplam kullanım miktarına boydan sığan miktar (adet)

σ_k : k. kesme planının kullanım miktarı* (adet)

*Matematiksel modelde her kesme planının 100 cm. olduğu varsayılırsa, σ_k karar değişkeni 100 cm.'lik kesme planlarından kaç kez kullanıldığını göstermektedir. Bu nedenle kesme planının kullanım sayısı, aynı zamanda kaç metre kullanıldığı anlamına da gelmektedir.

(M2):

Kısıtlar

(3-5, 12-16)

$$\mu_{jk} \leq y_{jk} M' \quad \forall j, k \quad (20)$$

$$\mu_{jk} \geq y_{jk} \quad \forall j, k \quad (21)$$

$$\alpha_{jk} \leq \frac{100\sigma_k}{b_j} \quad \forall j, k \quad (22)$$

$$\mu_{jk} \leq r \alpha_{jk} + (1 - s_{jkr}) M' \quad \forall j, k, r \mid r \leq q_j \quad (23)$$

$$y_{jk} = \sum_{r \mid r \leq q_j} r s_{jkr} \quad \forall j, k \quad (24)$$

$$\sum_{r \mid r \leq q_j} s_{jkr} \leq 1 \quad \forall j, k \quad (25)$$

$$\sum_j \sum_{r \mid r \leq q_j} s_{jkr} \leq c \quad \forall k \quad (26)$$

$$\sum_j y_{jk} \leq t \quad \forall k \quad (27)$$

$$\sum_j y_{jk} \leq \sigma_k M'' \quad \forall k \quad (28)$$

$$\sigma_k \geq z_k \quad \forall k \quad (29)$$

$$\sigma_k \leq L z_k \quad \forall k \quad (30)$$

$$x_k \geq b_j \alpha_{jk} \quad \forall j, k \quad (31)$$

$$s_{jkr} \in \{0,1\} \quad \forall j, k, r \quad (32)$$

$$\sigma_k \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall k \quad (33)$$

$$\alpha_{jk} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall j, k \quad (34)$$

Birleştirilmiş amaç fonksiyonu
(19)

20, 21'nolu kısıtlar, μ_{jk} ve y_{jk} değişkenleri arasındaki ilişki kısıtlarıdır. y_{jk} sıfır μ_{jk} değişkeninin de sıfır olmasını sağlarlar. 22'nolu kısıt j . sipariş parçasının k . kesme planında boydan kaç adet yer aldığı hesaplatılması içindir. Karar değişkeni σ_k , k . kesme planının metre cinsinden kaç adet kullanıldığını belirttiğinden cm. ye çevirmek için 100 ile çarpılmaktadır. 23'nolu kısıt j . sipariş parçasının k . kesme planının toplam kullanım miktarında tam olarak kaç adet yer aldığı hesaplandığı kısıttır. 24'nolu kısıt bir sipariş parçasının bir kesme planında enden kaç adet yer aldığı hesaplatılması içindir. 25'nolu kısıt bir sipariş parçası bir kesme planında kullanılıyorsa enden sığabileceği miktarın tek bir değer olabileceğini gösterir. 26'nolu kısıt kesme planında en fazla c farklı sipariş parçası yer alabileceğini, 27'nolu kısıt ise bir kesme planında enden kesilebilecek en fazla t tane sipariş parçası olabileceğini gösterir. 28'nolu kısıt y_{jk} ile σ_k arasındaki, 29, 30'nolu kısıtlar ise σ_k ve z_k arasındaki ilişki kısıtlarıdır. 31'nolu kısıt kesme planının kullanılan net miktarının hesaplanması içindir. (32-34) kısıtlar işaret kısıtlarıdır.

Literatür araştırmasında da belirtildiği gibi bu tür problemler için kesme planlarını önceden türeterek karar modeline girdi şeklinde vermek de bir çözüm yaklaşımıdır. Ancak bu durumda problem boyutuna bağlı olarak türetilmesi gereken kesme planı sayısı çok büyük olabilmektedir. İzleyen bölümde önceden türetilmiş kesme planlarını kullanacak şekilde geliştirilen matematiksel model (M3) verilmektedir. Rassal olarak türetilen test problemleri önerilen M1 ve M2 modelleri ile çözüldüğünde elde edilen sonuçlar, M3 modelinin sonuçları ile ileriki bölümlerde karşılaştırılacaktır.

5. M3 MODELİ: ÖNCEDEN TÜRETİLMİŞ KESME PLANLARINI KULLANAN MATEMATİKSEL MODEL (M3 MODEL: THE MATHEMATICAL MODEL USES GENERATED CUTTING PATTERNS)

Önceki bölümlerde tanımlanmamış olan indis, parametre ve karar değişkenleri ve M3 modeli aşağıda verilmiştir. M1 ve M2 modellerinde karar değişkeni olan y_{jk} M3 modelinde

kesme planları önceden türetildiği için parametredir ve Y_{jk} ile gösterilmiştir.

Parametreler

p : kesme planı sayısı

Y_{jk} : k . kesme planında yer alan j . sipariş parçasının kesme planına enden kaç adet sığıdığı (*adet*)

(M3):

Kısıtlar

(3, 5, 12, 14, 15, 22, 29-31, 33, 34),

$$\mu_{jk} = Y_{jk} \alpha_{jk} \quad \forall j, k \quad (35)$$

Birleştirilmiş amaç fonksiyonu

(19)

35'nolu kısıt j . sipariş parçasının k . kesme planının toplam kullanım miktarında tam olarak yer aldığı miktarı hesaplayan kısıttır. İzleyen bölümde deneysel sonuçlara yer verilmektedir. M3 modeli için kullanılan kesme planlarının türetilmesine dönük şu açıklamalar yapılabilir:

Kesme planları oluşturulurken göz önünde bulundurulması gereken teknik kısıtlar aşağıda sıralanmıştır:

- Aynı kağıt kombinasyonu ve ondüle cinsine sahip olmak şartıyla, en fazla c adet farklı sipariş parçası aynı kesme planında yer alabilir.
- En fazla t sıra kesim yapılabilir.

Kesme planları bu özellikleri taşıyacak şekilde, Microsoft Excel ve Visual Basic Application programlama dili kullanılarak tam sayımlama yöntemiyle türetilmiştir.

Altıncı bölüm, yukarıda açıklanan üç matematiksel modelin çözüm performanslarının, test problemleri kullanılarak karşılaştırılmasına dönük deneysel çalışmaları ve sonuçlarını sunmaktadır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR (COMPUTATIONAL RESULTS)

Önerilen modellerin performanslarını gösterebilmek için, farklı sayıda sipariş parçasına sahip test problemleri '*enfazla iki çeşit parça içeren*' ve '*en fazla üç çeşit parça içeren*' kesme planlarına izin verilen iki durum için M1, M2 ve M3 modelleri ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Kullanılan test problemlerinin özellikleri izleyen alt başlıkta ayrıntısıyla verilmiştir. Elde edilen test sonuçları ise bölüm 6.2'de yer almaktadır.

6.1. Test Problemleri (Test Problems)

Bu çalışmada kullanılan test problemleri, Kasımbeyli vd. [25] tarafından bir boyutlu kesme problemleri için türetilmiş

olan örneklerin 1,5 boyutlu probleme uyarlanması ile elde edilmiştir. Bunun için, bir boyutlu problemde yer alan sipariş parçalarının enleri belirli bir parametre ile çarpılarak boy değerleri türetilmiştir.

Kullanılan dört örnek problemin parametre değerleri aşağıda verilmiştir.

Örnek 1.

$$\begin{aligned} n &= 5, \\ G &= 110, \\ t &= 8, \\ e &= (10, 20, 30, 40, 60), \\ b &= (13, 26, 39, 52, 78), \\ d &= (6, 11, 4, 20, 15), \\ K(c \leq 2) &= 91, \\ K(c \leq 3) &= 132. \end{aligned}$$

Örnek 2.

$$\begin{aligned} n &= 10, \\ G &= 120, \\ t &= 9, \\ e &= (10, 20, 30, 40, 60, 15, 25, 35, 45, 65), \\ b &= (13, 26, 39, 52, 78, 19, 32, 45, 58, 84), \\ d &= (7, 11, 3, 20, 15, 5, 10, 13, 20, 15), \\ K(c \leq 2) &= 357, \\ K(c \leq 3) &= 918. \end{aligned}$$

Örnek 3.

$$\begin{aligned} n &= 20, G = 130, t = 10, \\ e &= (10, 20, 30, 40, 60, 15, 25, 35, 45, 65, 11, 12, 13, 14, 21, 22, 23, 24, 31, 32), \\ b &= (13, 26, 39, 52, 78, 19, 32, 45, 58, 84, 14, 15, 16, 18, 27, 28, 29, 31, 40, 41), \\ d &= (16, 11, 13, 20, 15, 15, 10, 13, 20, 15, 15, 11, 13, 20, 15, 15, 10, 13, 2, 15), \\ K(c \leq 2) &= 2.670, \\ K(c \leq 3) &= 21.409. \end{aligned}$$

Örnek 4.

$$\begin{aligned} n &= 30, \\ G &= 280, \\ t &= 28, \\ e &= (10, 20, 30, 40, 60, 15, 25, 35, 45, 65, 11, 12, 13, 14, 21, 22, 23, 24, 31, 32, 33, 34, 41, 42, 43, 44, 51, 52, 53, 54), \\ b &= (13, 26, 39, 52, 78, 19, 32, 45, 58, 84, 14, 15, 16, 18, 27, 28, 29, 31, 40, 41, 42, 44, 53, 54, 55, 57, 66, 67, 68, 70), \\ d &= (5, 11, 3, 20, 15, 5, 10, 13, 20, 15, 5, 11, 3, 20, 15, 5, 10, 13, 20, 15, 5, 10, 13, 20, 15), \\ K(c \leq 2) &= 22.399, \\ K(c \leq 3) &= 589.208. \end{aligned}$$

Burada, $K(c \leq 2)$ ve $K(c \leq 3)$ sırasıyla en fazla iki çeşit ve en fazla üç çeşit parça içermesine izin verildiğinde, tamsayımleme ile türetilen kesme planı sayısıdır.

6.2. Test Sonuçları (Test Results)

Türetilen tüm örnekler, M1, M2 ve M3 modelleri ile GAMS paket programının Cplex çözücüsü kullanılarak Intel (R) Core (TM) i7- 5700 HQ CPU 2.70 GHz işlemcisi, 8 GB ram özelliklerine sahip bir bilgisayarda çözülmüştür. Elde edilen çözümler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde örnek adı ve kesme planlarında en fazla kaç çeşit parçanın yer almasına izin verildiği (c) bilgileri yer almaktadır. Diğer üç bölümde ise sırasıyla M1, M2 ve M3 modelleri ile elde edilmiş kesme planlarının toplam boyu (f_1), kullanılan toplam kesme planı sayısı (f_2), skalerleştirilmiş amaç fonksiyonu değeri (f) ve saniye cinsinden çözüm süresi (s) verilmiştir. Eniyi çözümün elde edildiği sonuçlar italik yazılmıştır. Eniyi çözümlerine erişilebilen problemler için elde edilen kesme planları, her biri ayrı bir tabloda (Tablo 2-Tablo 6) olmak üzere ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Tablo 1'den görülebileceği gibi Örnek

Tablo 1. M1, M2 ve M3 modellerinin karşılaştırılması (M1, M2 and M3 models' comparison)

	(Doğrusal olmayan bütünlük)					(Doğrusal bütünlük)				(Önceden türetilmiş kesme planı)			
	M1					M2				M3			
	c	f_1	f_2	f	s	f_1	f_2	f	s	f_1	f_2	f	s
Örnek 1	≤ 2	1.274	3	0,77	28	1.274	3	0,77	1	1.274	3	0,77	1
	≤ 3	1.326	2	0,62	31	1.326	2	0,62	1	1.326	2	0,62	1
Örnek 2	≤ 2	-	-	-	200.000	2.850	5	0,97	8.793	2.850	5	0,97	2
	≤ 3	-	-	-	200.000	2.719	4	0,84	2.493	2.719	4	0,84	41
Örnek 3	≤ 2	-	-	-	200.000	3.144	10	0,82	66.049*	3.101	10	0,81	1.279
	≤ 3	-	-	-	200.000	3.353	7	0,69	5.000*	3.191	7	0,67°	200.000
Örnek 4	≤ 2	-	-	-	200.000	-	-	-	5.000*	2.762	15	0,67 ⁺	200.000
	≤ 3	-	-	-	200.000	-	-	-	5.000*	-	-	-	200.000

*hafıza yetmemesi nedeniyle süre limitinden önce durdu.

°eniye çözüme uzaklık %0,03 tür.

+eniye çözüme uzaklık %11,3 tür.

1 ve Örnek 2'nin $c \leq 2$ ve $c \leq 3$ için tüm matematiksel modellerle eniyi çözümlerine ulaşmıştır. M1 modelinin çözüm süresi, Örnek 1 $c \leq 2$ ve $c \leq 3$ için sırasıyla 28 ve 31 saniyedir. M2 ve M3 modellerinin karşı gelen çözüm süreleri ise sadece bir saniyedir. M1 modeli ile Örnek 2, Örnek 3 ve Örnek 4 için herhangi bir çözüm bulunamamıştır. Öte yandan M2 ile Örnek 2'nin $c \leq 2$ ve $c \leq 3$ durumları için çözümü, M3 modeline göre daha uzun ancak makul sürede bulunabilmiştir. M3 modeline önceden türetilmiş kesme planları girdi olarak verilirken, M2'nin, kesme planlarını da türetecek yapıda olduğu hatırlanırsa, M2'nin çözüm süresinin kabul edilebilir olduğu görülmektedir. Nitekim kesme planlarını önceden türetmenin de önemli bir güçlük olduğu, üstelik ayrıca zaman gerektirdiği bilinmektedir. Son olarak örnek 4'ün sadece $c \leq 2$ durumu, M3 modeliyle çözülebilmektedir. Örnek 1'in $c \leq 2$ için elde edilen kesme planları Tablo 2'de, $c \leq 3$ için elde edilen kesme planları ise Tablo 3'de verilmiştir. Örnek 1'in $c \leq 2$ için elde edilen kesme planları ayrıca Şekil 1'de çizim olarak da verilmiştir.

Tablo 2, Tablo 4 ve Tablo 6, dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde kesme planı numarası, ikinci ve üçüncü bölümlerde kesme planında yer alan parçaların; numarası, eni, kesme planının eninde kaç adet yer aldığı, boyu ve

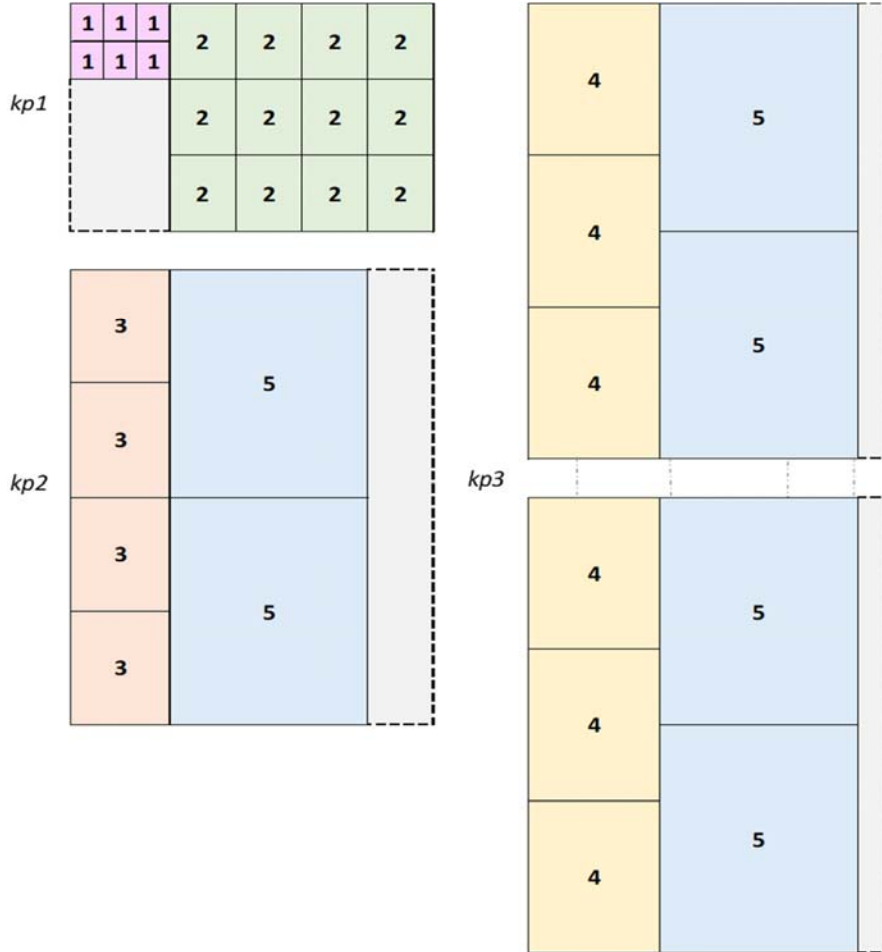
kesme planının boyunda kaç adet yer aldığı bilgileri bulunmaktadır. Son bölümde ise ilgili kesme planının (kp) eni ve boyu verilmiştir. Tabloların en alt iki satırında sırası ile elde edilmiş kesme planlarının toplam boyu (f_1) ve kullanılan toplam kesme planı sayısı (f_2) yer almaktadır.

Tablo 2. Örnek 1, $c \leq 2$ için eniyi çözümde türetilen kesme planları (Optimum cutting patterns for instance 1, $c \leq 2$)

Kesme Planı	Parça	Adet	Parça	Adet	Toplam	
kp1	en	10	3	20	4	110
	boy	13	2	26	3	78
	toplam	6		12		
kp2	en	30	1	60	1	90
	boy	39	4	78	2	156
	toplam	4		2		
kp3	en	40	1	60	1	100
	boy	52	20	78	13	1.040
	toplam	20		13		

$$f_1 (\text{kp top boy}) = 1.274$$

$$f_2 (\text{kp sayısı}) = 3$$



Şekil 1. Örnek1, $c \leq 2$ için eniyi çözümde türetilen kesme planları (Optimum cutting patterns for instance 1, $c \leq 2$)

Tablo 3. Örnek1, $c \leq 3$ için eniyi çözümde türetilen kesme planları
(Optimum cutting patterns for instance 1, $c \leq 3$)

Kesme Planı	Parça	Adet	Parça	Adet	Parça	Adet	Toplam
kp1	en	10	1	40	1	60	110
	boy	13	6	52	20	78	1.170
	toplam	6		20		15	
kp2	en	20	2	30	2		100
	boy	26	6	39	2		156
	toplam	12		4			

$f_1 = 1.326$
 $f_2 = 2$

Tablo 2'den görülebileceği gibi Örnek 1 $c \leq 2$ için eniyi çözümde üç kesme planı türetilmiştir. İlk kesme planı (*kp1*), eni 10 br., boyu 13 br. olan parça 1'den enden 3 adet (yan yana), boydan 2 adet (alt alta) ve eni 20 br., boyu 26 br. olan parça 2'den enden 4 adet boydan ise 3 adet konularak elde edilmiştir. Bir başka deyişle *kp1*'de parça 1 alt alta 2 sıra, parça 2 ise alt alta üç sıra yer almaktadır. Böylece *kp1*'in toplam eni ($10 \times 3 + 20 \times 4 =$) 110 br. dir. Kesme planının boyunu ise, planda yer alan 2 parçanın toplam kullanılan boy uzunluklarının daha büyük olanı belirlemektedir. Böylece *kp1*'in boyu $enb\{13 \times 3, 26 \times 3\} = 78$ 'dir. *kp1* Şekil 1'de çizim olarak da verilmiştir. Şekil 1'den de görülebileceği gibi *kp1*'in boyunu parça 2 belirlemiştir. Bu kesme planında yer alan diğer parça olan parça 1'in altında yer alan, numaralandırılmamış ve kenarları kesikli çizgi ile çizilmiş alan kesme planının firesidir.

Tablo 3 ve Tablo 5, beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde kesme planı, ikinci, üçüncü ve dördüncü bölümlerde ise kesme planında yer alan parçaların; numarası, eni, kesme planının eninde kaç adet yer aldığı, boyu ve kesme planının boyunda kaç adet yer aldığı bilgileri bulunmaktadır. Son bölümde ilgili kesme planının eni ve boyu verilmiştir. Tabloların en alt iki satırında ise sırası ile elde edilmiş kesme planlarının toplam boyu (f_1) ve kullanılan toplam kesme planı sayısı (f_2) yer almaktadır.

Tablo 3'den de görülebileceği gibi Örnek 1 $c \leq 3$ için eniyi çözümde iki kesme planı türetilmiştir. İlk kesme planı (*kp1*), parça 1'den 1 adet, parça 4'ten 1 adet ve parça 5'ten 1 adet yan yana konularak elde edilmiştir. *kp1*'in eni ($10 \times 1 + 40 \times 1 + 60 \times 1 =$) 110'dur. *kp1*'de parça 1 alt alta 6 sıra, parça 4, 20 ve parça 5 ise alt alta 15 sıra yer almaktadır. Dolayısıyla *kp1* planının boyu $= enb\{13 \times 6, 52 \times 20, 78 \times 15\} = 1.170$ 'dir. Örnek 2'nin $c \leq 2$ için eniyi çözüm ile elde edilen kesme planları Tablo 4'de, $c \leq 3$ için elde edilen kesme planları ise Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 4'den görülebileceği gibi Örnek 2 $c \leq 2$ için eniyi çözümde beş kesme planı türetilmiştir. İlk kesme planı (*kp1*), parça 9'dan 1 adet ve parça 10'dan 1 adet yan yana konularak elde edilmiştir. *kp1*'in eni ($45 \times 1 + 65 \times 1 =$) 110'dur. *kp1*'de parça 9 alt alta 20 sıra ve parça 10 ise alt alta 15 sıra yer almaktadır. Dolayısıyla *kp1* planının boyu $= enb\{58 \times 20, 84 \times 15\} = 1.260$ 'dir. Kesme planlarının toplam boyu ise 2.850 olarak elde edilmiştir.

Tablo 4. örnek2, $c \leq 2$ için eniyi çözüm ile türetilen kesme planları (Optimum cutting patterns for instance 2, $c \leq 2$)

kesme planı	parça	adet	parça	adet	toplam
kp1	en	45	1	65	110
	boy	58	20	84	1.260
	toplam	20		15	
kp2	en	20	2	25	115
	boy	26	6	32	156
	toplam	12		12	
kp3	en	10	3	30	120
	boy	13	3	39	39
	toplam	9		3	
kp4	en	15	1	35	120
	boy	19	5	45	225
	toplam	5		15	
kp5	en	40	1	60	100
	boy	52	20	78	1.170
	toplam	20		15	

$f_1 = 2.850$
 $f_2 = 5$

Tablo 5'den görülebileceği gibi Örnek 2 $c \leq 3$ için eniyi çözümde dört kesme planı türetilmiştir. Kesme planlarının üç tanesi (*kp1*, *kp2*, *kp4*) üç çeşit parça içerirken *kp3* sadece bir çeşit parçadan oluşmaktadır. İlk kesme planı (*kp1*), parça 1'den 1 adet, parça 9'dan 1 adet ve parça 10'dan 1 adet yan yana konularak elde edilmiştir. *kp1*'in eni ($10 \times 1 + 45 \times 1 + 65 \times 1 =$) 120'dir. *kp1*'de parça 1 alt alta 9 sıra, parça 9, 20 ve parça 10 ise alt alta 15 sıra yer almaktadır. Dolayısıyla *kp1* planının boyu $= enb\{13 \times 9, 58 \times 20, 84 \times 15\} = 1.260$ 'dir. Kesme planlarının toplam boyu ise 2.719 olarak elde edilmiştir. Örnek 3'ün $c \leq 2$ için sadece M3 modeli ile eniyi çözümüne erişilebilmiştir. M3 modeli ile elde edilen kesme planları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6'dan görülebileceği gibi Örnek 3 $c \leq 2$ için eniyi çözümde on kesme planı türetilmiştir. İlk kesme planı (*kp1*), parça 1'den 1 adet ve parça 4'den 3 adet yan yana konularak elde edilmiştir. *kp1*'in eni ($10 \times 1 + 40 \times 3 =$) 130'dur. *kp1*'de parça 1 alt alta 16 sıra ve parça 4 ise alt alta 7 sıra yer almaktadır. Dolayısıyla *kp1* planının boyu $= enb\{13 \times 16, 52 \times 7\} = 364$ 'tür. Kesme planlarının toplam boyu ise 3.101 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2-6'da verilen kesme planları genel olarak değerlendirilecek olursa, önerilen matematiksel modellerle

Tablo 5. örnek2, $c \leq 3$ için eniyi çözüm ile türetilen kesme planları
(Optimum cutting patterns for instance 2, $c \leq 3$)

Kesme Planı	Parça	Adet	Parça	Adet	Parça	Adet	Toplam
kp1	en	1	10	1	9	45	120
	boy		13	9		58	1.260
	toplam		9			20	15
kp2	en	4	40	2	6	15	120
	boy		52	10		19	520
	toplam		20			8	10
kp3	en	5	60	2			120
	boy		78	8			624
	toplam		16				
kp4	en	2	20	1	3	30	120
	boy		26	11		39	315
	toplam		11			3	14

$f_1 = 2.719$
 $f_2 = 4$

30 çeşide kadar sipariş parçası içeren problemler için kesme planı sayısını ve kullanılacak toplam ana malzeme boyunu enküçükleyecek kesme planlarının başarılı bir şekilde türetilbildiği görülmektedir.

Tablo 6. örnek3, $c \leq 2$ için eniyi çözüm ile türetilen kesme planları (Optimum cutting patterns for instance 3, $c \leq 2$)

Kesme Planı	Parça	Adet	Parça	Adet	Toplam
kp1	en	1	10	1	130
	boy		13	16	364
	toplam		16		21
kp2	en	2	20	2	130
	boy		26	6	195
	toplam		12		15
kp3	en	5	60	1	125
	boy		78	15	1.260
	toplam		15		15
kp4	en	6	15	5	130
	boy		19	3	57
	toplam		15		20
kp5	en	7	25	2	122
	boy		32	5	160
	toplam		10		15
kp6	en	8	35	1	125
	boy		45	13	585
	toplam		13		20
kp7	en	12	12	3	128
	boy		15	4	87
	toplam		12		12
kp8	en	13	13	5	127
	boy		16	3	48
	toplam		15		2
kp9	en	14	14	2	124
	boy		18	8	205
	toplam		16		15
kp10	en	15	21	3	129
	boy		27	5	140
	toplam		15		15

$f_1 = 3.101$
 $f_2 = 10$

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, parça çeşidi ve şerit sayısı kısıtlı 1,5 boyutlu kesme problemi için, kesme planlarını da türeten yeni bir matematiksel model geliştirilmiş, model, doğrusal olmayan yapısı sebebiyle doğrusallaştırılmıştır. Ayrıca kesme planlarının önceden türetildiği üçüncü bir model de geliştirilmiştir. Modellerin çözüm performansını değerlendirebilmek için, türetilen test problemleri geliştirilen modellerle çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Önceden türetilmiş kesme planlarını kullanan model beklendiği üzere tüm problemleri diğer modellerden daha kısa sürede çözmüştür. Ancak, kesme planlarını önceden türetmenin de önemli bir güçlük olduğu üstelik ayrıca zaman gerektirdiği bilinmektedir. Öte yandan, kesme planlarını kendisi türeten doğrusal modelin de belirli büyüklüğe kadar makul sürede çözüm bulabildiği görülmüştür. Bu çalışmada, bütünsel problem için geliştirilen matematiksel modelin doğrusal yapıya kavuşturulmasının, hem literatür için hem de ele alınan problemin yaşandığı üretim süreçleri için önemli bir kazanım olacağı düşünülmektedir.

Gerçek hayatta sipariş parçası ve ana malzeme çeşitliliğinin fazla olduğu sektörlerde bile kağıt cinsi, ondüla türü ve teknik kesme kısıtları vb. sebeplerle çoğu durumda problemin doğası gereği birlikte ele alınabilir sipariş parçası sayısı önemli ölçüde azalabilmektedir. Bu nedenle önerilen yaklaşımın çok sayıda gerçek sistemde uygulanabileceği düşünülmektedir. Ancak, daha büyük boyutlarda problem çözümüne ihtiyaç duyulması halinde modellerin çözümü için metasezgisel yaklaşımlar denenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Morabito R.N., Arenales M.N., Arcaro V.F., And-or-graph approach for two-dimensional cutting problems, European Journal of Operational Research, 58 (2), 263-271, 1992.
2. Hifi M, Zissimopoulos V., Constrained two-dimensional cutting: An improvement of Christofides

- and Whitlock's exact algorithm, *Journal of the Operational Research Society*, 48 (3), 324-331, 1997.
3. Dyckhoff H, Kruse H.J., Abel D., Gal T., Trim Loss and Related Problems, *OMEGA The International Journal of Management Science*, 13 (1), 59-72, 1985.
 4. Wascher, G., Haußner, H., Schumann, H., An improved typology of cutting and packing problems, *Working Paper (24)*, Last Revision: 2005-05-17, Otto von Guericke University, 38, 2005.
 5. Dyckhoff, H., A typology of cutting and packing problems, *European Journal of Operational Research*, 44, 145–159, 1990.
 6. Gramani, M.C.N., Franca, P.M., Arenales, M.N., Lagrangian relaxation approach to a coupled lot-sizing and cutting stock problem, *International Journal of Production Economics*, 119 (2), 219-227, 2009.
 7. Berberler, M.E., Nuriyev, U.G., A new heuristic algorithm for the one-dimensional cutting stock problem, *Applied and Computational Mathematics*, 9 (1), 19-30, 2010.
 8. Cherri, A.C., Arenales, M.N., Yanasse, H.H., Poldi, K.C., Vianna, A.C.G., The one-dimensional cutting stock problem with usable leftovers - A survey, *European Journal of Operational Research*, 236 (2), 395-402, 2014.
 9. Kim, K., Kim, B.I., Cho, H., Multiple-choice knapsack-based heuristic algorithm for the two-stage two-dimensional cutting stock problem in the paper industry, *International Journal of Production Research*, 52 (19), 5675-5689, 2014.
 10. Furini, F., Malaguti, E., Thomopulos, D., Modeling Two-Dimensional Guillotine Cutting Problems via Integer Programming, *Inform Journal on Computing*, 28 (4), 736-751, 2016.
 11. Lin, W.S., Mu, D., Wu, J.Z., Study on One-Dimensional Wood Board Cutting Stock Problem Based on Adaptive Genetic Algorithm, *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 9 (4), 95-101, 2016.
 12. Coelho, K.R., Cherri, A.C., Baptista, E.C., Jabbour, C.J.C., Soler, E.M., Sustainable operations: The cutting stock problem with usable leftovers from a sustainable perspective, *Journal of Cleaner Production*, 167, 545-552, 2017.
 13. Vanzela, M., Melega, G.M., Rangel, S., de Araujo, S.A., The integrated lot sizing and cutting stock problem with saw cycle constraints applied to furniture production, *Computers & Operations Research*, 79, 148-160, 2017.
 14. Melega, G.M., de Araujo, S.A., Jans, R., Classification and literature review of integrated lot-sizing and cutting stock problems, *European Journal of Operational Research*, 271 (1), 1-19, 2018.
 15. Tanir, D., Ugurlu, O., Guler, A., Nuriyev, U., One-dimensional cutting stock problem with divisible items: a case study in steel industry, *TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics*, 9 (3), 473-484, 2019.
 16. Christofolletti, M.M., de Araujo, S.A., Cherri, A.C., Integrated lot-sizing and cutting stock problem applied to the mattress industry, *Journal of the Operational Research Society*, DOI: 10.1080/01605682.2020.1718013.
 17. Kokten E.S., Sel C., Cutting stock problem in the wood products industry: A two-stage solution approach, *International Transactions in Operational Research*, 1–29. 2020. DOI: 10.1111/itor.12802
 18. Chauny F., Loulou R., Sadones S., Soumis F., A Two-phase heuristic for the two-dimensional cutting-stock problem, *Journal of the Operational Research Society*, 42 (1), 39-47, 1991.
 19. Haessler R.W., Sweeney P.E., Cutting stock problems and solution procedures, *European Journal of Operational Research*, 54 (2), 141-150, 1991.
 20. Song, X., Chu, C.B., Nie, Y.Y., Bennel, J.A., An iterative sequential heuristic procedure to a real-life 1.5-dimensional cutting stock problem, *European Journal of Operational Research*, 175, 1870–1889, 2006.
 21. Adakçı, S., Stok kesme problemi: Alüminyum sektöründe uygulaması, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
 22. Bayır, F., Kesme problemine sezgisel bir yaklaşım, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Fakültesi Sayısal Yöntemler Anabilim Dalı, İstanbul, 2012.
 23. Saraç T., Özdemir M.S., A genetic algorithm for 1,5 dimensional assortment problems with multiple objectives, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2718, 41-51, 2003.
 24. Gasimov, R.N., Sipahioglu, A., Sarac, T., A multi-objective programming approach to 1.5-dimensional assortment problem, *European Journal of Operational Research*, 179 (1), 64-79, 2007.
 25. Kasimbeyli N., Saraç T., Kasimbeyli R., A two-objective mathematical model without cutting patterns for one-dimensional assortment problems, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 235 (16), 4663-4674, 2011.



A personnel scheduling model containing thermal comfort and equivalent metabolic rate factors

Aylin Adem*^{ID}, Metin Dağdeviren^{ID}

Industrial Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- A mathematical model proposal was presented for the ergonomic job rotation scheduling.
- The importance of thermal comfort in the work environment was pointed out.
- Both metabolic ratio equal values and thermal comfort parameters were included in the proposed model.

Keywords:

- Job Rotation Schedules
- Ergonomics
- Mathematical Modeling
- Thermal Comfort
- Equivalent Metabolic Rate

Article Info:

Research Article

Received: 08.02.2020

Accepted: 20.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.685805

Correspondence:

Author: Aylin Adem

e-mail:

aylinadem@gazi.edu.tr

phone: +90 312 582 3822

Graphical/Tabular Abstract

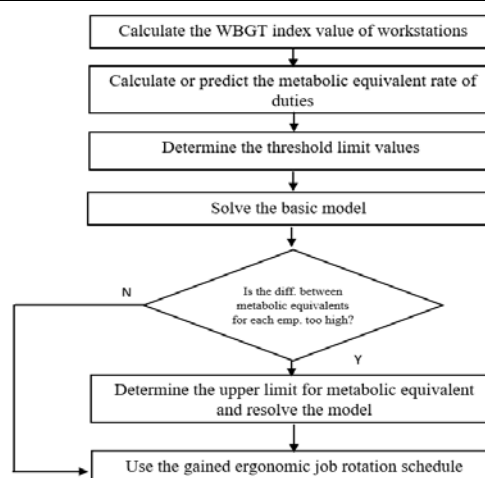


Figure A. The proposed approach

Purpose: Thermal comfort is one of the most important physical risks encountered in work systems. The applicability of the climatic precautions to be taken to provide thermal comfort for the employees in production environments may not be possible due to required quality characteristics of the products or economic reasons. In this case, protecting employees from heat stress and heat stress-related diseases is only possible with certain administrative measures. One of the quick and effective administrative measures that can be taken will be the rotation of employees among duties. The purpose of this study is to determine optimal job rotation schedules which includes thermal comfort and metabolic equivalent rates.

Theory and Methods: Firstly, a mathematical model with assignment cost minimization and thermal comfort constraint was proposed. After that, the proposed model was resolved by determining an upper limit on the equivalent metabolic rate to ensure the protection of the employees in every respect. The proposed models were developed using a mixed-integer mathematical modelling approach.

Results: The proposed models were solved with the help of the Game 24.9.2 package program. The job rotation schedules which include both traditional and ergonomic characteristics were obtained.

Conclusion: According to the gained results, there is a trade-off between ergonomic and economic aims. The proposed model can be employed in any production environment with small changes. Exposure to extreme temperatures in production environments causes a number of negativities such as attention deficit and somnolence. For this reason, it is an important requirement including the thermal comfort parameter to job rotation schedules



Termal konfor ve metabolik oran eşiti faktörlerini içeren personel çizelgeleme modeli

Aylin Adem*^{ID}, Metin Dağdeviren^{ID}

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Bu çalışmada ergonomik iş değişim çizelgesi için matematiksel model önerisi sunulmuştur
- İş ortamındaki termal konforun önemine dikkat çekilmiştir
- Hem metabolik oran eşiti değerleri hem de termal konfor parametreleri önerilen modele dahil edilmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.02.2020

Kabul: 20.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.685805

Anahtar Kelimeler:

İş değişim çizelgesi,
ergonomi,
matematiksel modelleme,
termal konfor,
metabolik oran eşiti

ÖZET

Termal konfor iş sistemlerinde karşılaşılan önemli fiziksel risklerden biridir. Özellikle yaz aylarındaki mevsimsel sıcaklıklara ek olarak çalışma ortamındaki artan sıcaklık çalışan verimliliğini olumsuz olarak etkilemektedir. İş sistemlerinde, çalışan açısından termal konforun sağlanması için alınması gereken iklimik önlemlerin uygulanabilirliği, ürünlerin taşınması gereken kalite özellikleri ya da ekonomik sebepler nedeni ile çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu durumda çalışanların aşırı sıcaklardan ve bu sıcaklığın çalışmada oluşturacağı ısı stresi ve ısı stresine bağlı rahatsızlıklardan korunması ancak yönetsel birtakım önlemlerle mümkün olabilmektedir. Bu noktada alınabilecek hızlı ve etkili yönetsel önlemlerden biri de çalışanların işler arasında rotasyona tabi tutulması ile termal açıdan ortaya çıkabilecek risklerin çalışanlar arasında paylaşılmasıdır. Bu çalışmada çalışanların termal açıdan yaptıkları işlerin metabolik ağırlığına uygun sıcaklıklara maruz kalmalarını sağlayan, aynı zamanda klasik işletme amaçlarını da dikkate alan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Termal konfor parametresinin sağlanması sırasında işlerin metabolik oran eşiti değerlerinin de dikkate alınması, çalışanların her iki parametre açısından da korunmasını sağlamıştır.

A personnel scheduling model containing thermal comfort and equivalent metabolic rate factors

H I G H L I G H T S

- In this study, a mathematical model proposal was presented for the ergonomic job rotation scheduling
- The importance of thermal comfort in the work environment was pointed out
- Both metabolic ratio equal values and thermal comfort parameters were included in the proposed model

Article Info

Research Article

Received: 08.02.2020

Accepted: 20.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.685805

Keywords:

Job-rotation schedules,
ergonomics,
mathematical modelling,
thermal comfort,
equivalent metabolic rate

ABSTRACT

Thermal comfort is one of the most important physical risks encountered in work systems. In addition to the seasonal temperatures, especially in the summer months, the rising temperature in the work environment negatively affect the productivity of the employees. The applicability of the climatic precautions to be taken to provide thermal comfort for the employees in production environments may not be possible due to required quality characteristics of the products or economic reasons. In this case, protecting employees from heat stress and heat stress-related diseases is only possible with certain administrative measures. One of the quick and effective administrative measures that can be taken in this sense will be the rotation of employees among duties and the distribution of risks that may arise thermally among employees. In this study, a mixed-integer mathematical model, which considers both the thermal conditions of the employees and the classical economic issues about the company simultaneously, was proposed. Taking into account the metabolic rate equal values of the duties while ensuring the thermal comfort parameter enabled the protection of the employees in terms of both parameters.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: aylinadem@gazi.edu.tr, metindag@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 582 3822

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İş sistemlerindeki gelişmelere bağlı olarak, -her ne kadar fiziksel iş gücüne olan ihtiyaç azalsa da- ülkemizde ve diğer gelişmekte olan ülkelerde, özellikle Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmelerde (KOBİ) fiziksel iş gücü, üretim faaliyetlerinin gerçekleştirilmesinde hala çok önemli bir yere sahiptir. Üretimin sorunsuz devam edebilmesi, işletme ortamındaki diğer faktörlere (sermaye, makine-teçhizat vb.) olduğu kadar hatta daha yüksek oranda insan faktörünün sağlıklı ve konforlu olmasına bağlıdır. Motivasyonel sebepler ve diğer duygusal durumlar nedeni ile yönetilmesi zor olan insan kaynaklarının iş yerinde sağlıklı bir şekilde faaliyetlerini sürdürmesi aynı zamanda bazı yasal düzenlemelerle de kontrol edilmektedir. Birçok açıdan oldukça kritik olan işgücünün iş ortamındaki fiziksel ergonomik risk faktörlerine maruz kalmaları da bazı durumlarda kaçınılmaz olabilmektedir.

Demir çelik işletmeleri, briket ve seramik fabrikaları, otomotiv parçaları üreten işletmeler gibi cam ürünleri üretim işletmeleri, plastik ürünleri üreten işletmeler, mutfaklar, fırınlar gibi sıcak üretim ortamlarında görev yapan çalışanlar genellikle ağır çevresel sıcaklıklara maruz kalmakta ve bu durum onların sağlığı açısından da ciddi tehlike ve riskler oluşturarak iş verimliliğini düşürmektedir. Ayrıca bazı üretim ortamlarında genellikle ortam sıcaklığının ilgili makine ve teçhizatın sürekli çalışması nedeni ile arttığı ve yüksek sıcaklıklara maruz kalındığı da bilinmekte olup, üretilen ürünlerin sağlaması gereken kalite özelliklerinden dolayı makinelerin ya da üretim birimlerinin sıcaklıklarına doğrudan müdahale edilememektedir. Morris vd. [1] çalışmalarında özellikle emek yoğun işlerde çalışanların vücutlarında fazladan ısı üretilmesinin, çevresel sıcaklık faktörleri ile bütünleşerek sağlığa zarar verecek boyutlarda ısı stresine neden olabileceğini belirtmişlerdir. Birçok KOBİ'nin emek yoğun süreçler kapsamında üretim yaptığı ve küresel ısınma ile atmosferik şartların daha da ısındığı faktörü dikkate alınınca önümüzdeki yıllarda birçok işletme için ısı stresinin iş sağlığı ve güvenliği boyutunun ciddi bir önem kazanacağını söylemek mümkündür. Ergonominin temelinde işin insana, insanın da işe uyumu vardır. Aynı zamanda kişinin çalışma hayatını sağlıklı bir şekilde sürdürmesi de ergonominin önemli amaçlarından biridir. Üretim ortamındaki fiziksel risk faktörlerinin kontrol altına alınması ve bu yolla meslek hastalıklarının önlenmesi üretim verimliliği ve işgücünün korunması açısından da oldukça önemlidir. Üretim ortamındaki fiziksel risk faktörlerinin alt başlıklarından biri de termal konfordur. Çalışanları sağlıklarını olumsuz etkileyecek yüksek sıcaklıklardan kişisel önlemlerle korumak mümkün olmazsa bir takım yönetsel önlemlerin planlanması gerekir. Ancak ürünlerin üretimi sırasında belirli seviyede tutulması gereken sıcaklıklar mevcut ise ya da üretim ortamına ekonomik gerekçeler ile müdahale edilemiyorsa, üretim ortamında termal konforu sağlamak mümkün olmayabilmektedir. İnsan vücudu dış dünyadaki sıcaklık değişimlerine rağmen vücut içinde sahip olduğu bir denge mekanizması ile vücut iç

sıcaklığını sabit tutabilmektedir. Kişilerin yaşamlarını devam ettirebilmek için gerekli olan vücut iç sıcaklığı yaklaşık 37°C'dır. İnsan vücudunun ortamdaki sıcaklığa göre (sıcak-soğuk fark etmeksizin) vücut sıcaklığını yaklaşık 37°C'da sabit tutması için harcaması gereken bir enerji vardır. Bu enerjinin fazla olması, yani kişinin termal konforunu sağlamak için fazladan çaba sarf etmesi iş yerindeki üretim verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle iş yerindeki termal konfor şartlarının çalışanların kendilerini rahat hissedecekleri şekilde düzenlenmesi oldukça kritiktir. Ek olarak, termal konforun sağlanmadığı işletmelerde çalışanların mental olarak da olumsuz etkilendiği ve sıcaklığa bağlı olarak yapılan hataların sayısının arttığı da bilinmektedir [2]. Bununla birlikte çalışanları iş ortamındaki fiziksel risk faktörlerinden korumak için verilen kişisel koruyucu donanımların (KKD) (örn: gözlük, baret, eldiven, çelik burunlu ayakkabı, iş kıyafeti vb.) kişilerin vücudunda oluşan fazla ısının uzaklaşmasını engellediği de bilinmektedir. Çalışma ortamında KKD'lerin bu etkisini azaltmak isteyen çalışanların genellikle iş sırasında rahatsızlık duydukları KKD'leri kullanmama eğilimi gösterdikleri gözlemlenmektedir [3]. Bu nedenle kişilerin hem sıcaklığa bağlı hastalıklardan korunması, hem yüksek sıcaklık kaynaklı hata risklerinin en aza indirilmesi, hem de vücutlarından sıcaklığı uzaklaştırırken diğer risklere maruz kalmamaları için iş çözelgelerinde sıcaklık faktörünün de dikkate alınması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, günlük, haftalık ya da aylık bazda personel atamaları yapılırken, çalışanların maruz kalacakları sıcaklıkların da dikkate alınması ergonomik açıdan ortaya çıkabilecek olası rahatsızlıkların (ısı çarpması, baygınlık, baş ağrısı, kas krampları, dikkat dağınılığı, baş dönmesi vb.) önlenmesi açısından önem arz etmektedir. Bütün bu açıklamalar ışığında, bu çalışmada, haftalık bir personel atama modeline termal konfora ilişkin kısıtların eklenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Frazer vd.[4] çalışmalarında, bazı vücut kısımlarına sürekli yüklenmenin kişinin sağlığı bozduğunu ve bu durumun iş değişim çözelgesi ile önlenebileceğini ifade etmişlerdir. Özellikle kas ve iskelet hastalıklarının önlenmesinde kolay ve ekonomik bir yönetsel kontrol aracı olarak görülen iş değişim çözelgelerinin hem iş yeri hem de çalışana katkılar sağladığı bilinmektedir. Çalışanların birçok farklı iş makinesinde ya da iş istasyonunda çalışması onların işletmede sadece bir işte özelleşen çalışanlar değil, tüm birimlerde çalışabilecek çalışanlar olmasına katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda sürekli aynı işi yapmanın getirdiği tekdüzellik, motivasyon kayıpları ve bu tekdüzeliğin getirdiği hata yapma ihtimalinin düşürülmesi de yine iş değişim çözelgelerinin işletmelere ve çalışanlara yaptığı katkılar olarak değerlendirilebilir. Bir iş değişim çözelgesi stratejisinin başarılı bir çözelge olması, işlere ilişkin risklerin doğru belirlenmesine, ilgili risk maruziyeti limit değerlerinin doğru belirlenmesine ve iş değişiminin uygun planlanmasına bağlıdır [5]. Bu çalışmada termal konforun, ölçümü için literatürde en sık kullanılan WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) indeksi ve American Conference of Governmental Industrial Hygienists-

ACGIH'in geliştirdiği limit değerleri kullanılacaktır. Çalışma kapsamında kişilerin ergonomik maruziyetlerinin günlük olarak hesaplanmasının ve farklı günlerdeki maruziyetler arasında bir ilişki kurulmamasının nedeni, Otto ve Scholl [6]'ün yaptıkları çalışmada da belirttikleri üzere, çalışanların vardiyalarından sonra ya da çalışma sürelerinin sonunda ilgili risk faktörüne olan maruziyetin bitmesi ve dinlenmek için yeterli sürenin olmasıdır. Termal konfora ilişkin teorik bilgilerin verildiği bir sonraki bölümde daha ayrıntılı bir şekilde ifade edildiği üzere, termal konfor parametresi daha çok yapılan işin ağırlığı ile ilgilidir. Kişinin çok daha ağır iş yaptığı durumlar için daha düşük sıcaklıklarda çalışması istenir. Bu durumun ergonomik açıdan ifadesi ise, yapılan işin ağırlığının artması dış çevre sıcaklığının yanı sıra kişinin metabolizması sonucunda da bir sıcaklık meydana gelmesi ve dış çevre sıcaklığı ile kişi üzerinde tümleşik bir etki oluşturması şeklinde açıklanabilir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında üretim ortamlarının sıcaklıklarının yanı sıra, yapılan işlerin metabolik oran eşiti değerleri de dikkate alınmıştır. Bu durum termal açıdan çalışanların daha rahat edebilecekleri iş atamalarının elde edilmesine olanak sağlarken, aynı zamanda ağır işlerin de çalışanlar arasında eşit bir şekilde dağıtılmasını sağlamıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen model literatürde yer alan, sadece işletme amaçlarına hizmet eden iş değişim çizelgelerine termal konfor ve metabolik oran faktörleri açısından bir bakış getirdiği için literatürdeki çalışmalardan farklılaşmaktadır. Aynı zamanda çalışanın termal konforu üzerinde en etkili olan iki parametreyi dikkate alması (ortam sıcaklığı, görevlerin metabolik oran değerleri) ve çalışanların maruz kalacakları sıcaklıkların yapılan işin ağırlığına göre belirlenmesi, çalışanlar için çift yönlü bir koruma mekanizması oluşturmuştur. Ancak geliştirilen çizelgelerin sürdürülebilir ve başarılı çizelgeler olabilmesi için hem işletme amaçlarını hem de çalışan sağlığını gözetken çizelgeler olması gerekmektedir. Bu bağlamda, çalışanların termal açıdan ve metabolik oran değerleri açısından korunması sağlanırken, işletme amaçlarından en kıymetlilerinden biri olan çalışanların görevlere atanma maliyetleri de dikkate alınmıştır. Bu çalışma izleyen şekilde yapılandırılmıştır: Çalışmanın bir sonraki bölümünde iş ortamında termal konfor parametresi açıklanmış ve çalışanların termal konforlarının ölçülmesine ilişkin detaylı bilgi verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde personel çizelgeleme çalışmalarında ergonomi kriterini göz önünde bulunduran araştırmacıların çalışmalarına yer verilmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde, termal konfor ve metabolik oran eşiti parametrelerini dikkate alacak şekilde geliştirilen matematiksel model verilmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde, önerilen modelin uygulanabilirliğini göstermek için yapılan denemelere yer verilmiştir. Son olarak, çalışmanın altıncı bölümünde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. TERMAL KONFOR VE ÖLÇÜMÜ (THERMAL COMFORT AND ITS MEASUREMENT)

Termal konfor şartları açısından bir üretim ortamı ele alındığında, iklim şartlarını etkileyen faktörler havanın hızı,

nemi, sıcaklığı ve ısı radyasyonu olarak ifade edilir [2]. Çalışma ortamı iklimini etkileyen faktörlerden en kritik olanları ortam sıcaklığı, ortamdaki nem düzeyi, hava akımı, radyant ısı, kişinin giyinme ve metabolizma düzeyleri olarak sıralanabilir. Çalışma ortamındaki sıcaklığın normal değerlerden çok yüksek ya da çok düşük olması, çalışanların bu sıcaklık seviyelerine uyumunu, buna bağlı olarak da sağlığını ve iş verimini etkileyebilir. Sıcaklığın insan üzerindeki etkisi ise birçok faktörün bütünsel etkisi ile ifade edilebilir. Bu faktörler ise: ortamdaki nem durumu, çalışanın yaşı, cinsiyeti ve kıyafeti olarak sayılabilir. Çalışma ortamının sıcaklığı, çalışanların gerek bedensel gerek zihinsel faaliyetlerini sürdürürken, belirli bir rahatlık içinde olmalarını sağlayacak nitelikte olmalıdır [2]. İnsan vücudu ancak belli bir dereceye kadar olan ısıyı dengeleyebilir. Dengelenemeyecek seviyede vücutta bir takım alarmlar başlar. Bu alarm seviyesi limit değer olarak adlandırılır. Limit değerler, iş yükü ve sıcaklığa maruz kalınan süre ile yakından ilişkilidir. Literatürde WBGT indeksi açısından geliştirilmiş çeşitli Isı Limit Değerleri (Threshold Limit Values-TLV) bulunmaktadır. Çevresel sıcaklık, nem, işin metabolik yükü ve çeşitli kıyafetlerin etkisinin toplam etkisi ısı stresini etkilemektedir [7]. Eğer mühendislik uygulamaları ve kontrolleri ile ısı stresi engellenemiyorsa yönetim kontrolleri devreye girecektir. Sıcaklığa maruz kalma zamanına bağlı olarak yapılan ısı kontrolleri iş gereklerini sağlayabilecek yeterli sayıda çalışanın olması durumunda uygun olacaktır (Zamana bağlı ortalama alan WBGT indeksine göre inceleme yapılması bu duruma bağlı olarak gelişmektedir.). Sıcaklığın yükselmesi bir takım fiziki rahatsızlıklara neden olmakla birlikte aynı zamanda çalışanın hata yapmasına da neden olacağı için bir takım kalite ve verim kayıplarına da neden olabilir. Isı stresi sadece iş performansını düşürmekle kalmaz, aynı zamanda birtakım hastalıklara da neden olarak (ısı çarpması, ısı krampları, isilik vb.) iş gücü kaybını da tetikleyebilir. Bu nedenle de çalışanların maruz kaldıkları sıcaklık seviyesinin de bir limiti olmalıdır. Bir iş periyodunda birden fazla iş yapılabileceği için kişilerin maruziyetleri belirlenirken ağırlıklı ortalama değerlerin hesaplanması gerekebilir. Bu durumda kullanılan formüller Tayyari ve Smith tarafından Eş.1 ve Eş. 2 ile verilmiştir [8] :

$$M_{TWA} = \frac{M_1 * t_1 + M_2 * t_2 + \dots + M_n * t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (1)$$

$$WBGT_{TWA} = \frac{WBGT_1 * t_1 + WBGT_2 * t_2 + \dots + WBGT_n * t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (2)$$

Burada; t_i : Bir zaman çalışması ile ölçülen i dönemdeki dakika sayısı; M_i : Aktivite ya da dinlenme zamanında ölçülen/tahmin edilen metabolik oran; $WBGT_i$: Aktivite ya da dinlenme alanında hesaplanana WBGT değeri;

WBGT : Wet Bulb Globe Temperature ve yaş termometre sıcaklığı olarak açıklanabilir.

$WBGT_{out} = 0,7 * T_{nwb} + 0,2 * T_g + 0,1 * T_{db}$ (dış ortamda, güneş altında)

$$WGBT_{in} = 0,7 * T_{nwb} + 0,3 * T_g \text{ (kapalı ortamda, gölgede)}$$

$$T_{nwb} = \text{doğal ıslak ampul küre sıcaklığı (natural wet bulb globe temperature)}$$

$$T_g = \text{küre sıcaklığı (globe temperature)}$$

$$T_{db} = \text{kuru ampul sıcaklığı (dry bulb temperature)}$$

Islak ampul küre sıcaklığı, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve görünür ve kızılötesi radyasyonun insanlar üzerindeki etkisini tahmin etmek için kullanılan görünür bir sıcaklık türüdür. Dış ortam sıcaklığı, kuru ampul (küre) sıcaklığı da denir. Genellikle cıvalı termometre ile ölçülür. Doğal ıslak ampul (küre) sıcaklığı da yine cıvalı termometre ile ölçülür ancak civanın olduğu kısım bir pamuk fitil ile kaplıdır. Fitil ölçümden 30 dk. önce saf su ile ıslatılmalıdır. Her yeni ölçümde temiz bir fitil kullanılmalıdır. Eğer yeni bir fitil kullanılıyorsa ilk kullanımdan önce yıkanmalıdır. Bu ölçümle havanın bağıl nemi veya buhar basıncı hakkında veri elde edilmiş olur. Bu ölçümlerden yola çıkarak WBGT indeksi hesaplanır [8].

Kişilerin iş yüklerine göre maruz kalabilecekleri en yüksek limit değerlere ilişkin literatürde geliştirilmiş WBGT indeksine bağlı maruziyet limitleri için çeşitli üst sınır tabloları bulunmaktadır. Tablo 1’de bu çalışma kapsamında benimsenen değerler belirtilmiştir [9].

Varley [10] WBGT endeks değerlerine ve aktivite seviyesine göre ısıya doğal olarak alışabilen (ısıya dayanıklı) ve ısıya belli bir süre geçse de alışamayan (ısıya dayanıksız) çalışanlar için geliştirilen ölçekleri de sunmuştur. WBGT indeksinin literatürde yer alan diğer ısı indekslerine göre (örn: Humidex) ısı stresine bağlı riskleri tespit etmede çok daha fazla duyarlı olduğu Morris vd. [1] tarafından ispatlanmıştır. Literatürde verilen sınır değerlerinin ve ısı stresi indekslerinin tamamına yakını ısıya belli bir süre geçtikten sonra doğal olarak alışan insanlar için geliştirilmiştir [11]. Literatürde sıklıkla kullanılan ısı stresi indeksi WBGT indeksidir [11-13]. Bu indeks hava sıcaklığı, görel nem ve rüzgâr hızını dikkate alarak hesaplanan bir indekstir [14].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatür araştırması kısmında iki aşamalı bir yöntem izlenmiştir. İş atama modellerinde ya da personel çizelgeleme konusunda yapılan çalışmalarda termal konfor parametresinin eklendiği bir çalışma bulunmadığı için, termal konfor ve iş atama modellerinde ergonomi faktörünün

ele alan çalışmalara ilişkin literatür araştırmaları ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Termal konfor konusunda yapılan çalışmaların çoğu üretim ortamlarının termal açıdan değerlendirilmesi üzerine yapılan ve istatistiki temele dayanan çalışmalardır. Genel olarak açık ya da kapalı ortamda çalışanları ve hava sıcaklığını çeşitli faktörler açısından yapılan ölçümleri kayıt ederek, istatistiki temetolar ile bir takım regresyon formülleri belirlemeye çalışan araştırmalar mevcuttur. Bahsi geçen çalışmalardan ilki, Bernard ve Kenney’in [7] çalışmasıdır. Araştırmacılar çalışmalarında çalışanların ısı yükünü kişisel bazda incelemek için 2 aşamalı bir uyarı sistemi geliştirmişlerdir. İlk aşamada kalp atım hızı gibi fiziksel bir uyarı ile kişi yüksek sıcaklıkta zorlanarak iş yaptığı konusunda uyarılır. Bu durumda çalışan daha serin bir görev yerine geçerek orada çalışmaya devam eder. Ya da 2. uyarının geleceğini bilerek ilk iş istasyonunda çalışmaya devam eder. İkinci uyarı da gelince artık tamamen daha güvenli bir bölgeye geçerek dinlenmeye çekilir. Yazarların dikkate aldıkları ısı stresi indeksi WBGT indeksi olup, iç vücut sıcaklığı oral sıcaklıktan yola çıkarak değerlendirilmiştir. Bir diğer çalışma da Dutta vd. [15]’in çalışmasıdır. Araştırmacılar çalışmalarını Hindistan’ın Gandhiganar kentinde faaliyet gösteren inşaat firmasındaki işçiler üzerinde yapmışlardır. 219 çalışandan ankete dayalı algıladıkları ısı stresini anlamlandırmaya çalışan veriler toplamışlardır. Çalışma yaz ve kış aylarını kapsayacak şekilde yapılmış ve elde edilen değerlerin uluslararası standartlarda verilen limit değerlerin üzerinde olduğu belirtilmiştir. Bernard ve Ashley [16] çalışmalarında farklı ısı geçirgenliği olan kıyafetlerin ısı stresi üzerindeki etkisini araştırmayı hedeflemişlerdir. 12 çalışan üzerinde, farklı kıyafetlerle ölçümler alınarak, işlerin metabolik oranlarını da dikkate alarak, çok yüksek sıcaklıklarda kişilerin en fazla çalışabilecekleri süreyi belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmadaki tüm ölçümleri WBGT indeksini elde edecekleri şekilde toplayan yazarlar, kişilere maksimum çalışma süresini de yine WBGT indeksine bağlı olarak tanımlamışlardır. İşlerin metabolik gereksinimlerini de çalışanların oksijen tüketimlerinden yola çıkarak hesaplamışlardır. Sheffield vd. [17] yaptıkları çalışmada Nikaragua’daki iş yerlerinde iç ve dış ortamlarda 400’den fazla WBGT ölçümü aldıklarını ve bu ölçümlerin %10’undan fazlasının hafif ve %75 çalış - %25 dinlen rejimindeki izin verilen limit değerinin üzerinde olduğunu ifade etmişlerdir. Dang ve Dowell [18] yaptıkları deneye dayalı çalışmada sıcaklıkla ilgili kişilerin yaşadıkları rahatsızlıkları listelemişler; en çok karşılaşılan ısıya bağlı rahatsızlıkların kalp atımının hızlanması, baş ağrısı, kas

Tablo 1. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri
(Maximum temperature values that can be exposed according to workload)

Ortalama saatlik çalışma-dinlenme rejimi	İş yükünün metabolik oran (M) eşiti		
	Hafif M<200 kcal/h	Orta 200<M<350 kcal/h	Ağır 350<M<500 kcal/h
sürekli iş	30,8°C	28,2°C	26,6°C
%75 çalış, %25 dinlen	31,2°C	29°C	27,6°C
%50 çalış, %50 dinlen	31,8°C	30,1°C	28,8°C
%25 çalış, %75 dinlen	32,3°C	31,3°C	30,5°C

krampları ve baş dönmesi, kusma, denge kayıpları, bilinç kaybı olduğunu ifade etmişlerdir. Rowlinson vd. [11] bir iş yerinde iklimatik koşulların incelenmesi gerektiğine dair yaz aylarında ilgili iş yerinde hatalarda bir artış görülmesinin ciddi bir gösterge olacağını ifade etmişlerdir. Aynı zamanda ısı stresinin kişilerde fizyolojik etkilerin yanı sıra, mental kapasitede de bir düşüşe neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Aynı zamanda ısıya alışabilen çalışanlarla, ısıya alışamayan çalışanlar için ACGIH 2012'de önerdiği 2 ayrı setten oluşan limit değerleri tanımladığını belirtmiştir. Isıya alışamayan çalışanların limit değerinin ısıya alışabilen çalışanların limit değerlerinden yaklaşık 3°C WBGT daha az olacağını ifade etmişlerdir. Methner ve Eisenberg [19] çalışmalarında 9 çalışanın kolaydan ağıra kadar çeşitli yüklerde işler yaptıkları 4 gün boyunca çalışanlardan kalp atım hızı, iç vücut sıcaklığı ölçümleri, dış ortamdan da hava sıcaklığı ölçümlerini alarak kayıt etmişlerdir. Vücut iç sıcaklığını ölçmek için kişilere vitamin büyüklüğünde termistörler yutturarak 15 dakikalık periyotlarla bilgi toplamışlardır. Dene ortamı yaklaşık 100 işçinin çalıştığı bir park ortamıdır. Bu deney ile çalışanların yasalarla belirtilen değerlerin üzerinde bir yüke maruz kalıp kalmadıklarının kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır. Meshi vd. [20] ısı stresinin fiziksel iş ortamının bir özelliği olarak insan sağlığını güvenlik açısından doğrudan etkilediğini, aynı zamanda verimlilik açısından olumsuz sonuçlar doğurarak ekonomik bir yük olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı zamanda araştırmacılar yaptıkları deneysel çalışma neticesinde her bir derece WBGT artışının, 0,174 derece iç vücut sıcaklığında artışa neden olacağını ifade etmişlerdir. Wang vd. [14] çalışmalarında kişilerin maruz kaldıkları ısı stresini tahmin etmeye çalışmışlardır. 51 kişinin ayak bileğine takılan termometreler yardımı ile iş günü boyunca sıcaklık ölçümlerine ilişkin bilgi toplanmıştır. İç ve dış mekân ölçümlerinden yola çıkarak, kişilerin maruz kaldıkları sıcaklık değerlerini düşürmek için çalış-dinlen periyotları açısından çalışma rejimi önerileri yapılmıştır. Al-Bouwarthan vd. [9] çalışmalarında özellikle çok sıcak bir iklime sahip olan Suudi Arabistan'daki inşaat işçileri üzerinde ölçüm alarak ısı stresini değerlendirmişlerdir. 81 gün ölçüm alan araştırmacılar kişilerin güneşe maruz kalma derecelerini, kıyafet gereksinimleri gibi birçok ek bilgiyi de kayıt altına almışlardır. WBGT indeksi ile kendi geliştirdikleri alternatif indeksleri de karşılaştırmışlardır. Kişinin maruz kaldığı iç vücut sıcaklığının ölçülmesi için en doğru sonucu verecek yöntem kişiye yutulabilir termometreler yutturmak ve ölçümleri doğrudan oradan almaktır. Ancak bu durum her gün ve her çalışan için tekrar edeceği ve yutulabilir termometre tek kullanımlık olduğu için oldukça maliyetlidir. Bu sebeple araştırmacıların çoğu ilgili değerleri tahmin ederek ya da sabit bir değer olarak kabul ederek çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

İş atama ya da iş değişim çizelgelerine ergonomik açıdan yapılan eklemeler ile ilgili literatür incelendiğinde ise, termal konfor açısından herhangi bir değerlendirmenin yapılmadığı görülmektedir. Ancak, çalışanların duruşları ile ilgili ya da fiziksel iş yüklenmesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar içinden güncel olanları izleyen şekilde ifade

edilmiştir. Carnahan vd. [21] çalışmalarında kaldırma işlerindeki fiziksel iş yükünü hesaplamaya yarayan iş şiddeti indeksini (job severity index) kullanmışlardır. Optimizasyon yaklaşımları ve sezgisel yaklaşımları kullanarak en iyi sonuca ulaşmaya çalışan araştırmacıların nihai amacı çalışanların yaralanma potansiyellerini en aza indirecek bir iş değişim çizelgesi elde etmektir. Wongwien ve Nanthavanij [22] çalışmalarında günlük tehlike miktarının bir kısıt olarak geliştirdikleri personel çizelgeleme modeline eklemişlerdir. Çalışanların yetenek seviyesinin birbirinden farklı olduğunu belirtmişler ve çalışanların birlikte çalışmak istedikleri çalışana seçmelerine izin vererek toplam sistem verimliliğini iyileştirmeye çalışmışlardır. Modelin denemesini ise, bir günlük iş değişim çizelgesi üzerinde kendi oluşturdukları sayısal değerlere göre yapmışlardır. Akbari [23] çalışmasında yarı zamanlı çalışanların yorgunluklarını dikkate alarak tur çizelgeleme yaklaşımı geliştirmiştir. Amaç fonksiyonu olarak işçi maliyetlerini minimize ettiğini ifade eden araştırmacı çalışanların yorgunluk oranlarını dikkate alarak vardiyalara atanması problemini modellediğini belirtmiştir. Moussavi vd. [24] çalışmada üretim çevrim süresinin kısaltılmasını amacı ile birlikte ergonomik iş gücü çizelgelemesi problemini ele almışlardır. Tam sayılı doğrusal matematiksel modelleme yaklaşımı kullanarak modelledikleri problemi, GUROBI yazılımı ile çözmüşlerdir. Deneme verileri ile çözümledikleri problemde, ergonomik analiz olarak, boy, yaş, kişinin yetenek seviyesi ve tecrübesi durumlarını dikkate almışlardır. Montaj hattı özelinde modellediklerini problemlerinde, üretim hattının kesintisiz bir şekilde 7 gün çalışması gerektiğini ifade etmişlerdir ve her bir çalışanın bir gün boyunca aynı işe çalışması koşulunu eklemişlerdir. Hochdörffer vd. [25] çalışmalarında kısa dönemli planlama çalışmalarında iş değişim çizelgelerinin ergonomik açıdan ise iş istasyonun tüm vücudu çalıştırması ya da yoğunlukla el-parmak sistemini çalıştırması özelliğini dikkate alarak geliştirmişlerdir. Çalışmalarında uzun çözüm yaklaşımı olarak sezgisel yöntemleri kullanmışlardır. Moussavi vd. [26] fiziksel iş yükü ve verimlilik amaçlarını içeren çok amaçlı bir matematiksel model önerisi ile ergonomik iş değişim çizelgelerini elde etmeye amaçlamışlardır. İşlere 1-10 arasında bir puan vererek iş yüklerini temsil etmeye çalışmışlardır. Puan olarak 4'e kadar düşük, 5-7 puan arası orta, 7'den sonra ise yüksek iş yüküne sahip işlerin olduğunu varsaymışlar ve verimlilik açısından ise üretim çevrim zamanını dikkate alan modellerinde maksimum iş yükünün en küçüklenmesini sağlamaya çalışmışlardır. Moussavi vd. [5] çalışmalarında, 2 aşamalı bir yöntem kullanarak günlük iş değişim çizelgelerini elde etmeye çalışmışlardır. İlk aşamada işlerin fiziksel iş yüklerini hesaplamışlar, daha sonra da matematiksel modelleme ile iş değişim çizelgelerini elde etmeye çalışmışlardır. Savino vd. [27] yaptıkları çalışmalarında yazarlar tarafından geliştirilen fiziksel iş yüküne ilişkin bir ergonomik indeks ile matematiksel modelleme yaklaşımını birleştirerek ergonomik iş değişim çizelgelerini elde etmeye çalışmışlardır. Seçkiner ve Kurt [28] çalışmalarında tur ve rotasyon çizelgelerini bütünlük bir şekilde kullanarak iş yükü en küçüklenmesini amaçlamışlardır. Ele aldıkları problemde hastanede

radyografi teknisyenlerinin maruz kaldıkları radyasyon miktarını dikkate almışlardır. Tur çizelgesinden elde ettikleri en az personel sayısını rotasyon çizelgeleme modelinin bir kısıtı olarak modele eklemiştirler. Elde ettikleri model ile personel başına düşen hasta sayısını küçükmeyi amaçlamışlar ve modeli bir haftalık olarak düzenleyip, GAMS paket programında çözdürmüşlerdir. Önerdikleri modelin geçerliliğini kendi oluşturdukları rassal veriler ile denemiştirler.

4. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL (THE PROPOSED MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada ele alınan problemin çizilen sınırı kabaca, ortam sıcaklığın bir risk unsuru olduğu işletmelerde çalışanların en düşük risk seviyesine maruz kalarak görevlere atanması olarak tanımlanabilir. Bu amacı sağlamak üzere geliştirilen matematiksel modelin sahip olacağı özellikler aşağıda listelenmiştir:

- İşletmede gerçekleştirilmesi gereken çeşitli görevler bulunmaktadır. Çalışanların uzmanlık durumu farklı olduğu için kalifiye çalışanların firmaya daha fazla maliyet getireceği düşüncesi ile işçilik maliyetlerinin her çalışan için farklı olduğu kabul edilmiştir.
- Bir iş günü periyotlara ayrılmıştır. Her bir çalışma periyodu sonunda çalışanların rotasyonuna izin verilmektedir.
- Makinelerin birer periyotluk zamanlarda ihtiyacı olan çalışan sayısı aynı değildir. Makineler arasında çalışan sayısı ihtiyacı değişkenlik göstermektedir.
- Çalışanlar haftada bir gün izin yapmaktadır.

Setler:

$i = 1, \dots, m$ çalışan seti

$j = 1, \dots, n$ makinelerin seti

$k = 1, \dots, K$ planlama ufku (gün)

$l = 1, \dots, L$ çalışma periyodu

Karar Değişkenleri:

$$x_{ijkl} = \begin{cases} 1, & i.\text{çalışan}, j.\text{makinede}, k.\text{gün}, l.\text{periyotta çalışıyor ise} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$D_{ik} = \begin{cases} 1, & i.\text{çalışan } k.\text{gün izinli ise} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$MOE_{ik} = i.$ çalışanın $k.$ günlük metabolik oran eşiti (kcal)

$TLV_{ik} = i.$ çalışanın $k.$ günlük metabolik oran eşitine göre sınırlandırılması gereken sıcaklık değeri

$CTWA_{ik} = i.$ çalışanın $k.$ günlük sıcaklık maruziyet değeri

Parametreler:

$c_{ij} = i.$ çalışanın $j.$ istasyona atandığına ortaya çıkan atama maliyetleri (pbr)

$w_j = j.$ istasyonun her periyotta ihtiyaç duyduğu çalışan sayısı

$WM_{ij} = i.$ çalışanın $j.$ istasyonda çalışmasının bir saatlik metabolik oran eşiti (kcal)

$WBGT_j = j.$ istasyonda hesaplanan sıcaklık indeksi değeri ($^{\circ}\text{C}$)

Matematiksel modelin kapalı formu ve ilgili kısıtların açıklamaları izleyen şekilde verilmiştir.

$$\min z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l x_{ijkl} * c_{ij} \quad (3)$$

Eş. 3, modelin amaç fonksiyonunu göstermektedir. Amaç bu model için çalışanların işlere atanma maliyetlerinin en küçüklemesidir.

$$\sum_k D_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

Eş. 4 her çalışanın bir haftalık çalışma periyodunda bir gün izinli olmasını sağlamak için yazılmıştır.

$$D_{ik} \leq 1 - x_{ijkl} \quad \forall i, j, k, l \quad (5)$$

Eş. 5 numaralı kısıt çalışan izinli iken atama yapılmasını engellemek amacı ile yazılmış olan kısıttır.

$$\sum_j x_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i, k, l \quad (6)$$

Eş. 6 çalışanın aynı anda birden fazla makineye atanmasını engellemek amacı ile yazılan kısıttır.

$$\sum_i x_{ijkl} \geq w_j \quad \forall j, k, l \quad (7)$$

Eş. 7 her makinenin ilgili günler ve periyotlar için her makineye ihtiyacı kadar çalışan atanmasını sağlamak amacı ile yazılmıştır.

$$\sum_{j=1}^n x_{ijkl} = \sum_{j=1}^n x_{ijk(l+1)} \quad \forall i, k, l \quad (8)$$

Eş. 8 eğer bir çalışan bir günün herhangi bir periyoduna atandı ise geri kalan periyotlara da atanmasını sağlamak amacı ile yazılmış olan kısıttır. Kısıt temel atama kısıtları arasında yer almakla birlikte, bu çalışmadaki modele eklenmesi noktasında Moussavi vd. [26] çalışmalarından esinlenilmiştir. Bu kısıt işletme amaçları açısından önem göstermektedir. Çünkü bu kısıt dâhil edilmeden model çözüldüğünde, çalışanların planlama periyodunda bazı günlerde birkaç periyoda atanıp, birkaç periyoda atanmaması durumu söz konusu olabilir. Bu durum aslında ergonomik açıdan çalışanı korumaya yönelik bir duruma işaret etmesine rağmen, klasik çizelgeleme amaçları ile çelişmektedir.

$$\frac{\sum_j \sum_l x_{ijkl} * WM_{ij}}{8} = MOE_{ik} \quad \forall i, k \quad (9)$$

Eş. 9, Tayyari ve Smith [8]'in önerdiği gibi çalışanların gün boyunca farklı metabolik oran değerlerine sahip işlerde çalışmaları ile oluşacak metabolik yükü, zaman ağırlıklı ortalama yöntemini kullanarak her gün ve her çalışan için hesaplatmaktadır.

$$\frac{\sum_j \sum_l x_{ijkl} * WBGT_j}{8} = CTWA_{ik} \quad \forall i, k \quad (10)$$

Eş.10 her gün ve her çalışan için gün boyunca çalıştıkları iş istasyonları için ortalama ortam sıcaklığını zamana bağlı ortalama yöntemini kullanarak hesaplatmaktadır.

$$CTWA_{ik} \leq TLV_{ik} \quad \forall i, k \quad (11)$$

Eş. 11 her gün ve her kişi için, ilgili kişilerin termal konforunu sağlamak için yazılmış olan kısıttır.

$$TLV_{ik} = 30,8 \text{ eğer } 0 < MOE_{ik} \leq 200 \quad \forall i, k \quad (12)$$

$$TLV_{ik} = 28,2 \text{ eğer } 200 < MOE_{ik} \leq 350 \quad \forall i, k \quad (13)$$

$$TLV_{ik} = 26,6 \text{ eğer } 350 < MOE_{ik} \leq 500 \quad \forall i, k \quad (14)$$

Eş.12, Eş.13 ve Eş.14 çalışanın gün boyu çalıştığı işlerdeki metabolik oran eşitinin alacağı değere göre çalışanın maruz kalacağı sıcaklık sınır değerinin doğru belirlenmesini sağlamak amacı ile yazılan kısıtlardır.

$$x_{ijkl} = 0,1 \quad (15)$$

$$D_{ik} = 0,1 \quad (16)$$

$$MOE_{ik} \geq 0 \quad (17)$$

$$CTWA_{ik} \geq 0 \quad (18)$$

Eş. 15-Eş.18 ilgili karar değişkenlerinin tipini de gösteren işaret kısıtlardır.

5. MODELİN DENENMESİ (ILLUSTRATIVE EXAMPLES)

Isı stresini ve ısıdan kaynaklı zorlanmayı etkileyen faktörler izleyen şekilde sıralanabilir: çevresel termal şartlar (hava sıcaklığı, radyant ısı, nem ve havanın hızı), fiziksel iş yükü, kıyafet, yaş, cinsiyet, ırk, beslenme, sağlık geçmişi, vücut kitle indeksi, ısıya alışma derecesi. Elbette ki bu faktörlerin tamamı ısı stresine aynı derecede etki edemez. Çevresel termal faktörler ve fiziksel iş yükü, ısı stresine doğrudan ve

en yüksek derecede etki eden faktörlerdir ki bu faktörler bu çalışma kapsamında dikkate alınmıştır. Çalışanlar aynı çalışma kıyafetini giydiği, sağlıklı, erkek ve 30-40 yaş aralığındaki kişilerden seçildiği için bu faktörlerin etkisi karar noktasını değiştirecek kadar ciddi etkiye sahip olmayacaktır. Bu nedenle ilgili faktörlerin göz ardı edilmesinin akademik anlamda çalışmayı olumsuz etkilemeyeceği düşünülmektedir. Normalde işlere ilişkin metabolik oran eşitinin belirlenmesi başlı başına ergonomi disiplinin çalışma konusu olup burada nihai amaç işlerin kolay, orta, ağır gibi farklı zorluk seviyelerinden hangisine girdiğini karar vermektir. Aynı zamanda ortam sıcaklığının hesaplanmasında kullanılan ve birçok araştırmacı tarafından da kullanılması önerilen WBGT indeksi havanın görel nemi, yaş ve kuru termometre sıcaklığı gibi verilerden yola çıkarak elde edilen bir indekstir. Kişilerde oluşacak termal stresi ölçmek, vücudun çekirdek sıcaklığındaki artışı ölçmek demektir ve bu da günümüz şartlarında ölçülebilirliği nispeten kolay olsa da izlenebilirliği zor olan bir durumdur. Boy, kilo ve sağlık geçmişi açısından yakın değerlere sahip sağlıklı yetişkinlerden ölçüm alınarak işlere ilişkin ortalama ve yaklaşık bir metabolik oran eşiği değeri elde edilebilir.

Önerilen modelin denenmesi için geliştirilen veriler elde edilirken MS Excel Mersenne Twister algoritmasını kullanarak rassal sayı üreten üreteçler kullanılmıştır. Rassal veriler ile yapılan yaklaşık 50 deneme setlerinden birisi modelin uygulanabilirliğini göstermek için burada verilmiştir. Model ilgili deneme verileri ile çalıştırılmak üzere GAMS 24.9.2 paket programında kodlanmış ve i5 6500T CPU, 2,5 GHz özelliklerine sahip bir bilgisayarda çözdürülmüştür. GAMS paket programı herhangi bir sınırlama yapılmadığında en uygun çözüme %5 uzaklıktaki ilk çözümü elde ettiğinde, bu çözümü vererek çalışmayı durdurmaktadır. İlgili model önerisinin çeşitli veri setleri ile yapılan denemeleri doğrudan çözdürüldüğünde %1-%2 GAP ile çözümlerin 10 sn. gibi kısa bir sürede elde edildiği gözlenmiştir. Ancak, konunun insan sağlığı olması ve elde edilecek iş atama çizelgelerinin stratejik seviyede kararlar olması nedeni ile *option optcr=0* komutu kullanılarak optimal çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır. Hangi çalışma rejimine göre limit değerlerin seçileceğinin belirlenmesinde izlenecek yola ise Rowlinson vd. [11]'in yaptığı çalışmadan yola çıkarak karar verilmiştir. Rowlinson vd. [11] çalışmalarında çok yüksek sıcaklıklarda çalışanların çalıştırılma periyotlarına zorlanmasının verimin azalmasına yol açabileceğini, ancak çalışanın yüksek sıcaklıklarda sürekli çalıştırmanın sağlık açısından sorunlar oluşturabileceği de bilindiği için ilgili iki faktör arasında bir ödünleşme olacağını ifade etmişlerdir. Bu nedenle bu çalışmada sınır değer olarak çalışanların ilgili işlerde sürekli çalıştığı durumdaki limit değerler kullanılmıştır. Modelin denenmesinde kullanılan veriler Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4 ile ifade edilmiştir.

Model bu veriler ile çalıştırıldığında, 8426 amaç fonksiyonu değeri ile, yaklaşık 3000 sn'de optimal çözümü vermiştir. Elde edilen çizelgeden örnek olması amacı ile birinci gün ve maruziyet değerleri Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7 ile ifade edilmiştir.

Tablo 2. İş istasyonlarının çalışan ihtiyacı ve hesaplanan WBGT indeks değerleri
(Employee needs of workstations and calculated WBGT index values)

İş İstasyonu	Çalışan ihtiyacı	WBGT indeks değeri (°C)
1	4	31,25
2	2	28,10
3	3	26,75
4	3	24,15

Tablo 3. Çalışanların iş istasyonlarına atanmaları durumunda ortaya çıkacak atama maliyetleri (pbr)
(Assignment cost)

Çalışan / İş İstasyonu	1	2	3	4
1	16	17	19	15
2	18	14	14	18
3	20	14	14	18
4	16	17	14	11
5	11	12	20	18
6	13	15	20	15
7	15	14	11	12
8	16	15	10	19
9	14	19	19	11
10	17	18	12	18
11	19	15	16	12
12	13	12	11	17
13	12	16	20	20
14	16	12	14	14

Tablo 4. Çalışanların ilgili iş istasyonlarında çalışmaları sırasında ortaya çıkan enerjinin metabolik oran eşiti (kcal/ sa) (The metabolic rate equivalent of the energy generated during the work of the employees at the workstations (kcal / h))

Çalışan / İş İstasyonu	1	2	3	4
1	170,0	275,9	355,0	211,3
2	168,6	273,1	356,2	209,8
3	168,9	274,3	353,5	212,3
4	172,3	276,0	349,5	210,4
5	168,6	277,6	357,2	215,6
6	167,3	275,0	354,4	212,0
7	169,3	275,6	357,7	208,9
8	167,6	278,1	355,3	211,4
9	166,4	276,9	351,6	210,8
10	169,7	274,4	358,3	211,5
11	167,8	275,6	351,6	212,7
12	163,3	276,9	357,8	215,9
13	169,4	272,2	351,5	208,7
14	169,2	277,4	359,1	212,0

Tablo 7’de çalışanların 7 günlük çizelgeleme periyodunun birinci gününe ilişkin atama planı gösterilmiştir. Bu atama planının okuması şu şekilde yapılmalıdır: 5. çalışan günün ilk iki periyodunda (birinci ve ikinci periyotta) 2. iş istasyonunda, geri kalan altı periyot boyunca (üçüncü, dördüncü, beşinci, altıncı, yedinci ve sekizinci periyotlarda) 1. iş istasyonunda çalışacaktır. Modelin sadece termal konfor

kısıtlaması ile çözdürülmesinin işlerin metabolik oran eşitleri (Tablo 5) incelendiğinde, atamanın, model amacının maliyetin en küçüklenmesi olması sebebi ile maliyet odaklı olarak yapıldığı görülmüş ve kişilerin günlük metabolik oran eşiti ile ilgili de bir kısıtlama yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Çünkü çalışanların bütüncül korunmaları amaçlandığı için, her ne kadar çalıştıkları işlerin ağırlığına uygun sıcaklıklarda çalışmalarının sağlandığı Tablo 6 ile gösterilse de, bir grup çalışanın yüksek metabolik oran eşitine sahip işlerde çalışması, bir grup çalışanın ise hafif sayılan düşük metabolik oran eşitine sahip işlerde çalışması ergonomik açıdan kabul edilebilir bir durum değildir. Temel model önerisinin sonuçları incelendiğinde, 334,725 metabolik oran eşiti değeri en yüksek değer olarak görülmektedir. Temel modelde MOE değişkenine koyulan çeşitli üst değerlerine göre yapılan denemelerin sonuçları Tablo 8’de özetlenmiştir.

Tablo 8 incelendiğinde, MOE değerine yapılan müdahalelerin, amaç fonksiyonu üzerinde doğrudan etki gösterdiği görülmektedir. MOE değerinin sınırlandırıldığı sağ taraf değeri azaldıkça, amaç fonksiyonu değerinin arttığı söylenebilir. Modellerin daha uzun sürelerde çalıştırılması daha iyi çözümlerin elde edilmesine olanak sağlayabilir ancak 1000 saniyelik çözümlerle bile ergonomik amaçlar ile ekonomik amaçların arasında bir ödünleşim olduğu Tablo 8’de yer alan verilerin yardımı ile net bir şekilde söylenebilir. MOE değerine yapılan müdahalenin modelde nasıl bir değişiklik oluşturduğunun gösterilebilmesi için, 265 MOE değerine sahip modelin sonuçları izleyen tablolarla gösterilmiştir.

Tablo 9, MOE değerine 265 üst sınırı koyulduktan sonra çalışanların maruz kaldıkları değerleri MOE değerlerini göstermektedir. Tablo 9 ve Tablo 5 birlikte değerlendirildiğinde çalışanlar arasındaki MOE değeri açısından olan dengesizliğin büyük oranda giderildiği görülmektedir. Tablodaki boş hücreler çalışanların izinli olduğu günleri ifade etmekle birlikte, çalışanların izinli oldukları günlerin de ilk modele göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Tablo 10, MOE değerine 265 üst sınırı koyulduktan sonra elde edilen çizelgede çalışanların bir haftalık planlama periyodunda maruz kaldıkları sıcaklık değerlerini göstermektedir. Tablo 10 ve Tablo 6 birlikte değerlendirildiğinde MOE değerine üst sınır koyulduğunda modelin, bu kısıtlamayı sağlayabilmek için, yine limit değerlerin altında ancak, bir önceki modele göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışanları çalıştırdığı yorumu yapılabilir.

Aslında ekonomik amaçlar ve ergonomik faktörler arasında bir ödünleşim olduğu gibi, iki ergonomik faktör arasında da bir ödünleşim olduğu ifade edilebilir. Bu durumda karar vericilerin, çalışanları yine olması gereken limit değerlerin altında ancak sınırlara yakın sıcaklıklarda mı çalıştırmak istediklerine, yoksa sıcaklık açısından daha düşük sıcaklıklar ancak, çalışanlar arasında oldukça fark eden MOE değerlerine katlanarak mı çalıştıracaklarına karar vermeleri

Tablo 5. Çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodu boyunca maruz kaldıkları metabolik oran eşiti değerleri
(Metabolic rate equal values that employees are exposed to during the weekly scheduling period)

Çalışan / Gün	1	2	3	4	5	6	7
1	190,650	175,163	175,162	175,162	175,162	190,650	
2	325,037		293,875	335,425	293,875	325,037	283,488
3	323,800	294,100		313,900	333,700	323,800	284,200
4	210,400	210,400	210,400	210,400	210,400		210,400
5	195,850	195,850	195,850	195,850		195,850	195,850
6	172,887	172,887		172,887	172,887	172,887	172,887
7	320,500	334,150	334,150		217,600	320,500	334,150
8		331,837	331,838	331,838	331,838	331,837	331,838
9	210,800	199,700	199,700	194,150		210,800	199,700
10	334,725	334,725	334,725	334,725	334,725		334,725
11		212,700	212,700	212,700	212,700	212,700	212,700
12	187,612	187,612	187,612		187,612	187,612	187,612
13	174,312		174,312	174,312	174,312	174,312	174,312
14	277,400	277,400	277,400	277,400	277,400	277,400	

Tablo 6. Çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodu boyunca maruz kaldıkları sıcaklıklar
(Temperatures that employees are exposed to during a weekly scheduling period)

Çalışan / Gün	1	2	3	4	5	6	7
1	27,700	30,362	30,362	30,362	30,362	27,700	
2	27,256		27,763	27,087	27,762	27,256	27,931
3	27,256	27,762		27,425	27,088	27,256	27,931
4	24,150	24,150	24,150	24,150	24,150		24,150
5	30,463	30,462	30,462	30,462		30,462	30,463
6	30,362	30,362		30,362	30,362	30,362	30,362
7	26,100	27,312	27,313		26,250	26,100	27,312
8		27,312	27,312	27,312	27,312	27,312	27,312
9	24,150	25,925	25,925	26,813		24,150	25,925
10	27,312	27,312	27,312	27,312	27,313		27,312
11		24,150	24,150	24,150	24,150	24,150	24,150
12	30,687	30,687	30,687		30,687	30,687	30,687
13	30,362		30,362	30,362	30,362	30,362	30,362
14	28,100	28,100	28,100	28,100	28,100	28,100	

gerekmektedir. Tablo 11, MOE değerine üst sınır koyulduktan sonra elde edilen çizelgenin ilk gününü göstermektedir. Bu tablonun okuması Tablo 7 ile aynıdır.

Tablo 11 ve Tablo 7 birlikte değerlendirildiğinde modelin MOE değerine verilen üst sınırı sağlamak için çalışanları daha fazla rotasyona tabii tuttuğu görülmektedir.

Tablo 7. Elde edilen çizelgenin birinci günü (The first day of the obtained schedule)

1. Gün	1. Pr	2. Pr	3. Pr	4. Pr	5. Pr	6. Pr	7. Pr	8. Pr	Toplam
1. Çalışan									
WS1	1		1			1		1	4
WS4		1		1	1		1		4
2. Çalışan									
WS2			1	1		1			3
WS3	1	1			1		1	1	5
3. Çalışan									
WS2					1		1	1	3
WS3	1	1	1	1		1			5
4. Çalışan									
WS4	1	1	1	1	1	1	1	1	8
5. Çalışan									
WS1			1	1	1	1	1	1	6
WS2	1	1							2
6. Çalışan									
WS1	1	1	1	1	1		1	1	7
WS4						1			1
7. Çalışan									
WS3		1	1	1	1	1	1		6
WS4	1							1	2
9. Çalışan									
WS4	1	1	1	1	1	1	1	1	8
10. Çalışan									
WS1		1							1
WS3	1		1	1	1	1	1	1	7
12. Çalışan									
WS1	1	1	1	1	1	1	1		7
WS3								1	1
13. Çalışan									
WS1	1	1		1	1	1	1	1	7
WS4			1						1
14. Çalışan									
WS2	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Tablo 8. Çeşitli MOE sınırlamalarına göre model önerisinin amaç fonksiyonu değerinin değerlendirilmesi (Evaluation of the objective function value of the model according to different Metabolic Rate Equivalent (MRE))

Süre (sn.)	1000		
MOE değeri	GAP	Amaç Fonksiyonu Değeri	En iyi Mümkün Çözüm
265	%3,24	9275	8974,173
270	%0,37	8936	8902,985
275	%0,62	8909	8853,592
280	%1,01	8868	8778,150
285	%1,27	8815	8702,834

Tablo 9. Çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodu boyunca maruz kaldıkları metabolik oran eşiti değerleri (MOE≤265 için) (MRE values exposed to employees during the one-week scheduling period (for MRE≤265))

Çalışan / gün	1	2	3	4	5	6	7
1		249,700	249,700	249,700	262,937	254,862	253,050
2	259,838	259,838	259,837	262,512	259,838	259,838	
3	260,000	263,275	260,000		263,275	263,275	263,275
4	262,562		262,563	262,563	262,562	262,563	262,563
5	195,850		262,500	195,850	195,850	195,850	195,850
6	190,687	190,687	190,687		190,687	190,687	194,225
7	263,138	263,138		263,137	259,750	264,700	263,137
8	262,750	262,750	262,750	262,750	262,750		262,750
9	188,600	205,250	194,150	183,050	246,000		258,050
10	250,875	250,875		263,962	263,962	250,875	250,875
11	264,788	264,788	264,788	264,787		264,788	264,787
12	261,100	261,100	261,100	261,100	261,100	261,100	
13		192,162	192,162	192,162	192,162	192,163	192,162
14	262,600	262,600	262,600	262,600		262,600	262,600

Tablo 10. MOE 265 modeli için çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodu boyunca maruz kaldıkları sıcaklıklar (Temperatures that workers are exposed to during the one-week scheduling period for the MRE≤265 model)

Çalışan / gün	1	2	3	4	5	6	7
1		27,788	27,788	27,788	27,394	26,900	27,563
2	28,056	28,056	28,056	27,831	28,056	28,056	
3	28,056	27,831	28,056		27,831	27,831	27,831
4	25,125		25,125	25,125	25,125	25,125	25,125
5	30,462		28,056	30,462	30,463	30,462	30,462
6	30,687	30,687	30,687		30,687	30,687	30,462
7	27,394	27,394		27,394	26,013	25,125	27,394
8	27,394	27,394	27,394	27,394	27,394		27,394
9	27,700	25,038	26,813	28,588	24,800		26,013
10	27,788	27,788		27,394	27,394	27,788	27,788
11	25,125	25,125	25,125	25,125		25,125	25,125
12	28,056	28,056	28,056	28,056	28,056	28,056	
13		30,687	30,687	30,687	30,687	30,688	30,687
14	28,056	28,056	28,056	28,056		28,056	28,056

Tablo 11. MOE 265 model için elde edilen çizelgenin birinci günü (First day of the obtained schedule of MRE \leq 265 model))

1. Gün	1. Pr	2. Pr	3. Pr	4. Pr	5. Pr	6. Pr	7. Pr	8. Pr	Toplam
2. Çalışan									
WS1		1						1	2
WS2	1				1	1			3
WS3				1			1		2
WS4			1						1
3. Çalışan									
WS1			1				1		2
WS2	1			1		1			3
WS3		1						1	2
WS4					1				1
4. Çalışan									
WS3	1				1	1			3
WS4		1	1	1			1	1	5
5. Çalışan									
WS1	1	1		1	1	1	1		6
WS2			1					1	2
6. Çalışan									
WS1	1	1	1	1	1	1	1		7
WS3								1	1
7. Çalışan									
WS1						1	1		2
WS2			1						1
WS3		1		1				1	3
WS4	1				1				2
8. Çalışan									
WS1	1							1	2
WS2		1							1
WS3				1		1	1		3
WS4			1		1				2
9. Çalışan									
WS1			1		1	1		1	4
WS4	1	1		1			1		4
10. Çalışan									
WS1			1	1	1				3
WS3	1	1					1		3
WS4						1		1	2
11. Çalışan									
WS3	1		1		1				3
WS4		1		1		1	1	1	5
12. Çalışan									
WS1	1							1	2
WS2		1		1			1		3
WS3			1		1				2
WS4						1			1
14. Çalışan									
WS1		1		1					2
WS2					1		1	1	3
WS3			1			1			2
WS4	1								1

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada ergonomik iş çizelgeleme temelinde bir matematiksel model önerisi yapılmıştır. Bu model ile termal açıdan çalışanları rahatsız etmeyecek bir iş atamasının

yapılması amaçlanmıştır. Termal konfor sınırlaması yapılırken, çalışanların gerçekleştirdikleri işlerin metabolik oran eşiti değeri de dikkate alınmış ve sınır değerler bu oran eşiti değerine göre belirlenmiştir. Üretim ortamlarını doğrudan etkileyen düzenlemelerden biri olan iş atama faaliyetleri vb. faaliyetlerde üretim ortamındaki ergonomik

özelliklerin göz önünde bulundurulması çalışanın iş yerindeki sağlığı ve verimliliği ile yakından ilişkilidir [29, 30].

Çalışmanın sonuçlarına göre, maruz kalınan metabolik oran eşiti değeri sınırlandırıldığında, sınırlandırılmadığı duruma göre çalışanların işler arasında çok daha fazla rotasyon yaptıkları görülmektedir. Aynı zamanda amaç fonksiyonu değeri de artış göstermektedir. Üretim ortamlarında her zaman WBGT indeksine göre ölçüm alarak, limit değerlerden daha düşük seviyelere sahip üretim ortamları olmayabilir. Özellikle yaz aylarında 36-37°C ve daha üstü sıcaklıklar ile de karşılaşılması olasıdır. Bu durumda ACGIH'in önerdiği limit değerler hiçbir şekilde karşılanamayacağından önerilen modeldeki termal konfor kısıtlarının vücut iç sıcaklığının yaklaşık 37,6 da sabit tutulmasına yönelik kısıtlar ile değiştirilmesi gerekliliği ortaya çıkacaktır.

Bu çalışmada çalışanların doğal olarak çevresel ısıya uyum sağlayabilen çalışanları olduğu varsayımı ile maruz kalabilecekleri sıcaklık üst limiti için ACGIH tarafından geliştirilen değerler kullanılmıştır. Ancak üretim işletmelerinde nadiren de olsa işletmelerde ısıya dayanıksız ve doğal olarak alışmayan çalışanların da bulunması durumu da olasıdır. Bu durumda literatürde ısıya dayanamayan çalışanlar için geliştirilen limit değerler kullanılabilir gibi [10], bu çalışmada kullanılan değerlerden 3°C düşük değerler de limit değerler olarak kullanılabilir [11]. Literatürde çalışılan işlerin metabolik oran eşiti değerlerinden yola çıkarak her çalışan için farklı sıcaklık üst limiti de önerilmiştir [16]. M değeri Watt cinsinden işte harcanan enerjiyi göstermek üzere her kişi bazında limit değerlerin $TLV = 56,7 - 11,5 * \log_{10}(M)$ eşitliği kullanılarak değerlendirilebileceği ifade edilmiştir. Ancak literatürde genel kabul görmüş limit değerleri ACGIH tarafından önerilen değerlerdir. Aynı zamanda logaritmik ifadeler modellerin çözüm zamanları üzerinde doğrudan olumsuz etki oluşturacağından, bu eşitliğin limit değerlerin belirlenmesinde kullanımı noktasında, çözüm zamanı kriteri de göz önüne alınmalıdır.

Model önerisinin mevcut hali dış ortam sıcaklıklarının değerlendirilmesine yönelik gibi görünse de, ergonomik anlamda dikkate alınan ikinci parametre olan yapılan işlerin metabolik oran eşiti değerleri dış ortam sıcaklığı ile birlikte vücudun yapılan işin ağırlığına göre ortaya çıkacak iç sıcaklığının da dikkate alınmasına imkân sağlamıştır. Aynı zamanda bu çalışma çalışanların tüm işleri yapabildiği varsayımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışanların heterojen yetenek seviyesine sahip olduğu işletmeler için ilgili kısıt güncellenerek model önerisi genişletilebilir.

Tüm bu açıklamalar ve kısıtlamalar altında bile çalışmanın literatüre yaptığı katkıları izleyen şekilde özetlemek mümkündür: a) önerilen model daha önceleri termal konforun dikkate alınmadan sadece işletme amaçları ile yapılan iş değişim çözelgelerine ergonomik bir bakış açısı sağlamıştır; b) ısı çarpması gibi birçok rahatsızlığa yol açabilecek olası iş gücü kayıplarını en aza indirebilecek

potansiyele sahip bu model önerisi küçük adaptasyonlar ile her türlü üretim ortamına kolaylıkla uyarlanabilecektir; c) üretim ortamı özelinde diğer fiziksel risklerin etkin olmadığı ancak sıcaklık parametresinin aktif bir şekilde risk olarak bulunduğu üretim ortamlarında (örn: cam ürünleri üretim sektörü, demir-çelik işletmeleri vb.) rahatlıkla kullanılabilir; d) termal konfor parametresi yapılan işin ağırlığına göre değerlendirildiği ve çalışanların gün sonunda maruz kalacakları ilgili değer kısıtlandırıldığı için çift yönlü bir koruma mekanizması ortaya koyulmuştur.


KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Morris, C. E., Gonzales, R. G., Hodgson, M. J., Tustin, A. W., Actual and simulated weather data to evaluate wet bulb globe temperature and heat index as alerts for occupational heat-related illness, *Journal of occupational and environmental hygiene*, 16 (1), 54-65, 2019.
2. Babalık, F. Mühendisler için Ergonomi: İşbilim, Dora Yayıncılık, Bursa, 2011.
3. Adem, A., Dağdeviren, M., İş Sağlığı Ve Güvenliğinin Verimlilik Üzerindeki Etkisi: Bir Literatür Araştırması 5. Ulusal Verimlilik Kongresi Bildiriler Kitabı, 60-71, ISBN: 978-605-4889-17-4, 2015.
4. Frazer, M., Norman, R., Wells, R., Neumann, P. The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain. *Ergonomics*, 46 (9), 904-919, 2003.
5. Moussavi, S. E., Zare, M., Mahdjoub, M., Grunder, O. Balancing high operator's workload through a new job rotation approach: Application to an automotive assembly line. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 71, 136-144, 2019.
6. Otto, A., Scholl, A. Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. *OR spectrum*, 35 (3), 711-733, 2013.
7. Bernard, T. E., Kenney, W. L. Rationale for a personal monitor for heat strain. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 55 (6), 505-514, 1994.
8. Tayyari, F., Smith J.L., *Occupational Ergonomics Principles and applications*, Chapman and Hall, London, 1997.
9. Al-Bouwarthan, M., Quinn, M. M., Kriebel, D., Wegman, D. H. Assessment of Heat Stress Exposure among Construction Workers in the Hot Desert Climate of Saudi Arabia. *Annals of work exposures and health*, 63 (5), 505-520, 2019.
10. Varley, F. A study of heat stress exposures and interventions for mine rescue workers, *Transactions*, 316, 133-142, 2004.
11. Rowlinson, S., YunyanJia, A., Li, B., ChuanjingJu, C. Management of climatic heat stress risk in construction: a review of practices, methodologies, and future research. *Accident Analysis & Prevention*, 66, 187-198, 2014.
12. Holmer, I. Climate change and occupational heat stress: methods for assessment. *Global Health Action*, 3 (1), 5719, 2010.
13. Garzón-Villalba, X.P., Wu, Y., Ashley, C.D., Bernard, T.E. Heat stress risk profiles for three non-woven

- coveralls. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 15 (1), 80-85, 2018.
14. Wang, S., Richardson, M. B., Wu, C. Y., Cholewa, C. D., Lungu, C.T., Zaitchik, B.F., Gohlke, J.M. Estimating occupational heat exposure from personal sampling of public works employees in Birmingham, Alabama. *Journal of occupational and environmental medicine*, 61 (6), 518-524, 2019.
 15. Dutta, P., Rajiva, A., Anhare, D., Azhar, G. S., Tiwari, A., Sheffield, P., Climate Study Group. Perceived heat stress and health effects on construction workers. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 19 (3), 151, 2015.
 16. Bernard, T.E., Ashley, C.D. Short-term heat stress exposure limits based on wet bulb globe temperature adjusted for clothing and metabolic rate. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 6 (10), 632-638, 2009.
 17. Sheffield, P.E., Herrera, J. G. R., Lemke, B., Kjellstrom, T., Romero, L. E. B., Current and future heat stress in Nicaraguan work places under a changing climate. *Industrial health*, 51 (1), 123-127, 2013.
 18. Dang, B.N., Dowell, C.H. Factors associated with heat strain among workers at an aluminum smelter in Texas. *Journal of occupational and environmental medicine/American College of Occupational and Environmental Medicine*, 56 (3), 313, 2014.
 19. Methner, M., Eisenberg J., Evaluation of heat stress and heat strain among employees working outdoors in an extremely hot environment, *Journal of Occupational And Environmental Hygiene*, 15 (6), 474-480, 2018.
 20. Meshi, E.B., Kishinhi, S.S., Mamuya, S.H., Rusibamayila, M.G., Thermal exposure and heat illness symptoms among workers in Mara Gold Mine, Tanzania. *Annals of global health*, 84 (3), 360, 2018.
 21. Carnahan, B. J., Redfern, M. S., Norman, B., Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search. *Ergonomics*, 43 (4), 543-560, 2000.
 22. Wongwien, T. Nanthavanij, S., Ergonomic Workforce Scheduling with Productivity and Employee Satisfaction Consideration. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 1108-1116, 2013.
 23. Akbari, M., Tour scheduling for part-time employee with variable productivity, *Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dubai, United Arab Emirates (UAE)*, March 3 – 5, 2015.
 24. Moussavi, S. E., Mahdjoub, M., Grunder, O., Reducing production cycle time by ergonomic workforce scheduling. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (12), 419-424, 2016.
 25. Hochdörffer, J., Hedler, M., Lanza, G., Staff scheduling in job rotation environments considering ergonomic aspects and preservation of qualifications. *Journal of manufacturing systems*, 46, 103-114, 2018.
 26. Moussavi, S. E., Mahdjoub, M., Grunder, O., A multi-objective programming approach to develop an ergonomic job rotation in a manufacturing system. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11), 850-855, 2018.
 27. Savino, M. M., Riccio, C., Menanno, M., Empirical study to explore the impact of ergonomics on workforce scheduling. *International Journal of Production Research*, 1-19, 2019.
 28. Seçkiner S.U., Kurt M., Workload Minimization by Integrated Tour-Rotation Scheduling Approach, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 20 (2), 161-169, 2005.
 29. Baykasoğlu A., Akyol Ş.D., Ergonomic Assembly Line Balancing, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (4), 785-792, 2014.
 30. Güner B., Hasgül S., U-Type Assembly Line Balancing with Ergonomic Factors for Balance Stability, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 407-415, 2012.



Calculation amount of carbon dioxide and sulfur dioxide per capita area, per unit area for the heating period: Example of Izmir

Mustafa Ertürk 

Department of Mechanical Engineering, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Sakarya, 54130, Turkey

Highlights:

- Optimum insulation thickness payback times, energy saving analysis for İzmir based on two different wall types and three fuel types
- Analysis the amount of carbon dioxide and sulfur dioxide for the heating period outdoor wall unit area
- Heating period per capita carbon dioxide and sulfur dioxide analysis

Keywords:

- Optimum insulation thickness
- Heating period
- Unit area emissions
- Per person emissions

Article Info:

Research Article
Received: 29.04.2020
Accepted: 20.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.728927

Correspondence:

Author: Mustafa Ertürk
e-mail: mustafaerturk@subu.edu.tr
phone: + 90 264 616 0221

Graphical/Tabular Abstract

Theory and Methods:

This study comprises three stages as the first stage 2 different fuels, 3 different insulation materials, 2 different externally insulated wall are investigated for effects on optimum insulation thickness (OIT) in cases of different components of external walls, total cost, energy savings and repayment duration according to the lifetime cost analysis method. In the second stage comparisons are exposed for carbon dioxide and sulfur dioxide amounts released per unit area (m^2) in the heating period according to wall, fuel and insulation material type without insulation. The effect of OIT on the environment and energy for İzmir is determined for the first time in the literature. The third stage of the study presents two different approaches of carbon dioxide and sulfur dioxide amounts per capita in the heating period for coal and natural gas emissions.

Table A. Investigation of the effect of insulation thickness on per capita CO_2 during heating period

Insulation Material	Insulation Thickness (cm)												
	Heating Period CO_2 Amount Per Person for Coal in Externally Insulated Wall (kg / person year)												
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
XPS	3484	1595	1033	764	606	502	428	374	332	298	270	248	228
EPS	3484	1670	1097	817	651	541	462	404	359	323	293	268	248
Taş Yünü	3484	1762	1178	885	708	591	506	443	394	355	323	296	273

Purpose:

This study is performed for İzmir, which indicates that if coal is used as fuel in insulated and uninsulated buildings then the amount of CO_2 and SO_2 emissions increases per unit area during the heating period, whereas the amount of CO_2 decreases by using natural gas as fuel. On the other hand, the amount of CO_2 and SO_2 per capita for coal and for natural gas are presented in detail as a new contribution to the existing literature.

Results and Conclusion:

In cases of natural gas usage as fuel in a building with an externally insulated exterior wall, the amount of CO_2 emission will decrease by 57% for XPS, 58% for EPS and 56% from the unit area during the heating period for Stone wool compared to the uninsulated wall, while the heating period for the sandwich outer wall will reduce CO_2 emission from the unit area. It has been demonstrated that the amount of CO_2 will decrease by 57% for XPS and EPS, and 56% for Stone wool. The heating period in an uninsulated building is the heating period of 1839 kg per capita for natural gas. If the building is insulated with XPS according to OYK, the amount of CO_2 per capita will decrease by 76% in the heating period. If coal is used as fuel then the heating period in an uninsulated building is determined as 3484 kg per capita CO_2 per capita, and in case of insulation with XPS according to OYK, 838 kg / capita heating period. In addition, it has been revealed that the amount of SO_2 per capita in the heating period for the externally insulated exterior wall for coal will decrease by 73% compared to the uninsulated wall, while this rate will be 69% for the sandwich walls. With these approaches introduced to the literature, the heating period CO_2 SO_2 amounts in any province of the world can be easily calculated with the parameters in Equations 22 and 23.



Isıtma dönemi için bina birim alan, kişi başı karbondioksit ve kükürtdioksit miktarlarının hesaplanması: İzmir Örneği

Mustafa Ertürk*

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 54130, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- İki farklı duvar tipi ve üç yakıt türüne göre İzmir için optimum yalıtım kalınlığı, geri ödeme süreleri, enerji tasarrufu analizleri
- Isıtma dönemi dış duvar birim alanı için karbondioksit ve kükürtdioksit miktarı analizi
- Isıtma dönemi kişi başı karbondioksit ve kükürtdioksit analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 29.04.2020
Kabul: 20.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.728927

Anahtar Kelimeler:

Optimum yalıtım kalınlığı,
ısıtma dönemi,
birim alan emisyonlar,
kişi başı emisyonlar

ÖZET

Hava kirliliği her yıl 3 milyona yakın insanın ölümüne neden olmaktadır. Bu değer, dünyadaki yıllık ölüm oranının % 5'ine karşılık gelmektedir. Literatürde il bazında konutların yıllık yakıt ve elektrik tüketimi resmi olarak kayıt altına alınan verilerle sera gazı emisyonları hesaplamaları yapılmaktadır. Bu hesaplamalarda ısınma, sıcak su, ev tipi eşyaların (buzdolabı, klima, çamaşır ve bulaşık makinası, ütü, fırın vb) tükettiği enerji ayrımı yapılmamaktadır. Bu çalışmada İzmir ili için farklı duvar tipi, yakıt ve yalıtım malzemeleri göz önüne alınarak ısıtma amaçlı enerji gereksinimi ve kişi başı emisyonlar yeni bir yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Isıtma dönemi birim alandan salınan karbondioksit miktarı (IDBASC) ve ısıtma dönemi birim alandan salınan kükürtdioksit miktarı (IDBASKM) duvar, yakıt ve yalıtım malzemesi cinsine göre ve yalıtımsız olarak karşılaştırılmaları yapılarak optimum yalıtım kalınlığı (OYK)'nın çevre ve enerji üzerindeki etkisi İzmir ili için hesaplanmıştır. Farklı yakıt, izolasyon malzemesi ve duvar şekline bağlı olarak enerji talebi ve IDBASC azalmanın %76 seviyesine ulaşabileceği belirlenmiştir. Isıtma dönemi kişi başı karbondioksit miktarı (IDKBCM) ve ısıtma dönemi kişi başı kükürtdioksit miktarı (IDKBKM) olmak üzere iki yeni yaklaşım daha getirilmiştir. 1TDYD'da XPS ile OYK'na göre ve yakıt olarak kömür kullanılması durumunda; IDKBCM'nın 836 kg/kişi yıl, IDKBKM yalıtımsız bir dairede 7196 kg kişi/ ısıtma dönemi, OYK'na göre 1727 kg kişi/ ısıtma dönemi hesaplanmıştır.

Calculation amount of carbon dioxide and sulfur dioxide per capita area, per unit area for the heating period: Example of Izmir

H I G H L I G H T S

- Optimum insulation thickness, payback times, energy saving analysis for İzmir based on two different wall types and three fuel types
- Analysis the amount of carbon dioxide and sulfur dioxide for the heating period outdoor wall unit area
- Heating period per capita carbon dioxide and sulfur dioxide analysis

Article Info

Research Article
Received: 29.04.2020
Accepted: 20.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.728927

Keywords:

Optimum insulation
thickness,
heating period,
unit area emissions,
per person emissions

ABSTRACT

The damage to the environment caused by fossil-derived fuels is very high. Each year air pollution causes the death of close to 3 million people. This value is equivalent to 5% of the global annual death rate. In the literature, greenhouse gas emission calculations are made with data officially recorded from annual fuel and electricity consumption in housing on a provincial basis. These calculations do not differentiate energy consumed for heating, hot water or domestic appliances (fridge, air conditioning, washing machines, dishwashers, iron, oven, etc.). This study calculated energy requirements for heating and per person emissions with a new method taking account of different wall types, fuel and insulation material for İzmir province. The carbon dioxide amount released per unit area in the heating period (CDUAHP) and sulfur dioxide released per unit area in the heating period (SDUAHP) were compared according to wall, fuel and insulation material types and without insulation. The effect of optimum insulation thickness (OIT) on the environment and energy was calculated for İzmir. It was determined that with different fuel, isolation material and wall types, energy demand and CDUAHP reductions could reach 76% levels. Two new approaches of carbon dioxide amount per person in the heating period (CDPPHP) and sulfur dioxide amount per person in the heating period (SDPPHP) were developed. For 1TEIW with XPS according to OIT and coal as fuel, the CDPPHP was 836 kg/person year, while the SDPPHP for an uninsulated apartment was 7196 kg/person heating period, with 1727 kg person/heating period calculated according to OIT.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: mustafaerturk@subu.edu.tr / Tel: +90 264 616 0221

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel bazda baş döndürücü hızla artan enerji ihtiyacı tüm dünya milletlerinin başlıca sorunları arasında yer almaktadır. Enerji sırasıyla sanayi, bina, ulaştırma ve tarım olmak üzere dört sektörde ağırlıklı olarak sarf edilmektedir. Yapılarda sarf edilen enerjinin çoğu ısıtma veya soğutma amaçlı kullanılması, artan enerji fiyatları bina dış duvarlarında yalıtımı cazip hale getirmektedir. Enerji tüketiminin artmasına bağlı fazla yakıt tüketimi ekonomik kayba, zararlı baca gazı emisyonlarını artırıp hava kirliliğine ve tüm insanlık için tehdit oluşturan küresel ısınma miktarını artırmaktadır. Türkiye’de konut ve yapı sektöründe tüketilen enerji miktarı toplam enerji tüketiminin % 35’ine tekabül etmektedir. Konut ve yapı sektöründeki bu tüketim değeri bilinçli yalıtımla azaltılabilir [1]. Küresel olarak teknolojiye hızlı değişim bireylerin lüks konutlara olan ilgisini artırması; konut stokunun artmasına, yeşil sahaların azalmasına, fosil yakıt tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Bu durum atmosfer havası kirliliği, küresel ısınma ve doğal enerji kaynaklarını azaltma gibi problemlere neden olmaktadır. Dünya milletleri bu sorunları sürdürülebilir olarak çözmek için küresel bazda uzun, orta ve kısa vadeli sözleşmeler imzalamaktadır. Türkiye küresel bazda kısıtlamalar getiren Kyoto Protokolü’ne imza atan ülkeler arasında bulunmaktadır[2]. Türkiye’nin yüksek enerji açığı olmasına rağmen, her geçen gün artan teknolojik yatırımlar, şehirleşme, yaşam kalitesinin yükselmesi, göç ve diğer faktörler enerji tüketimini sürekli olarak artırmaktadır. Ülkemizin enerji açığının azaltılması için enerji tasarrufuna ve verimliliğine yönelik önlemlerin alınması gerekmektedir. Tekniğine uygun yalıtımla binalardaki hem enerji talebi azalacak hem de baca gazları azalacaktır. Yalıtım kalınlığının artması ısı kaybını azaltırken, yalıtım maliyetini artırmaktadır. Yalıtım hesaplamalarında yalıtım malzemesi kalınlığı arttıkça yıllık enerji giderleri de belli bir noktaya kadar azalmakta sonrasında artış göstermektedir. Yıllık enerji giderlerinin en az olduğu noktaya OYK denilmektedir. Literatürde farklı il ve yalıtım malzemeleri ve borular için OYK hesaplamaları yapılmıştır. Kurt [3] Karabük ili için yaptığı çalışmada dış duvarlarda hava boşluğu ile yalıtım malzemesinin birlikte kullanılmasıyla OYK, enerji tasarrufu ve emisyonlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Gürel vd. [4] Karabük’te iki yakıt türüne göre dış duvar OYK’nın ekonomik ve çevresel analizini araştırmışlardır. Öztuna [5] Edirne şehrinde altı değişik yakıt türü ve iki değişik dış duvar bileşeni için optimum yalıtım kalınlığının enerji tasarrufuna etkisini araştırmıştır. Enerji tasarrufu miktarının %24 ile %47 arasında değiştiğini bulmuştur. Gürel ve Daşdemir [6] Türkiye’deki dört farklı iklim bölgesindeki binaların OYK göre yalıtılmasıyla baca gazı emisyonlarının % 65-%75 oranında azalacağını hesaplamışlardır. Bolattürk[7] optimum yalıtım kalınlıkları hesaplamalarında güneş radyasyonunu da dikkate alarak OYK belirlemiştir. Bu çalışma sonucunda; sıcak iklim kesimlerindeki yapılarda OYK’nın soğutma kapasitelerine göre hesaplanması gerektiğini açıklamıştır. Bolattürk [8] başka bir çalışmada Türkiye’nin dört farklı iklim bölgesi ve on altı farklı iline

yönelik OYK ve geri ödeme sürelerini (GÖS) hesaplamıştır. Daşdemir ve Kurt [9] Adıyaman ili için dış duvarda yalıtım malzemesiyle birlikte hava boşluğunu kullanılmasıyla kişi başına düşen emisyon miktarı 2,13 ton CO₂ seviyesinden 0,45 ton CO₂ seviyesine düştüğünü ortaya koymuşlardır. Öztürk vd. [10] donmuş ve soğuk muhafaza odaları için OYK’larını ömür maliyet analiz yöntemine göre hesaplamışlardır. Ertürk vd, [11] ısıtma ve soğutma uygulamaları için farklı yakıt, yalıtım malzemesi ve yapı bileşenleri için optimum yalıtım kalınlığına bağlı enerji analizleri gerçekleştirmiştir. Mahlia ve İqbal [12] Maldivler’de OYK’na göre yalıtılmış binalarda farklı yakacak türleri için baca gazı emisyon miktarlarındaki azalmayı hesaplamışlardır. Dış duvarda hava boşluğu kullanılması durumunda optimum yalıtım kalınlığının düştüğü, CO₂ emisyonunda %25 oranında azalma olduğunu tespit etmiştir. Kaynaklı ve Yamankaradeniz [13] derece-gün sayısının belirlenmesi ve dış duvarlara uygulanacak OYK hesaplamalarına yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Yalıtımla ilgili çalışmaların temel amacı enerji tüketimini ve baca gazı salınımlarını azaltmaktır.

Literatürde il bazlı karbon ayak izi hesaplamaları birincil ve ikincil ayak izi olmak üzere yapılmaktadır. Birincil ayak izi; evsel yıllık toplam enerji tüketimi ve ulaşım olmak üzere fosil kaynaklı yakıtların yanmasıyla doğrudan ortaya çıkan CO₂ miktarıdır. İkincil ayak izi; günlük hayatta kullandığımız ürünlerin imalatı ve en sonunda bozulmalarıyla ilgili olan dolaylı CO₂ miktarıdır[14]. Birincil karbon ayak izi hesaplaması açıklamasından anlaşılacağı üzere; literatürde il bazlı sera gazı hesaplamaları yaz ve kış dönemi ayrımı yapılmadan, kayıt altına alınan yıllık yakıt ve elektrik tüketimine göre yapılmaktadır. Ayrıca evlerde kullanılan beyaz eşyaların (buzdolabı, klima, çamaşır ve bulaşık makinası, ütü, fırın, süpürge vb) yıllık tüketmiş olduğu enerjide hesaplamalara dahil edilmektedir. Bu çalışmada sadece ısıtma sezonunda bina dış duvarlarında kaybolan ısıtma enerjisi için birim alan için ve kişi başı emisyonlar İzmir için literatüre dört farklı yaklaşım olarak sunulmuştur. Bu yaklaşımların literatürdeki diğer çalışmalardan farkı:

- i) Bu çalışmada ısıtma dönemindeki enerji ihtiyacına bağlı emisyon miktarları iki farklı; duvar, yalıtım, yakıt çeşidine göre literatüre IDBASC ve IDBASKM yaklaşımı getirilmiştir.
- ii) Bu çalışmada ısıtma dönemindeki enerji ihtiyacına bağlı kişi başı emisyon miktarları iki farklı; duvar, yalıtım, yakıt çeşidine göre literatüre IDKBCM ve IDKBKM yaklaşımı getirilmiştir.
- iii) Literatürde ısıtma dönemi için birim alan enerji ihtiyacı ve kişi başı emisyon salınım miktarı olmaması konut ve kişi bazlı karbon tüketimi hesaplamalarında sorunlar yaşanmaktadır. Bu çalışmada farklı yakıt, duvar ve izolasyon malzemesine göre birim alan enerji tüketimine göre ve kişi başı salınımların bilinmesi konut ve kişi bazlı hesaplamalarındaki sorunları azaltacaktır.
- iv) Bu çalışmada il bazında karbon tüketim vergisinin ayrıntılı olarak belirlenmesine neden olacaktır. Bu durum

daha az karbon vergisi ödenecek illere ve daha küçük konutlar yapılması talebini artıracaktır.

İzmir için literature ilk defa kazandırılan bu yaklaşım dünyanın herhangi bir yerindeki şehir içinde uygulanabilir.

2. YÖNTEM (METHOD)

İzmir için yapılan bu çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada; iki farklı duvar (1TDYD, 2TSD), üç farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, Taş yünü), yakıt olarak doğalgaz ve kömür için 1-23 numaralı eşitliklerle ayrıntılı hesaplamalar yapılarak OYK'ları tespit edilmiştir. Bu hesaplamalarla yakıt, duvar ve yalıtım malzemesi tipine göre birim alan için; yalıtım, yakıt, toplam maliyetler, geri ödeme süreleri, yıllık kazançlar bulunmuştur. İkinci aşamada; ilk defa İzmir için yapılarak IDBASC ve IDBASKM olarak literatüre iki yeni yaklaşım kazandırılmıştır. Bu aşamada; 1 kg yakıtın (doğal gaz ve kömür) yanmasıyla atmosfere salınacak emisyonlar duvar, yakıt, yalıtım malzemesi cinsine göre ve yalıtımsız olarak karşılaştırılmaları yapılarak OYK'nın çevre ve enerji üzerindeki etkisi açıklanmıştır. Üçüncü aşamada; il bazında ısıtma dönemi IDKBCM ve IDKBKM olmak üzere literatüre iki yeni yaklaşım (Eş. 22 ve 23) daha literatüre kazandırılmıştır. Bu eşitlik parametreleriyle dünyanın herhangi bir yerindeki il için IDKBCM ve IDKBKM kolaylıkla hesaplanabilecektir.

2.1. Hesaplama Kullanılan Varsayımların Açıklanması (Disclosure of assumptions used in calculations)

Toplam dış duvar alanının %12'sine eşit veya daha küçük toplam pencere alanı şartına sahip binalarda ısı izolasyonu şartı aranmaz. Yapıların ısı kaybeden toplam düşey dış yüzey alanının % 60'ı ve üzerinde cam oranına sahip yapılarda, pencere ısı iletim katsayısının 2.1 W/m²K ve küçük olarak tasarlandığında, bu binalar standarda uygun kabul edilir [15]. TS 825'te (binalarda ısı yalıtım kuralları) bina dış kabuğu bileşenleri alanlarıyla pencerelerle ilgili yönetmelik vardır. Kolon, giriş alanlarıyla ilgili yönetmelik bulunmamaktadır. Türkiyede bulunan konutların il bazında toplam dış duvar alanıyla ilgili veri bulunmamaktadır. Bu çalışmada İzmir ili toplam dış duvar alanı hesaplaması için; ilde tek katlı ve çok katlı olarak inşa edilen binaların 166.6 m², ayırık nizam, kat yüksekliği 3m, brüt dış duvar alanının % 20'si kolon, giriş alanı, % 20'si de balkon kapısı, pencere alanı olarak yapıldığı, taban ve tavan döşemeleri ısı kayıplarının ihmal edildiği, brüt 166.6 m² toplam dış duvar alanının %20'si (33.3 m²) kolon ve giriş alanının, %20'si (33.3 m²) balkon kapısı ve pencere alanının brüt dış duvar alanından çıkarılmasıyla net toplam dış duvar alanı (NTDDA) 100 m² olarak olduğu varsayılmıştır. Hesaplamalar yalıtımsız ve OYK'na göre yalıtım yapılmış olduğu varsayılarak IDKBCM ve IDKBKM' ları Şekil 1'deki iki duvar tipi (1TDYD, 2TSD) iki yakıt türü (kömür, doğalgaz) ve üç yalıtım malzemesi (XPS, EPS, Taşyünü) için yapılmıştır. Çalışmada kullanılan iki duvarın kesit resmi Şekil 1'de görülmektedir. Bu şekildeki duvar bileşenleri; (a) iç sıva (3 cm), (b) tuğla (13.5cm), (c) izolasyon malzemesi, (d) dış sıva (2cm), (e) tuğla (8cm) olarak görülmektedir.

2.2. Optimum Yalıtım Kalınlığının (OYK) Enerji Tüketimi ve Çevre Üzerindeki Etkisinin Açıklanması (Disclosure of the Impact of OIT on Energy Consumption and the Environment)

Çalışmanın ikinci aşamasında ısıtma dönemi dış duvar birim yüzey alanı için enerji ihtiyacı 1-5 numaralı eşitliklerle, 6-12 numaralı eşitliklerle OYK, GÖS, 13-21 numaralı eşitliklerle de IDBASC ve IDBASKM ayrıntılı olarak hesaplanmıştır.

2.2.1. Isıtma dönemi için yalıtımlı ve yalıtımsız dış duvarda enerji ihtiyacının hesaplanması

(Calculation of energy requirements for insulated and uninsulated external wall for the heating period)

Binalardaki en fazla ısı kaybı ya da ısı kazancı dış duvarda olmaktadır. Dış duvardaki ısı kayıp ve kazançları binanın yönüne, konumuna, yalıtımlı olup olmamasına ve dış duvar bileşenlerinde kullanılan malzemelerin özelliğine göre farklı olmaktadır. Bu çalışmada, ısıtma için yıllık enerji ihtiyacı 1-5 numaralı eşitliklerle hesaplanmıştır. Dış duvar birim alanından transfer edilen ısı kaybı, Eş. 1'de verilmiştir [16].

$$q = U \cdot (T_b - T_o) \quad (1)$$

Eşitlikte, U dış duvar toplam ısı transfer katsayısı [W/m²K], T_b denge sıcaklığını [°C] ve T_o iç ortam sıcaklığı [°C] dir. Dış duvar toplam ısı transfer katsayısı Eş. 2 ile hesaplanmaktadır [17].

$$U = \frac{1}{R_i + R_w + R_y + R_d} \quad (2)$$

Eşitlikte; U dış duvar toplam ısı transfer katsayısını (W/m²K) R_i ve R_d sırasıyla duvar iç ve dış yüzeyinin ısı taşınım katsayılarıdır. R_w yalıtımsız duvar tabakasının toplam ısı transfer katsayısıdır. R_y kullanılan yalıtım malzemesinin ısı direncini, x yalıtım malzemesinin tabaka kalınlığını (m), k_y izolasyon malzemesinin ısı iletim katsayılarını [W/mK] göstermekte olup, Eş. 3 ile hesaplanmıştır [18].

$$R_y = \frac{x}{k_y} \quad (3)$$

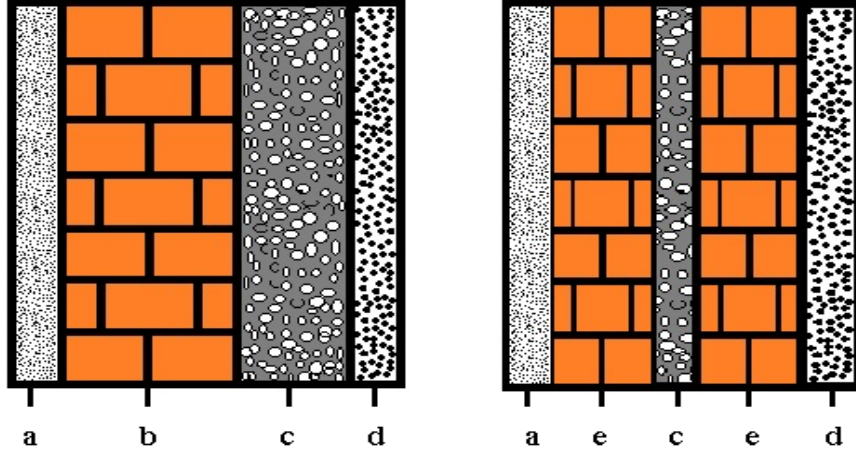
Yalıtımsız duvarın ısı direnci, R_w ile gösterilirse, izolasyonsuz dış duvarın toplam ısı transfer katsayısı Eş. 4 ile hesaplanır [18].

$$U = \frac{1}{R_w} \quad (4)$$

Bina dış duvarlarında yalıtımlı ve yalıtımsız olarak, ısıtma için harcanan yıllık enerji miktarı Eş. 5'te verilmiştir [20].

$$E_A = \frac{C_f \cdot U \cdot IDS}{LHV \cdot \eta} \quad (5)$$

Eşitlikte, C_f ; yakıt maliyetini, IDS ; ısıtma derece saat değerini, LHV ; yakıtın alt ısı değerini (J/m³), η ; ısıtma sistemi verimini ifade etmektedir. Tablo 1'de çalışmada kullanılan yakıtlara ait özellikler verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan İki farklı duvarın kesit görünüşleri (Cross-sections of two different wall types used in the study)

Tablo 1. Kullanılan Yakıtın Özellikleri (The properties of the fuel used)

Yakıt Cinsi	Kimyasal Formül [22]	Alt Isıl Değer [23]	Isıl Verim [22]	Fiyat
Kömür	$C_{5.85}H_{5.26}O_{1.13}S_{0.008}N_{0.077}$	29.260×10^6 J/kg	0.65	0.821221 TL/kg [21]
Doğal Gaz	$C_{1.05}H_4O_{0.034}N_{0.022}$	34.285×10^6 J/m ³	0.93	1.066443 TL/m ³ [22]

2.2.2. Ömür maliyet analizi yöntemine göre Optimum

Yalıtım Kalınlığının hesaplanması

(Calculation of OIT according to the life cycle analysis method)

OYK hesaplamalarında, toplam ısıtma maliyetinin minimum olduğu noktada OYK ve yakıt maliyeti belirlenmektedir [24]. OYK hesaplamaları için yaşam döngüsü yöntemi kullanılmaktadır [25]. Bu çalışmada, yaşam döngüsü hesaplama yöntemine göre 6-12 numaralı eşitliklerle OYK belirlenmiştir. Toplam ısıtma maliyeti hesaplamalarında bina yaşam müddeti (N) ile şimdiki değer unsuru (P_1) birlikte dikkate alınmıştır. P_1 ; faiz oranı (i) ve enflasyon oranına (d) bağımlı olup Eş. 6'ya göre hesaplamalar yapılmaktadır [26]. Hesaplamalar için i , d %9 alınmıştır [26].

$$i = d \text{ ise } P_1 = \frac{N}{1+i} \quad (6)$$

İzolasyonun ilk yatırım maliyeti (P_2), işletme ve bakım giderleri olup, Eş. 7'den hesaplanmıştır [28].

$$P_2 = I + P_1 \cdot M_s - \frac{R_v}{(1+d)^N} \quad (7)$$

Eşitlikte, M_s ; yıllık bakım, işçilik maliyetinin ilk maliyete oranını, R_v ; perakende satış fiyatının ilk satış fiyatına oranını göstermektedir. Bu durumda bakım ve işçilik maliyetleri sıfır kabul edilirse P_2 değeri 1 alınabilir. İzolasyon maliyeti (C_y) ise, Eş. 8 ile hesaplanmıştır [29]. Eşitlikte İzolasyon malzemesinin birim hacim fiyatı (C_i), İzolasyon malzemesi tabaka kalınlığı (x) olarak sembolize edilmiştir.

$$C_y = C_i \cdot x \quad (8)$$

Bina duvarı birim yüzeyinden elde edilecek enerji tasarrufu (S) Eş. 9'da verilmiştir [30].

$$S = P_1 \cdot E_A - P_2 \cdot C_y \quad (9)$$

Yalıtılmış bir binanın toplam ısıtma maliyeti (C_{top}) Eş. 10'da verilmiştir [31].

$$C_{top} = P_1 E_A + P_2 C_y \quad (10)$$

Yalıtım da optimum nokta yıllık maliyetin en düşük olduğu, enerji tasarrufunun en yüksek olduğu nokta olarak ifade edilebilir. Eş. 11 yardımıyla Optimum yalıtım kalınlığı hesaplanmaktadır [28]. Hesaplamalarda kullanılacak parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hesaplamalarda Kullanılan Değişkenler (Variables used in the calculations)

Parametre	Değer
IDS (İzmir) (°C saat)[32]	28512
Yakıt Özellikleri	Tablo 1
İzolasyon	
XPS	
k[33]	0.033 W/mK
EPS	
k[34]	0.036 W/mK
Taş yünü	
k[33]	0.04 W/mK
1TDYD	
R_{wt}	0.508 m ² K/W
2TSD	
R_{wt}	0.696 m ² K/W
Ömür, N	10 yıl
P_1	9
P_2	1

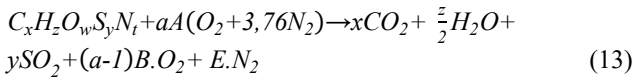
$$X_{opt} = \left(\frac{IDS \cdot C_f \cdot P_1 \cdot k_y}{P_2 \cdot LHV \cdot C_i \cdot \eta} \right)^{1/2} - k_y \cdot R_{wt} \quad (11)$$

Yalıtımın geri ödeme süresi Eş. 12'de verilmiştir [31].

$$GÖS = \frac{LHV \cdot C_i \cdot P_2 \cdot \eta \cdot (R_{wt} \cdot x + R_{wt}^2 \cdot k_y) \cdot (1 + i)}{C_f \cdot IDS} \quad (12)$$

2.2.3. Baca gazı emisyon hesaplamaları (The calculations of exhaust emission)

Bina dış duvarlarına uygulanacak olan izolasyon, enerji tasarrufunun yanı sıra baca gazı emisyonlarını azaltıp atmosferin kişi başına düşen baca gazı emisyonlarını da azaltacaktır. İzmir için iki tip duvar, iki yakıt türü için yalıtımsız ve OYK'na göre XPS, EPS, Taşyünü ile yalıtım yapılmış olduğu varsayılarak IDBASCМ ve IDBASKM'ları Eş. 13-21'le hesaplanmıştır. Kullanılan yakıtların genel yanma eşitliği Eş. 13'te verilmiştir [34].



A ve B sabitleri oksijen denge eşitliklerinden (Eş. 14, 15 ve 16) hesaplanabilir [34].

$$A = \left(x + \frac{z}{4} + y - \frac{w}{2} \right) \quad (14)$$

$$B = (\alpha - 1) \left(x + \frac{z}{4} + y - \frac{w}{2} \right) \quad (15)$$

$$E = 3.76\alpha \left(x + \frac{z}{4} + y - \frac{w}{2} \right) + \frac{t}{2} \quad (16)$$

Eş.12'de CO ve NO_x emisyonları ihmal edilmiştir. Eş. 17, 18 ile 1 kg yakıtın yanmasıyla açığa çıkacak emisyon oranları hesaplanmıştır [35].

$$M_{CO_2} = \frac{x \cdot M_{CO_2}}{M_{yakıt}} \quad (kg \ CO_2 / kg \ yakıt) \quad (17)$$

$$M_{SO_2} = \frac{y \cdot M_{SO_2}}{M_{yakıt}} \quad (kg \ SO_2 / kg \ yakıt) \quad (18)$$

Yıllık yakıt tüketimine göre birim yüzeydeki CO₂ ve SO₂ emisyon miktarı Eş. 19, Eş. 20'de verilmiştir[36].

$$M_{CO_2} = \frac{44 \cdot x}{M_{yakıt}} E_A \quad (kg \ CO_2 / m^2 - yıl) \quad (19)$$

$$M_{SO_2} = \frac{64 \cdot y}{M_{yakıt}} E_A \quad (kg \ SO_2 / m^2 - yıl) \quad (20)$$

Eş. 19 ve 20'deki M yakıtın mol ağırlığı olup Eş. 21 ile hesaplanmıştır.

$$M_{yakıt} = 12x + z + 16w + 32y + 14t \quad (kg/mol) \quad (21)$$

2.3. Isıtma Dönemi Kişi Başı Karbondioksit Miktarı (IDKBCM) ve Isıtma Dönemi Kişi Başı Kükürtdioksit Miktarı (IDKBKM) Hesaplama Yönteminin Açıklanması (Explanation of Calculation Methods for Carbon Dioxide Amount Per Person in the Heating Period (CDPPHP) and Sulfur Dioxide Amount Per Person in the Heating Period (SDPPHP))

2011 yılı OECD ülkeleri sera gazı salınımı değerlerine göre, CO₂ salınımları en fazla ülke 6.7 milyar ton ile ABD iken, Türkiye 422 milyon ton ile dokuzuncu sırada, OECD devletleri fert başı sera gazı salınımları ortalaması 12.8 ton CO₂ eşdeğeridir. Avustralya fert başı 24.7 ton CO₂ eşdeğeriyle birinci sırada yer alırken OECD ülkeleri arasında Türkiye 5.7 ton CO₂ eşdeğer ile en az sera gazı emisyonu salınımı yapan ülke arasındadır [37].

Bu çalışmada literatüre iki yeni yaklaşım (IDKBCM, IDKBKM) getirilmiştir. Bu yaklaşımlar Eş. 22 ve 23'de açıklanmıştır.

$$IDKBCM = \frac{IDBASCМ \cdot NTDDA \cdot İTKS}{İNS} \quad (kg /kişi ısıtma dönemi) \quad (22)$$

Bu eşitlikte il toplam konut sayısını (İTKS), il nüfus sayısını (İNS) ifade etmektedir.

İkinci yaklaşımda ise SO₂ emisyonunu bulmak için, IDKBKM ile literatüre ikinci bir yaklaşım Eş. 23 getirilmiştir.

$$IDKBKM = \frac{IDBASKM \cdot NTDDA \cdot İTKS}{İNS} \quad (kg /kişi ısıtma dönemi) \quad (23)$$

Eş. 22' deki IDBASCМ Tablo 5'te her iki yakıt için ayrı ayrı olarak Eş. 23'teki IDBASKM'ları yalıtımsız, farklı yalıtım kalınlığına (2-24cm), 2 duvar tipi, üç farklı yalıtım malzemesine ve iki yakıt türüne göre 183 farklı hesaplama yapılmıştır. Bu hesaplamalar yazılan visual basic tabanlı yazılımla yapılmıştır. Yazılım sonuçları analiz edilerek Tablo 6-8 ve Şekil 2-7'de verilmiştir.

İzmir İTKS'la ilgili veri olmadığı için Türkiye İstatistik Kurumu Balıkesir Bölge Müdürlüğüne 2018 yılı hane halkı sayısı için resmi yazıyla başvuru yapılmıştır. Başvuru 95083221-622.03-E.120 sayı numarasıyla resmi excell dosyası olarak teslim edilmiştir. Bu excell dosyasında; "31 Aralık 2018 Tarihli Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları İllere Göre Hanehalkı Sayısı" İzmir hane halkı sayısı (Kent Nüfusu 20.001 ve üzeri yerleşim yerlerini (il/ilçe merkezi, belde ve köyler) 1392267 olduğu belirtilmiştir. Hane halkı sayısı İzmir İTKS olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. İzmir nüfus sayısı 4320579'dir[38]. İzmir için yapılan bu çalışmada; İTKS 1392267 konut, İNS 4320579 kişi olarak alınmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

İki farklı dış duvar, yakıt türü ve üç farklı izolasyon malzemesi için hesaplama ve analiz sonuçları üç aşamada ayrıntılı olarak tablo ve grafiklerle açıklanmıştır.

3.1. Optimum Yalıtım Kalınlığı (OYK), Yakıt Maliyeti, Toplam Maliyet, Geri Ödeme Süresi (GÖS) ve Yıllık Kazanç Hesaplamaları Sonuçları

(Results of optimum insulation thickness (OIT), fuel costs, total costs, return on investment (ROI) and annual gain calculations)

Bu bölümde İzmir ili iki duvar tipi (1TDYD ve 2TSD) için; OYK, yakıt ve toplam maliyet, GÖS ve yıllık kazanç hesaplamalarında, yakıt olarak doğalgaz ve ithal kömür, izolasyon malzemesi olarak da, XPS, EPS, ve Taş yünü seçilmiştir. Her iki yakıt türü için de ayrı ayrı hesaplamalar yapılmış, yapılan bu hesaplamalar iki duvar tipiyle karşılaştırılmıştır. Seçilen iki farklı dış duvar yapısı için, OYK'ları, GÖS'leri, toplam maliyetler ve senelik kazançları hesaplama sonuçları kömür için Tablo 3'de, doğalgaz için Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 3'den görüleceği üzere 2TSD

için optimum yalıtım kalınlığı, yapı bileşenlerinin ısı iletim katsayıları ve duvar bileşenlerinin farklı olmasından dolayı 1TDYD'dan daha düşük çıkmıştır.

Tablo 4'te 1TDYD ve 2TSD için en küçük OYK'ları sırasıyla 0.048m ve 0.042m ile XPS'de olduğu, GÖS'inde taş yünü olduğu görülmektedir. Her iki duvar tipi içinde taş yünü OYK'nın en büyük olmasına rağmen GÖS'nin küçük çıkmasının nedenleri toplam maliyetlerin düşük, kazançların yüksek olmasından dolayıdır.

Dıştan XPS yalıtımlı duvar için yakıt olarak doğalgaz kullanılması durumunda OYK 4.8 cm olurken yakıt olarak kömür seçilmesi halinde OYK 5.4 cm, 2TSD OYK 4.2 cm olmaktadır. Yakıt türünün optimum yalıtım kalınlığına bu denli değiştirmesinde yakıt maliyeti, yakıt alt ısı değeri, yakıt verimi belirleyici bir etken olmaktadır. Tablo 3 ve Tablo 4'te her iki yakıt ve duvar tipi, üç yalıtım malzemesi çeşidine göre küçükten büyüğe sırasıyla; OYK'ğı XPS, EPS ve taş yünü, toplam maliyet ve GÖS'de taş yünü EPS, XPS olduğu, yıllık kazancında XPS, EPS ve taş yünü olduğu görülmektedir.

Tablo 3. İki farklı dış duvar tipi ve kömür için üç farklı izolasyon malzemesine göre hesaplama sonuçları
(Calculation results for two different wall types and three different insulation materials for coal)

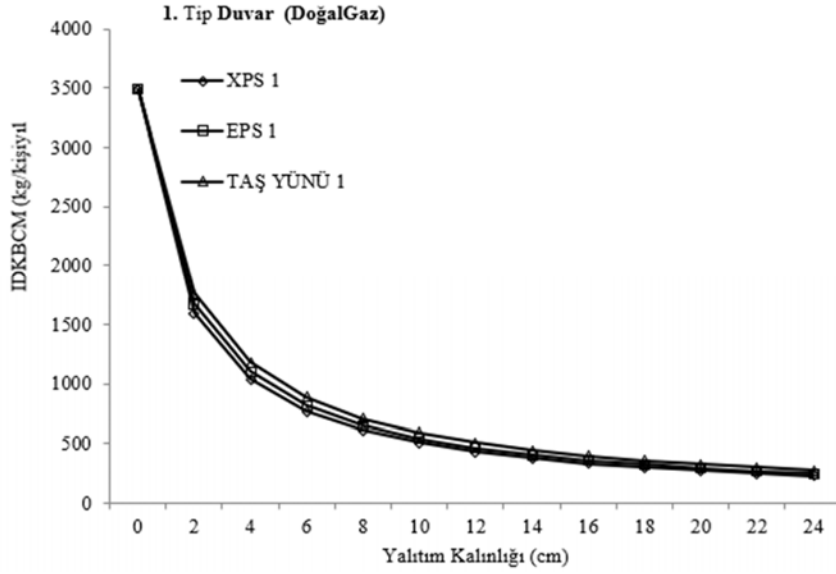
Yakıt Türü	Duvar Tipleri					
	1TDYD			2TSD		
Kömür	XPS	EPS	Taş Yünü	XPS	EPS	Taş Yünü
Yalıtım Maliyeti (TL/m ² yıl)	14.580	13.860	13.320	12.690	12.320	12.060
Yakıt Maliyeti (TL /m ² yıl)	18.857	17.908	17.149	19.072	17.959	17.054
Toplam Maliyet (TL /m ² yıl)	33.437	31.768	30.469	31.762	30.279	29.114
GÖS (yıl)	2.400	2.247	2.133	3.252	3.069	2.938
Kazanç (TL/m ² yıl)	46.162	47.831	49.130	26.337	27.819	28.984
Optimum Yalıtım Kalınlığı (m)	0.054	0.063	0.074	0.047	0.056	0.067

Tablo 4. İki farklı duvar tipi ve doğalgaz için üç farklı yalıtım malzemesine göre hesaplama sonuçları
(Calculation results for two different wall types and three different insulation materials for natural gas)

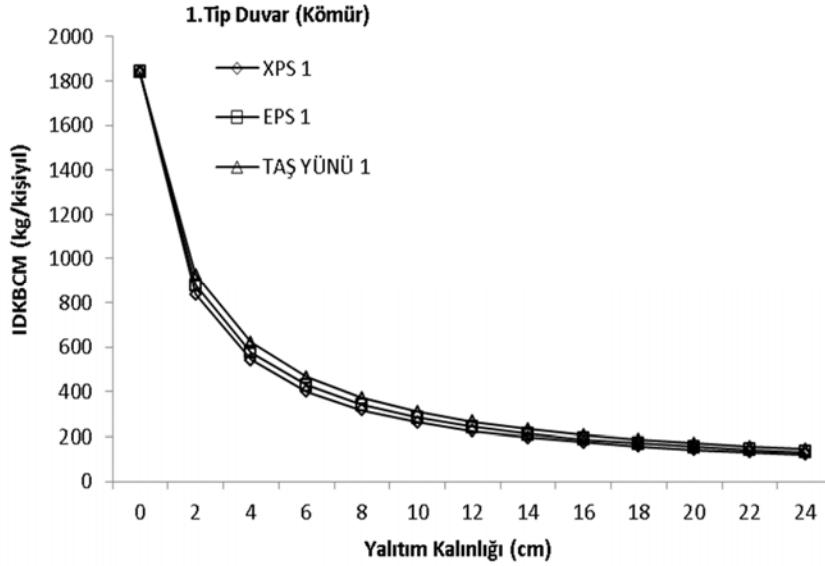
Yakıt Türü	Duvar Tipleri					
	1TDYD			2TSD		
Doğalgaz	XPS	EPS	Taş Yünü	XPS	EPS	Taş Yünü
Yalıtım Maliyeti (TL/m ² yıl)	12.960	12.540	12.060	11.340	11.000	10.800
Yakıt Maliyeti (TL/m ² yıl)	17.678	16.590	15.893	17.623	16.641	15.799
Toplam Maliyet (TL/m ² yıl)	30.638	29.130	27.953	28.963	27.641	26.599
Geri Ödeme Süresi (Yıl)	2.560	2.425	2.301	3.519	3.313	3.172
Kazanç (TL/m ² yıl)	37.658	39.166	40.343	20.885	22.207	23.249
Optimum Yalıtım Kalınlığı (m)	0.048	0.057	0.067	0.042	0.050	0.060

Tablo 5. İki duvar ve yakıt türüne göre, yalıtımsız ve optimum yalıtım kalınlığına göre IDBASC M
(According to two wall and fuel types, uninsulated and according to optimum insulation thickness IDBASC M)

Duvar ve Yakıt Türü	IDBASC M (kg/m ² ısıtma dönemi)			
	Yalıtımsız	Optimum Yalıtım Kalınlığına Göre		
		XPS	EPS	Taş Yünü
1TDYD Kömür	118.462	28.383	26.728	25.381
1TDYD Doğalgaz	69.297	16.126	15.133	14.497
2TSD Kömür	86.464	28.064	26.652	25.521
2TSD Doğalgaz	45.470	16.075	15.179	14.411



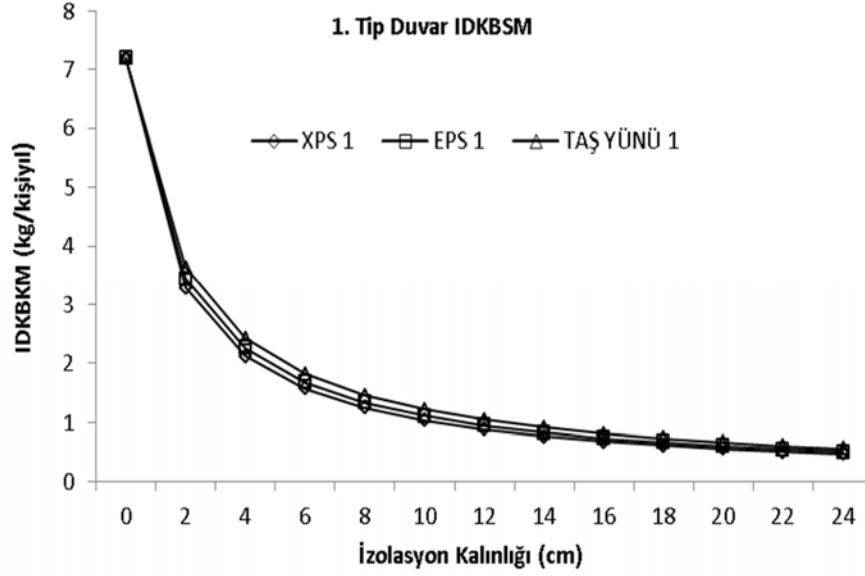
Şekil.2. Doğal gaz 1TDYD için izolasyon malzemesi cinsi ve kalınlığı için IDKBCM

Şekil.3. Kömür 1TDYD için izolasyon malzemesi cinsi ve kalınlığı için IDKBCM
(IDKBCM According to the type and thickness of insulation material for coal 1TDYD)

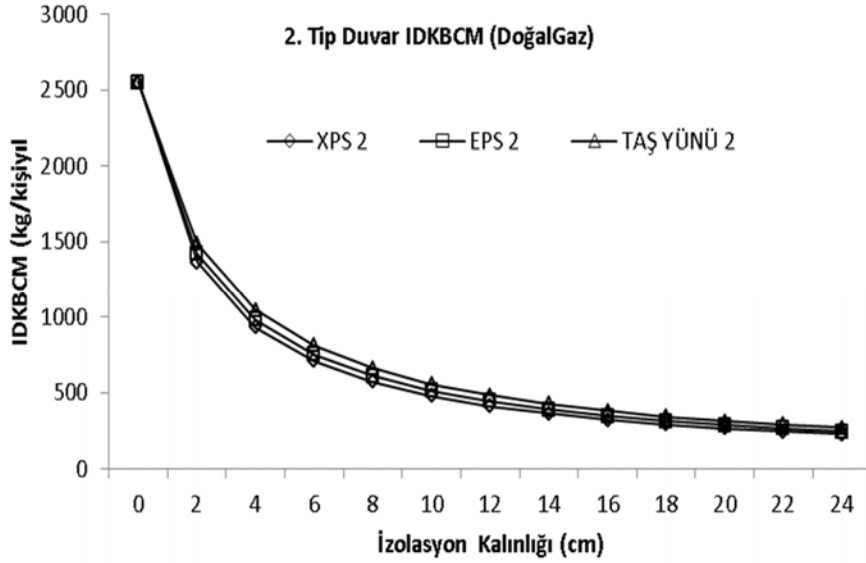
3.2. Farklı Yalıtım, Duvar, Yakıt Cinsine Göre Emisyon Hesaplamalarının Yalıtım Durumuna Göre Hesaplanması (Calculation of emissions according to different insulation, wall and fuel types)

Yakıt tüketimini azaltmak için yapılan yalıtımla hem enerji tasarrufu yapılmakta hem de yakıt kaynaklı emisyonlar aynı ölçüde azaltılmaktadır. Kömürün yanmasıyla atmosfere CO₂ ve SO₂, doğal gazın yanmasıyla da SO₂ salımı olmaktadır. Çalışmanın ikinci aşaması ilk defa İzmir için yapılarak literatüre kazandırılmıştır. Bu aşamada; 1 kg yakıtın yanmasıyla atmosfere salınacak emisyonlar duvar, yakıt ve yalıtım malzemesi cinsine göre ve yalıtımsız olarak karşılaştırılmaları yapılarak OYK'nın çevre ve enerji

üzerindeki etkisi açıklanmıştır. Hesaplamalar sonrasında ortaya çıkan sonuçlar analiz edilerek CO₂ ve SO₂ salımları Tablo 5'te verilmiştir. Bu tabloda görüleceği üzere yalıtımsız 1TDYD'a sahip bir binada yakıt olarak doğalgaz kullanılması durumunda IDBASC_M 69.297 kg/m² ısıtma dönemi olduğu, bu binanın XPS ile OYK'na göre yalıtılması durumunda IDBASC_M 16.126 kg/m² ısıtma dönemi olduğu, oransal olarak %76 azalacağı görülmektedir. Bu durum yakıt olarak kömür kullanıldığında ise IDBASC_M 118.462 kg/m² ısıtma dönemi olduğu görülmektedir. 2TSD'a sahip yalıtımsız bir binada yakıt olarak doğalgaz kullanılması durumunda IDBASC_M 45.470 kg/m² ısıtma dönemi, bu binanın XPS ile OYK'na göre yalıtılması durumunda IDBASC_M 16.075 kg/m² ısıtma dönemi, yakıt olarak kömür



Şekil.4. Kömür 1TDYD için izolasyon malzemesi cinsi ve kalınlığı için IDKBKM (IDKBKM According to the type and thickness of insulation material for coal 1TDYD)



Şekil.5. Doğal gaz 2TSD tipi için, izolasyon malzemesi cinsi ve kalınlığı için IDKBCM (2TSD type for natural gas, according to the type and thickness of insulation material IDKBCM)

kullanıldığında yalıtımsız olarak IDBASC_M 86.464 kg/m² ısıtma dönemi, OYK'na göre EPS ile yalıtılması durumunda IDBASC_M miktarı 26.652 kg/m² ısıtma dönemi olduğu Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 6'da 1 kg kömürün IDBASK_M'ları yalıtımlı ve yalıtımsız durum için sunulmuştur. Tablo 6'da görüleceği üzere yalıtımsız 1TDYD'a sahip bir binada yakıt olarak kömür yakılması durumunda IDBASK_M 0.240 kg/m² ısıtma dönemi olduğu görülmektedir. Bu binanın XPS ile OYK'na göre yalıtılması durumunda IDBASK_M 0.058 kg/m² ısıtma dönemi olduğu, oransal olarak da yine %76 azalacağı Tablo 6'da görülmektedir.

3.3. Yalıtım Durumuna Göre Kömür ve Doğalgaz İçin Isıtma Dönemi Birim Alandan Salınan Karbondioksit Miktarı (IDBASC_M) ve Isıtma Dönemi Birim Alandan Salınan Kükürtdioksit Miktarı (IDBASK_M) Hesaplamaları (Calculation of carbon dioxide amount released per unit area in the heating period (CDUAHP) and sulfur dioxide released per unit area in the heating period (SDUAHP) for coal and natural gas according to insulation status)

Çalışmanın üçüncü aşamasında, ikinci aşamadaki IDBASC_M ve IDBASK_M kullanılarak İzmir için IDKBCM ve IDKBKM ile ilgili literatüre iki yeni yaklaşım daha getirilmiştir. Bu çalışmada literatüre kazandırılan Eş. 22 ve 23 yazılan PYTON bilgisayar programıyla IDKBCM ve

IDKBKM için 183 farklı senaryoya göre hesaplama ve analiz yapılmıştır. Hesaplama ve analiz sonuçları Tablo 7-9 ve Şekil 2-7'de verilmiştir.

Yakıt olarak doğal gaz, yalıtımsız ve on üç farklı kalınlıkta (2-24 cm) XPS, EPS, Taş yünü kullanıldığı varsayılarak IDKBKM ve kömür içinde IDKBKM, IDKBSM hesaplanıp analiz edilmiştir. Hesaplama ve analiz sonuçları doğal gaz için Tablo.7 ve Şekil 2'de, kömür için Tablo 8, 9 ve Şekil 3,4'de verilmiştir.

1TDYD sahip bir dairede doğal gaz için IDKBKM; yalıtımsız olarak 1839 kg/kişiyıl, OYK'na göre XPS ile yalıtılması durumunda ise 441 kg/kişiyıl olduğu, oransal olarak %76 azalacağı Tablo 7'de görülmektedir.

1TDYD için yakıt olarak doğal gaz, üç farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, Taş Yünü) kullanıldığında IDKBKM'nin üç yalıtım malzemesi optimum yalıtım

kalınlıklarına kadar azalma değişim oranının yüksek olduğu, OYK'larından sonra ise bu azalma oranının çok düştüğü Şekil 2'de görülmektedir.

Tablo 8'de kömür için, yalıtımsız bir dairede IDKBKM; 3483.84 kg/kişiyıl OYK'na kadar yalıtım kalınlığı arttıkça emisyon miktarında azalma oranının büyük olduğu, OYK'dan sonra azalma oranının çok azaldığı görülmektedir. 1TDYD'da yalıtımsız olarak 3483.84 kg/kişiyıl olan IDKBKM OYK göre yalıtıldığında; XPS ile 837.83 kg/kişiyıl, EPS ile 788.97 kg/kişiyıl, Taş yünü ile 749.22 kg/kişiyıl olduğu hesaplanmıştır.

1TDYD için kömür, üç farklı izolasyon malzemesi (XPS, EPS, Taş Yünü) kullanıldığında IDKBKM'nin optimum yalıtım kalınlıklarına kadar azalma değişim oranının yüksek olduğu, OYK'dan sonra ise bu azalma oranının çok düştüğü Şekil 3'te görülmektedir.

Tablo 6. Yalıtımlı ve yalıtımsız iki farklı duvar ve kömür için IDBASKM (IDBASKM for two different types of insulated and uninsulated walls and coals)

Duvar Tipi	IDBASKM (kg/m ² ısıtma dönemi)			
	Yalıtımsız	Optimum Yalıtım Kalınlığına Göre		
		XPS	EPS	Taş Yünü
1TDYD	0.240	0.058	0.055	0.052
2TSD	0.177	0.058	0.055	0.053

Tablo 7. Doğal gaz 1TDYD için farklı izolasyon malzemesi cinsi ve kalınlığı için IDKBKM (IDKBKM for natural gas 1TDYD according to different insulation material type and thickness)

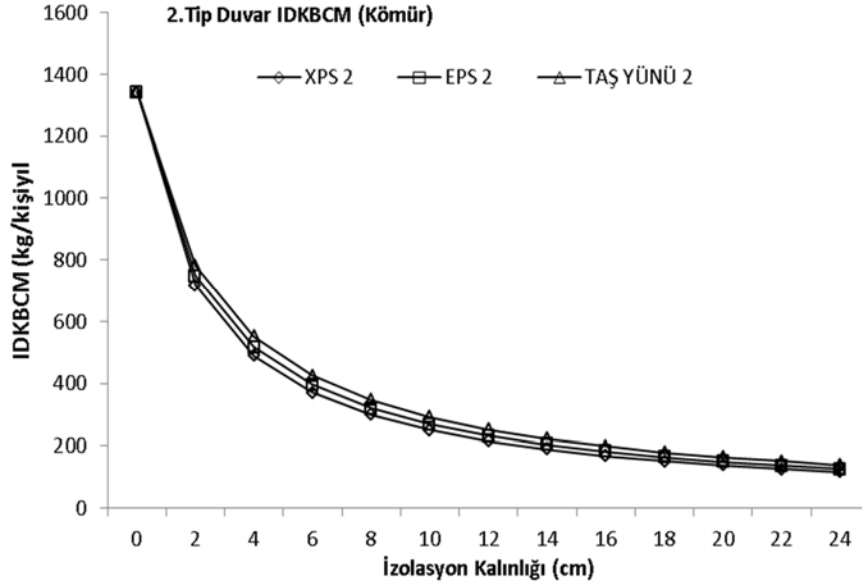
Yalıtım Malzemesi	IDKBKM (kg/kişi yıl)												
	İzolasyon Kalınlığı (cm)												
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
XPS	1839	838.5	543.1	401.6	318.6	264.0	225.4	196.7	174.4	156.7	142.2	130.2	120.1
EPS	1839	878.4	577.0	429.6	342.2	284.3	243.2	212.5	188.6	169.6	154.1	141.1	130.2
Taş Yünü	1839	926.8	619.5	465.2	372.5	310.6	266.3	233.1	207.2	186.5	169.6	155.5	143.5

Tablo 8. Kömür 1TDYD için farklı yalıtım malzemesi ve kalınlığı için IDKBKM (IDKBKM According to the type and thickness of insulation material for coal 1TDYD)

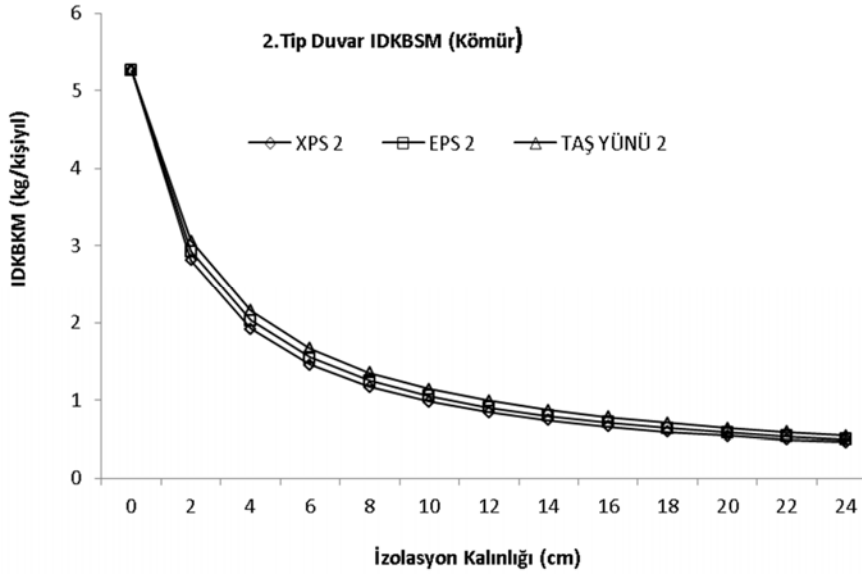
Yalıtım Malzemesi	IDKBKM (kg/kişi yıl)												
	İzolasyon Kalınlığı (cm)												
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
XPS	3483.8	1594.5	1032.7	763.7	605.8	502.1	428.6	374.0	331.6	297.9	270.4	247.6	
EPS	3483.8	1670.3	1097.2	816.9	650.7	540.6	462.4	404.0	358.7	322.5	293.0	268.4	
Taş Yünü	3483.8	1762.3	1178.0	884.7	708.3	590.6	506.4	443.2	394.1	354.7	322.5	295.7	

Tablo 9. Kömür 1TDYD için izolasyon malzemesi cinsi ve kalınlığı için IDKBSM (IDKBSM According to the type and thickness of insulation material for coal 1TDYD)

Yalıtım Malzemesi	SO ₂ Salınımın Miktarı (kg/kişi yıl)												
	İzolasyon Kalınlığı (cm)												
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
XPS	7,196	3,281	2,125	1,572	1,247	1,033	0,882	0,770	0,682	0,613	0,557	0,510	0,470
EPS	7,196	3,437	2,258	1,681	1,339	1,113	0,952	0,831	0,738	0,664	0,603	0,552	0,510
Taş Yünü	7,196	3,627	2,424	1,821	1,458	1,215	1,042	0,912	0,811	0,730	0,664	0,608	0,562



Şekil.6. Kömür için 2TSD tipi, izolasyon malzemesi cinsi ve kalınlığı için IDKBCM (2TSD type for coal, according to the type and thickness of insulation material IDKBCM)



Şekil.7. Kömür 2TSD için izolasyon malzemesi cinsi ve kalınlığı için IDKBKM (2TSD type for coal, according to the type and thickness of insulation material IDKBKM)

Tablo 9'da kömür için IDKBKM; yalıtımsız bir dairede 7.196 kg/kişiyıl, OYK'na göre XPS ile 1.724 kg/kişiyıl, EPS ile 1.62 kg/kişiyıl, Taş yünü ile 1.542 kg/kişiyıl olduğu verilmiştir.

Makale metninin uzamaması için 2TSD için analiz sonuçları Şekil 5, 6 ve 7'de verilmiştir. Yakıt olarak doğalgaz, izolasyon malzemesi olarak XPS, EPS, Taş yünü ve 2TSD tipi için yalıtım kalınlığının IDKBCM'na etkisi Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5'de OYK'na kadar yalıtım kalınlığı arttıkça IDKBCM'da azalma oranının büyük olduğu, OYK'dan sonra azalma oranının giderek azaldığı görülmektedir. Yakıt olarak kömür, izolasyon malzemesi olarak XPS, EPS, Taş yünü ve 2TSD tipi için yalıtım

kalınlığının IDKBCM etkisi Şekil 6'da, IDKBKM etkisi Şekil 7'de verilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre iki duvar tipi ve iki yakıt türü içinde OYK'na kadar kişi başı yıllık IDKBCM azalma oranının yüksek olduğu OYK'dan sonra yalıtım kalınlığı artmasına rağmen CO₂ salınımlarındaki azalmanın oranının sürekli azaldığı görülmektedir. Kömür için SO₂ ve CO₂ salınımlarına benzemektedir.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

OYK Optimum yalıtım kalınlığı (m)
U Dış duvar toplam ısı transfer katsayısı [W/m²K]

T_b	Denge sıcaklığı [°C]
T_o	İç ortam sıcaklığı [°C]
C_y	Yalıtım maliyet [TL/m ³]
C_f	Yakıt maliyet [TL/kg, TL/m ³]
EA	Isıtma için gerekli yıllık enerji miktarı [J/m ² yıl]
d	Enflasyon oranı [%]
$GÖS$	Geri ödeme süresi [Yıl]
IDS	Isıtma derece Saat [°C-saat]
N	Ömür [Yıl]
P_1	Şimdiki değer faktörü

Kısaltmalar (Abbreviations)

i	Faiz oranı [%]
M_s	Yıllık bakım maliyeti
R_v	Perakende satış fiyatı [m ³ /TL]
k	Yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı [W/mK]
$LCCA$	Ömür maliyet analizi
LHV	Yakıtın alt ısı değeri [J/kg, J/m ³ , J/kWh]
m_f	Yıllık yakıt tüketimi [kg/m ² yıl]
$GÖS$	Geri ödeme süresi [yıl]
P_1	Şimdiki değer faktörü
T_o	Ortalama dış sıcaklık [°C]
η	Yakma sistemi verimi
x	Yalıtım Kalınlığı [m]

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada ısıtma enerji ihtiyacına bağlı kömür için IDBASCAM ve IDBASKM, doğalgaz için IDBASCAM yeni bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca ısıtma enerji ihtiyacına bağlı kömür için IDKBASCAM ve IDBASKM, doğalgaz için IDBASCAM yeni bir hesaplama yöntemi daha geliştirilmiştir.

Literatüre IDBASCAM, IDBASKM ve IDKBASCAM ve IDBASKM adı altında İzmir için ilk defa kazandırılan yaklaşımlarla ilgili hesaplama ve analiz sonuçları aşağıda sunulmuştur.

- 1TDYD için yakıt olarak kömür kullanılması halinde OYK, XPS için 0.054 m, EPS için 0.063m, Taş yünü için 0.074m, GÖS sırasıyla 2.4, 2.247 ve 2.133 yıl hesaplanırken, doğal gaz için OYK, sırasıyla 0.048 m, 0.057m, 0.067m, GÖS'de sırasıyla 2.56, 2.425 ve 2.301 yıl olarak hesaplanmıştır.
- 2TSD için yakıt olarak kömür kullanılması halinde OYK, sırasıyla 0.047m, 0.056m, Taş yünü için 0.067m, GÖS sırasıyla 3.252, 3.069 ve 2.938 yıl hesaplanırken, doğal gaz için OYK, sırasıyla 0.042 m, 0.050m, 0.060m, GÖS'de sırasıyla 3.19, 3.313 ve 3.172 yıl olarak hesaplanmıştır.
- 1TDYD'a sahip bir binada yakıt olarak kömür yakılması durumunda; yalıtımsız IDBASCAM 118.462 kg/m²ısıtmadönemi, XPS için IDBASCAM 28.383 kg/m²ısıtmadönemi, EPS için IDBASCAM 26.728 kg/m²ısıtmadönemi, Taş yünü için IDBASCAM 25.381 kg/m²ısıtma dönemi olarak, IDBASKM ise yalıtımsız, XPS, EPS ve Taş yünü için sırasıyla 0.240, 0.058, 0.055 ve 0.053 kg/m²ısıtmadönemi olarak hesaplanmıştır.

- 2TSD'a sahip bir binada yakıt olarak kömür yakılması durumunda IDBASCAM yalıtımsız 86.464 kg/m²ısıtmadönemi, XPS için IDBASCAM 28.064 kg/m²ısıtmadönemi, EPS için IDBASCAM 26.652 kg/m²ısıtmadönemi, Taş yünü için IDBASCAM 25.521 kg/m²ısıtmadönemi olarak, IDBASKM ise yalıtımsız, XPS, EPS ve Taş yünü için sırasıyla 0.177, 0.058, 0.055 ve 0.053 kg/m²ısıtmadönemi olarak hesaplanmıştır.
- 1TDYD'a sahip bir binada yakıt olarak doğalgaz yakılması durumunda ise; IDBASCAM yalıtımsız duvara göre, XPS için % 57, EPS için % 58 ve Taş yünü için % 56 oranında azalacağı, 2TSD içinse IDBASCAM yalıtımsız % 53, XPS ve EPS için % 57, Taş yünü içinde % 56 oranında azalacağı ortaya konulmuştur.
- 1TDYD ve yakıt olarak doğalgaz için, yalıtımsız bir binada 1839 kg / kişi ısıtma dönemi olacaktır. Bu binanın XPS ile OYK'na göre yalıtılması durumunda 441 kg / kişi ısıtma dönemi, oransal olarakta IDKBSCM' nın %76 azalacağı hesaplanmıştır. Yakıt olarak kömür kullanılması durumunda ise, yalıtımsız bir dairede 3484 kg kişi/ ısıtma dönemi, XPS ile OYK'na göre yalıtılması durumunda 838 kg/ kişi ısıtma dönemi olarak,
- 2TSD içinse doğal gaz için yalıtımsız olarak 1342.225 kg kişi/ ısıtma dönemi, OYK'na göre yalıtılması durumunda ise 465.411 kg kişi / ısıtma dönemi olduğu, yakıt olarak kömür kullanılması durumunda ise, yalıtımsız bir dairede 2552 kg / kişi ısıtma dönemi, XPS ile OYK'na göre yalıtılması durumunda 837.838 kg/ kişi ısıtma dönemi olduğu hesaplanmıştır.
- 1TDYD ve 2TSD uygulamasında IDKBSCM yakıt olarak kömür kullanılması durumunda; 1TDYD için yalıtımsız bir binada 7.196 kg kişi/ısıtma dönemi, XPS ile OYK'na (4.2cm) göre yalıtıldığında 1.999 kg / kişi ısıtma dönemi, oransal olarak %73 azalacağı hesaplanmıştır.
- 2TSD için yalıtımsız bir binada 5.252 kg kişi/ısıtma dönemi, EPS ile OYK'na (5cm) göre yalıtıldığında 1.698 kg / kişi- ısıtma dönemi, oransal olarak %69 azalacağı hesaplanmıştır.

Literatüre kazandırılan bu yaklaşımlarla dünyanın herhangi bir ilindeki IDKBSCM ve IDKBSCM Eş. 22 ve 23'deki parametrelerle kolaylıkla hesaplanabilecektir. Hatta il bazında ayrıntılı bina dış duvarları envanteri temin edildiğinde daha hassas IDKBSCM ve IDKSM hesaplanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Özel M. Dört farklı il için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi ve çevresel analiz, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10 (1), 1-17, 2013.
2. Yılmaz Y., Koçlar G. An approach for cost and energy efficient retrofitting of a lower secondary school building, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 34 (1), 393-407, 2019.
3. Kurt H. The usage of air gap in the composite wall for energy saving and air pollution, Environmental Progress & Sustainable Energy, 30 (3), 450-458, 2011.

4. Gürel A. E., Çay Y., Daşdemir A., Küçükkülahlı E. Karabük için dış duvar optimum yalıtım kalınlığının enerji tasarrufu ve hava kirliliğine etkileri, *Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 1 (4), 2012.
5. Öztuna., S, Dereli E. Edirne İlinde Optimum Duvar Yalıtım Kalınlığının Enerji Tasarrufuna Etkisi. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10 (2), 139-147, 2016.
6. Gürel A.E., Daşdemir A. Economical and environmental effects of thermal insulation thickness in four different climatic regions of Turkey, *IJRER*, 1 (1), 1-10, 2011.
7. Bolattürk A. Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey, *Building and Environment*, 43 (6), 1055–1064, 2008.
8. Bolattürk A. Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey, *Applied Thermal Engineering*, 26 (11-12), 1301–1309, 2006.
9. Daşdemir A., Kurt H. Hava boşluklu dış duvar konstrüksiyonunun çevre kirliliği üzerine etkisi, 2. Uluslararası Çevre ve Ahlak Sempozyumu (ISEM 2014), Adıyaman-Türkiye, 1333-1343, 24-26 Ekim 2014.
10. Ozturk H., Dombayci A., Caliskan H. Life-cycle cost, cooling degree day, and carbon dioxide emission assessments of insulation of refrigerated warehouses industry in Turkey, *Journal of Environmental Engineering*, 145 (10). 2019
11. Ertürk M., Keçebaş A., Daşdemir A., Kurt H. Isıtma ve soğutma uygulamalarında optimum yalıtım kalınlığı ve enerji tasarrufu analizi, 10th International Clean Energy Symposium, Istanbul-Turkey, 24-26 October 2016.
12. Mahlia T. M. I., Iqbal A. Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in Maldives, *Energy*, 35 (5), 2242-2250, 2010.
13. Kaynaklı Ö., Yamankaradeniz R. Isıtma süreci ve optimum yalıtım kalınlığı hesabı, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 104 (3), 19-25, 2008.
14. Atabey T., Karbon ayak izinin hesaplanması: Diyarbakır örneği, yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013, Elazığ.
15. TS 825, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Aralık 2013. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/08/20080826-7.htm>. Erişim tarihi, 14.10.2018.
16. Buyukalaca O., Bulut., Yılmaz, T. Analysis of variable-base heating and cooling degree-days for Turkey. *Applied Energy* 69: 269–83. 2001.
17. Kadioglu M., Şen Z. Degree day formulations and application in Turkey. *Journal of Applied Meteorology*. 38 (6) 37–46, 1999.
18. Daouas N., Hassen H., Aıssıa, H. Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia. *Applied Thermal Engineering*, 30 (4). 319-326, 2010.
19. Dombaycı Ö.A. The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings. *Building and Environment*, 42 (11), 3855-3859, 2007.
20. Dombaycı Ö.A., Gölcü M., Pancar Y. Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources. *Applied Energy*, 83, 921–928, 2006.
21. <http://www.tesisat.com.tr/belge-indir/1/511/10-temmuz-2018-yakit-fiyatları-konut.xlsx/>. Erişim tarihi, 14.07.2018.
22. <https://www.izgaz.com.tr/tr/izgaz/dogalgaz-fiyatları/doğalgaz fiyatları-temmuz-2018>. Erişim tarihi, 14.07.2018.
23. Çay, Y. and Gürel, A.E., Determination of optimum insulation thickness, energy savings, and environmental impact for different climatic regions of Turkey. *Environ. Prog. Sustainable Energy*, 32, 365-372, 2013.
24. Ertürk M., A new approach to calculate the energy saving per unit area and emission per person in exterior wall of building using different insulation materials and air gap, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 395-406, 2016.
25. Ataç A., Aksoy U. The relation between optimum insulation thickness and heating cost on external walls for energy saving, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21 (4), 753-758, 2006.
26. Al-Sanea S.A., Zedan M.F., Al-Ajlan S.A., Abdul Hadi A.S. Heat transfer characteristics and optimum insulation thickness for cavity walls, *Journal Thermal Envelope and Building Science*. 26 (3), 285-307,2003.
27. <http://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tcmb+tr/tcmb+tr/main+menu/para+politikasi/merkez+bankasi+faiz+oranlari>, 2018.
28. Hasan A. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost, *Applied Energy*. 63, 88-94, 1999.
29. Bolatturk A., Dagıdır C. Determination of optimum insulation thickness for buildings in hot climate regions by considering solar radiation. *Journal of Thermal Science and Technology*. 33 (1), 87-99, 2013.
30. Sisman N., Kahya E., Aras N., Aras H. Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey's different degree-day regionse. *Energy Policy*, 35, 5151–5155, 2007.
31. Yıldız A., Gürlek G., Erkek M., Özbalta N. Economical and environmental analyses of thermal insulation thickness in buildings, *Journal of Thermal Science of Technology*, 28 (2), 25–34, 2008.
32. Ertürk, M., Isıtma ve soğutma derece saat hesaplamalarında farklı bir yöntemin araştırılması ve geliştirilmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2012.
33. Uygunoğlu T., Keçebaş A. LCC analysis for energy-saving in residential buildings with different types of construction masonry blocks, *Energy and Buildings*, 43 (9), 2077-2085, 2011.
34. Hasan A., Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost, *Applied Energy*, 63 (2), 115- 124, 1999.

35. Basogul Y., Kecebas A. Economic and environmental impacts of insulation in district heating pipelines. *Energy*, 36 (10), 6156-6164, 2011.
36. Abdallah M.A., Ismail L.A. Saving energy lost from steam boiler vessels, *Renewable Energy*, 23 (3-4), 537-550, 2001.
37. http://www.tuik.gov.tr/basinOdasi/haberler/2014_22_20140408d.pdf. Erişim tarihi, 14.10.2018.
38. <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist> Erişim tarihi. 31.12.2018.



An analysis of asymmetric spur gear forging by upper bound energy method

Ömer Eyercioglu *^{ID}, Gulaga Taş^{ID}, Mehmet Aladağ^{ID}

Gaziantep University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 27310, Gaziantep, Turkey

Highlights:

- Upper bound energy analysis of asymmetric gear forging
- Determination of gear forging load and material flow
- Development of a software for gear forging load calculation

Keywords:

- Asymmetric spur gear
- upper bound energy method
- precision forging
- material flow
- forging load

Article Info:

Research Article
Received: 11.04.2020
Accepted: 29.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.718534

Correspondence:

Author: Omer Eyercioglu
e-mail:
eyercioglu@gantep.edu.tr
phone: +90 342 3171593

Graphical/Tabular Abstract

In this study, an analysis is presented for the determination of the forging load and material flow by using the upper bound energy method (UBEM) in the precision forging process of asymmetric spur gears. In this analysis, the driver and driven sides of the asymmetrical tooth are divided into 12 deformation zones. Calculation of regional material flow rates and solution of energy equations were realized with software developed in Python programming language and an interactive user interface is presented. An experimental study was carried out and the results of material flow pattern and forging load were compared with the results of upper limit energy analysis (UBEA).

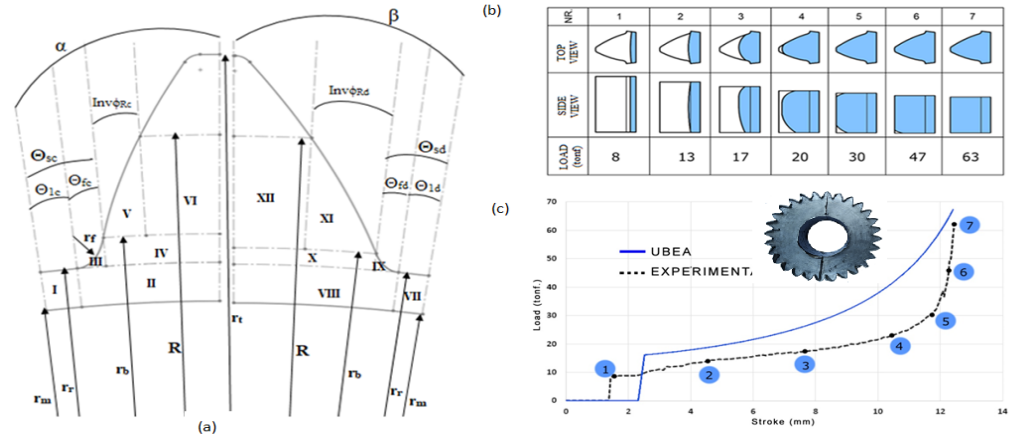


Figure A. Deformation zones of UBEA (a) Die filling (b) and corresponding load-stroke diagram (c)

Purpose: The purpose of this study is to present an analysis for determination of forging load and material flow pattern in asymmetric spur gear forging by using upper bound energy method.

Theory and Methods:

In the analysis of the asymmetric gear forging presented in this study uses upper bound energy theory (UBET). In this analysis, 12 different kinematically admissible velocity fields that satisfy the incompressibility, continuity and velocity boundary conditions have been chosen. Based on these velocity fields, deformation, shear (in the case of velocity discontinuities) and friction energy dissipation rates are calculated to determine the total forging energy and consequently the forging load. A software is developed in python programming language for calculations of the proposed equations. Asymmetric gear forging experiments were performed and the results of analysis and experimental ones were compared.

Results:

The load stroke curves for both UBEA and experimental study are similar in shape and show three different zones as; very low load (initial root filling) zone, relatively proportional load increasing (radial tooth profile filling) zone and an asymptotic load increasing (final tooth filling) zone. However, the forging load calculated by the presented UBEA is higher than the experimental ones the deviation is less than 10%. This show that the presented analysis and the developed software can be used for industrial applications where fast and conservative solutions are preferred.

Conclusion:

The load stroke diagrams of experimental and UBEA are in agreement in variation, however UBEA gives higher forging load. Keeping in mind that the bulging effect is not taken into account in the analysis (2D) and due to the nature of the upper limit energy theory, some amount of deviation must be expected in load prediction. The maximum forging deviation is below 10%, therefore the presented analysis is successful. The forging load can easily be determined by using the developed software in very short time. The software may be used for different materials and for both asymmetric and symmetric spur gear forgings.



Asimetrik düz dişli dövme işleminin üst sınır enerji metodu ile analizi

Ömer Eyercioğlu *^{ID}, Gulaga Taş ^{ID}, Mehmet Aladağ ^{ID}

Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 27310 Gaziantep

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Asimetrik dişli dövme üst sınır enerji analizi
- Dişli dövme yükü ve malzeme akışının belirlenmesi
- Dişli dövme yükü hesaplama yazılımı geliştirme

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 11.04.2020
Kabul: 29.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.718534

Anahtar Kelimeler:

Asimetrik düz dişli,
üst sınır enerji metodu,
hassas dövmecilik,
malzeme akışı,
dövme yükü

ÖZET

Asimetrik dişliler özellikle tek yönlü güç ve hareket iletiminin olduğu uygulamalarda simetrik dişlilere göre daha üstün performansları nedeniyle tercih edilmektedirler. Asimetrik dişlilerin imalatında, hassas dövmecilik teknolojisinin kullanılması ile profilden kaynaklanan imalat sınırlarının ortadan kaldırılması ve yüksek mukavemete sahip dişlilerin verimli bir şekilde üretilmesi mümkün olacaktır. Bu çalışmada, asimetrik düz dişlilerin hassas dövme işleminde, üst sınır enerji metodu (ÜSEM) kullanılarak dövme yükü ve malzeme akışının belirlenmesi için bir analiz sunulmuştur. Bu analizde, asimetrik dişin süren ve sürülen tarafları 12 şekil değiştirme bölgesine ayrılmıştır. Yapılan analizde, iş parçası malzemesinin isotropik ve homojen olduğu, dövme sırasında pekleşmediği, simetri eksenini boyunca malzeme geçişi olmadığı ve simetri eksenini üzerinde malzeme akış hızlarının eşit olduğunu varsayılmıştır. Bölgesel malzeme akış hızlarının hesaplanması ve enerji denklemlerinin çözümü, Python programlama dilinde geliştirilen bir yazılımla gerçekleştirilmiş ve interaktif bir kullanıcı arayüzü sunulmuştur. Prototip bir asimetrik dişli için dövme deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar üst sınır enerji analizi (ÜSEA) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. ÜSEA ile elde edilen dövme yükü değişimi ve malzeme akışı deneysel sonuçlarla uyum içerisindedir. Geliştirilen yazılım ile dövme yükü kısa bir süre içerisinde hesaplanabilmektedir. Hesaplanan maksimum dövme yükünün deneysel olarak belirlenenenden daha yüksek olması, üst sınır enerji metodunun özelliğinden kaynaklanmakta olup, kalıp tasarımı ve pres kapasitesinin belirlenmesinde emniyetli bölgede kalmak için uygundur.

An analysis of asymmetric spur gear forging by upper bound energy method

H I G H L I G H T S

- Upper bound energy analysis of asymmetric gear forging
- Determination of gear forging load and material flow
- Development of a software for gear forging load calculation

Article Info

Research Article
Received: 11.04.2020
Accepted: 29.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.718534

Keywords:

Asymmetric spur gear
upper bound energy method
precision forging
material flow
forging load

ABSTRACT

Asymmetric gears are preferred for applications with unidirectional power and motion transmission because of their superior performance compared to symmetrical gears. In the production of asymmetrical gears, it will be possible to eliminate the manufacturing limitations arising from the profile and to produce high strength gears efficiently by using precision forging technology. In this study, an analysis is presented for the determination of the forging load and material flow by using the upper bound energy method (UBEM) in the precision forging process of asymmetric spur gears. In this analysis, the driver and driven sides of the asymmetrical tooth are divided into 12 deformation zones. In the analysis, it was assumed that the workpiece material is isotropic and homogeneous, there is no strain hardening during the forging, there is no material flow along the symmetry axis and the material flow rates on the symmetry axis are equal. Calculation of regional material flow rates and solution of energy equations were realized with software developed in Python programming language and an interactive user interface is presented. An experimental study was carried out and the results of material flow pattern and forging load were compared with the results of upper limit energy analysis (UBEA). The forging load variation and the material flow pattern found by using USEA are in agreement with experimental results. With the developed software, the forging load can be calculated in a short time. The calculated maximum forging load is higher than the experimentally determined one, due to the nature of the upper limit energy method, and it is suitable to stay in the safe zone in the design of the die and the determination of the press capacity.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: eyercioğlu@gantep.edu.tr, h.agt.1974@gmail.com, mmehmetaladag@gmail.com

Tel +90 342 317 1593

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asimetrik dişliler, bölüm daireleri aynı fakat basınç açıları farklı olan iki evolvent eğrisi kullanılarak elde edilen dişlilerdir. Asimetrik dişliler özellikle tek yönlü güç ve hareket iletiminin olduğu durumlarda kendileri ile aynı boyutlara sahip olan simetrik dişlilere göre daha üstün performans sergilemektedir [1]. Banica ve Ravai-Nagy [2] statik ve dinamik gerilmeler açısından asimetrik ve simetrik dişlileri karşılaştırmış ve asimetrik dişlilerin söz konusu gerilmeler açısından simetrik dişlilere göre yüksek mukavemete sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Bazı çalışmalarda [3-5] asimetrik ve simetrik dişlilerin yük taşıma kapasiteleri karşılaştırılmış ve asimetrik düz dişlilerin aynı boyuttaki simetrik düz dişlilere göre daha fazla yük taşıdıkları gösterilmiştir. Benzer çalışmalarda sadece asimetrik ve simetrik düz dişliler karşılaştırılmamış, helisel dişliler ve iç dişliler de karşılaştırılmıştır. Yang [6] ve Li vd. [7] helisel dişlileri gerilmeler açısından karşılaştırmış ve asimetrik helisel dişlilerin daha dayanıklı olduğu sonucuna varmışlardır. Yang [8] ile Yılmaz vd. [9] asimetrik ve simetrik iç dişlileri gerilmeler açısından kıyaslamış ve asimetrik iç dişlilerdeki gerilme değerlerinin simetrik iç dişlilerdeki gerilmelere göre daha az olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, Masuyama ve Miyazaki. [10], Kapelevich. [11] ve Marimuthu ve Muthuveerappan. [12] asimetrik düz dişlilerin süren tarafındaki basınç açısının artmasıyla yük taşıma kapasitelerinin arttığını ve gerilme değerlerinin azaldığını göstermişlerdir.

Asimetrik düz dişlilerin evolvent ve diş dibi profillerinin iyileştirilmesi ile performansının artırılması ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır. Çavdar vd. [13] asimetrik düz dişlilerin boyutlandırılması ve kullanılabilirlik araştırmaları için geometrik modellerin oluşturulması üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Fetvacı [14] kremayer takımla imal edilen asimetrik evolvent profilli helisel dişli çarkların bilgisayar simülasyonunu gerçekleştirerek, asimetrik evolvent profilli helisel dişli çark profili oluşturan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Akpolat [15] simetrik ve asimetrik kesici uç yarıçaplarının diş dibi gerilmesine etkisi diğer tüm dişli parametrelerini sabit tutarak incelemiştir.

Dişlilerin imalatında hassas dövme işleminin kullanılması son zamanlarda birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Hassas dövme yöntemi ile elde edilen dişlilerin mukavemet ve çalışma ömürleri açısından standart dişlilere göre daha avantajlı olduğu birçok çalışma tarafından gösterilmiştir. Kelley ve, Danis [16] konik dişlilerin hassas dövme ile üretiminin avantajlarını tartışmışlardır. Eyericioğlu vd. [17] hassas dövme ve klasik kesme düz dişlilerin yorulma ömürlerini karşılaştırarak, dövme dişlilerin mukavemet ve ömür açısından üstünlüklerini göstermişlerdir. Benzer bir çalışmada düz dişli dövmeciliğinin genel bir değerlendirmesi yapılmıştır [18]. Townsend vd [19] ve Lehnhoff vd [20] dövme dişlilerin yüzey dayanımı açısından mukavemetini ve çalışma ömrünü karşılaştırmışlardır. Hassas dövme dişlilerin performans analizleri ve ekonomik üstünlükleri standart

kesme dişlilerle karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur [21, 22]. Hassas dövme ile dişli imalatında, dövme esnasında malzeme akış modelinin ve dövme yükünün önceden belirlenmesi, kalıp tasarımı, pres seçimi ve ön-şekil tasarımı için önem taşımaktadır. Hassas dişli dövme işleminin analizi konusunda birçok çalışma yapılmıştır [23-35]. Bunlar çoğunlukla sınır enerji (üst, alt) ve sonlu elemanlar (FE) analizleridir. Son yıllarda, hesaplama teknolojisindeki gelişmeler ve ticari olarak temin edilebilen yazılım paketlerinin gücü, sonlu elemanlar yöntemine dayanan analizlerin, birçok araştırmacı tarafından farklı tasarımların metal akışı ve yük gereksinimleri üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmasına neden olmuştur. Cai vd. [23], net şekilli dişli dövme işleminin sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmiş ve sürtünmenin dövme yükü ve metal akış modu üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Yang ve arkadaşları [24], sonlu elemanlar analizlerinde iki aşamalı dövme kullanarak, dövme yükünün azaltılması üzerinde çalışmışlardır. Zuo vd. [25] 'da, sonlu elemanlar yöntemi ile farklı kalıp boşluğu tasarımlarının kalıp doldurma, dövme yükü ve kalıp gerilmeleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile birçok başarılı çalışma bulunmasına rağmen, analiz sonuçlarının oluşturulan modele (eleman tipi ve sayısı vb), sınır şartlarına (sürtünme, arayüz tanımı vb) ve çözüm metoduna (Euler, Lagrangian, mixed vb) bağlı olarak farklılıklar gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirilmesine uzman kullanıcı önemlidir. Ayrıca, yüksek hassasiyet için kullanılan eleman sayısının artması, gelişmiş bilgisayar donanımlarının kullanılmasına rağmen uzun çözüm süreleri gerektirmektedir. Bu nedenle bazı araştırmacılar alt ve üst enerji sınır analizleri (ÜSEA) kullanılarak bu dezavantajları ortadan kaldıracak çözümleri sunmuşlardır. Abdul ve Dean [26] diş profilinin dişin merkez çizgisine paralel olduğunu düşünerek üst sınır analizi kullanarak silindirik zımbalı düz dişli dövme yöntemini incelemişlerdir. Grover ve Juneja [27], diş profilini yamuk olarak kabul ederek düz dişli dövme yöntemini analiz etmişlerdir. Benzer şekilde, Chitkara ve Bhutta [28] diş profilini düz çizgi olarak kabul ederek üst sınır yöntemini kullanarak dişli benzeri parçaların deformasyonunu modellemişlerdir. Choi vd. [29, 30] evolvent profili esas alarak üst sınır yöntemine dayanan matematiksel modeller sunmuşlardır. Sadeghi [31, 32], düz ve helis dişlilerin hassas dövme işleminde trapez diş şekli ve fiçilasma etkisini dikkate alan üst sınır analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Rasae ve arkadaşları [33], üst sınır yöntemini kullanarak katı ve merkezi delik düz dişlilerin dövülmesini araştırmak için bir matematiksel model önermişlerdir. Chitkara ve Kim [34] simetrik düz dişli dövme analizi için üst sınır enerji metodunu kullanmışlardır. Hsu [35] simetrik düz dişliler için üst sınır enerji metodu ile elde ettiği sonuçları literatürde mevcut olan deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmıştır. Literatürde, asimetrik dişlilerin dövme işlemi ile ilgili henüz bir çalışmaya rastlanmamıştır. Asimetrik dişli dövmeciliğinde, kalıp tasarımı ve pres kapasitesinin belirlenebilmesinde

kullanılacak olan dövme yükünün hesaplanabilmesi için üst sınır metodu uygun bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Asimetrik dişliler için geçerli bir modelin oluşturulması, hassas dişli dövme sürecinin asimetrik dişlilerde kullanımının yaygınlaşmasına fayda sağlayacaktır.

Bu çalışmada, asimetrik düz dişlilerin hassas dövme işleminin üst sınır enerji metodu ile analizi sunulmuştur. Bu analizde, asimetrik dişin süren ve sürülen tarafları toplamda 12 şekil değiştirme bölgesine ayrılmıştır. Bölgesel malzeme akış hızlarının hesaplanması ve enerji denklemlerinin çözümü python programlama dilinde geliştirilen bir yazılımla gerçekleştirilmiş ve interaktif bir kullanıcı arayüzü sunulmuştur. Prototip bir asimetrik dişli için dövme deneyleri yapılarak dövme yükü ve malzeme akışı sonuçları, üst sınır enerji analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2. ÜST SINIR ENERJİ ANALİZİ-ÜSEA (UPPER-BOUND ENERGY ANALYSIS-UBEA)

Bu metoda göre bir cismin şeklini değiştirmek için gereken yükün üst sınırı; iç enerji dağılımı oranı ve sürtünme için harcanan enerjinin, dış kuvvetlerin belirli bir deformasyon modelinde iş üretme hızına eşitlenmesiyle elde edilebilir. Üst sınır enerji analizinde, sıkıştırılamazlık, süreklilik ve hız sınır koşullarını karşılayan farklı kinematik olarak kabul edilebilir hız bölgeleri belirlenir. Bu hız bölgelerine dayanarak, toplam dövme enerjisini ve dolayısıyla dövme yükünü belirlemek için şekil değiştirme, kesme (hız süreksizlikleri durumunda) ve sürtünme enerjisi kayıp oranları hesaplanır. Bu çalışmada, Choi ve arkadaşları tarafından simetrik dişliler için yapılan çalışmadaki [30] matematiksel model esas alınmıştır. Choi'nin çalışmasında, simetrik yarım diş profili 7 farklı şekil değiştirme bölgesine ayrılmıştır. Bu çalışmada, şekil değiştirme bölgeleri ve bunlara ait denklemler yeniden düzenlenmiştir. Asimetrik düz dişlilerin hassas dövme süreci için bu yöntem kullanılırken asimetrik dişin süren ve sürülen tarafları ayrı ayrı ele alınmış ve toplamda 12 şekil değiştirme bölgesine ayrılmıştır ve bu bölgeler Şekil 1 de görülebilir.

Bu analiz esnasında; polar koordinat sistemi kullanılmış ve ayrıca iş parçasının isotropik ve homojen olduğu, dövme sırasında pekleşmediği, simetri eksenini boyunca malzeme geçişi olmadığı ve simetri eksenini üzerinde süren ve sürülen taraftaki maddelerin hızlarının eşit olduğu varsayılmıştır.

2.1. Şekil değiştirme Bölgeleri ve Sınır Şartları (Deformation Zones and Boundary Conditions)

2.1.1. 1. Bölge ($r_m < r < r_r$ ve $0 < \theta < \theta_{1c}$)

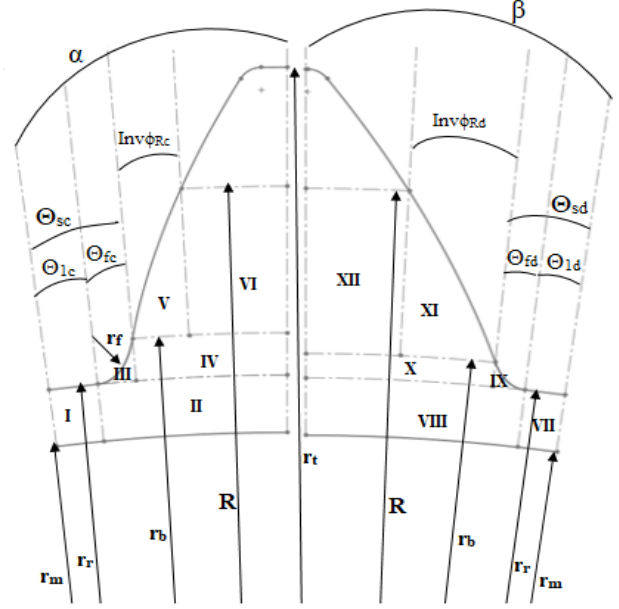
Bu bölge malafa ve kalıp tarafından sınırlandırılmıştır, dolayısıyla maddenin radyal hızı sıfırdır. Bu bölgeye ait akış hızları ve birim şekil değiştirme formülleri Eş. 1-4'teki gibidir.

$$U_{r1} = 0 \quad (1)$$

$$U_{\theta 1} = \frac{u\theta r}{h} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{rr} = 0 \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{u}{h} \quad (4)$$



Şekil 1. Asimetrik düz dişli dövme ÜSEM malzeme akış bölgeleri (UBEM Material flow zones of asymmetric spur gear forging).

2.1.2. 2. Bölge ($r_m < r < r_r$ ve $\theta_{1c} < \theta < \alpha$)

Bu bölgede, simetri eksenini boyunca malzeme akışı olmadığı kabul edildiğinden malzemenin çevresel hızı sıfırdır ve radyal hızı ise karşılıklı gelen bölgelerin (asimetrik dişin iki yarısı) radyal hızına eşittir. Bu bölgeye ait formüller Eş. 5 ve 6'daki gibidir.

$$U_{r2} = \frac{u}{2h} \left(r - \frac{r_m}{r} \right) \left(\frac{\alpha}{\alpha - \theta_{1c}} \right) \quad (5)$$

$$U_{\theta 2} = \left(\frac{ur}{h} \right) \left(\frac{\theta_{1c}}{\alpha - \theta_{1c}} \right) (\alpha - \theta) \quad (6)$$

2.1.3. 3. Bölge ($r_r < r < r_b$ ve $\theta_{sc} < \theta < \alpha$)

Bu bölge, ikinci bölge, dördüncü bölge ve diş dibi profili ile çevrilmiştir ve burada malzemenin diş dibi profiline dik olan hızı sıfırdır. Bununla ilgili eşitlikler Eş. 7 ve 8'deki gibidir.

$$U_{r3} = \frac{ur}{2h} + \frac{C_{uu}}{r} \quad (7)$$

$$U_{\theta 3} = \left(\frac{ur}{2h} + \frac{C_{uu}}{r} \right) \cot\phi \quad (8)$$

Formüllerdeki $\cot\phi$ ve C_{uu} aşağıda Eş. 9 ve 10'daki gibi hesaplanmalıdır:

$$\cot\phi = (r_r + r_f)^4 - (r^2 - r_f^2) - (r^2 - r_r^2)$$

$$\left[(2r_f + r_r)^2 - r^2 \right] \quad (9)$$

$$C_{uu} = \frac{ur_r}{2h} \left(\frac{\theta_{1c}}{\alpha - \theta_{1c}} \right) + \frac{ur_m^2}{2h} \left(\frac{\alpha}{\alpha - \theta_{1c}} \right) \quad (10)$$

2.1.4. 4. Bölge ($r_r < r < r_b$ ve $\Theta_{sc} < \theta < \alpha$)

Bu bölgedeki sınır şartları yukarıda yapılan kabuller doğrultusunda, malzemenin simetri eksenindeki çevresel hızı sıfır ve radyal hızı komşu bölgelerin radyal hızına eşit olacak şekilde Eş. 11 ve 12’de belirlenmiştir.

$$U_{r4} = \frac{ur}{2h} + \frac{c_i}{2hr(\alpha - \theta)} + \frac{C_{uu}}{(\alpha - \theta_{sc})} \frac{C_u}{r} + \frac{C_{IV}}{r} \quad (11)$$

$$U_{\theta 4} = \frac{\alpha - \theta}{\alpha - \theta_{sc}} \left(\frac{ur}{2h} + \frac{C_{uu}}{r} \right) \text{Cot}\theta \quad (12)$$

Hız formüllerindeki katsayılar aşağıda Eş. 13 - 17’de verilmiştir.

$$C_I = \frac{1}{2} \sqrt{(r^2 - r_r^2) \left[(2r_f + r_r)^2 - r^2 \right]} + 2r_f \text{Sin}^{-1} \left(\frac{\sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2}}{2\sqrt{r_f(r_r + r_f)}} \right) \quad (13)$$

$$C_{II} = \frac{1}{2} (\tan^{-1}A + \tan^{-1}B) + \text{Sin}^{-1} \left(\frac{\sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2}}{2\sqrt{r_f(r_r + r_f)}} \right) - \frac{1}{4(r_r + r_f)^2} \sqrt{(r^2 - r_r^2) \left[(2r_f + r_r)^2 - r^2 \right]} \quad (14)$$

$$C_{IV} = \frac{\pi r_f^2}{2h(\alpha - \theta_{sc})} - \frac{ur_m^2}{2h} \quad (15)$$

$$A = -\frac{(2r_f + r_r) \sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2} + 4r_f(r_r + r_f)}{r_r(r^2 - r_r^2)} \quad (16)$$

$$B = -\frac{(2r_f + r_r) \sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2} - 4r_f(r_r + r_f)}{r_r(r^2 - r_r^2)} \quad (17)$$

2.1.5. 5. Bölge ($r_b < r < R$ ve $\Theta_{sc} < \theta < \Theta_{sc} + \text{inv}\phi_{Rc}$)

Bu bölgede iş parçası dış profili ile temas edeceği için dış profiline dik olan hızı sıfır olacaktır. Bu bölgeye ait formüller aşağıda Eş. 18 ve 23’teki gibi belirlenmiştir.

$$U_{r5} = \frac{ur}{3h} + \frac{C_V}{r^2} \quad (18)$$

$$U_{\theta 5} = \left(\frac{ur}{3h} + \frac{C_V}{r^2} \right) (\theta - \theta_{sc} + \phi_{Rc}) \quad (19)$$

burada,

$$\phi_{Rc} = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(r^2 - r_b^2)}}{r_b} \right) \quad (20)$$

$$C_V = \frac{ur_b^3}{6h} + \frac{r_b}{\alpha - \theta_{sc}} \frac{C_I''}{2h} + \frac{C_{III} r_b C_{II}''}{\alpha - \theta_{sc}} + C_{IV} r \quad (21)$$

$$C_I'' = [C_I]_{r=r_b} \quad (22)$$

$$C_{II}'' = [C_{II}]_{r=r_b} \quad (23)$$

olarak alınmalıdır.

2.1.6. 6. Bölge ($r_b \leq r \leq R$ ve $\Theta_{sc} + \text{inv}\phi_{Rc} \leq \theta \leq \alpha$)

Bu bölgedeki sınır şartları malzemenin simetri eksenindeki çevresel hızı sıfır ve radyal hızı ise karşılık gelen komşu bölgelerdeki radyal hızına eşittir. Bununla ilgili eşitlik Eş. 24 ve 25’te verilmiştir.

$$U_{r6} = \frac{ur}{2h} + C_R \left(\frac{ur}{6h} - \frac{C_V}{r^2} \right) + C_R' \left[\frac{u}{3h} \left(\frac{r}{2} \tan^{-1} R_{con} - \frac{r_b}{2r} R_{con} \right) + C_V \left(-\frac{1}{r} \tan^{-1} R_{con} + \frac{R_{con}}{r^2} \right) \right] + \frac{C_{VI}}{r} \quad (24)$$

$$U_{\theta 6} = \frac{\alpha - \theta}{\alpha - (\theta_{sc} + \text{inv}\phi_{Rc})} \left(\frac{ur}{3h} + \frac{C_V}{r^2} \right) (\text{inv}\phi_{Rc} + \phi_{Rc}) \quad (25)$$

Formüllerdeki katsayılar aşağıda Eş. 26 - 30’daki gibi hesaplanmalıdır:

$$R_{con} = \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \quad (26)$$

$$C_R = \frac{\text{inv}\phi_{Rc}}{\alpha - (\theta_{sc} + \text{inv}\phi_{Rc})} \quad (27)$$

$$\text{inv}\phi_{Rc} = \frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b} - \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b} \right) \quad (28)$$

$$C_R' = \frac{1}{\alpha - (\theta_{sc} + \text{inv}\phi_{Rc})} \quad (29)$$

$$C_{VI} = \left(\frac{1}{\alpha - \theta_{sc}} \frac{C_I''}{2h} \right) + \frac{C_{III} C_{II}''}{\alpha - \theta_{sc}} + C_{IV} - C_R \left(\frac{ur_b^2}{6h} - \frac{C_V}{r_b^2} \right) \quad (30)$$

2.1.7. 7. Bölge ($r_m < r < r_r$ ve $0 < \theta < \theta_{1d}$)

Bu bölgede tıpkı birinci bölge gibi malafa ve kalıp tarafından çevrilmiş olduğu için malzemenin radyal hızı sıfırdır. Bununla ilgili eşitlik Eş. 31 - 34’te verilmiştir.

$$U_{r7} = 0 \quad (31)$$

$$U_{\theta 7} = \frac{u\theta r}{h} \quad (32)$$

$$\dot{\epsilon}_{rr} = 0 \quad (33)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{u}{h} \quad (34)$$

2.1.8. 8. Bölge ($r_m < r < r_r$ ve $\theta_{1d} < \theta < \beta$)

Bu bölgede simetri eksenindeki çevresel hız sıfır ve radyal hız ise denk gelen komşu bölgelerin radyal hızına eşittir. Bununla ilgili eşitlik Eş. 35 ve 36'da verilmiştir.

$$U_{r8} = \frac{u}{2h} \left(r - \frac{r_m}{r} \right) \left(\frac{\beta}{\beta - \theta_{1d}} \right) \quad (35)$$

$$U_{\theta8} = \left(\frac{ur}{h} \right) \left(\frac{\theta_{1c}}{\alpha - \theta_{1d}} \right) (\beta - \theta) \quad (36)$$

2.1.9. 9. Bölge ($r_r < r < r_b$ ve $\theta_{1d} < \theta < \theta_{sd}$)

Bu bölgede malzeme dış dibine temas eder ve bu bölgedeki formüller Eş. 37 ve 38'deki gibidir.

$$U_{r9} = \frac{ur}{2h} + \frac{C_{IX}}{r} \quad (37)$$

$$U_{\theta9} = \left(\frac{ur}{2h} + \frac{C_{IX}}{r} \right) \text{Cot}\varphi \quad (38)$$

Burada,

$$\text{Cot}\varphi = (r_r + r_f)^4 - (r^2 - r_f^2) - (r^2 - r_r^2) \left[(2r_f + r_r)^2 - r^2 \right] \quad (39)$$

$$C_{IX} = \frac{ur_r}{2h} \left(\frac{\theta_{1d}}{\beta - \theta_{1d}} \right) + \frac{ur_m^2}{2h} \left(\frac{\beta}{\beta - \theta_{1d}} \right) \quad (40)$$

olarak hesaplanır.

2.1.10. 10. Bölge ($r_r < r < r_b$ ve $\theta_{sd} < \theta < \beta$)

Simetri ekseninde çevresel hızın sıfır, radyal hızın ise karşılık gelen komşu bölgelerin radyal hızına eşit olduğu sınır şartları olarak kabul edilmiştir. Bu bölgeye ait formüller Eş. 41 ve 42'deki gibidir.

$$U_{r10} = \frac{ur}{2h} + \frac{C_{VII}}{2hr(\beta - \theta)} + \frac{C_{IX}}{(\beta - \theta_{sd})} \frac{C_{VIII}}{r} + \frac{C_X}{r} \quad (41)$$

$$U_{\theta10} = \frac{\beta - \theta}{\beta - \theta_{sd}} \left(\frac{ur}{2h} + \frac{C_{IX}}{r} \right) \text{Cot}\varphi \quad (42)$$

Formüllerdeki katsayılar aşağıdaki eşitliklerle Eş. 43 ve 44 ile hesaplanır.

$$C_{VII} = \frac{1}{2} \sqrt{(r^2 - r_r^2) \left[(2r_f + r_r)^2 - r^2 \right]} + 2r_f \text{Sin}^{-1} \left(\frac{\sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2}}{2\sqrt{r_f(r_r + r_f)}} \right) \quad (43)$$

$$C_{VIII} = \frac{1}{2} (\tan^{-1} A + \tan^{-1} B) + \text{Sin}^{-1} \left(\frac{\sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2}}{2\sqrt{r_f(r_r + r_f)}} \right) - \frac{1}{4(r_r + r_f)^2} \sqrt{(r^2 - r_r^2) \left[(2r_f + r_r)^2 - r^2 \right]} \quad (44)$$

$$C_X = \frac{\pi r_f^2}{2h(\beta - \theta_{sd})} - \frac{ur_m^2}{2h} \quad (45)$$

$$A = - \frac{(2r_f + r_r) \sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2} + 4r_f(r_r + r_f)}{r_r(r^2 - r_f^2)} \quad (46)$$

$$B = - \frac{(2r_f + r_r) \sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2} - 4r_f(r_r + r_f)}{r_r(r^2 - r_f^2)} \quad (47)$$

2.1.11. 11. Bölge ($r_b < r < R$ ve $\theta_{sd} < \theta < \theta_{sd} + \text{inv}\phi_{Rd}$)

Sınır şartları; malzeme dış profiline temas ettiği için dış profiline dik olan hız sıfırdır ve radyal hızı komşu olduğu on ikinci bölge ile meydana getirdikleri sınırda birbirine eşittir. Eşitlik Eş. 48-53'da verilmiştir.

$$U_{r11} = \frac{ur}{3h} + \frac{C_{XI}}{r^2} \quad (48)$$

$$U_{\theta11} = \left(\frac{ur}{3h} + \frac{C_{XI}}{r^2} \right) (\theta - \theta_{sd} + \phi_{Rd}) \quad (49)$$

Burada,

$$\phi_{Rd} = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(r^2 - r_b^2)}}{r_b} \right) \quad (50)$$

$$C_{XI} = \frac{ur_b^3}{6h} + \frac{r_b}{\beta - \theta_{sd}} \frac{C_{VII}}{2h} + \frac{C_{IX} r_b C_{VIII}}{\beta - \theta_{sc}} + C_X r \quad (51)$$

$$C_{VII} = [C_{VII}]_{r=r_b} \quad (52)$$

$$C_{VIII} = [C_{VIII}]_{r=r_b} \quad (53)$$

olarak hesaplanır.

2.1.12. 12. Bölge ($r_b \leq r \leq R$ ve $\theta_{sd} + \text{inv}\phi_{Rd} \leq \theta \leq \beta$)

Bu bölge için hesaplamalar Eş. 54-60'da verilmiştir.

$$U_{r12} = \frac{ur}{2h} + C_R \left(\frac{ur}{6h} - \frac{C_{XI}}{r^2} \right) + C'_R \left[\frac{u}{3h} \left(\frac{r}{2} \tan^{-1} R_{con} - \frac{r_b}{2r} R_{con} \right) + \frac{C_{XII}}{r} \right] + C_{XI} \left(-\frac{1}{r} \tan^{-1} R_{con} + \frac{R_{con}}{r^2} \right) \quad (54)$$

$$U_{\theta6} = \frac{\beta - \theta}{\beta - (\theta_{sd} + \text{inv}\phi_{Rd})} \left(\frac{ur}{3h} + \frac{C_{XI}}{r^2} \right) (\text{inv}\phi_{Rd} + \phi_{Rd}) \quad (55)$$

Hız formüllerindeki katsayılar aşağıdaki formüllerde verilmiştir (Eş. 56- Eş. 60).

$$R_{con} = \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \quad (56)$$

$$C_R = \frac{inv\phi_{Rd}}{\beta - (\theta_{sc} + inv\phi_{Rd})} \quad (57)$$

$$inv\phi_{Rd} = \frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b} - \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b} \right) \quad (58)$$

$$C'_R = \frac{1}{\beta - (\theta_{sd} + inv\phi_{Rd})} \quad (59)$$

$$C_{XII} = \left(\frac{1}{\beta - \theta_{sd}} \frac{C_{VII}}{2h} \right) + \frac{C_{IX} C_{VIII}}{\beta - \theta_{sc}} + C_X - C_R \left(\frac{w_b^2}{6h} - \frac{C_{XI}}{r_b^2} \right) \quad (60)$$

2.2. Toplam Enerji Oranı ve Zimba Basıncının Hesaplanması

(Total Energy Dissipation Rate and Calculation of Punch Pressure)

Bir önceki bölümde belirlenen şekil değiştirme bölgeleri ve malzeme akış hızları kullanılarak, şekil değiştirme, kesme (hız süreksizlikleri bölgeleri) ve sürtünme enerjisi oranları hesaplanabilir.

i) Şekil değiştirme enerjisi oranı Eş. 61; burada i her bir şekil değiştirme bölgesini simgelemektedir.

$$\dot{E}_{p,i} = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV \quad (61)$$

ii) Hız süreksizliği yüzeyindeki kayma enerjisi Eş. 62; burada S hız süreksizliği yüzeyini belirtmektedir.

$$\dot{E}_S = \int_S \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} |\Delta V| dS \quad (62)$$

iii) Sürtünmeye harcanan enerji oranı Eş. 63; burada, A_f sürtünme yüzeyi alanını temsil etmektedir.

$$\dot{E}_f = \int_{A_f} \frac{m\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} |\Delta V| dA \quad (63)$$

Makalenin hacmi dikkate alınarak enerji oranlarını belirten denklemlerin (Eş. 61-63) detayları burada verilmemiştir (detaylı bilgi için bkz kaynak [36]). Toplam enerji oranı, şekil değiştirme, kesme (hız süreksizlikleri bölgeleri) ve sürtünme enerjisi oranlarının Eş. 64 toplamıyla elde edilir.

$$\dot{E}_T = \dot{E}_p + \dot{E}_S + \dot{E}_f \quad (64)$$

Zimba üzerindeki basıncın göreceli değeri (akma gerilmesine oranı) aşağıda Eş. 65 denklemiyle hesaplanır.

$$\frac{P_{av}}{\bar{\sigma}} = \frac{\dot{E}_T}{\bar{\sigma} A_u} \quad (65)$$

Bu denklemde, A, u ve \dot{E}_T sırasıyla, zimba/iş parçası temas alanını, zimba hızını ve toplam enerji oranını simgelemektedir.

Asimetrik düz dişlilerin dövme yükünün hesaplanabilmesi için üst sınır enerji teorisi kullanılarak yapılan analiz sonucunda elde edilen denklemlerin numerik olarak çözümlenebilmesi amacıyla Python programlama dili kullanılarak bir bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır.

3. ASİMETRİK DIŞLI PROTOTİPİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

3.1. Asimetrik Dişli Ölçüleri (Dimensions of Asymmetric Gear)

Bu çalışmada, TV7-117S turbo-prop motorun dişli kutusunun 1. kademe merkez (sun) dişlisi (asimetrik dişli) prototip olarak seçilmiş ve özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

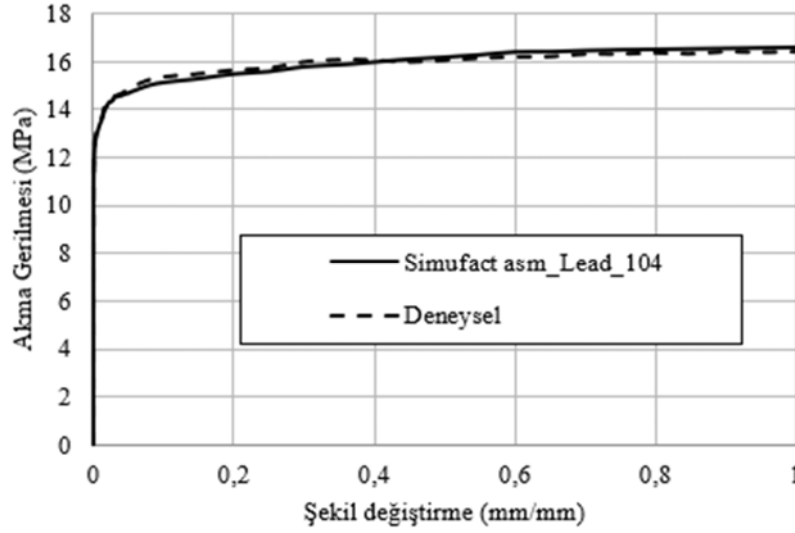
Tablo 1. Asimetrik düz dişli parametreleri (Asymmetric Spur Gear Parameters)

Parametre	Değer
Diş sayısı	28
Modül (mm)	3
Diş yüksekliği (mm)	6.75
Süren Taraf Basınç Açısı (°)	33
Sürülen Taraf Basınç Açısı (°)	25
Diş Yanak Genişliği (mm)	35

3.2. Biyet Geometrisi ve Malzemesi (Preform Geometry and Material)

Biyet, seçilen prototip asimetrik dişli parametrelerine uygun olarak dış çapı 37.5 mm ve iç çapı 20 mm olan bir silindirik halka olarak tasarlanmıştır. Burada iç çap malafa çapına ve dış çap ise diş dibi çapına eşittir. Biyetin yüksekliği, dövülmüş dişlinin hacmine eşit olacak şekilde belirlenmiştir ve 35 mm yanak genişliğinde bir dişli elde etmek için 3B modelden 46.88 mm olarak hesaplanmıştır.

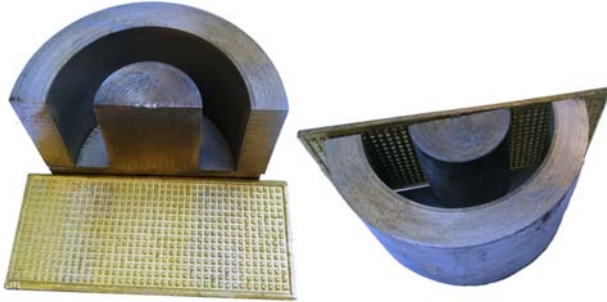
Deneysel çalışmalarda, Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan 200 ton kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Pres kapasitesi dikkate alınarak, dişli malzemesi olarak kurşun malzeme kullanılmıştır. Bu amaçla, piyasadan kurşun kütükler temin edilmiş ve malzeme testleri gerçekleştirilerek malzeme özellikleri belirlenmiştir (Şekil 3-4). Sonuçlar, Simufact Forming Sonlu Elemanlar Yazılımı'nın mevcut malzeme kütüphanesindeki [36] değerlerle karşılaştırılmıştır. Kurşun malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme diyagramı ve Simufact malzeme kütüphanesinde [37] bulunan "asm_Lead_104" malzemesinin akma gerilmesi diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Simufact malzeme kütüphanesinde bulunan "asm_Lead_104" özellikleriyle büyük oranda uyum sağlayan numunenin teminine ve deneysel çalışmalarda kullanılmasına karar verilmiştir. Söz konusu kurşun malzemenin özellikleri aşağıda Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Kurşun numune ve Simufact malzeme kütüphanesinde [37] bulunan “asm_Lead_104” malzemesinin akma gerilmesi diyagramı (Flow stress diagram of lead specimen and “asm_Lead_104” in the Simufact material library [37])

Tablo 2. Kurşun malzeme özellikleri [37]
(Properties of lead [37])

Kurşun (Asm_Lead_104)	
Elastisite modülü	1.4e+10 Pa
Poisson oranı	0.3
Yoğunluk	11360,0 kg/m ³
Termal iletkenlik	24.0 W/(m·K)
Spesifik ısı kapasitesi	129.0 J/(kg·K)
Termal genleşme katsayısı	2.96e-5 1/K
Yitim faktörü	0.9



Şekil 3. Biyet döküm kalıbı (Preform casting die)



Şekil 4. Kurşun numune (Lead specimen)

3.3. Dövme kalıbı ve Malzemesi (Forging Die and Material)

Asimetrik dişli dövme kalıbı seti, Şekil 5’de gösterildiği gibi silindirik dış kalıp, dişli profiline sahip alt ve üst zımba ve silindirik malafadan oluşmaktadır. Kalıp elemanları H13 sıcak işlem kalıp çeliğinden tel erozyon ile kesilerek imal edilmiş ve yüzeyleri aşındırıcı akışkanla işleme (AFM) yöntemi kullanılarak parlatılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında kalıp iç yüzeyi molibden disülfür (MoS₂) ile yağlanmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

4.1. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Deneysel çalışmada ya hidrolik pres ile yapılan dövme işlemi sonucunda elde edilen asimetrik düz dişlinin görüntüsü Şekil 6’da verilmiştir. Zımba konumunun (kurs) farklı yüksekliklerinde malzeme akışının incelenebilmesi için kademeli deneyler yapılmış ve son aşamada dişlerin özellikle taban bölgesinde tamamen dolması sağlanmıştır. Şekil 6’de dişlinin üst yüzeyinde çapak oluşumu görülmektedir. Kademeli dövmede malzeme akışı ve karşılık gelen dövme yükü-zımba konumu grafiği Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8’de kesik çizgi ile gösterilen deneysel sonuçlar incelendiğinde, dövme sırasında yük değişiminin üç bölgeye ayrılacağı görülmektedir. Grafikteki 1. kademeye kadar olan bölgede dövme yükü düşüktür, bu bölge biyetin kalıp yüzeylerine temasına kadar gerçekleşen şekil değiştirmedir ve zımbanın 1mm gibi hareketine karşılık gelen başlangıç bölgesidir. 1. Kademedan 4. kademeye kadar olan bölgede yükün artışı (eğim) düşük ve yaklaşık olarak doğrusaldır. Bu bölge diş profilinin radyal malzeme akışı ile doldurulduğu şekil değişimine karşılık gelen bölgedir. 4. Kademedan itibaren yükteki artış (eğim) artmakta ve son bölümde asimtotik bir eğriye dönüşmektedir.



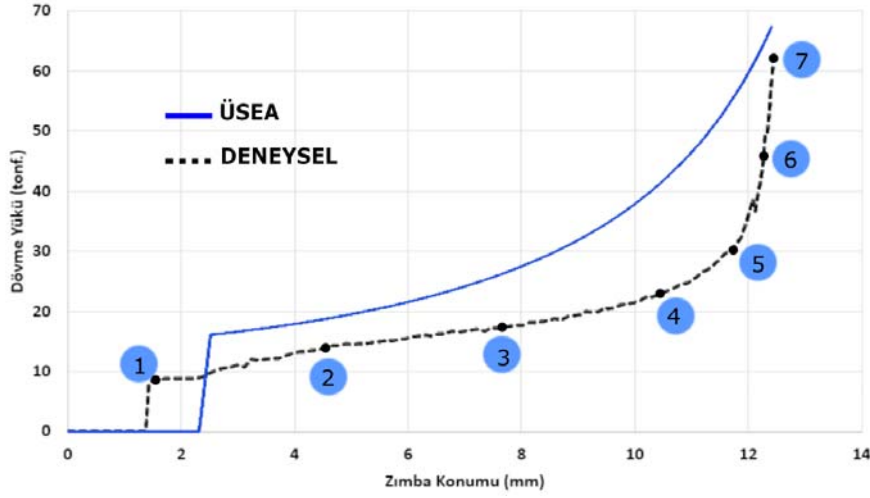
Şekil 5. Asimetrik Dişli Dövme Kalıp Seti (Asymmetric gear forging die set)



Şekil 6. Dövme işlemi sonucunda elde edilen asimetrik düz dişli (Asymmetric spur gear after forging)

DÖVME NR.	1	2	3	4	5	6	7
ÜST GÖRÜNÜŞ							
YAN GÖRÜNÜŞ							
DÖVME YÜKÜ (tonf.)	8	13	17	20	30	47	63

Şekil 7. Asimetrik düz dişli dövme işleminde malzeme akışı (Material flow during asymmetric spur gear forging)



Şekil 8. Dövme yükünün zımba konumuna (kurs) göre değişimi (Variation of forging load with respect to stroke)

Tablo 3. Literatürde simetrik dişlilere ait deneysel ve bu çalışmada sunulan ÜSEA dövme yükü sonuçları (Forging load results of the presented study and the experimental symmetrical gears in the literature)

Kaynak	Modül (mm)	Diş Sayısı	Yanak Genişliği (mm)	Malafa Çapı (mm)	Sürtünme Faktörü	Malzeme	Dövme Yükü	
							Deneysel tonf	ÜSEA tonf
Eyericioğlu [21]	3	24	18	30	0,1	AISI 4340	430	455
Choi-1 [30]	2	15	10	0	0,1	Al-2024	75	78
Choi-2 [30]	2	15	10	10	0,1	Al-2024	88	92
Zadshakouyan [38]	3	15	20	0	0,1	Lead	45	51
Alves [39]	1,5	14	26	0	0,2	AlMgSi-1725	63	71

Bu bölüm diş profilinin dişlinin üst bölgesinde kalıbın dolması ve alt bölgede hala boşlukların olması nedeniyle artan sürtünme yükü ve malzeme akışında oluşan hidrostatik basınç (ölü) bölgelerinden kaynaklanmaktadır. Alt zımba hareketsiz ve üst zımba hareketli (tek yönlü dövme) şartları ve fiçilaşma etkisi malzeme akışını ve dövme yükünü bu şekilde etkilemektedir.

4.2. Üst Sınır Enerji Analizi Sonuçları (Results of Upper Bound Energy Analysis)

Üst sınır enerji metodu ile yapılan analiz sonuçları hazırlanan yazılım kullanılarak elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmak amacıyla Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu şekilde, kesik çizgi deneysel sonuçları, sürekli çizgi ise üst sınır enerji analiziyle elde edilen sonuçları göstermektedir. Her iki eğrinin benzer değişimleri göstermesi, bu çalışmada sunulan üst sınır enerji analizinin ve önerilen şekil değiştirme bölgelerinin uygunluğunu ispatlamaktadır. Şekil 8'den de görüldüğü üzere, üst sınır enerji analizi sonuçlarının deneysel sonuçlardan daha yüksek dövme yükü değerleri vermesi, üst sınır enerji metodunun özelliğinden kaynaklanmaktadır. Maksimum dövme yükü, üst sınır enerji analizi ile 68,8 tonf ve deneysel 63 tonf olarak bulunmuştur. Kalıp tasarımı ve pres kapasitesinin

belirlenmesinde emniyetli bölgede kalmak için üst sınır enerji metodu önerilmektedir. Bu analizde maksimum dövme yükü %10'un altında bir farkla belirlenmiştir. Dövme işleminde fiçilaşma etkisinin hesaplamaya katılması (3B analiz) halinde bu sapma daha da azalacaktır. Geliştirilen yazılım ile çözümler çok kısa bir süre içerisinde (bu analizde 3 saniye) elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada sunulan üst sınır enerji analizi ile farklı dişli parametrelere için belirlenen dövme yüklerinin karşılaştırılması amacıyla dövme dişliler için literatürde mevcut olan bazı deneysel çalışmalar Tablo 3'te verilmiştir. Asimetrik dişlilerin dövme yükü ile ilgili herhangi bir deneysel sonuç bulunmadığı için simetrik dişliler elde edilmiş sonuçlar verilmiştir. Farklı malzeme ve dişli parametreleri için yapılmış bu çalışmalarda dövme yükleri ile bu çalışmada sunulan ÜSEA ile elde edilen sonuçların birbirine yakın ve deneysel çalışmadan her zaman fazla olduğu görülmektedir.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

D_i	Biyet iç çapı (mm)
D_m	Malafa çapı (mm)
D_o	Biyet dış çapı (mm)

\dot{E}_F	Sürtünmeden kaynaklı enerji kayıp oranı
\dot{E}_p	İç kaynaklı enerji kayıp oranı
\dot{E}_s	Kesme gerilmesinden kaynaklı enerji kayıp oranı
m	Sürtünme katsayı sabiti
M	Modül
N	Diş sayısı
r, θ, z	Silindirik koordinat sistemi
r_b	Temel dairesi yarıçapı (mm)
r_f	Diş dibi yuvarlatma yarıçapı (fillet) (mm)
r_m	Nötral yüzey yarıçapı (mm)
r_r	Diş dibi yarıçapı (mm)
R	Evolvent üzerindeki değişken noktanın yarıçapı (mm)
t	Dövme esnasında biyetin yüksekliği (mm)
u	Zımba hızı (mm/sn)
α	Asimetrik dişli sürülen yüzey adım yarı açısı (rad)
β	Asimetrik dişli süren yüzey adım yarı açısı (rad)
θ_{lc}	Sürülen tarafın diş dibi radyüs başlangıç noktasının açısı (rad)
θ_{sc}	Sürülen tarafın diş dibi radyüs bitiş noktasının açısı (rad)
θ_{fc}	Sürülen tarafın diş dibi radyüs başlangıç ve bitiş arasındaki açı (rad)
$Inv\phi_{rc}$	Sürülen taraf evolvent eğrisine göre R değişken ölçüsünün açı değişkeni
θ_{ld}	Süren tarafın diş dibi radyüs başlangıç noktasının açısı (rad)
θ_{sd}	Sürülen tarafın diş dibi radyüs bitiş noktasının açısı (rad)
θ_{fd}	Süren tarafın diş dibi radyüs başlangıç ve bitiş arasındaki açı (rad)
$Inv\phi_{rd}$	Süren taraf evolvent eğrisine göre R değişken ölçüsünün açı değişkeni.
$\dot{\epsilon}$	Gerinim hızı
$\dot{\bar{\epsilon}}$	Etkin gerinim hızı
$\dot{\epsilon}_v$	Hacimsel gerinim hızı
U_r, U_θ	Eksenel hız bileşenleri
U_z	Eksenel hız bileşeni

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Asimetrik düz dişlilerin hassas dövme işleminde, üst sınır enerji metodu kullanılarak dövme yükü ve malzeme akışının belirlenmesi için bir analiz sunulmuştur. Bu analizde, asimetrik dişin süren ve sürülen tarafları ayrı ayrı ele alınmış ve toplamda 12 şekil değiştirme bölgesine ayrılmıştır. Yapılan analizde, iş parçası malzemesinin isotropik ve homojen olduğu, dövme sırasında pekleşmediği, simetri eksenini boyunca malzeme geçişi olmadığı ve simetri eksenini üzerinde malzeme akış hızlarının eşit olduğunu varsayılmıştır. Bölgesel malzeme akış hızlarının hesaplanması ve enerji denklemlerinin çözümü python programlama dilinde geliştirilen bir yazılımla gerçekleştirilmiş ve interaktif bir kullanıcı arayüzü sunulmuştur. Prototip bir asimetrik dişli için dövme deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar üst sınır enerji analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen çıkarımlar aşağıda verilmiştir.

- Deneysel ve ÜSEA sonuçlarından elde edilen dövme yükünün zımba konumuna göre değişim grafiklerinin benzer (paralel) değişimler göstermesi, bu çalışmada önerilen şekil değiştirme bölgelerinin ve sunulan üst sınır enerji analizinin, asimetrik düz dişlilerin dövme işleminde başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir.
- Üst sınır enerji analizi ile hesaplanan maksimum dövme yükü deneysel sonuçlarla uyum içerisindedir. Zımba konumuna göre, üst sınır analizi ve deneysel dövme yükü arasındaki fark daha fazla sapma göstermektedir. Bu durum, üst sınır analizinin 2-boyutlu olması ve dolayısıyla kalıp yüksekliği boyunca homojen bir malzeme akışı kabulünden kaynaklanmaktadır. Hesaplanan maksimum dövme yükü sonuçlarının deneysel sonuçlardan daha yüksek dövme yükü değerleri vermesi, üst sınır enerji metodunun özelliğinden kaynaklanmakta olup, kalıp tasarımı ve pres kapasitesinin belirlenmesinde emniyetli bölgede kalmak için uygundur.
- Geliştirilen yazılım ile dövme yükü kısa bir süre içerisinde elde edilebilmektedir. Bu yazılım, asimetrik ve simetrik düz dişliler için kullanılabilir olup interaktif bir kullanıcı arayüzüne sahiptir.
- Asimetrik düz dişli dövme işleminde, dövme yükünün zımba konumuna (kurs) göre değişimi üç farklı bölgede incelenebilir. Birinci bölge, biyetin kalıp yüzeylerine temasına kadar gerçekleşen şekil değiştirme gerçekleştiği ve zımbanın 1mm gibi hareket karşılık gelen dövme yükünün düşük olduğu başlangıç bölgesidir. İkinci bölge, dövme yükünün zımba hareketine göre nispeten doğrusal artış gösterdiği, diş profilinin radyal malzeme akışı ile doldurulduğu bölgedir. Üçüncü bölgede, dövme yükü hızla artmakta ve son bölümde asimtotik bir eğriye dönüşmektedir. Bu bölümde, dişli kalıbının üst zımbaya temas eden bölümü tamamıyla dolarken, alt zımbaya oturan bölgede hala boşlukların bulunmakta ve dolayısıyla sürtünme yükü artmakta ve malzemede hidrostatik basınç bölgeleri oluşmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmayı (Proje No. 217M063) destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Liming L., Guimin L., Dynamic simulation analysis of asymmetric involute gear drive system, *Applied Mechanics and Materials*, 215–216, 974–977, 2012.
2. Banica M., Ravai-Nagy S., Manufacturing precision on the numeric simulation of spur gear with asymmetric teeth, *Applied Mechanics and Materials*, 809–810, 772–777, 2015.
3. Senthil Kumar V., Muni D. V., Muthuveerappan G., Optimization of asymmetric spur gear drives to improve the bending load capacity, *Mechanism and Machine Theory*, 43 (7), 829–858, 2008.
4. Costopoulos T., Spitas V., Reduction of gear fillet stresses by using one-sided involute asymmetric teeth,

- Mechanism and Machine Theory, 44 (8), 1524–1534, 2009.
5. Spitas V., Spitas C., Costopoulos T., Reduction of tooth fillet stresses using novel one-sided involute asymmetric gear design, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 37 (2), 157–182, 2009.
 6. Yang S. C., Mathematical model of a helical gear with asymmetric involute teeth and its analysis, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26 (5–6), 448–456, 2005.
 7. Li N., Li W., Liu N., Liu H., Analytical method on contact stress of helical gear with asymmetric involutes, *Advanced Materials Research*, 321, 157–160, 2011.
 8. Yang S. C., Study on an internal gear with asymmetric involute teeth, *Mechanism and Machine Theory*, 42 (8), 977–994, 2007.
 9. Yilmaz T. G., Doğan O., Yüce C., Karpat F., Improvement of loading capacity of internal spur gear with using asymmetric trochoid profile, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 11 (2009), 1–8, 2017.
 10. Masuyama T., Miyazaki N., Evaluation of load capacity of gears with an asymmetric tooth profile, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 11 (1), 2016.
 11. Kapelevich A., Geometry and design of involute spur gears with asymmetric teeth, *Mechanism and Machine Theory*, 35 (1), 117–130, 2000.
 12. Marimuthu P., Muthuveerappan G., Investigation of load carrying capacity of asymmetric high contact ratio spur gear based on load sharing using direct gear design approach, *Mechanism and Machine Theory*, 96, 52–74, 2016.
 13. Çavdar K., Karpat F., Babalık F. C., Asimetrik evolvent düz dişlilerin bilgisayar destekli analizi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 9 (1), 123-131, 2004.
 14. Fetvacı C., Computer simulation of helical gears with asymmetric involute teeth, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (3), 441-447, 2010.
 15. Akpolat A., Reduction of tooth root bending stresses in gears generated by symmetric cutter with asymmetric tip radii, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (2), 713-728, 2018.
 16. Kelley M., Danis L., Precision flow forged gears, *Metals Eng. Quarterly*, 20-22, November 1974.
 17. Eyericioğlu O., Walton D., Dean T.A., Comparative bending fatigue strength of precision forged spur gears, *Proceedings Institution Mechanical Engineers IMechE, Part C*, September, 1997, 211, 293-299, 1997.
 18. Benedict D.K., Forged straight bevel gears-an overview, *AGMA paper no 84-1949*, 1984.
 19. Townsend D.P., Bamberger E.N., Zaretsky E.V., A life study of ausforged, standard forged and standard machined AISI M-50 spur gears, *Transactions. of ASME, Journal of Lubrication Technology*, July 418-425, 1976.
 20. Lehnhoff T.F., Chen H., Ardayfio D.D., Surface durability of forged and machined steel gears, *ASME paper 83-DE-6*, 1983.
 21. Eyericioğlu O., Developments and performance analyses of precision forged spur gears, PhD. Thesis, School of Manufacturing and Mechanical Engineering, The University of Birmingham, England, 1995.
 22. Eyericioğlu O., Dean T.A., Walton D., Precision forging of gears, 7th Int. Mach. Des. and Prod Conf. Ankara, Turkey, 433-442, 1996.
 23. Cai J., Dean T. A., Hu Z. M., Alternative die designs in net-shape forging of gears, *J. Mater. Proc. Tech.* 150 (1), 48-55, 2004.
 24. Yang C., Zhao S., Zhang J., Precision forging of spur gear by flow control forming method, *Australian j. of Mech. Eng.*, 12 (1), 101-109, 2014.
 25. Zuo B., Wang B., Li Z., Zheng M. Zhu X., Design of relief-cavity in closed-precision forging of gears, *J. Cent. South Univ.* 22, 1287-1297, 2015.
 26. Abdul N.A., Dean T.A., An analysis of the forging of spur gear forms, *Int J Mach Tool Des Res*, 26 (2), 113-123, 1986.
 27. Grover O.P., Juneja B.L., Analysis of closed-die forging of gear like element, *Adv Tech Plasticity*, 888-893, 1984.
 28. Chitkara N.R., Bhutta M.A., Forging and heading of hollow spur gear forms: an analysis and some experiments, *Int J Mech Sci*, 41, 1159-1189, 1999.
 29. Choi J.C., Choi Y., A study on the forging of external spur gears: upper bound analyses and experiments, *Int J Mach Tool Des Res*, 38, 1193-1208, 1998.
 30. Choi J., Cho H. Y., Jo C. Y., An upper-bound analysis for the forging of spur gears, *J. Mater. Proc. Tech.* 104, 67-73, 2000.
 31. Sadeghi M.H., Precision forging axisymmetric shapes, straight and helical spur gears, PhD. Thesis, School of Man. And Mech. Eng., The University of Birmingham, England, 1989.
 32. Sadeghi M. H., Gear forging: mathematical modeling and experimental validation, *J. of Manuf. Science and Engineering*, 125 (4), 753-762, 2003.
 33. Rasae S., Haghghat H., Zahedi M., Modelling and upper bound analysis of involute spur gear precision forging, *Int. Res. J. of Applied and Basic Sciences*, 4 (7), 1676-1682, 2013.
 34. Chitkara N. R., Kim Y. J., Near-net shape forging of a crown gear: some experimental results and an analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41 (3), 325–346, 2001.
 35. Hsu H. H., A study on precision forging of spur gear forms and spline by the upper bound method, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44 (8), 1543–1558, 2002.
 36. Hosford W. F., Caddell R. M., *Upper bound analysis, Metal forming: Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press, 110-127, 2012.
 37. Simufact Forming, <https://www.simufact.com/simufactforming-forming-simulation.html>.

- 38.** Zadshakouyan M., Sobbouhi E. A., Jafarzadeh H., A study on the heading of spur gears: numerical analysis and experiments, *Int. J. of Mech. Aerospace, Industrial, Mechatronic Manuf. Eng.*, 3 (4), 380-384, 2009.
- 39.** Alves M., Rodriguez J. M. C., Martins P. A. F., Cold forging of gears: experimental and theoretical investigation, *Finite Elements in Analysis and Design*, 37 (6-7), 549-558, 2001.



A convolutional neural network model for marble quality classification

İdris Karaali^{ID}, Mete Eminağaoğlu*^{ID}

Department of Computer Science, Dokuz Eylül University, İzmir, 35390, Turkey

Highlights:

- Use of convolutional neural networks for multi-classification
- Marble quality classification with slab images
- Data augmentation with image processing filters

Keywords:

- Convolutional neural networks
- Marble images
- Data augmentation
- Marble quality classification
- Machine learning

Article Info:

Research Article
Received: 14.04.2020
Accepted: 17.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.720041

Correspondence:

Author: Mete Eminağaoğlu
e-mail: mete.eminagaoglu@deu.edu.tr
phone: +90 533 968 7979

Graphical/Tabular Abstract

IMarble quality classification by human experts can be time-consuming, error-prone, unreliable, and subjective. Automated and computerized methods are needed to obtain more reliable, faster, and less subjective results. In this study, a deep learning model is developed in order to perform multi-classification of marble slab images with six different quality types. Some special image pre-processing operations were applied to the images for data augmentation and a special convolutional neural network (CNN) architecture was designed and implemented. It has been observed that the data augmentation approach for marble image samples has significantly improved the accuracy of the CNN model.

Table A. Performance comparison using the augmented dataset with 6300 images

Classifier	Accuracy (Train)	Accuracy (Test)	Accuracy (10-folds x-val.)
<i>Our CNN model</i>	1.000	0.922	0.961
k-NN (k=1)	0.906	0.729	0.703
Multilayer Perceptron (hidden layer: 64 nodes)	0.893	0.748	0.757
Multilayer Perceptron (hidden layers: 256 and 128 nodes)	0.917	0.705	0.712
C4.5 Decision Tree	0.821	0.694	0.685
Naïve Bayes	0.735	0.655	0.661

Purpose: This study aims to propose a novel marble quality classification model that could provide accuracy scores at least as good as human experts, which might be implemented and used in the marble industry as autonomous agents that could minimize human intervention and human workforce requirements in the near future. To the best of our knowledge, the use of CNN for marble quality multi-classification and image pre-processing and data augmentation techniques for marble quality classification is known to be a novel approach and model in the related literature.

Theory and Methods:

The original dataset consisted of 2100 marble images with six different classes. Image blurring was achieved by convolving the image with a low-pass filter 4x4 kernel. After that, 2D linear separable filter was applied. After these data augmentation operations, the marble image dataset size was increased up to 6300. Batch normalization was used for the input data with a batch size of 16 within CNN. Two convolution layers with 64 and 128 filters of (3x3) sizes were used. A fully connected layer was used where 139392 nodes were fully connected with 512 nodes and a dropout rate of 0.50. CNN model was trained for 30 epochs and Adam is used with an initial learning rate of 0.001.

Results:

The average accuracy scores obtained by our CNN model using the augmented dataset with 6100 images were 0.922 (test) and 0.961 (ten-folds cross-validation), which are both much higher than the results obtained by other algorithms. In addition, these results are considered to be at least as good as (or even exceeding) the human experts' manual classification. The novelty of our study and its contributions can be summarized as follows; the use of a specifically designed convolutional neural network for marble quality classification, the use of specific two image processing methods (Blur filter and 2D linear separable filter) for data augmentation, the delivery of highly successful results without overfitting problems.

Conclusion:

It can be concluded that this CNN and data augmentation model can be implemented and used in marble companies as a fully automated and computerized alternative for manual operations carried out by humans



Mermer işlemede kalite sınıflandırması için evrişimsel sinir ağı modeli

İdris Karaali^{ID}, Mete Eminağaoğlu*^{ID}

Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Fakültesi, Bilgisayar Bilimleri Bölümü, 35390 Buca İzmir

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Evrişimsel sinir ağları ile çoklu sınıflandırma
- Mermer levhalarının resimleri ile kalite sınıflandırması
- Görüntü işleme filtreleri ile veri artırımı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 14.04.2020
Kabul: 17.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.720041

Anahtar Kelimeler:

Evrişimsel sinir ağları,
mermer resimleri,
veri artırımı,
mermer kalitesi
sınıflandırması,
yapay öğrenme

ÖZET

Mermer işletmelerinin temel politikası; sürdürülebilir ve yüksek kaliteli ürünleri standartlaşmış bir yöntemle ortaya koymaktır. Farklı türdeki mermerlerin tanımlanması ve sınıflandırılması, genellikle bu alandaki uzman kişiler tarafından manuel olarak gerçekleştirilen kritik bir işittir. Bununla birlikte; mermer kalitesi sınıflandırılmasının insanlar tarafından ve manuel şekilde yapılması oldukça zaman alıcı, hatalara fazlasıyla açık, aynı zamanda da güvenilir olmayan ve öznel bir süreçtir. Bu süreci daha nesnel ve güvenilir, çok daha hızlı ve çok daha az insan müdahalesi gerektirecek şekilde otomatik hale dönüştüren bilgi teknolojilerine dayalı yaklaşımlar ve yöntemlere büyük ölçüde gereksinim vardır. Bu çalışmada; levha mermer resimlerini işleyerek altı farklı kalite tipine göre sınıflandıran bir derin öğrenme modeli geliştirilmiştir. Veri artırımı amacıyla, orijinal mermer resimlerine özgü bir görüntü ön işleme süreci gerçekleştirilmiş ve özel bir evrişimsel sinir ağı mimarisi tasarlanıp uyarlanmıştır. Mermer görselleri üzerinde bu çalışmada uygulanan özgün veri artırımı yaklaşımının, evrişimsel sinir ağı modelinin sınıflandırma başarısı ve doğruluk değerlerini çok önemli düzeyde artırdığı gözlenmiştir. Evrişimsel sinir ağı modeli ile alternatif yapay öğrenme algoritmalarının tamamından çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği ve mermer işlemedeki kalite kontrol uzmanlarının performanslarına yakın başarı düzeyinde sınıflandırma yapılabildiği ortaya konulmuştur.

A convolutional neural network model for marble quality classification

H I G H L I G H T S

- Use of convolutional neural networks for multi-classification
- Marble quality classification with slab images
- Data augmentation with image processing filters

Article Info

Research Article
Received: 14.04.2020
Accepted: 17.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.720041

Keywords:

Convolutional neural
networks,
marble images,
data augmentation,
marble quality classification,
machine learning

ABSTRACT

The basic policy of marble enterprises is to establish sustainable high-quality products in a standardized manner. Identification and classification of different types of marbles is a critical task that is usually carried out by human experts. However, marble quality classification by human experts can be time-consuming, error-prone, unreliable, and subjective. Automated and computerized methods are needed to obtain more reliable, faster, and less subjective results. In this study, a deep learning model is developed in order to perform multi-classification of marble slab images with six different quality types. Some special image pre-processing operations were applied to the images for data augmentation and a special convolutional neural network (CNN) architecture was designed and implemented. It has been observed that the data augmentation approach for marble image samples has significantly improved the accuracy of the CNN model. We have obtained outstanding results with our CNN model, which surpassed the alternative machine learning algorithms and even equalized the human experts' classification performance.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: karaaliidris@gmail.com, mete.eminagaoglu@deu.edu.tr / Tel +90 533 968 797

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sert taşlar ve kayalar haricinde; renk, doku ve yapı taşı özellikleri açısından homojen olan mermerlere ve mermer kayaçlarına yeryüzünde pek rastlanmamaktadır. Süreksizlikler, renk farkları, yabancı parçacıkların ya da öğelerin varlığı, blok şekiller ve çeşitli ölçümler; mermerin niteliğini etkileyen ana faktörlerdir. Mermer blokları; mermer tipinin genel özelliklerine, içsel parametrelerine, mermer ocağının jeolojik karakteristiklerine, işleme hattı ve kullanım karakteristiklerine göre değerlendirilir [1]. Günümüzde mermerlerin kalitelerine göre sınıflandırılması; donanım ve yazılım teknolojilerindeki ilerlemelere karşın çoğunlukla insan iş gücü ve uzman kişilerin müdahalesiyle gerçekleştirilmektedir.

Bir mermerin kalitesi genellikle; o mermerin üzerindeki fosiller ve lekeler kadar, mermerin yoğunluğuna ve büyüklüğüne bağlı olarak değişebilmektedir [1]. Bir literatür çalışmasında, mermer kalitesinin sınıflandırılmasına ilişkin çeşitli klasik yaklaşımlar veya yöntemler ortaya konulmuştur [2]. İlgili çalışmaların çoğunda mermer levhalarının fotoğraflarının kalite sınıflandırma sistemlerine dâhil edilmeden önce; Gabor, yüzdelik gibi farklı filtrelerle ya da kromatik özelliklerinin çıkartılması gibi diğer tekniklerle görüntü ön-ışleme sürecinden geçirildiği bilinmektedir [3]. İlgili çalışmada, renkli granit karolarının resimlerinden oluşan toplam 12 farklı kalite sınıfı ve her bir sınıftan 48 adet örneği içerecek şekilde toplam 576 örnekten oluşan bir veri kümesi kullanılmıştır [3]. Granit görsellerindeki bozunum (distortion) etkisini en aza indirmek adına, 1500 x 1500 piksel boyutlarındaki görseller kırılma işlemiyle 544 x 544 boyutuna küçültülmüştür. Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine) algoritması kullanılarak % 98,5' lik bir doğruluk oranı elde edilmiştir [3].

Mermer görsellerine bağlı olarak yapılan kalite sınıflandırmasına ilişkin literatürde yer alan diğer bir çalışmada ise K-ortalamar kümeleme (K-means clustering) algoritması kullanılarak mermer sınıflandırması için endüstriyel bir uygulama geliştirilmiştir [4]. Bu çalışmada, mermerlerin görsellerine ait resim büyüklükleri 315 x 310 piksel olacak şekilde ayarlanmıştır. Her bir farklı mermer kalitesi sınıfı için örneklem adetleri sırasıyla 172, 388, 411 ve 187 olarak alınmış ve toplamda 1158 örnekten oluşan bir veri kümesi kullanılmıştır [4]. Toplam ve fark histogramları (SDH) [5] kullanılarak elde edilen ve ayrıca; ortalama, varyans, enerji, korelasyon, entropi, kontrast ve homojenlik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan dokusal özellikler mermer sınıflandırmasına dâhil edilmiştir [6]. Diğer yandan, bir örneklemin enerji ayrışmasını sağlayan dalgacık dönüşümü tabanlı (wavelet transform-based) özellikler elde edilmiş [7] ve bu özellikler ayrışmanın her bir düzeyinin ortalama, medyan ve varyansını hesaplamada kullanılmıştır. K-ortalamar kümeleme algoritması kullanılarak % 83,60'lık bir doğruluk (accuracy) elde edilmiştir [4].

Doğan ve Akay; dört farklı mermer kalitesine ait mermer fotoğraflarını içeren bir görsel veri seti kullanarak yaptıkları

çalışmada yüksek düzeyde doğruluk oranları elde etmiştir [8]. Toplam ve fark histogramları ile AdaBoost algoritmasını kullanarak, mermer levhalarının otomatik olarak sınıflandırmasını yapan bir sistem ortaya koymuşlardır. Dört farklı kalite sınıfına ait, toplamda 1158 örnekten oluşan bir veri kümesi kullanılmış ve AdaBoost algoritması ile her bir farklı mermer kalite sınıfı için doğruluk oranları sırasıyla % 96,52, % 91,79, % 94,53 ve % 99,25 olarak elde edilmiştir [8]. Araştırmacıların diğer bir çalışmasında da aynı veri kümesinde Hiyerarşik Radyal Temelli Fonksiyon Ağı (Hierarchical Radial Basis Function Network) kullanılarak oldukça yüksek doğruluk oranlarında sonuçlar elde edilmiştir [9].

Ferreria ve Giraldi; granit karolarının sınıflandırılmasında Evrişimsel Sinir Ağlarını (Convolutional Neural Networks) kullanan bir yöntem önermiştir [10]. Evrişimsel sinir ağı içinde yer alan eğitim verilerinde 28 x 28 piksel boyutundaki siyah-beyaz görseller ve 32 x 32 'lik renkli görseller kullanılmışlardır. Bu veri setleri, aynı zamanda Bianconi ve arkadaşlarının çalışmasında da [11] kullanılmış olan granit karolarının resimlerinin görüntü işleme ile küçültülmüş türevleridir. Bu çalışmalarda orijinal granit karo verileri ise; 1500 x 1500 piksel boyutunda, 25 farklı sınıfa ait ve her sınıfta 40 adet granit fotoğrafının yer aldığı, toplam 1000 adet renkli görseli içermektedir. İlk 100 görsel örneği, bir görüntü işleme sistemi ile taranarak elde edilmiştir. Kalan 900 örnek ise; orijinal görsellerin 10 ile 90 derece arasında dokuz farklı açıyla döndürülmesiyle elde edilmiştir [10]. Bu görseller; toplam 2809000 örnekten oluşmakta olup, MNIST verileri [12] için önceden eğitilmiş (pre-trained) bir evrişimsel sinir ağına kullanılmak üzere, 28 x 28 piksel ebatlarında siyah beyaz görsellere dönüştürülmüştür. Benzer şekilde ayrıca; CIFAR verileriyle [13] önceden eğitilmiş bir evrişimsel sinir ağına çalıştırılmak üzere 2116000 adet 32 x 32 boyutlarında renkli görseller hazırlanmıştır. Sınıflandırmadaki başarımlar ölçümü için 5 x 2 'lik çapraz-geçerleme yöntemi kullanılmıştır. Evrişimsel sinir ağındaki eğitim sürecinde; öğrenme hızı 0,001 değerinde sabit tutulmuş ve momentum değeri de 0,9 olarak ayarlanmıştır. Ağıdaki hataların geri yayılımı ve ağırlıkların güncellenmesinde stokastik kademeli azalma (stochastic gradient descent) yöntemi kullanılmış ve ağırlıklardaki azalım hızı (decay rate) 0,0005 olarak belirlenmiştir. Araştırmacılar ayrıca, önceden eğitilmiş CIFAR modeli ile renkli karoların eğitimi sürecinde de benzer parametreleri kullanmıştır; ancak bu süreçteki tek farklılık, ağırlıklardaki azalım hızının 0,0001 olarak kullanılması olmuştur. Renkli karo görsellerinde % 87,26'lık bir doğruluk oranı elde edilmiştir.

Yakın zamanda yapılmış olan bir çalışmada ise, mermer levha görsellerinin sınıflandırılmasında evrişimsel sinir ağı kullanılmıştır [14]. Pençe ve Çeşmeli' nin bu çalışmasında, 80 farklı mermer görseli üzerinde çeşitli evrişimsel sinir ağı mimarileri ve farklı hiper-parametreler kullanılarak deneyler yapılmıştır [14]. Bununla birlikte; bu çalışmada veri artırımı için hiçbir yöntem kullanılmamıştır. Ayrıca, mermer görsellerinin kalitesine göre ayırt edilmesi

kapsamında sadece ikili sınıflandırma tercih edilmiştir ki, endüstriyel uygulamalarda mermerlerin ikiden daha fazla kalite düzeyine ayrıştırılması gerekmektedir. Çalışmada elde edilen en yüksek doğruluk oranının % 75 civarı olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada; mermer endüstrisinde yakın gelecekte insan müdahalesini ve insan iş gücü gerekliliklerini minimize edebilecek şekilde, en az mermer eksperlerinin ortaya koyduğu düzeyde doğru sınıflandırmayı, çok hızlı ve etkin bir şekilde, otomatikleştirilmiş olarak yapabilecek yeni bir mermer sınıflandırması modeli ortaya konulmuştur. Bugüne kadar literatürdeki bilinen tüm çalışmalardan farklı olarak; mermer kalitesinin çoklu sınıflandırmasında evrimsel sinir ağlarının bu düzeyde başarılı sonuç vermesi ve evrimsel sinir ağlarının doğruluk oranını, aşırı uyumu (overfitting) da engelleyecek şekilde arttıran bazı veri artırımı (data augmentation) tekniklerinin özgün bir biçimde kullanımı, bu çalışmanın önemini ortaya koyan yeni bir yaklaşımdır.

2. MALZEMELER VE YÖNTEMLER (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada kullanılan mermer levhalarının görselleri, İzmir’de kurulmuş uluslararası bir şirket olan Haz Mermer Sanayi ve Ticaret A. Ş.’ den sağlanan gerçek ürünlere aittir. Her bir kalite sınıfı için örnek sayısı 350 adet renkli fotoğrafı ve toplamda 2100 örnekten oluşan bir veri setini oluşturmaktadır. Bu görsellerin özgün boyutları 2400 x 2400

piksel büyüklüğündedir. Veri setindeki tüm görseller kırpılmıştır ve bu sayede nihai veri seti, 300 x 300 piksel boyutundaki renkli (RGB) mermer levha fotoğraflarından oluşmuştur. Toplam altı farklı kalite kategorisinden oluşan bu mermer levhalar Q3-A, Q3-B, Q3-C, Q4-A, Q4-B, Q4-C şeklinde etiketlenmiştir. Bu farklı kalitedeki sınıfların bazılarından alınan örnek görseller, fikir vermesi açısından Şekil 1’de ve Şekil 2’de gösterilmektedir.

Farklı sınıflara ait olan mermer örneklerinin çoğunluğunun görüntü olarak birbirine çok benzer olmasından ve bir mermer kalite eksperleri tarafından bile bazen ayırt edilmesinin çok güç olmasından dolayı, mermerlerin kalitelerine göre ayrıştırılmasının son derece zor bir iş olduğunun altı çizilmelidir. Buna ek olarak; bazı mermer örnekleri, aynı kalite sınıfına ait olmalarına rağmen, yüzeylerindeki renklerden ve bazı desenlerden ya da damarlardan ötürü pek çok insanın görsel algısına göre tamamıyla farklı görünebilmektedir. Diğer bir deyişle, mermer örneklerinin hem yanlış pozitif (false positive) hem de yanlış negatif (false negative) şekilde kategorize edilme riski son derece yüksek düzeyde olabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan mermer görselleri ve verileri için de bu sorunlar ve güçlükler benzer şekilde geçerlidir. Örneğin, Şekil 3a, Şekil 3b ve Şekil 3c’de de görülebileceği gibi, hem insan hem de bilgisayar görsel görüşü için aynı sınıftaki bu mermer görsellerini algılamak ve doğru sınıflara atamak son derece zor bir iştir.



Şekil 1. İki farklı kalite sınıfına ait mermer levha örnekleri (Marble slab images from two different quality classes)
(a) Q3-B sınıfı (quality class: Q3-B), (b) Q3-C sınıfı (quality class: Q3-C)



Şekil 2. İki farklı kalite sınıfına ait mermer levha örnekleri (Marble slab images from two different quality classes)
(a) Q4-A sınıfı (quality class: Q4-A), (b) Q4-B sınıfı (quality class: Q4-B)



Şekil 3. Q4-C kalite sınıfına ait üç adet mermer levha görseli (Three marble slab images from Q4-C quality class)

Bu çalışmada kullanılan evrişimsel sinir ağı, son yıllarda oldukça yaygınlaşan ve birçok alanda çok başarılı sonuçlar veren derin öğrenmedeki en çok bilinen mimari ve yapılardan birisidir. Derin öğrenme kavramı, çeşitli kaynaklarda farklı biçimlerde tanımlansa da; en basit şekliyle, yapay sinir ağlarının çok sayıda gizli katman içeren, daha karmaşık öğrenme yöntemleri ve çok daha fazla sayıda değişken, parametre ve hesaplama işlemleriyle ele alındığı, dolayısıyla yüksek kapasitede bellek ve işlemci gerektiren yapay öğrenme modeli olarak tanımlanabilir [15]. Günümüzde çok katmanlı algılayıcı (multilayer perceptron) gibi klasik yapay sinir ağları ya da diğer yapay öğrenme algoritmalarıyla çözülemeyen ya da yeterince başarılı sonuç elde edilemeyen birçok problem, derin öğrenme ile artık çözüme ulaştırılmaktadır [16, 17].

Evrişimsel sinir ağları; ağırlıklı olarak görsel veriler ve görüntü işleme ya da çoklu sınıflandırma kapsamındaki çeşitli zor işlerde çok başarılı sonuçlar alınabilen bir derin öğrenme türüdür. Evrişimsel sinir ağları ilk olarak ızgara benzeri topolojik verilerin (görüntüler ve zaman serisi verileri) işlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada ortaya konulmuştur [18]. Evrişimsel sinir ağları; görüntü ön-işleme ve görsel verilerin hesaplanmasında yaşanan aşırı sayıda işlemi ve işlem karmaşıklığını daha farklı ve daha verimli bir şekilde ele almak için tasarlanmıştır [19, 20]. Fotoğraf, video, vb. görsel verilerden yeni öznitelikler ve desenler çıkartılması ve verilerin sınıflandırılması işlemlerinde günümüzde bilinen en başarılı, verimli ve esnek modeldir. Evrişimsel sinir ağlarının çalışması sürecinde dört ana aşama bulunmaktadır. Birinci aşama olan evrişim sürecinde, çeşitli görüntü filtreleri ile girdi verilerinden öznitelik haritaları ve örüntüleri elde edilmektedir. Pooling aşamasında, bir görselin örüntüsünün alt kümesinin elde edilerek görselin farklı türevlerinin de evrişimsel sinir ağı tarafından doğru şekilde tanınmasını sağlar. Düzleştirme (flattening) aşamasında, çok boyutlu öznitelik kümesinin tek boyutlu bir dizin şekline dönüştürülmesi ve böylece son aşamadaki tam bağlantılı (fully connected) katmanlara girdi olarak iletimi sağlanır. Son aşamada da, çok katmanlı algılayıcıya benzer şekilde, bir ya da birkaç adet gizli katmandan oluşan tam bağlantılı katmanlarda verilerin sınıflandırılması ve oluşan hataların geri yayılımla hesaplanıp ağırlıkların güncellenmesi yapılır [15, 16].

Evrişimsel sinir ağlarında; evrişim katmanları ve tam

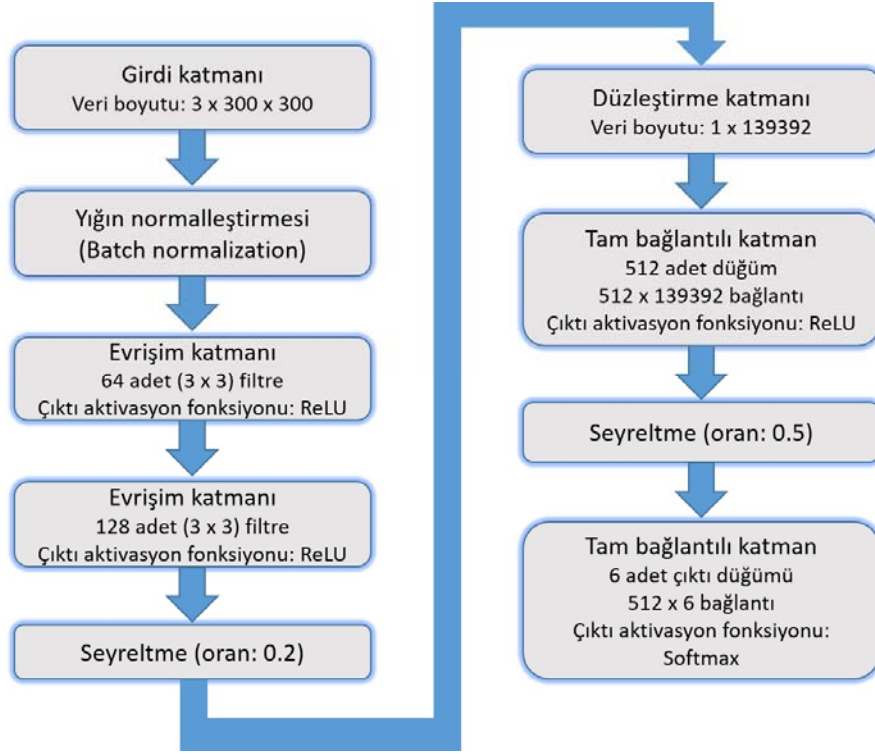
bağlantılı katmanların gizli ara katmanlarında çıktı aktivasyon fonksiyonu olarak genelde ReLU (Rectified Linear Unit) kullanılmaktadır [15, 16]. ReLU aktivasyon fonksiyonu ilk olarak dinamik bir ağ modelinde ortaya konulmuştur [21]. ReLU; doğrusal olmaması, çok basit ve çok hızlı çalıştırılabilmesi ve birinci dereceden türevinin de kendi cinsinden ifade edilebilmesi nedeniyle, derin öğrenme modellerinde ve özellikle evrişimsel sinir ağlarında en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonudur. Bir düğüme girdi olarak gelen değer x olarak ifade edilirse, ReLU aktivasyon fonksiyonu $F(x) = \text{maksimum}(0, x)$ olarak tanımlanabilir.

Softmax fonksiyonu, sınıfları tahmin etmek için modelin son katmanında kullanılmakta olup evrişimsel sinir ağlarında da, özellikle çoklu sınıflandırma işlemlerinde sıkça tercih edilmektedir. Softmax fonksiyonunun çıktı değerleri $[0,1]$ aralığında olup birinci dereceden türevinin de kendisi cinsinden ifade edilebilmesi nedeniyle hataların geri yayılımı gibi işlemlerde de oldukça kullanışlı bir fonksiyondur [16, 20]. Softmax fonksiyonu Eş. 1'de tanımlanmış olup herhangi bir j girdi değerine ait S_j çıktı değeri, denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$S_j = \frac{e^{a_j}}{\sum_{k=1}^N e^{a_k}} \quad (1)$$

3. TASARIM VE UYGULAMA (DESIGN AND IMPLEMENTATION)

Bu çalışmada kullanılan evrişimsel sinir ağı modelimizin mimari tasarımı ve yapısı, Şekil 4'te gösterilmiştir. Birçok farklı evrişimsel sinir ağı modeli ve çok farklı hiper-parametrelerle deneyler yapılmış ve en başarılı sonuçların bu mimari ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Girdi katmanında, yığın normalleştirilmesi (batch normalization) kullanılmıştır. Bir sonraki aşamada; her bir görsel, iki evrişim katmanından (convolution layer) geçirilmekte ve sırasıyla 64 ve 128 adet (3 x 3) filtreler bu katmanlarda kullanılmaktadır. Her bir evrişim katmanında, çıktı aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmaktadır. İkinci evrişim katmanındaki ReLU işlemlerinde, 0,20 oranında bir seyreltme (dropout) kullanılmıştır. Bu çalışmadaki evrişimsel sinir ağı modelimizde; bilinen birçok evrişimsel sinir ağı mimari ve modelinin aksine, max pooling ya da average pooling işlemi hiç bir aşamada kullanılmamıştır. Bunun nedeni de, pooling mekanizmasının modelimize eklendiği durumlarda, altı



Şekil 4. Evrişimsel sinir ağıımızın mimari yapısı (Architecture of our convolutional neural network model)

sınıftan özellikle ikisine ait verilerin sınıflandırmasında doğruluk oranlarında ciddi düşüşler gözlenmiş olmasıdır. Evrişimsel sinir ağı modelimizin bir sonraki aşamasında; verinin 139392 elemanlı tek boyutlu bir dizine dönüştürülmesi için bir düzleştirme katmanı (flattening layer) kullanılmıştır. Bu tek boyutlu dizin, tam bağlantılı katmanın 139392 düğümden oluşan girdi katmanı olarak kullanılmış ve 512 adet düğümden oluşan bir gizli katmana bağlanmıştır. Tam bağlantılı katmanda 0,50 oranında bir seyreltme de kullanılmıştır ve çıktı aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. Son aşamada da, 512 adet düğüm, altı adet çıktı katmanı düğümüne tam bağlantılı şekilde yapılandırılmış ve çıktı katmanında aktivasyon fonksiyonu (ve aynı zamanda da çoklu sınıflandırma fonksiyonu) olarak Softmax kullanılmıştır. Evrişimsel sinir ağı modelimiz; çıktı katmanında yer alan altı düğümün her birinin altı farklı mermer sınıfından birisini temsil edecek şekilde yapılandırılmıştır. Evrişimsel sinir ağı modelimizin eğitim sürecinde, yığın normalleştirmesinde her bir yığının boyutu 16 olarak ayarlanmış ve eğitim toplam 30 devir (epoch) boyunca sürdürülmüştür. Öğrenme hızının ayarlanmasında uyumsal öğrenme hızı optimizasyonu modellerinden birisi olan Adam algoritması kullanılmış [15, 16] ve ilk öğrenme hızı 0,001 olarak tanımlanmıştır.

Evrişimsel sinir ağı modelimiz, Python programlama dilinin 3.6.7 sürümü ve şu yazılım mimarileri ve kütüphaneleri kullanılarak kodlanmıştır: Keras 2.2.4, Tensorflow 1.13.1, PyCharm Pro. 2018.1.4 ve Atom 1.34.0. Kodumuzun bazı kısımları Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu çalışmadaki deneylerimiz ve testlerimizde ilk başta 300 x 352

300 piksel boyutlarındaki renkli mermer görselleri kullanılmıştır. Birçok farklı evrişimsel sinir ağı modeli ve çok farklı hiper-parametrelerle deneyler yapıldığı halde, istenilen doğruluk oranları elde edilememiş, özellikle eğitim (train) sonunda altı sınıfın doğruluk oranı 1,0' e ulaşsa bile, geçiş ve testlerde aşırı düşüşler gözlenmiş ve aşırı uyum (overfitting) sorunu gözlenmiştir. Evrişimsel sinir ağı modelimizdeki yığın normalleştirmesi aşamasında farklı yığın boyutları denenmiş, ayrıca seyreltme oranları da değiştirilerek birçok farklı deney yapılmıştır. Fakat tüm bu farklı yaklaşımlarda aşırı uyum sorunu aşılamamıştır. Öte yandan, aynı mermer verileri diğer alternatif yapay öğrenme algoritmalarıyla denendiğinde de aşırı uyum sorunu sürekli olarak gözlemlenmiştir.

Test ve geçerleme sonuçlarının doğruluk oranını artırmak ve aşırı uyum sorununu gidermek amacıyla; çalışmamızda çeşitli veri artırımı yöntemlerinin denenmesine karar verilmiştir. Öncelikle L1 ve L2 regülasyonları denenmiş [15, 16], ancak bu yöntemlerin modelimizdeki aşırı uyum sorununu gidermediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, evrişimsel sinir ağlarında aşırı uyumu gidermede diğer bir strateji olan veri artırımı ve buna bağlı olarak görsel verilerde sıklıkla kullanılan gürültü ekleme (noise injection), görüntü döndürme (image rotation), renk seğirmesi (color jittering), görüntüyü yatay ve dikey döndürme (horizontal and vertical flips) ve rastgele kırpm (random cropping) gibi çeşitli görüntü işleme teknikleri de denenmiştir [15, 22]. Buna ek olarak; Gabor filtresi, iki taraflı filtreleme (bilateral filter), medyan filtresi, Retinex, Msrnc ve Automated-Retinex gibi bazı özel görüntü işleme yöntem ve filtreleri de mermer

```

batch_size = 16
num_classes = 6
epochs = 10
data_augmentation = True
num_predictions = 12
save_dir = os.path.join(os.getcwd(), 'saved_models')

(x_train, y_train) = imgt.image_to_txt("Blursep44train")
(x_test, y_test) = imgt.image_to_txt("Blursep44test")

print(x_train.shape)
print(x_test.shape)

y_train = keras.utils.to_categorical(y_train-1, num_classes)
y_test = keras.utils.to_categorical(y_test-1, num_classes)

model = Sequential()
model.add(Conv2D(64, (15, 15), strides=(3,3), padding='same',
                input_shape=x_train.shape[1:]))
model.add(Activation('relu'))
model.add(Conv2D(128, (15, 15), strides=(3,3)))
model.add(Activation('relu'))
model.add(Dropout(0.15))

model.add(Flatten())
model.add(Dense(512))
model.add(Activation('relu'))
model.add(Dropout(0.5))
model.add(Dense(num_classes))
model.add(Activation('softmax'))

# initiate RMSprop optimizer
opt = keras.optimizers.rmsprop(lr=0.0001, decay=1e-6)

model.compile(loss='categorical_crossentropy',
              optimizer=opt,
              metrics=['accuracy'])

x_train = x_train.astype('float32')
x_test = x_test.astype('float32')
x_train /= 255
x_test /= 255

```

Şekil 5. Evrişimsel sinir ağıımızın mimarisi ve parametrelerinin tanımlandığı Python kod parçası (Python code for the architecture and parameter settings of our convolutional neural network model)

```

model.fit_generator(datagen.flow(x_train, y_train, batch_size=batch_size),
                  epochs=epochs,
                  validation_data=(x_test, y_test),
                  workers=4)

# Save model and weights
if not os.path.isdir(save_dir):
    os.makedirs(save_dir)
model_path = os.path.join(save_dir, 'sonuc')
model.save(model_path)
print('Saved trained model at %s ' % model_path)

# Score trained model.
scores = model.evaluate(x_test, y_test, verbose=1)
print('Test loss:', scores[0])
print('Test accuracy:', scores[1])

```

Şekil 6. Eğitim sonundaki modelin ve elde edilen test sonuçlarının kayıtladığı Python kod parçası (Python code for saving the trained model and printing the test results)

görselleri üzerinde kullanılmıştır [23]. Her bir farklı yöntem, mermer görsellerinin tamamında uygulanıp; oluşan yeni görseller de, veri setine dâhil edilmiş ve sonrasında da evrişimsel sinir ağına yeni baştan eğitim ve testleri yapılmıştır. Fakat bunların hiçbiri aşırı uyum sorununu çözememiş ve özellikle testlerdeki doğruluk oranlarını iyileştirememiştir. Tüm bu başarısız sonuçlardan sonra, aşırı uyum sorununu giderebilmek amacıyla daha özgün bir yaklaşım denenmesine karar verilmiş, seçilen bazı görüntü işleme filtreleri mermer görselleri üzerinde uygulanarak yeni görseller elde edilmiştir. Farklı görüntü işleme yöntem ve

filtrelerinin görseller üzerinde uygulanmasında da, 82 farklı model belirlenip denenmiş ve her birisi ayrı ayrı evrişimsel sinir ağına çalıştırılmıştır. En sonunda, mermer levha görselleri ve evrişimsel sinir ağı için aşırı uyum sorununu da aşacak şekilde, olabilecek en yüksek doğruluk oranını elde eden görüntü işleme ve veri artırımı yaklaşımı ortaya konulmuştur. Veri setindeki her bir mermer görseline; bulanıklaştırma filtresi (blur filter) ve iki boyutlu doğrusal ayrıştırıcı filtre (2D Linear Separable Filter) uygulanarak yeni görsel örnekleri elde edilmiş ve bunlar da veri setine eklenmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Görüntü bulanıklaştırması, 4 x 4' lük matristen oluşan bir düşük geçişli (low-pass) filtreyle [24] mermer görsellerinin evriştirilmesi yoluyla sağlanmış olup bu sayede mermer resimlerdeki gürültü ve bozunumlar temizlenebilmiştir. Bu çalışmada kullanılan mermer görsellerinin pek çok oyuk (pit) damar (vein) ve fosil kalıntısı içermesinden dolayı, bulanıklaştırma filtresi sayesinde daha pürüzsüz görseller elde edilmesi sağlanmıştır. Öte yandan, bulanıklaştırma filtresinin tek başına kullanılması, oyuk ve damarların ayırt edilebilir hale getirilmesinde yeterli olmamıştır. Mermer görsellerindeki damar desenlerini daha iyi ayırt edilebilir hale getirmek amacıyla da, iki boyutlu doğrusal ayrıştırıcı filtre kullanılmıştır [24].

Görsellere ayrı ayrı uygulanan bu filtreleme işlemleri ile elde edilen yeni görseller, mevcuttaki veri setine eklenerek veri artırımı sağlanmıştır. Bu sayede, çalışmamızdaki veri setinde bulunan görsel örneklerin adedi 6300' e yükselmiştir. Altı farklı mermer kalitesi sınıfının her birine ait olan örnek sayısı 1050' dir. Bu veri setindeki görsellerin 5400 adedi eğitim için ve 900 adedi de test için ayrılıp kullanılmıştır. Buna ek olarak, 6300 örneğin tamamı 10 katlı çapraz geçerlilik yöntemiyle yapılan deneylerde kullanılmıştır.

Bu çalışmada ortaya konan evrişimsel sinir ağı modeli, diğer bazı bilinen yapay öğrenme algoritmalarıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilerek, her birisi ile elde edilen ortalama doğruluk oranları Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışmada kapsama alınan yapay öğrenme algoritmaları içerisinde, özellikle ilgili literatürde görsel verilerin çoklu sınıflandırması amacıyla kullanılanlar; çok katmanlı algılayıcı, k en yakın komşu, C4.5 ve Naive Bayes olarak sıralanabilir. Çok katmanlı algılayıcı (multilayer perceptron), ileri beslemeli bir yapay sinir ağı modelidir ve kademeli iniş ve geri yayılım ile hataların hesaplanması ve

ağırlık güncellemelerini yapmaktadır. Çoğunlukla bir ya da bir kaç gizli katmandan oluşur ve genellikle çıktı aktivasyon fonksiyonu olarak Sigmoid tercih edilir. Öğrenme hızı, momentum, tekrar sayısı ve gizli katmanlardaki düğüm sayısı esnek bir şekilde değiştirilebilir [16]. k en yakın komşu (k-nearest neighbors ya da k-NN); veri setindeki kayıtlar arasındaki benzerlik ya da uzaklığa bağlı olarak öğrenen ve her bir kaydı, hiper uzaydaki bir vektör olarak tanımlayan bir yapay öğrenme algoritmasıdır [25, 26]. Naive Bayes; sınıflandırma problemleri için kullanılan ve Bayes teoremine dayanan bir algoritma olup öz niteliklerin birbirinden tamamen bağımsız olduğunu varsayar [27, 28]. C4.5; sınıflandırma problemleri için kullanılan ve bilgi kazanımı yöntemini kullanarak ağacın gövde, yaprak ve dallarını oluşturan bir karar ağacı algoritmasıdır [27].

Tablo 1'deki sonuçlar orijinal mermer görselleri kullanılarak elde edilmiş olup bu örneklerden 1800' ü eğitim ve 300'ü test için ayrılarak analiz edilmiş; ayrıca 2100 örneğin tamamıyla on katlı çapraz geçişleme yapılmıştır. Tablo 1'de de görülebileceği gibi, orijinal mermer görsellerinden elde edilen sonuçlar; test ve geçerlemede gözlenen oldukça düşük doğruluk oranları yanı sıra, aşırı uyum sorunundan ötürü tatmin edici değildir. Öte yandan, özgün görüntü işleme yaklaşımımız sonucundaki veri artırımı sayesinde toplam 6300 görselden oluşan veri seti ile çok daha başarılı sonuçlar elde edilmiş olup bu sonuçlar Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 1 ile karşılaştırıldığında; Tablo 2'de evrişimsel sinir ağı modelimiz yanı sıra diğer tüm alternatif algoritmaların da doğruluk oranlarının kayda değer biçimde yükseldiği görülmektedir. Ayrıca, Tablo 2 incelendiğinde evrişimsel sinir ağı modelimizin; hem test sonuçlarında, hem de çapraz geçişleme sonuçlarında diğer tüm algoritmalarından çok daha yüksek başarı oranları sağladığı ve aşırı uyum sorununun yüksek düzeyde olmadığı görülmektedir. Tablo 2'de de görülebileceği şekilde, evrişimsel sinir ağı modeli ile test

Tablo 1. Evrişimsel sinir ağı modelimizle çeşitli yapay öğrenme algoritmalarının 2100 adet resimden oluşan orijinal veri seti ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırması

(Performance comparison of several classifier algorithms versus our CNN model using the original dataset with 2100 images)

Algoritma adı ve parametre değerleri	Ortalama doğruluk oranı (Eğitim)	Ortalama doğruluk oranı (Test)	Ortalama doğruluk oranı (10 katlı çapraz geçişleme)
<i>Evrişimsel sinir ağı modeli</i>	1.000	0.714	0.701
k-NN (k en yakın komşu k=1, Öklid uzaklığı)	0.915	0.652	0.661
Çok katmanlı algılayıcı (64 düğümlü bir adet gizli katman, öğrenme hızı=0.1, momentum=0.2, aktivasyon fonksiyonu: sigmoid)	0.908	0.695	0.697
Çok katmanlı algılayıcı (256 ve 128 adet düğümlü iki adet gizli katman, öğrenme hızı=0.03, momentum=0.1, aktivasyon fonksiyonu: sigmoid)	0.910	0.701	0.693
C4.5 Karar Ağacı	0.887	0.612	0.625
Naive Bayes	0.846	0.603	0.614

Tablo 2. Evrişimsel sinir ağı modelimizle çeşitli yapay öğrenme algoritmalarının veri artırımı sonrası 6300 adet resimden oluşan veri seti ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırması
(Performance comparison of several classifier algorithms versus our CNN model using the augmented dataset with 6300 images)

Algoritma adı ve parametre değerleri	Ortalama doğruluk oranı (Eğitim)	Ortalama doğruluk oranı (Test)	Ortalama doğruluk oranı (10 katlı çapraz geçirme)
<i>Evrişimsel sinir ağı modeli</i>	1.000	0.922	0.961
k-NN (k en yakın komşu k=1, Öklid uzaklığı)	0.906	0.729	0.703
Çok katmanlı algılayıcı (64 düğümlü bir adet gizli katman, öğrenme hızı=0.1, momentum=0.2, aktivasyon fonksiyonu: sigmoid)	0.893	0.748	0.757
Çok katmanlı algılayıcı (256 ve 128 adet düğümlü iki adet gizli katman, öğrenme hızı=0.03, momentum=0.1, aktivasyon fonksiyonu: sigmoid)	0.917	0.705	0.712
C4.5 Karar Ağacı	0.821	0.694	0.685
Naïve Bayes	0.735	0.655	0.661

sonucunda elde edilen ortalama doğruluk oranı 0,922 olup, ikinci en iyi sonucu veren çok katmanlı algılayıcı (MLP) tipindeki yapay sinir ağı ile elde edilen ortalama doğruluk oranı ise sadece 0,748' dir. Benzer şekilde, evrişimsel sinir ağı modeli ile on katlı çapraz geçirme sonucunda ortalama doğruluk oranı 0,961 olarak gözlemlenmiş, ikinci en başarılı sonucu veren çok katmanlı algılayıcı tipindeki yapay sinir ağının ortalama doğruluk oranı ise sadece 0,757 olarak ele edilmiştir.

Bianconi vd'nin çalışmasında [3], oldukça zor ayırt edilebilen mermer görsellerinden farklı olarak, granit görselleri kullanılmış ve granit sınıflaması yapılmıştır. Granitlerin oluşumu mermerlere göre daha uzun yıllar almakta ve bu nedenle granitler daha fazla kristalize madde içermektedir. Granitlerde genelde öbek şeklinde bozulmalar gözlemlenir fakat mermerlerde damarlar, fosiller ve ya delikler oluşabilmektedir. İlgili makalede de gösterildiği şekilde, farklı granit sınıflarının her birisinin diğerinden ayırt edilebilirliği bizim çalışmadaki mermer örneklerine göre daha kolaydır. Doğan ve Akay [8] ile Selver ve arkadaşlarının [9] çalışmalarında ise, Manisa bölgesindeki kireçtaşı örnekleri kullanılmıştır. Kimyasal yapısı birbirine çok benzese de, kireçtaşı ile mermer arasındaki kökeni ve sahip oldukları fiziksel özellikler açısından birçok farklılıklar vardır. Mermer, kireçtaşına kıyasla renk çeşitliliğine sahiptir ve hem uzmanlar, hem de bilgisayar otomasyon sistemleri için farklı kalitelere ait mermerlerin ayırt edilmesi kireçtaşlarına göre daha zordur.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; mermer levhalarının görselleri kullanılarak mermer kalitesinin sınıflandırılmasında yeni bir model ve yaklaşım ortaya konulmuştur. Çalışmamızın orijinalliği ve ilgili literatüre olan katkısı; mermer kalitesinin çoklu sınıflandırılmasında özel olarak tasarlanmış bir evrişimsel

sinir ağı modelinin kullanılması, iki farklı görüntü işleme yönteminin (bulanıklaştırma filtresi ve iki boyutlu doğrusal ayrıştırıcı filtre) veri artırımı amacıyla aşırı uyum sorununu da giderecek şekilde kullanılması ve altı farklı kalite sınıfına ait verilerin oldukça zor olan sınıflandırma işleminin çok yüksek doğruluk oranlarıyla elde edilmesi olarak özetlenebilir. Çalışmamızda geliştirilmiş olan evrişimsel sinir ağı modeli ve veri artırımı yöntemleri sayesinde elde edilen doğruluk oranları, diğer yapay öğrenme algoritmaları kullanılarak elde edilen oranlardan çok daha yüksek olmuştur. Buna ek olarak; Haz Mermer Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin kalite kontrol uzmanları ve yöneticileri, evrişimsel sinir ağı modeli ile elde edilen doğruluk oranlarının, eksperlerin manuel olarak yaptığı mermer kalite sınıflandırmasına çok yakın düzeyde olduğunu belirtmiştir. Mermer kalite kontrol sınıflandırması için spesifik bir ulusal ya da uluslararası standart (ISO, TSE, vb) henüz yürürlükte olmadığından, mermer sektöründe kalite kontrol ve ilgili diğer süreçler bu konudaki uzman yorumları ile yapılmaktadır. Bu nedenle, çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlar, mermer görsellerini edindiğimiz Haz Mermer Sanayi ve Ticaret A. Ş.'nin mermer kalite kontrol uzmanlarınca değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ortaya konulan modelin; mermer fabrikaları ve işletmelerinde insanlar tarafından gerçekleştirilen manuel kalite kontrol ve kalite sınıflandırması süreçlerinin yerini alacak şekilde, bilişim sistemleri ile otomatikleştirilmiş bir biçimde kullanılabilir bir alternatif olabileceği düşünülebilir. Günümüzde ülkemiz de dâhil olmak üzere dünyanın birçok ülkesinde Endüstri 4.0 çözümleri ve uygulamalarının çok etkili ve hızlı biçimde yayıldığı gerçeği göz önüne alındığında, ortaya konan modelimizin bu açıdan da bir katkısı ve önemi bulunmaktadır.

Yakın gelecekte planladığımız çalışmalardan biri de; mermer işletmelerindeki endüstriyel uygulamalar için bu çalışmadaki yöntem ve modeli bir bilişim ürünü ve

uygulama paketi olarak ortaya koymaktır. Önceden eğitilmiş (pre-trained) evrişimsel sinir ağı modelimiz ve veri artırımı amacıyla kullanılan görüntü ön-işleme sürecimiz; kameralı elektronik aygıtlar veya akıllı telefonlar üzerinde çalıştırılabilecek tek bir yazılım paketine ya da tek bir uygulama içerisine yerleştirilebilir. Bu aygıtlar, mermer işleme tezgâhlarındaki uygun noktalara yerleştirilerek insan müdahalesi olmaksızın her bir yeni mermer levhasının fotoğrafını çekerek mermeri doğru kalite sınıfına atayabilecektir. Bu sistemde, mermer görselleri için önceden eğitilmiş bir evrişimsel sinir ağı modeli kullanılmış olduğundan, eğitim aşaması için herhangi bir bekleme süresi olmayacağı; bununla birlikte canlı sistemdeki görüntü ön-işleme süreçleri için belli bir çalışma süresi gereksiniminin ortaya çıkacağı dikkate alınmalıdır. Bu nedenle; otomatikleştirilmiş mermer kalite sınıflandırma işleminin, gerçek zamanlı sistemler ve endüstriyel uygulamalarda kabul edilebilir bir sürede çalıştırılabilmesi için görüntü ön-işleme aşamasının yüksek düzeyde etkili ve hızlı algoritmalar ve teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Makalenin yazarları; bu çalışmada mermer levha görsellerini sağlayan ve değerli geri bildirimlerde bulunan Haz Mermer Sanayi ve Ticaret A.Ş. yöneticileri ve uzmanlarına teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Karaca, Z., Quality control of marble blocks, MERSEM 2003 IV. Marble Symposium, Afyon-Türkiye, 497-503, 18-19 Aralık, 2003.
2. Yavuz, A.B., Türk, N., Koca, M.Y., The use of micritic limestone as building stone: A case study of Akhisar beige marble in western Turkey, IMBS 2003 International Symposium of Industrial Minerals and Building Stones, İstanbul-Türkiye, 277-281, 15-18 Eylül, 2003.
3. Bianconi, F. et al, Automatic classification of granite tiles through colour and texture features, Expert Systems with Applications, 39 (12), 11212-11218, 2012.
4. Selver, M.A. et al, An automated industrial conveyor belt system using image processing and hierarchical clustering for classifying marble slabs, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27 (1), 164-176, 2011.
5. Unser, M., Sum and difference histograms for texture classification, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8 (1), 118-125, 1986.
6. Martinez-Alajarin, J., Luis-Delgado, J.D., Tomas-Balibrea, L.M., Automatic system for quality based classification of marble textures, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C, 35 (4), 488-497, 2005.
7. Martinez-Alajarin, J., Luis-Delgado, J.D., Tomas-Balibrea, L.M., Classification of marble surfaces using wavelets, Electronics Letters, 39 (9), 714-715, 2003.
8. Doğan, H. ve Akay, O., Using AdaBoost classifiers in a hierarchical framework for classifying surface images of marble slabs, Expert Systems with Applications, 37 (12), 8814-8821, 2010.
9. Selver, M.A. et al, Cascaded and hierarchical neural networks for classifying surface images of marble slabs, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C, 39 (4), 426-439, 2009.
10. Ferreira, A. ve Giraldo, G., Convolutional Neural Network approaches to granite tiles classification, Expert Systems with Applications, 84, 1-11, 2017.
11. Bianconi, F. et al, On comparing colour spaces from a performance perspective: Application to automated classification of polished natural stones, New Trends in Image Analysis and Processing, 9281, 71-78, 2015.
12. The MNIST Database of handwritten digits. <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>. Yayın tarihi 2001. Erişim tarihi Kasım 8, 2019.
13. The CIFAR-10 dataset. <https://www.cs.toronto.edu/~kriz/cifar.html>. Yayın tarihi 2009. Erişim tarihi Eylül 21, 2019.
14. Pençe, İ. ve Çeşmeli, M.Ş., Deep Learning in Marble Slabs Classification, Techno-Science, 2 (1), 21-26, 2019.
15. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., Deep Learning, MIT Press, Cambridge, MA, A.B.D., 2016.
16. Buduma, N. ve Locascio, N., Fundamentals of Deep Learning: Designing Next-Generation Machine Intelligence Algorithms, O'Reilly, A.B.D., 2017.
17. Yıldız O., Melanoma detection from dermoscopy images with deep learning methods: A comprehensive study, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 2241-2260, 2019.
18. LeCun, Y. et al, Backpropagation applied to handwritten zip code recognition, Neural Comp., 1, 541-551, 1989.
19. Hanbay K., Hyperspectral image classification using convolutional neural network and two dimensional complex Gabor transform, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 443-456, 2020.
20. Arı A., Hanbay D., Tumor detection in MR images of regional convolutional neural networks, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1395-1408, 2019.
21. Hahnloser, R. et al, Digital selection and analogue amplification coexist in a cortex-inspired silicon circuit, Nature, 405, 947-951, 2000.
22. Avcı K., Two dimensional digital filter design using Kaiser-Hamming window structure and Huang transform and image enhancement application, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1459-1474, 2018.
23. Filters. <https://github.com/realka/DataPreparation>. Yayın tarihi Temmuz 18, 2018. Erişim tarihi Mayıs 17, 2019.
24. Image Filtering. <https://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/filtering.html>. Yayın tarihi 2011. Erişim tarihi Nisan 22, 2019.

25. Aha, D.W., Kibler, D., Albert, M.K., Instance-based learning algorithms, *Machine Learning*, 6 (1), 37-66, 1991.
26. Küçük H., Eminoğlu İ., Balcı K., Classification of neuromuscular diseases with artificial intelligence methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1725-1742, 2019.
27. Han, J., Pei, J., Kamber, M., *Data mining: concepts and techniques*, Elsevier, Waltham, MA, A.B.D., 2011.
28. Utku A., Doğru İ., Permission based detection system for android malware, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1015-1024, 2017.



3D facial recognition using local feature-based methods and accuracy assessment

Muhammed Enes Atik*^{ID}, Zaide Duran^{ID}

Geomatics Engineering Department, Istanbul Technical University, Istanbul, 34469, Turkey

Highlights:

- Use of the raw laser scanner data obtained directly
- Propose a new combination of algorithms
- Analysis of spatial accuracy

Keywords:

- Local features
- Face recognition
- Point cloud
- Laser scanning
- Accuracy assessment

Graphical/Tabular Abstract

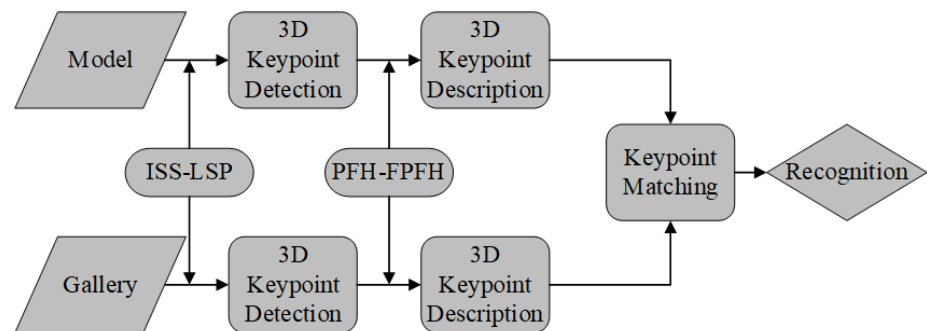


Figure A. Workflow of proposed approach

Article Info:

Research Article
Received:06.04.2020
Accepted: 23.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.715450

Acknowledgement:

This study was supported by Istanbul Technical University Scientific Research Projects Office (BAP).

Correspondence:

Author: Muhammed Enes Atik
e-mail: atikm@itu.edu.tr
phone: +90 212 285 7202

Purpose: The aim of the study is to approach 3D facial recognition from a different aspect. In this context, the possibilities of using automated 3D local key point detector algorithms in facial recognition were explored. The algorithms have also been applied on a raw point cloud data. Thus, it is intended that a similar study of real-world applications will emerge. Accuracy is a very important concept. If the results are expressed together with an accuracy value, it becomes much more meaningful in terms of geomatics engineering. The results of the study were also evaluated in terms of spatial accuracy.

Theory and Methods:

The 3D face recognition system was developed based on the identification application. ISS-PFH, ISS-FPFH, LSP-PFH and LSP-FPFH algorithms were compared by using point clouds of human faces. The algorithm consists of 3 steps. In the first step, 3D points are defined on the point clouds using ISS and LSP methods that are key point detector. In the second step, key points are defined using Point Feature Histograms (PFH) and Fast Point Feature Histograms (FPFH) histogram methods that are key point descriptor. Thus, the feature histogram of each was obtained. In the third step, the key points in different point clouds are matched using the feature histograms obtained. Statistical methods are used to compare generated histograms.

Results:

As a result, in the natural face expression, ISS-PFH algorithm, 9 out of 10 people; 7 out of 10 people with ISS-FPFH algorithm; with the LSP-PFH algorithm, 8 out of 10 people; with the LSP-FPFH algorithm, 8 out of 10 people are correctly defined. In all methods a root mean square error of about 3 mm was determined. The difference between key point descriptor algorithms has been determined. The correct matching rate for PFH is up to 60% with 10 mm error, while FPFH histograms are around 25% - 30%.

Conclusion:

3D facial recognition is a current research area. It is widely used in many applications, especially in the field of security. The study compared 3D key point detector and descriptor algorithms for 3D facial recognition. Given that there was no facial recognition study with the methods in this study before in the literature, the study is important in terms of contribution to literature.



Lokal özellik temelli yöntemler kullanılarak 3B yüz tanıma ve doğruluk analizi

Muhammed Enes Atik*^{ID}, Zaide Duran^{ID}

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Sarıyer, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Doğrudan elde edilmiş ham lazer tarama verisi kullanılması
- Yeni bir algoritma kombinasyonunun önerilmesi
- Konumsal doğruluk analizinin yapılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 06.04.2020
Kabul: 23.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.715450

Anahtar Kelimeler:

Lokal özellik,
yüz tanıma,
nokta bulutu,
lazer tarama, doğruluk
analizi

ÖZET

Lazer tarama teknolojisinin gelişmesiyle 3 boyutlu nokta bulutu elde etmenin kolay hale gelmesi, 2B görüntüler kullanılarak gerçekleştirilen yüz tanıma işleminin kısıtlamalarına karşı üç boyutlu yüz tanımanın popülerleşmesini sağlamıştır. Bu çalışmada 10 kişiye ait yüz verisi lazer tarayıcı kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. İki farklı doğal yüz ifadesi ve bir gülme yüz ifadesi olmak üzere 10 kişiden toplamda 30 adet nokta bulutu alınmıştır. Algoritma 3 adımdan oluşmaktadır. İlk adımda ISS VE LSP yöntemleri kullanılarak nokta bulutları üzerinde 3B ilgi noktaları belirlenmiştir. İkinci adımda, PFH ve FPFH yöntemleri kullanılarak ilgi noktaları tanımlanmıştır. Böylece her birine ait özellik histogramı elde edilmiştir. Üçüncü adımda, özellik histogramları kullanılarak farklı nokta bulutlarındaki ilgi noktaları eşleştirilmiştir. Bu amaçla Kullbeck-Leibler Divergence yöntemi kullanılmıştır. İlgi noktası bulucu ve tanımlayıcı algoritmaların kombinasyonları çalışma sonucunda karşılaştırılmıştır. Doğruluk analizi için nokta bulutları İteratif En Yakın Nokta (İEYN)(ICP) yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Eşlenik noktaların arasındaki Öklid mesafesi hesaplanarak doğru eşlenen noktalar tespit edilmiştir. ISS algoritması LSP algoritmasına göre yaklaşık %25 oranında daha az nokta bulmaktadır. PFH kullanılarak yapılan eşlemelerde doğru eşleme oranı %60'lara ulaşırken, FPFH histogram ile yapılan eşleştirmeler ise %25-%30 dolaylarında kalmıştır.

3D facial recognition using local feature-based methods and accuracy assessment

H I G H L I G H T S

- Use the raw laser scan data obtained directly
- Propose a new combination of algorithm
- Analysis of the spatial accuracy

Article Info

Research Article
Received:06.04.2020
Accepted: 23.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.715450

Keywords:

Local feature,
face recognition,
point cloud,
laser scanning,
accuracy assessment

ABSTRACT

As 3-dimensional point cloud can be obtained easily with laser scanning technology, three-dimensional face recognition have become popular against the facial recognition performed using 2D images that has many limitations. In this study, the facial data of 10 people were modeled in 3D using a laser scanner. A total of 30 point clouds were taken from 10 people-two natural facial expressions and one laughing facial expression. The algorithm consists of three steps. In the first step, 3D points are defined on the point clouds using ISS and LSP methods. In the second step, key points were described using PFH and FPFH methods to obtain feature histogram. In the third step, the key points in different point clouds were matched using the feature histograms via the Kullbeck-Leiber Divergence method. For accuracy analysis, point clouds are registered with Iterative Closest Point (ICP) method. For accuracy assessment, the Euclidean distance between the matching points was calculated. The ISS algorithm finds about 25% less points than the LSP algorithm. The correct matching rate for PFH is up to 60%, while FPFH histograms are around 25%-30%.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: atikm@itu.edu.tr, duranza@itu.edu.tr / Tel: +90 212 285 7202

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüz tanıma, bilgisayarlı görme, örüntü tanıma ve makine öğrenimi araştırmalarında, algısal, davranışsal ve sosyal ilkelerin yeniden yorumlanmasını sağlayan önemli bir konudur. Paralel olarak, sensörler, algoritmalar, veri tabanları ve değerlendirme çerçevelerinin gelişimi ile yüz tanıma teknolojisi ilerlemektedir [1]. Günümüzde yüz verisi, güvenlik alanında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Son teknolojik gelişmelerle birlikte cep telefonları kilitleri dahil olmak üzere birçok sistem otomatik yüz tanıma ile entegre edilmektedir. Bu güvenlik uygulamalarındaki kritik nokta farklı insanlara ait farklı insan yüzü verilerinin birbirleriyle nasıl ayırt edileceği veya farklı bir açıdan sorulursa; aynı insana ait iki farklı yüz taramasının benzerliğinin nasıl tespit edileceğidir. İnsan algısının çok hızlı ve rahat yapabildiği yüz tanıma işlemini makinelerle yaptırmak her zaman ilgi çekici bir konu olmuştur. Yüz tanıma, hukuki uygulamalar, gözetleme sistemleri, sınır güvenliği, kimlik tespiti ve eğlence sistemleri gibi birçok alanda uygulama alanı bulmuştur [2]. Yüz görüntüleri kullanılarak yapılan 2 boyutlu (2B) yüz tanımanın doğruluğu, poz değişimi, aydınlatma durumu, ifade farklılığı ve örtüklük gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Belirtilen problemlerin üstesinden gelmek amacıyla, 3 boyutlu (3B) yüz tanıma alternatif veya tamamlayıcı bir yöntem olarak geleneksel 2B yüz tanımanın yerine önerilmiştir [3]. 3B temelli yaklaşımların esas avantajı yüzün geometrik bilgisini içermeleridir [4]. Böylece 3B nokta bulutu verisinde daha güvenilir geometrik bilgi çıkarımı yapılabilir. Ayrıca, 3B model tabanlı yüz özellikleri daha ayırt edicidir ve durum değişimlerine karşı dayanıklıdır. Yüzlerin eşleştirilmesinde temel problem yüz tanıma için uygun benzerlik metriklerinin bulunmasıdır. 3B yüzeyler arasındaki benzerliklerin hesaplanması, birçok model tanıma uygulaması için oldukça önemlidir. Özellikle 3B obje ve yüz tanıma çalışmalarında yüzey benzerliklerinden faydalanılmaktadır. Genel olarak, yüz eşleminin kritik noktası, iki ayrı yüzeyin doğru, şekilde eşlenmesini sağlayacak yüzey temsillerinin tespit edilmesidir. Dolayısıyla yüz tanıma sistemi, temel olarak kişinin biyometrik özelliklerinden kişiyi tanımlayacak bir özellik seti oluşturan ve bu özellik seti ile daha öncesinde oluşturulmuş başka bir veri setini karşılaştıran tanıma/onaylama veya sınıflandırma sistemidir [5]. 3B verileri elde etmek için farklı yöntemler mevcuttur. Dijital fotogrametri ve lazer tarama en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerin arasında lazer tarayıcılar, güvenilir ve hızlı, şekilde veri üretmek 3B modelleme teknolojisinin odak noktası haline gelmiştir. Objeye yüzeyi birkaç dakikada içerisinde milyonlarca 3B koordinata sahip nokta ile tanımlanabilmektedir [6].

3B nokta bulutu kullanılarak yüz tanıma işlemi için farklı yöntemler mevcuttur. Literatürde; en üst seviyede bütüncül, özellik-temelli ve hibrit yöntemler olarak üç kısımda incelenmiştir. Bu bölümler de alt başlıklara ayrılmıştır [2]. Bütüncül yöntemler, yüzün bütün yapısını göz önünde bulundurarak benzerlik kriterleri belirlemeye çalışmaktadır.

Özellik-temelli yöntemler, yüzdeki lokal bölgelere (kulak, burun vb.) veya özelliklere bağlı olarak benzerlik belirleme çalışan yöntemlerdir. Hibrit yöntemler ise farklı yaklaşımların veya verilerin kombinasyonlarına bağlı olarak çalışmaktadır. Bu çalışma kapsamında özellik-temelli yöntemlerin bir alt başlığı olan ilgi noktası temelli yöntemler kullanılacaktır. 3B ilgi noktaları, nokta bulutunda, belirlenen ayırt edici özelliklere sahip noktalardır. İlgi noktası-temelli yöntemler, ilgi noktalarını bazı geometrik kriterlere bağlı olarak bulan ve tanımlayan yöntemlerdir. 3B veriden çıkartılan ilgi noktaları, nokta bulutu birleştirme, 3B obje tanıma ve poz tahmini, şekil çıkarımı ve şekil sınıflandırma gibi çeşitli şekil eşleme çalışmalarında kullanılabilir [7]. İlgi noktası temelli yöntemler üç temel adıma sahiptir: ilgi noktası bulma, tanıma ve eşleme. 3B ilgi noktası tanıma, ilgi noktası bulucular tarafından bir yüzey üzerinde ilgi noktalarının belirlenmesi işlemidir. Belirlenen ilgi noktalarının, etkili bir tanıma ve eşleme amacıyla kullanılabilmesi için ayırt edici özelliğe sahip olmalıdır. Ayrıca, farklı pozisyon ve görüntü durumlarında, mümkün olduğunca, aynı noktaların tekrar tespit edilebilmesi gerekmektedir. 3B ilgi noktası tanıma, 3B ilgi noktası tanımlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu tanımlayıcı algoritmalar, 3B ilgi noktasını lokal çevresindeki geometrik özellikleri baz alarak tanımaktadır. Ayrıca renk bilgisini kullanan 3B ilgi nokta tanımlayıcı algoritmalar da vardır. Tanıma işleminde, iki farklı nokta bulutunda aynı tanımlayıcı özelliklere sahip noktalar eş nokta olarak kabul edilir [8]. İlgi noktalarını eşleme için, 3B tanımlayıcılar ile elde edilen iki farklı nokta bulutuna ait tanıma değerleri istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır.

3B yüz tanıma yöntemleri ile ilgili Scheenstra [9], Bowyer [10] ve Soltanpour [2] tarafından yayınlanmış geniş kapsamlı literatür araştırmaları mevcuttur. Bu çalışmalar incelendiğinde 1990'lara gelindiğinde yüz tanıma olan ilgi ticari imkanların artması, gerçek zamanlı donanımsal gelişmeler ve gözetim sistemlerinin önemli hale gelmesi ile birlikte ciddi oranda artış göstermiştir [11]. 3B yüz tanıma için ilgi noktası bulucu algoritmalar, ilk olarak Mian vd. [12] tarafından geliştirilmiştir. Önerilen algoritma Face Recognition Grand Challenge v2 (FRGC v2) [13] veri tabanında denenmiştir. Çalışmada hem 3B veri olarak doğrudan nokta bulutu değil bu nokta bulutundan üretilen yoğunluk görüntüsüdür. Hem bu yoğunluk görüntüsünden hem de 2B yüz görüntüsü üzerinden ilgi noktaları tespit edilip, eşleme algoritması ile eşlenmiştir. Kimlik saptama oranı sabit yüz ifadesi ve ifade değişimi durumlarında sırasıyla %99,38 ve %92,11 olarak gerçekleşmiştir. Kimlik doğrulama oranı ise %99,85 ve %96,62 olarak gerçekleşmiştir. Mayo ve Zhang [14] tarafından yapılan çalışmada, GavabDB [15] 3B yüz veri tabanı (61 farklı yüz, her biri için 9 farklı tarama) kullanılmıştır. 3B nokta bulutu verisi 2,5B yoğunluk görüntüsüne dönüştürülmüştür. Çalışmada önerilen yöntem 2B görüntülerde ilgi noktası bulan SIFT [16] algoritmasının geliştirilmiş halidir. Önerilen metodun sabit yüzlerde %95'e kadar, farklı yüz ifadelerinde ise %90'a kadar tanıma doğruluğuna ulaştığı tespit

edilmiştir. Ancak yüzün sağ ve sol taraflarından görünümü kullanılarak yapılan eşleme uygulamasında eşleme doğruluğu %11'e kadar düşmüştür. Huang vd. [17] yaptığı çalışmada FRGC v2.0 veri tabanı kullanılmıştır. Çalışmada, 2,5B yoğunluk görüntülerinden Çok-Ölçekli Lokal İkili Örüntü Derinlik Haritası (MS-LBP) ve Şekil İndisli Yüz Haritası oluşturulmuş, SIFT-tabanlı algoritma bu gösterimler üzerinden uygulanarak lokal özellik eşlemesi yapılmıştır. Tanıma doğruluğu oranları doğal ve doğal olmayan yüz ifadelerinde sırasıyla %99,1 ve %92,5 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca yüzde belli bölgelerin eksikliği durumunda tanıma oranı %74 ila %93,8 arasında değişiklik göstermiştir. Inan ve Halıcı [18] tarafından yapılan çalışmada, FRGC v2.0 veri tabanı kullanılmıştır. Kullanılan veriler, 3B veriden üretilen 2B şekil indeksi, gauss ve ortalama eğrilik haritalarıdır. Elde edilen bu 2B görüntülerden SIFT tabanlı ilgi nokta bulucu ve tanımlayıcı algoritma uygulanmıştır. Farklı yüz ifadelerinde, yöntemin performansı değerlendirildiğinde %98,35 tanıma oranına ulaşıldığı tespit edilmiştir. Li vd. [19] tarafından yapılan çalışmada doğrudan 3B yüz verisi (mesh model) kullanılmıştır. Çalışmada 3B mesh modellerin, Gauss Uzayı oluşturularak, 3 farklı ilgi noktası tanımlayıcının (Yüzey Düşümü (HoG), Şekil İndeksi (SI) ve Şekil İndeksi Düşümü (HoGS)) yüz ifadesi değişimi durumlarında performansının karşılaştırılmasıdır. Sonuç olarak bütün yüz verilerinde HoG, HoS, HoGS kullanılarak sırasıyla %82,50, %90,11,%81,93 tanıma oranları elde edilmiştir. Farklı yüz ifadeleri kullanıldığında ise tanıma oranı %50'lere kadar düşmüştür. Smeets vd. [20] tarafından önerilen yöntem 2B SIFT yönteminden esinlenerek geliştirilen meshSIFT yöntemidir. Çalışmada veri seti olarak FRGC v2, Bosphorus [21] ve SHREC '11 [22] veri tabanları kullanılmıştır. Yüz ifadesi farklılığı durumunda FRGC v2 ve Bosphorus veri tabanlarında sırasıyla %93,7 ve %89,6 yüz tanıma oranı elde edilmiştir. 3B yüz verisi eksikliği durumunda SHREC '11 verisinde %98,6 tanıma oranı gerçekleşmiştir. Berretti vd. [23] tarafından önerilen ilgi noktası bulucu algoritma meshDOG algoritmasıdır. Kullanılan veri tabanları Bosphorus, GavabDB ve UND/FRGC v2 veri tabanlarıdır. Bosphorus veri tabanında farklı yüz ifadelerinde tanıma oranı %76,8 (tiksinme ifadesi) ila %98,6 (şaşıрма ifadesi) arasında değişmiştir. GavabDB veri tabanında ise doğal yüz ifadesinde %100 tanıma oranı sağlanırken, yüz ifadesi ile birlikte %94,0 oranı gerçekleşmiştir. 3B yüzün sol ve sağ tarafa çevrilerek yapılan uygulamada sırasıyla %93,4 ve %83,6 tanıma oranları elde edilmiştir. UND/FRGC v2 veri tabanında yine sağa ve sola çevrilerek gerçekleştirilen yüz tanıma uygulamasında elde edilen doğru tanıma oranı sırasıyla %76,4 ve %77,8 olarak gerçekleşmiştir. Li vd. [24] tarafından yapılan çalışmada 3B ağ modeller kullanılmıştır. Önerilen yüz tanıma sisteminde ilgi noktası bulucu olarak kullanılan yöntem meshSIFT algoritmasıdır. İlgi noktası tanımlayıcı algoritma olarak yeni bir yöntem geliştirilmiştir: Diferansiyel Çoklu-Yüzey Niteliklerinin Histogramı (Histogram of Multiple surface differential Quantities (HOMQ)). Önerilen 3B ilgi noktası tanımlayıcı yöntem Bosphorus veri tabanı üzerinden karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar; bütün veri tabanı için %96,56, yüz ifadesi

değişiminde %98,82, poz değişiminde %91,14 ve örtüklük durumunda %99,21 olarak belirlenmiştir. Elaiwat vd. [25] tarafından önerilen yöntem doku giydirilmiş 3B yüz verisi kullanılmaktadır. Doğal yüz ifadesi ile bütün farklı yüz ifadeleri arasındaki doğru eşleme oranı FRGC v2, Bosphorus ve BU-3DFE [26] için sırasıyla %99,2, %95,1 ve %91 olarak gerçekleşmiştir. Guo vd. [27] tarafından yapılan çalışmada FRGC v2 ve Bosphorus veri tabanları kullanılmıştır. İlgi nokta bulma, tanımlama ve eşleme olarak belirlen yeni bir metodoloji önerilmiştir. Önerilen yöntem, yüz doğrulama ve yüz tanıma uygulamalarında FRGC v2 veri tabanında %99 ve %97, Bosphorus verisinde ise yüz tanıma %96,85 doğruluk vermiştir. Abbad vd. [28] tarafından yapılan çalışmada ise burun ucunun çevresinden hesaplanan Gauss eğrilikleri ve Wave Kernel Signatures (WKS) yöntemi ile tespit edilen lokal özellikler kullanılmıştır. Değerlendirmeler GavabDB ve Bosphorus veri tabanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. GavabDB veri tabanı üzerinde %98,9 ve Bosphorus veri tabanı üzerinde ise %93,24 doğruluk elde edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonuçları Tablo 1'de özet halinde sunulmuştur.

Tablo 1. Literatürde bulunan ilgili çalışmalar (Relevant studies in the literature)

Çalışma	Veri tabanı	Yıl	Doğruluk
Mian vd. [12]	FRGC v2.0	2008	%99,38
Mayo ve Zhang [14]	GavabDB	2009	%95
Huang vd. [17]	FRGC v2.0	2010	%99,1
Inan ve Halıcı [18]	FRGC v2.0	2012	%98,35
Li vd. [19]	Bosphorus	2011	%90,11
	FRGC v2.0		%93,7
Smeets vd. [20]	Bosphorus	2013	%89,6
	SHREC '11		%98,6
	Bosphorus		%98,6
Berretti vd. [23]	GavabDB	2015	%100
	UND/FRGC v2		%94,0
Li vd. [24]	Bosphorus	2015	%96,56
	FRGC v2		%99,2
Elaiwat vd. [25]	Bosphorus	2015	%95,1
	BU-3DFE		%91
Abbad vd. [28]	GavabDB	2018	%98,9
	Bosphorus		%93,24

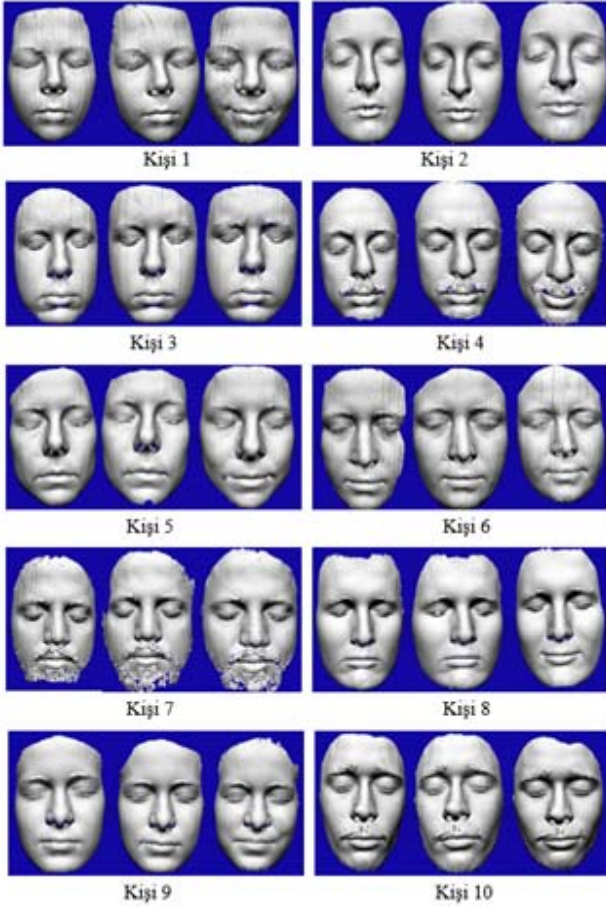
Bu çalışmada 3B ilgi noktası bulucu (detector) algoritmalar olarak "Gerçek Şekil İmleci (Intrinsic Shape Signature (ISS))" [29] ve "Lokal Yüzey Alanları (Local Surface Patches (LSP))" [30] yöntemleri tercih edilmiştir. 3B ilgi noktası tanımlayıcı algoritmalar olarak "Nokta Özellik Histogramları (Point Feature Histograms (PFH))" [31] ve "Hızlı Nokta Özellik Histogramları (Fast Point Feature Histograms (FPFH))" [32] yöntemleri tercih edilmiştir. Her bir ilgi noktasına ait histogramlar istatistiksel karşılaştırma yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmış ve farklı ilgi noktası bulucu ve tanımlayıcı algoritma kombinasyonları 3B yüz nokta bulutu verileri üzerinde incelenmiştir. Her bir yöntemin performansı, uygulamada seçilen veri setine göre farklılık göstermektedir. Çalışmada, lazer tarayıcı ile elde edilen ham 3B yüz nokta bulutları kullanılmaktadır. Böylece hazır veri tabanları kullanan çalışmalardan ayrılmaktadır.

Eşlenen ilgi noktalarının konumsal doğruluğu da incelenmiştir. Sonuçlar tablo ve grafikler halinde sonuç bölümünde sunulmuştur.

2. VERİ VE YÖNTEMLER (DATA AND METHODS)

2.1. Kullanılan Veri (Data Used)

Çalışmada kullanılan veri, Next Engine Desktop Laser Scanner ile taranan insan yüzüne ait 3B nokta bulutu verisidir. Next Engine 3D masaüstü tarayıcı, hassas 3D nokta bulutu sağlayan düşük maliyetli bir tarayıcıdır. Sistemin doğruluğu üretici tarafından makro mod için $\pm 0,127\text{mm}$ ve geniş mod için $\pm 0,328\text{mm}$ olarak belirtilmiştir. Tarama hızı 50000 nokta/s'dir. İnsan yüzleri, 1100 nokta/inç² yoğunluğunda taranmıştır. Bu yoğunluk değeri deneysel olarak hem işlem yükünü arttırmayacak hem de yeterli geometrik bilgiyi elde edilebilecek şekilde olmasına dikkat edilerek belirlenmiştir. Veri tabanı için 10 kişinin yüzü taranmıştır. 10 kişiye ait toplam 30 nokta bulutu elde edilmiştir. Her yüzün iki doğal yüz ifadesi ve bir gülme yüz ifadesi taranmıştır. Algoritmalar ham nokta bulutu verileri üzerinde çalıştırılmıştır. Galerisi, Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kişilere ait 3B nokta bulutu verileri. Soldan sağa doğal ifade 1-2 ve gülme yüz ifadesi olacak şekilde sıralanmıştır. (Personal 3D cloud data. Natural Expression 1-2 and laughing is listed respectively as facial expression)

Çalışmada sunulan yöntemler Bosphorus veri tabanında da denenmiştir. Bosphorus veri tabanı 105 kişiye ait toplam 4666 tarama içermektedir. İkinci doğal yüz ifadesine sahip 76 kişinin yüz modelleri kullanılmıştır. Böylece 76 doğal yüz ifadesine sahip bir galeri oluşturulmuştur ve yüz tanıma sistemi uygulanmıştır.

2.2. Lazer Tarama (Laser Scanning)

Bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesiyle, kişisel bilgisayarların grafik işlemcileri güçlendirilmiş ve hem bilimsel alanda hem de son kullanıcılar arasında 3B modelleme kullanımı hızlanmıştır. 3B modellere artan talep, ticari lazer tarayıcıların yüksek maliyeti ve bu cihazlardan verilerin işlenmesinin zorluğu ile birlikte düşük maliyetli 3B lazer tarama sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır [33]. Lazer tarama ile topografyanın veya bir nesnenin doğru ve hızlı şekilde 3 boyutlu elde edilebilmektedir [34]. Yersel lazer taramada ölçülen temel büyüklük tarayıcı ve nokta arasındaki mesafedir. Farklı çalışma ilkesine sahip lazer tarayıcılar, nesnelerin üç boyutlu koordinatlarını elde etmek için kullanılmaktadır. Bunlar: ışığın gidiş-dönüş zamanı veya puls metodu, üçgenleme, faz farkıdır.

2.3. Lazer Tarayıcıların Ölçme Prensipleri (Measurement Principle of Laser Scanners)

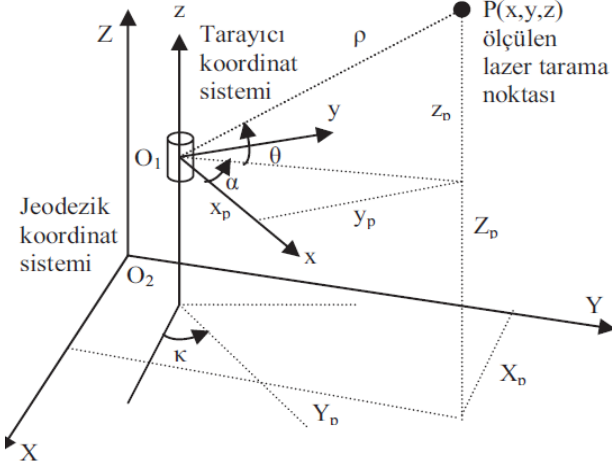
Yapısal ışık, ışık düzeninin bilinen bir açıyla bir nesneye yansıtılmasıdır. Bu teknik, boyutsal bilgilerin görüntülenmesi ve elde edilmesi için kullanışlıdır. En sık kullanılan ışık deseni, bir ışık huzmesinin bir ışık sayfasına yayılması ile üretilir. Bir ışık sayfası bir nesneyle kesiştiğinde, nesnenin yüzeyinde parlak bir ışık çizgisi görülebilir. Bu ışık çizgisi bir açıdan incelendiğinde, hatta gözlenen distorsiyonlar yükseklik değişimlerine çevrilebilir [35]. Her lazer noktası için tarayıcı merkezli bir koordinat sisteminde kutupsal koordinatlar ölçülür. Bunlar; ölçülen noktaya olan eğik uzaklık n , ölçüm doğrultusunun x eksenine yatay düzlemde yaptığı açı a , ölçüm doğrultusunun yatay düzlemde yaptığı eğim açısı q 'dır. Ayrıca ölçülen yüzeyin yapısına ve ölçme uzaklığına bağlı olarak dönen sinyalin yoğunluğu ölçülerek kaydedilir. Yersel tarayıcılarla ölçülen değerler ve tarayıcı koordinat sistemi Şekil 2'de görülmektedir.

x,y,z ; tarayıcı alet orijinli nokta bulutu koordinatları, r ; lazer tarayıcı ile ölçülen obje noktası arasındaki eğik mesafe, a ; ışın doğrultusunun x eksenine yatay düzlemde yaptığı açı, q ; ışın doğrultusunun yatay düzlemde yaptığı eğim açısı, $O1$; lazer tarayıcı yerel koordinat sistemi merkezi, $O2$; yer koordinat sistemi merkezidir.

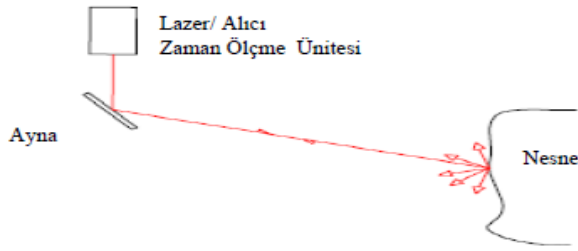
2.3.1. Uçuş süresi farkı metodu (Time of flight method)

Bir lazer ışını gönderici ve yüzey arasındaki aldığı mesafe, sinyal iletimi ile alımı arasındaki seyahat zamanı ile ölçülür. Bu prensip, total stationların çalışma prensibine benzemektedir. Şekil 3'te çalışma prensibi gösterilmiştir. Tarayıcılar, lazer ışınının açısal sapması için küçük dönüş

aletleri kullanırlar. Uzunluk hesaplaması için basit algoritmalar kullanılır. Uzaklık ölçümlerinin standart sapmaları, birkaç milimetre olduğu için, doğruluk tüm nesne alanı için hemen hemen aynıdır. Bu yöntem robotik alanında sıkça kullanılmaktadır. Robot böylece yolunda önünde herhangi bir engel varsa bunu algılar ve yolunu rahatlıkla değiştirebilir. [37].



Şekil 2. Tarayıcı koordinat sistemi (Scanner Coordinate System) [36]



Şekil 3. Lazer ışını gidiş geliş zamanı ile işlem yapan tarayıcıların çalışma prensibi (Scanners operating with laser beam round-trip time principle) [37]

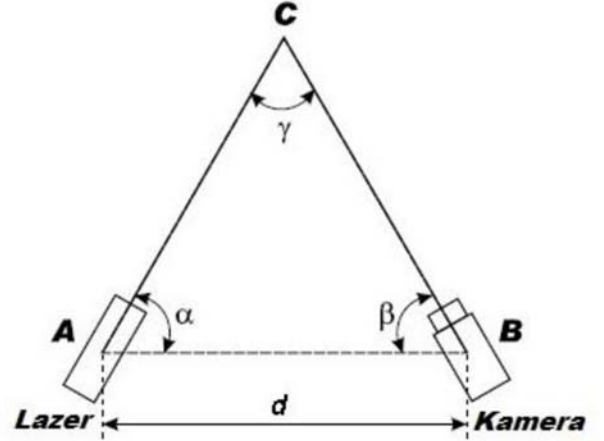
2.3.2. Faz farkı metodu (Phase-shift method)

Faz karşılaştırma metodu ile çalışan tarayıcılarda, iletilen lazer ışını harmonik dalgalar tarafından düzenlenir. Bu yöntemdeki temel esas taranan yüzey ile tarayıcı arasındaki gönderilen ve alınan dalga boyu arasındaki faz farkı belirlenerek hesaplanmasıdır. Çalışma prensibi total stationlara benzemektedir. Uçuş süresi farkı metodunda çok da farklı görünmemektedir. Sinyal analizi daha karışık olduğu için daha doğru sonuçlar elde edilebilir. İyi ayarlanmış bir dönüş sinyaline ihtiyaç olduğu için, kısa mesafede faz farkını kullanan tarayıcılar daha etkilidir [37].

2.3.3. Üçgenleme Metodu (Triangulation Method)

Yapısal ışıkla 3B bilgi elde etmek için üçgenleme yöntemi kullanılır. Bu yöntemde göre lazer tarayıcı nesne yüzeyine ışını gönderir. Gönderilen ışın yüzeyden yansdıktan sonra

bir CCD kamera tarafından toplanır. Eğer kamera ile lazer kaynağı arasındaki mesafe (d) ve üçgenin iki açısı biliniyorsa, bir noktanın 3B koordinatları hesaplanabilir. γ açısı derinlik çözünürlüğünü etkiler. Eğer γ açısı arttırılırsa, derinlik çözünürlüğü de artar [6]. Şekil 4'te üçgenleme metodu gösterilmiştir.



Şekil 4. Üçgenleme (Triangulation) [6].

2.4. Lokal Yüzey Alanları (Local Surface Patches-LSP)

Lokal özellikli nokta bulma yöntemlerinden biri olan Lokal Yüzey Alanları (LSP), Chen ve Bhanu [30] tarafından önerilmiştir. LSP, nokta bulmada bulunan bir noktanın lokal komşuluğuna bağlı olarak özellikli nokta olup olmadığını belirler. Yöntem, 3 boyutlu noktanın özelliğini "Şekil İndeksi (Shape Index)"ne bağlı olarak belirler. Şekil İndeksi (S_i), Eş. 1'de görüldüğü gibi bir noktadaki maksimum ve minimum temel eğrilikler tarafından tanımlanan, şeklin o noktadaki nicel bir ölçüsüdür [38].

$$S_i(p) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\kappa_1 + \kappa_2}{\kappa_1 - \kappa_2} \right) \quad (1)$$

Eş. 1'de κ_1 ve κ_2 sırasıyla maksimum ve minimum temel eğriliklerdir. Şekil dizini her nokta için ayrı ayrı hesaplanır. LSP yönteminde, destek yarıçapı her nokta için bir küre kullanılarak belirlenir. Bu dairenin içinde kalan noktalar merkezi noktanın desteğini oluşturur. Ortalama şekil endeksi (m_{si}) her noktanın desteğinde hesaplanır. Hesaplama Eş. 2'de gösterilmiştir.

$$\mu_{s_i}(p) = \frac{1}{N} \sum S_i(q) \quad (2)$$

Eğer merkez noktanın şekil indeksi, ortalama şekil indeksinden belirgin düzeyde küçük veya büyükse, o nokta eleme adımını geçer, diğer noktalar elenir. Bu durum Eş. 3'te gösterilmiştir.

$$S_i(p) \geq (1+\alpha)\mu_{s_i}(p) \quad \vee \quad S_i(p) \geq (1-\beta)\mu_{s_i}(p) \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitlikte a ve b, ortalama şekil indeksinden sapmayı belirleyen sayısal parametrelerdir [38]. Bu işlem adımlarından sonra kalan noktalara Non-maxima suppression (NMS) uygulanır. Non-maxima suppression bir komşuluktaki en yüksek özellik değerine sahip noktayı belirleme işlemidir. LYA yönteminde bir noktanın kendi komşuları arasında en yüksek veya en düşük şekil indeksi değerine sahip olup olmadığına bakılır (Eş. 4).

$$\begin{aligned} \rho(p) > \rho(q) \quad \forall q \in NMS(p) \\ \rho(p) < \rho(q) \quad \forall q \in NMS(p) \end{aligned} \quad (4)$$

Hem en büyük hem de en küçük şekil indeksine sahip merkez noktalar, özellikli noktalar olarak seçilir.

2.5. Gerçek Şekil İmleci (Intrinsic Shape Signature-ISS)

ISS yönteminde, her bir nokta için destek önce bir küre kullanılarak belirlenir. Her noktanın ağırlığı, Eş.5'te olduğu gibi, komşu noktaların sayısına göre hesaplanır.

$$\omega_i = \frac{1}{\| \{ p_j : |p_j - p_i| < r \} \|} \quad (5)$$

ISS yönteminde noktanın özelliği, saçılım matrisinin $\Sigma(p)$ Özdeğer Ayrışımına (EDV) bağlı olarak hesaplanır. Saçılım matrisi Eş. 6'da gösterilmiştir.

$$\Sigma(p) = \frac{1}{N_{q \in N(p)}} \sum (q - \mu_p)(q - \mu_p)^T \quad (6)$$

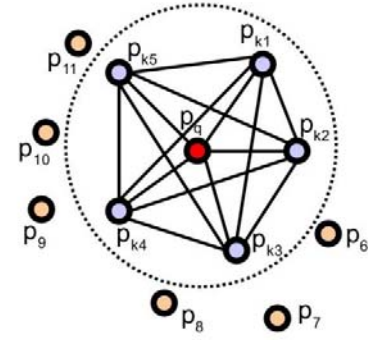
Burada $\mu(p)$ p noktasına ait komşulukta bulunan noktaların ortalama koordinat değeridir. Saçılım matrisi hesaplandıktan sonra, matrise ait özdeğer vektörü hesaplanır. Özdeğer vektörler, ilgi noktası seçiminden önce noktaların eleme işlemi için kullanılır. Hesaplanan özdeğerler ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) büyükten küçüğe doğru sıralanır. Eş. 7'de gösterildiği gibi özdeğerlerin birbiriyle olan oranları, belirlenen sınır değerlerden küçükse nokta ilgi noktası adayı olarak seçilir.

$$\frac{\lambda_2(p)}{\lambda_1(p)} < Th_{12} \quad \wedge \quad \frac{\lambda_3(p)}{\lambda_2(p)} < Th_{23} \quad (7)$$

Eleme adımından sonra, kalan noktalar arasından ilgi noktaları belirlenir. Bu işlem için kalan her bir noktanın lokal komşuluğunda değerleri karşılaştırılır. Eğer noktanın λ_3 değeri lokal komşuluğundaki en küçük değer ise, o nokta ilgi noktası olarak belirlenir [39].

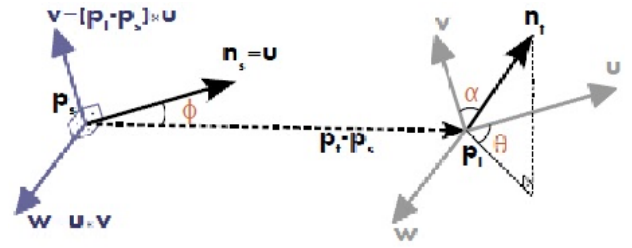
2.6. Nokta Özellik Histogramları (Point Feature Histograms-PFH)

Nokta Özellik Histogramları (PFH) bir ilgi noktasının komşuluk sınırları içinde her bir nokta çiftinin farklı özelliklerini kullanarak oluşturulan çok boyutlu bir histogramdır [40]. PFH'a ait diyagram Şekil 5'te gösterilmiştir. İlgi noktaları kırmızı, komşu noktalar mavi olarak temsil edilmiştir.



Şekil 5. Nokta Özellik Histogramları için bir ilgi noktasının komşuluk diyagramı (Diagram of Point Feature Histograms for a interest point) [32]

Girdi veri noktaların 3 boyutlu koordinat (X, Y, Z) değerleri ve yüzey normaleri kullanılır. Her bir nokta p konum vektörü ve n yüzey normali ile tanımlanır. İlk olarak, bir noktaya ait k sayıdaki komşu noktalarının yüzey normaleri hesaplanır. Lokal tanımlayıcı algoritmalarda, noktalar için Lokal Referans Sistemi (LRF) belirlenmelidir. PFH yönteminde LRF olarak Darboux çerçevesi kullanılır. Şekil 6'da iki noktaya ait Darboux çerçeveleri gösterilmektedir.



Şekil 6. Darboux çerçevesi (Darboux frame)

Hesaplanan normaller kullanılarak komşuluk alanı içindeki her bir nokta için Darboux çerçevesi belirlenir (Eş. 8).

$$\begin{aligned} u &= n_1 \\ v &= \frac{(p_1 - p_2) \times u}{\| (p_1 - p_2) \times u \|} \\ w &= u \times v \end{aligned} \quad (8)$$

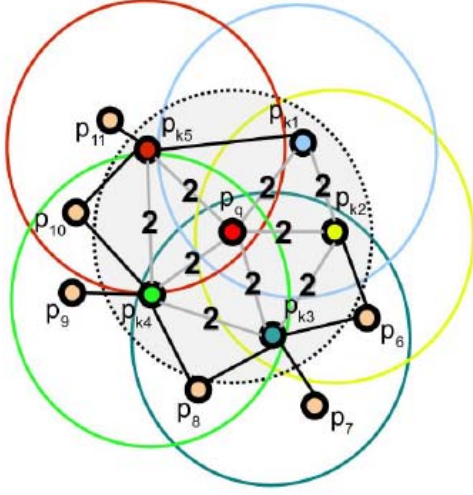
Bir komşuluk alanı içerisindeki bütün ikili ilişkiler Eş. 9'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan(w.n_2, u.n_2) \\ \beta &= v.n_2 \\ \gamma &= u \cdot \frac{p_2 - p_1}{\| p_2 - p_1 \|} \\ d &= \| p_2 - p_1 \| \end{aligned} \quad (9)$$

α ; n_2 vektörünün azimut açısını, β ; n_2 vektörünün polar açısının kosinüsünü ve γ ; p_1 'den p_2 'ye doğrultuyu göstermektedir. Nokta Özellik Histogramları yönteminde hesaplanan 4 özellik bir histogram içinde ifade edilir.

2.7. Hızlı Nokta Özellik Histogramları (Fast Point Feature Histograms-FPFH)

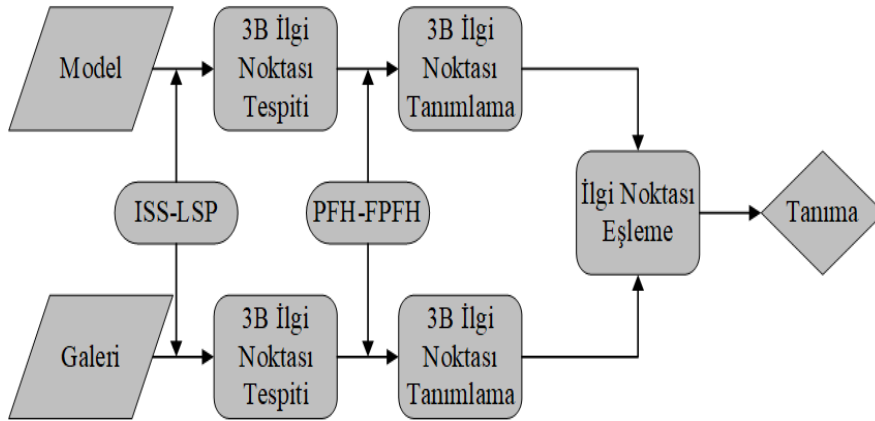
Hızlı Nokta Özellik Histogramları (Fast Point Feature Histograms (FPFH)), PFH yönteminin hızlandırılmış şeklidir. İki adımdan oluşan yöntemin ilk adımında; r yarıçaplı bir küre ile ilgi noktasının komşuluğu belirlenir. Küre içinde kalan noktalar ile merkezdeki ilgi noktasının arasındaki geometrik ilişki hesaplanır (Şekil 7).



Şekil 7. Hızlı nokta özellik histogramları diyagramı
(Diagram of fast point feature histograms) [32]

Sadece ilgi noktası ve komşu noktalar arasındaki geometrik özelliklerden oluşan histogram, sadeleştirilmiş PFH (SPFH) olarak adlandırılmaktadır [32]. İkinci adımda; ilgi noktasının her bir komşu noktası için de SPFH hesaplanır. Oluşturulan histogram ilgi noktası ile komşu nokta arasındaki Öklid mesafesine bölünerek ağırlıklandırma yapılır. Son olarak, ilgi noktasına ait histogram ile komşu noktalara ait ağırlıklandırılmış histogramların ortalaması toplanır.

$$FPFH(p) = SPF(p) + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{w_k} \cdot SPF(p_k) \quad (10)$$



Şekil 8. İş Akış Şeması (Workflow)

3. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

3.1. 3B Yüz Tanıma (3D Face Recognition)

Çalışmada bir 3D yüz tanıma sistemi geliştirilmiştir. Buna göre, 10 3D insan yüzü verisi ile bir galeri oluşturulmuştur. Sistemin dışarıdan verilen farklı model 3B yüz verisini galerideki doğru kişinin yüzü ile eşleştirmesi beklenmektedir. Sistem, bir ilgi noktası detektörü ile bir ilgi noktası tanımlayıcı algoritmasının kombinasyonu olarak düzenlenmiştir. 3B yüz tanıma üç adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda; her bir 3B nokta bulutu üzerinde ilgi noktası bulucu algoritmalar (ISS-LSP) uygulanmıştır. Böylece ilgi noktaları tespit edilmiştir. İkinci adımda; belirlenen ilgi noktaları, tanımlayıcı algoritmalar (PFH-FPFH) ile tanımlanmıştır. Tanımlama sonucunda yöntemlere bağlı olarak her bir ilgi noktasına ait özellik histogramları oluşturulmuştur. Özellik histogramları noktanın komşuluğundaki geometrik özellikleri betimlemektedir. Üçüncü adımda; iki farklı nokta bulutuna ait histogramların arasındaki benzerlikler hesaplanarak ilgi noktası eşleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için Kullback-Lieber Divergence yöntemi kullanılmıştır. İki histogram arasındaki mesafe eğer belirlene t sınır değerinin altındaysa eşlenik nokta olarak kabul edilmiştir. En fazla eşlenik ilgi noktasına sahip iki farklı yüz nokta bulutu, aynı kişiye ait olarak kabul edilmiştir. Sistemin akış şeması Şekil 8’de gösterilmiştir.

3.2. Komşuluk Yarıçapının Belirlenmesi (Detection of Support Radius)

Algoritmaların en önemli adımlarından birisi noktaların komşuluğunun (support) belirlenmesidir. Nokta komşuluğu r yarıçaplı bir küre ile belirlenir. Yarıçapın büyüklüğü ilgi noktası belirlenmesi aşamasında etkilidir. Küçük bir r değeri, lokal özelliklerin çeşitli değişimlere karşı daha az hassas ve daha az tanımlayıcı olmasına sebep olur [12]. Lokal özellik tanımlayıcı algoritmalarda da büyük r değeri lokal yüzey hakkında daha fazla geometrik bilgi elde edilmesini ve tanımlayıcılığın artmasını sağlar. Ayrıca r değerinin büyük olması örtüklük ve karmaşıklık durumlarına karşı hassasiyeti

arttırır. Bu çalışmada, geometrik özelliklerin yeterli düzeyde elde edilmesini ve hesaplama yükünün ağır olmamasını sağlayacak şekilde 4mm yarıçap belirlenmiştir.

3.3. 3B İlgi Noktası Tespiti (3D Keypoint Description)

3B ilgi noktası bulmak amacıyla ISS ve LSP yöntemleri kullanılmıştır. ISS yönteminde belirlenen noktalar için yalnızca (X, Y, Z) koordinatları girdi olarak verilir. İlgi noktalarının yerleri önceden tahmin edilemediğinden seçilen parametrelere dayanılarak belirlenmiştir. ISS yönteminde Th_{12} ve Th_{23} değerleri önceki çalışmalara dayanarak [39] sırasıyla 0,975 ve 0,975 olarak belirlenmiştir. Belirlenen ISS noktaları Şekil 9'da gösterilmiştir. LSP yöntemi, ilgi noktalarını eğrilik değerlerine dayalı olarak belirleyen bir yöntemdir. Nokta bulutu koordinatları (X, Y, Z), Gauss eğrileri ve ortalama eğriliklerin girdi olarak verilmiştir. LSP

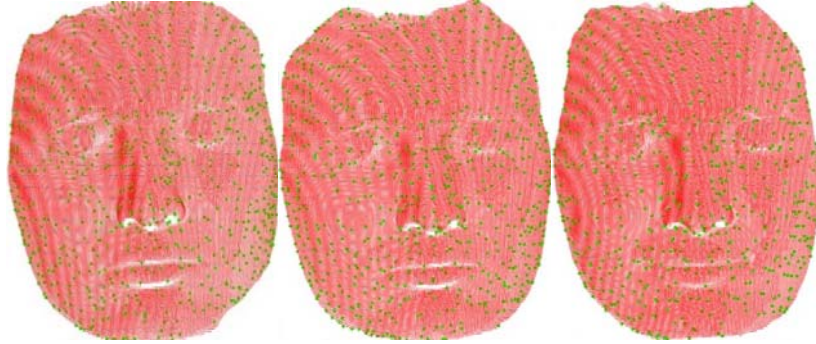
yönteminde ortalama şekil endeksinin sapma değerlerini temsil eden skaler a ve b değerleri sırasıyla 0,35 ve 0,2 olarak belirlenmiştir. LSP ile tespit edilen ilgi noktaları Şekil 10'daki gibidir. İki yöntemde belirlenen nokta sayıları Şekil 11'de gösterilmiştir. LSP yönteminde ISS'ye göre daha fazla sayıda nokta elde edilmiştir.

3.4. 3B İlgi Noktası Tanımlama (3D Keypoint Description)

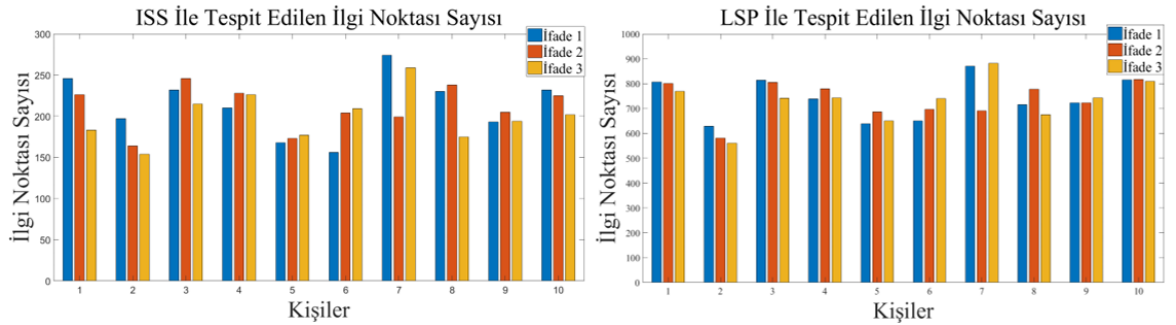
İlgi noktaları 3D yüz taramalarından tespit edildiğinde, her ilgi noktasının etrafındaki etrafındaki yerel yüzeyinden bir özellik tanımlı oluşturulur. İlgi noktalarını tanımlamak için her bir ilgi noktasının özellik histogramları, PFH ve FPFH yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. PFH ve FPFH yöntemleri, tüm taramalar için ISS ve LSP tarafından belirlenen anahtar noktalara ayrı ayrı uygulandı. Destek yarıçapı 4mm ve histogram gruplarının sayısı 27 olarak



Şekil 9. ISS ile tespit edilen ilgi noktaları (Keypoints detected with ISS)



Şekil 10. LSP ile tespit edilen ilgi noktaları (Keypoints detected with LSP)



Şekil 11. ISS (sol) ve LSP (sağ) ile tespit edilen ilgi noktaları sayısı (Number of keypoint detected by ISS and LSP)

belirlenmiştir. Farklı değerlerin test edilmesi sonucunda 27 grubun yeterli olduğuna karar verilmiştir. Histogram gruplarının değerleri normalleştirilmiştir. PFH'de çok fazla sayıda geometrik ilişki incelendiği için işlem süresi uzundur.

3.5. 3B Yüz Eşleme (3D Face Matching)

3B yüz tanıma sistemi kimlik saptama uygulaması çerçevesinde geliştirilmiştir. Sistemin, dışarıdan verilen farklı model 3B yüz verisini, galerideki doğru kişinin yüzü ile eşlemesi beklenmektedir. Belirlenen ve tanımlanan 3B ilgi noktalarının eşlenmesi için, PFH ve FPFH ile elde edilen histogramların metrik mesafeleri hesaplanmıştır. Literatürde uzaktan hesaplama için farklı yöntemler vardır [31]. Bu makalede Kullbeck-Leibler Diverjans yöntemi kullanılmıştır (Eş. 11).

$$\kappa(H_o, H_o) = \sum (H_o(i) - H_o(i)) \ln \left(\frac{H_o(i)}{H_o(i)} \right) \quad (11)$$

Eşleme için kabul eşiği 0,5'tir. İki histogram arasındaki mesafe 0,5'ten azsa, iki ilgi noktası eşleştirilir. En çok eşlenik noktaya sahip galeri nokta bulutu model nokta bulutu ile aynı kişiye aittir. Böylece model-galeri eşlemesi yapılarak, yüz tanıma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yalnızca modelden galeriye eşleştirildiğinde bir noktayı birden çok noktayla eşleştirme sorunu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, tekrarlı eşleştirmeyi önlemek için galeriden modele ikinci bir nokta eşleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 10). Eşleme işlemi ISS-PFH, ISS-FPFH, LSP-PFH ve LSP-FPFH algoritmaları için ayrı ayrı uygulanmıştır. İlk durumda her bir kişiye ait doğal yüz ifadesine sahip taramalardan bir veri tabanı oluşturulmuştur. Sisteme girdi olarak, veri tabanındaki bir kişiye ait doğal yüz ifadeli ikinci bir tarama verilmiştir. İlgi noktaları tespit edilip, tanımlandıktan sonra galerideki her bir tarama ile model taramasının ayrı ayrı benzerliği tespit edilmiştir. Dört algoritma çiftinin eşlenik nokta sayıları grafiklerde gösterilmiştir. İkinci durumda, veri tabanı sistemindeki bir kişinin gülme bir yüz ifadesi sisteme girdi olarak verilir. Böylece, yüz ifadesi farklılıkları da incelenmiştir.

3.6. Doğruluk Analizi (Accuracy Assessment)

Eşlenen ilgi noktalarının konumsal doğruluğunu incelemek için İteratif En Yakın Nokta-İEYN (İterative Closest Point-ICP) yöntemi kullanılmıştır. İteratif En Yakın Nokta (İEYN) iki farklı nokta bulutunu birleştirmek için doğru ve güvenilir bir yöntemdir. Yoğun hesap yapmayı gerektirse de, kolay uygulanabilmesi ve yüksek doğrulukta sonuç vermesi sebebiyle lazer taramalarının eşleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yöntem referans nokta kümesi (M) ve araştırma nokta kümesi (S) aynı ölçekli kabul edilerek en yakın nokta çiftleri ile dönüşüm parametrelerinin bulunması temeline dayanır. İki nokta bulutu arasındaki dönüşüm parametreleri eşlenik noktalar arasındaki ilişkiler aracılığıyla yeterli presizyon sağlanana kadar iteratif olarak hesaplanır. Elde edilen dönme

ve öteleme parametreleri birleştirme işlemini gerçekleştirmek için kullanılır [40]. İEYN algoritması S araştırma nokta bulutu ile M referans nokta bulutu arasındaki dönme matrisini (T) bulmak için kullanılır. S nokta bulutuna ait noktalar $\{S_i | S_i \in R^3, i=1,2,\dots,N_S\}$, M nokta bulutuna ait noktalar $\{M_i | M_i \in R^3, i=1,2,\dots,N_M\}$, olarak alındığı varsayılınsın. k. iterasyonda S nokta bulutunun nokta koordinatlarının $\{M_i^k | M_i^k \in R^3, i=1,2,\dots,N_M\}$ olması beklenmektedir. S ve M arasındaki dönüşüm matrisi hesabı, iki nokta bulutundaki eşlenik noktaların arasındaki mesafe belirlenen bir t sınır değerinden küçük oluncaya kadar tekrarlı olarak hesaplanır [41].

Eşlenik noktaların konumsal doğrulukları incelenmiştir. Eşlenik noktaların hepsi iki nokta bulutunda da aynı bölgede olmayabilir. Çünkü geometrik olarak yüzde benzer bölgeler bulunmaktadır. Bunun tespiti için iki nokta bulutu üst üste bindirmek için nokta bulutlarına İteratif En Yakın Nokta-İEYN (İterative Closest Point-ICP) uygulanmıştır. İlk önce iki nokta bulutu arasındaki dönüşüm parametrelerinin hesabı için iki nokta bulutundan 3 eşlenik nokta elle seçilmiştir. Daha sonra hesaplanan dönüşüm parametreleri ile nokta bulutlarından biri diğeri ile çakıştırılmıştır. Bu işlemler MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. İki nokta bulutundaki eşlenik ilgi noktaları arasındaki Öklid mesafesi hesaplanmıştır. 10mm'den kısa mesafeye noktalar doğru eşlenmiş olarak kabul edilmiştir.

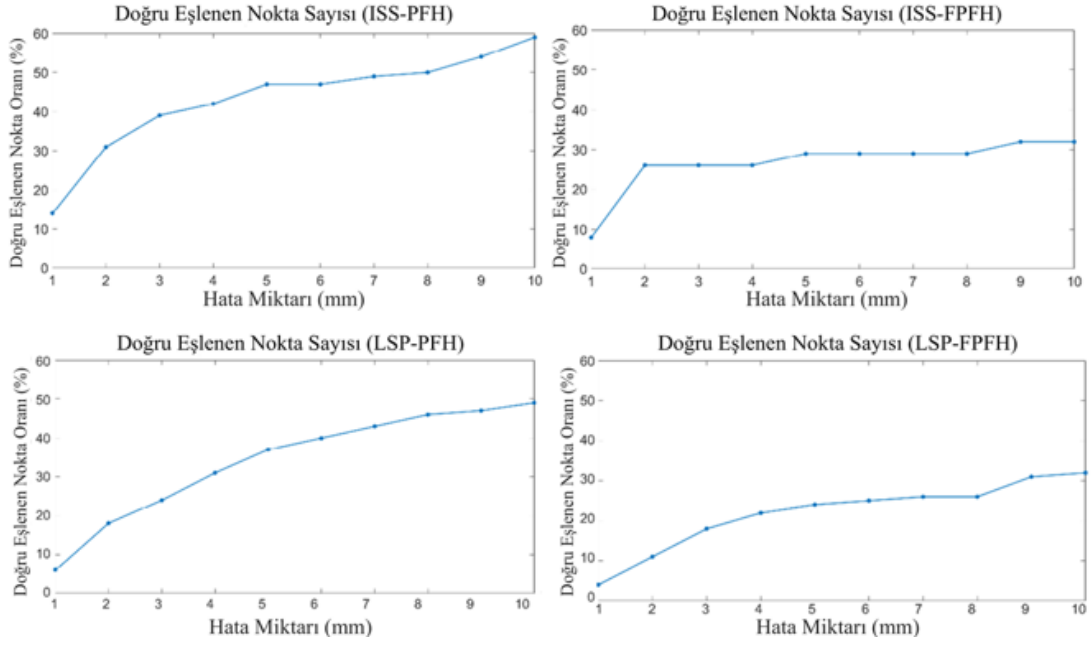
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada 10 kişiye ait 3B nokta bulutu verileri kullanılarak 3B yüz tanıma sistemi geliştirilmiştir. Üç farklı durum üzere toplam 30 yüz nokta bulutu kullanıldı. 20 tanesinin doğal bir yüz ifadesine ve 10 tanesi gülme yüz ifadesine sahiptir. Oluşturulan sistem, 3B lokal özellik tabanlı yöntemleri kullanarak tanıma gerçekleştirmektedir.

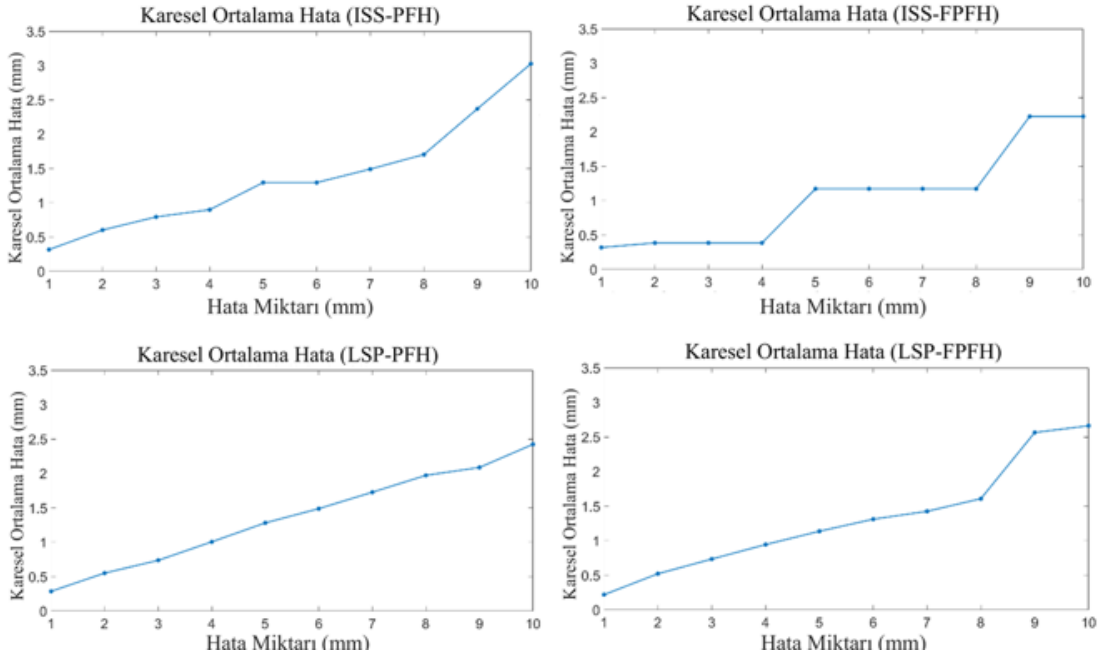
Sonuç olarak, doğal yüz ifadesinde, ISS-PFH algoritması olan 10 kişiden 9'unu; ISS-FPFH algoritması olan 10 kişiden 7'sini; LSP-PFH algoritması ile 10 kişiden 8'ini; LSP-FPFH algoritması ile 10 kişiden 8'ini doğru olarak tanımlamıştır. Önceki çalışmalara dayanarak beklendiği gibi PFH bu konuda daha iyidir [40]. PFH kullanıldığında, iki nokta bulutu arasında daha fazla ilgi noktası eşleştirilir. Yanlış eşleşmeye sahip kişinin tarama sırasında hareket ettiği belirlenmiştir. Küçük hareketler yüzün geometrisinin değişmesine neden olur, bu nedenle tanıma işlemi yanlış şekilde gerçekleşebilmektedir. Tanınan yüzlerin sayısı göz önüne alındığında, ISS-PFH'nin doğru kişiyi tespit etmek için en iyi yöntem olduğu tespit edilmiştir. Sisteme farklı yüz ifadeleri verildiğinde, ISS-PFH algoritması 10 kişiden 5'ini; ISS-FPFH algoritması 10 kişiden 3'ünü; LSP-PFH algoritması 10 kişiden 4'ünü ve LSP-FPFH algoritması 10 kişiden 4'ünü doğru bir şekilde belirlemiştir. Tanıma oranının bu kadar düşük olmasının nedeni, farklı yüz ifadelerinin yüzün geometrisini önemli ölçüde değiştirmesidir. ISS-PFH algoritması, farklı yüz ifadeleri olan durumlarda da en iyi performansı göstermiştir. ISS algoritması LSP algoritmasına göre yaklaşık 1/4 oranında

daha az nokta bulmaktadır. Ancak az bir farkla doğru eşlenen nokta sayısı ISS kullanılan algoritmalarda daha fazladır. Esas farkı oluşturan unsur ilgi noktası tanımlayıcı algoritmalarıdır. PFH kullanılarak yapılan eşlemelerde doğru eşleme oranı 10mm hata ile %60'lara ulaşırken, FPFH histogram ile yapılan eşleştirmeler ise %25-%30 dolaylarında kalmıştır. Bütün taramalar incelendiğinde en fazla doğru nokta eşlemesi oranına sahip olan algoritma ikilisi ISS-PFH'tır. İkinci sırada LSP-PFH algoritma ikilisi gelmektedir. ISS-PFH ile arasında büyük bir farklılık tespit edilmemiştir (Şekil 12). Ancak ISS-FPFH ve LSP-FPFH

algoritma ikilileri incelendiğinde çok az sayıda doğru eşleme elde edilmiştir. Aynı zamanda geometrik farklılıklar FPFH algoritmasının performansını önemli oranda etkilemektedir. Doğru nokta eşleşmelerinin karesel ortalama hataları incelendiğinde ise yöntemler arasında ciddi bir farklılık ortaya çıkmamıştır (Şekil 13). Bütün yöntemlerde yaklaşık 2,5mm karesel ortalama hata tespit edilmiştir. Bu değer tanıma işlemi için yeterli bir doğruluktur. Aynı kişiye ait iki tarama arasında geometrik farklılık fazla ise karesel ortalama hata doğru olarak tespit edilememiştir. Doğruluk değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Kişi 4'e ait doğru eşleme oranı (Number of correct matching of Person 4)



Şekil 13. Kişi 4'e ait eşlemelerin Karesel Ortalama Hatası (Root Mean Square Error of Person 4)

Tablo 2. Doğruluk analizi (Accuracy analysis)

Kişi	Yöntem	Doğru Eşlenen Nokta (%)	Karesel Ortalama Hata
Kişi 1	ISS-PFH	25	2,17mm
Kişi 2	ISS-PFH	47	2,40mm
Kişi 3	ISS-PFH	21	2,34mm
Kişi 4	ISS-PFH	60	3,02mm
Kişi 5	ISS-PFH	38	3,03mm
Kişi 6	ISS-PFH	7	0,14mm
Kişi 7	ISS-PFH	42	2,68mm
Kişi 8	ISS-PFH	49	2,56mm
Kişi 9	ISS-PFH	43	2,46mm
Kişi 10	ISS-PFH	47	3,25mm

Kullanılan yöntemler sadece doğal yüz ifadesine sahip yüzleri tanımda etkili olmuştur. Yüz ifadesi farklı ise kullanılan algoritma ikilileri başarılı olmamıştır. Bu sebeple farklı yüz ifadeleri için algoritmaların tek başlarına kullanımı yeterli olmamaktadır. Ayrıca tarama esnasında ufak hareketler taranan yüzün geometrisini değiştirmiştir dolayısıyla çalışma sonuçlarını önemli oranda etkilemiştir. Genel olarak bakıldığında algoritmaların 3B yüz tanıma işlemi için güçlü bir potansiyele sahip olduğu anlaşılmıştır.

Ayrıca Bosphorus veri tabanı üzerinde de yöntemler uygulanmıştır. Ancak doğal yüz ifadesinde en yüksek tanıma oranı %62,8 ile ISS-PFH ile elde edilmiştir. Oranın düşük olmasının sebebi kullanılan yöntemlerin geometrik değişimlerden ve nokta bulutu yoğunluk değişimlerinden olumsuz etkilenmesidir. Bosphorus veri tabanında nokta bulutlarının büyüklük ve yoğunluklarında farklılık olduğu için aynı kişiye ait iki farklı nokta bulutunda 2 kat fazla ilgi noktası tespit edilmesi durumu ortaya çıkmıştır. Söz konusu farklılıklar algoritmaların yüksek doğrulukla çalışmamasına sebep olmuştur. Aynı koordinat sisteminde elde edilmiş, benzer yoğunluk ve büyüklüklere sahip nokta bulutları ile oluşturulmuş veri tabanlarında, bu çalışmada kullanılan yöntemler yukarıda gösterildiği gibi yüksek doğrulukta sonuçlar vermektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

3B yüz tanıma güncel bir çalışma alanıdır. Özellikle güvenlik alanında birçok uygulamada kullanımı yaygınlaşmaktadır. Literatürde birçok farklı yöntem önerilmektedir. 3B ilgi noktası temelli algoritmalar da bu yöntemlerden biridir. Çalışmada 3B ilgi noktası bulucu ve tanımlayıcı algoritmaların 3B yüz tanıma kapsamında karşılaştırması yapılmıştır. ISS-PFH algoritması %90 tanıma oranı ile en iyi sonuç veren algoritma olmuştur.

Veri tabanı 10 kişiden 3 farklı taramadan oluşmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, daha büyük veri tabanları kullanılabilir. Sadece doğal yüz ifadesi ve gülen yüz ifadesi değil, farklı yüz ifadeleri de incelenebilir. Gelecekteki çalışmalarda literatürdeki farklı yöntemler kullanılarak kapsamlı çalışmalar yapılabilir. Çalışmada zaman açısından değerlendirme yapılmamıştır. Sadece 3B yüz tanımda algoritmaların performansları araştırılmıştır. Literatürde

daha önce çalışmadaki yöntemlerle yüz tanıma çalışmasının olmadığı göz önüne alındığında çalışmanın bu eksikliği giderme yönünde önem taşıması beklenmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kakadiaris, I. A., Toderici, G., Evangelopoulos, G., Passalis, G., Chu, D., Zhao, X., Theoharis, T., 3D-2D face recognition with pose and illumination normalization, *Computer Vision and Image Understanding*, 154, 137-151, 2017.
2. Soltanpour, S., Boufama, B., Wu, Q. J., A survey of local feature methods for 3D face recognition, *Pattern Recognition*, 72, 391-406, 2017.
3. Berretti, S., Werghe, N., Del Bimbo, A., Pala, P., Matching 3D face scans using interest points and local histogram descriptors, *Computers & Graphics*, 37 (5), 509-525, 2013.
4. Hariri, W., Tabia, H., Farah, N., Benouareth, A., Declercq, D., 3D face recognition using covariance based descriptors, *Pattern Recognition Letters*, 78, 1-7, 2016.
5. Ozkaya N., Sagiroglu Ş., Face recognition from fingerprints, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23 (4), 785-793, 2008.
6. Akyol, O., Duran, Z., Low-cost laser scanning system design, *Journal of Russian Laser Research*, 35 (3), 244-251, 2014.
7. Salti, S., Tombari, F., Spezialetti, R., Di Stefano, L., Learning a descriptor-specific 3D keypoint detector, In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2318-2326, 2015.
8. Hänsch, R., Weber, T., Hellwich, O., Comparison of 3D interest point detectors and descriptors for point cloud fusion, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2 (3), 57, 2014.
9. Scheenstra, A., Ruifrok, A., Velkamp, R.C., A survey of 3d face recognition methods, In *International Conference on Audio-and Video-based Biometric Person Authentication*, 891-899, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.
10. Bowyer, K. W., Chang, K., Flynn, P., A survey of approaches and challenges in 3D and multi-modal 3D+ 2D face recognition, *Computer vision and image understanding*, 101 (1), 1-15, 2006.
11. Romero, M., Pears, N., Landmark localisation in 3d face data, In *2009 Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 73-78, 2009.
12. Mian, A. S., Bennamoun, M., Owens, R., Keypoint detection and local feature matching for textured 3D face recognition, *International Journal of Computer Vision*, 79 (1), 1-12, 2008.

13. Phillips, P. J., Flynn, P. J., Scruggs, T., Bowyer, K. W., Chang, J., Hoffman, K., Worek, W., Overview of the face recognition grand challenge, In 2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05), 1, 947-954, 2005.
14. Mayo, M., Zhang, E., 3D face recognition using multiview keypoint matching, In 2009 Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, 290-295, 2009.
15. Moreno, A., GavabDB: a 3D face database, In Proc. 2nd COST275 Workshop on Biometrics on the Internet, 75-80, 2004.
16. Lowe, D. G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, International Journal of Computer Vision, 60 (2), 91-110, 2004.
17. Huang, D., Zhang, G., Ardabilian, M., Wang, Y., Chen, L., 3D face recognition using distinctiveness enhanced facial representations and local feature hybrid matching., In 2010 Fourth IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS), 1-7, 2010.
18. Inan, T., Halici, U., 3-D face recognition with local shape descriptors, IEEE transactions on Information Forensics and Security, 7 (2), 577-587, 2012.
19. Li, H., Huang, D., Lemaire, P., Morvan, J. M., & Chen, L., Expression robust 3D face recognition via mesh-based histograms of multiple order surface differential quantities, In 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing, 3053-3056, 2011.
20. Smeets, D., Keustermans, J., Vandermeulen, D., Suetens, P., meshSIFT: Local surface features for 3D face recognition under expression variations and partial data, Computer Vision and Image Understanding, 117 (2), 158-169, 2013.
21. Savran, A., Alyüz, N., Dibeklioglu, H., Çeliktutan, O., Gökberk, B., Sankur, B., Akarun, L., Bosphorus database for 3D face analysis, In European Workshop on Biometrics and Identity Management, 47-56, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
22. Veltkamp, R. C., van Jole, S., Drira, H., Amor, B. B., Daoudi, M., Li, H., Vandermeulen, D., SHREC'11 Track: 3D Face Models Retrieval. In 3DOR, 89-95, 2011.
23. Berretti, S., Werghi, N., Del Bimbo, A., Pala, P., Selecting stable keypoints and local descriptors for person identification using 3D face scans, The Visual Computer, 30 (11), 1275-1292, 2015.
24. Li, H., Huang, D., Morvan, J. M., Wang, Y., Chen, L. Towards 3D face recognition in the real: a registration-free approach using fine-grained matching of 3D keypoint descriptors, International Journal of Computer Vision, 113 (2), 128-142, 2015.
25. Elaiwat, S., Bennamoun, M., Boussaïd, F., El-Sallam, A., A curvelet-based approach for textured 3D face recognition. Pattern Recognition, 48 (4), 1235-1246, 2015.
26. Yin, L., Wei, X., Sun, Y., Wang, J., Rosato, M. J., A 3D facial expression database for facial behavior research, In 7th international conference on automatic face and gesture recognition (FGR06), 211-216, 2006.
27. Guo, Y., Lei, Y., Liu, L., Wang, Y., Bennamoun, M., Sohel, F., EI3D: Expression-invariant 3D face recognition based on feature and shape matching, Pattern Recognition Letters, 83, 403-412, 2016.
28. Abbad, A., Abbad, K., Tairi, H., 3D face recognition: Multi-scale strategy based on geometric and local descriptors, Computers & Electrical Engineering, 70, 525-537, 2018.
29. Zhong, Y., Intrinsic shape signatures: A shape descriptor for 3d object recognition, In 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops, 689-696, 2009.
30. Chen, H., Bhanu, B., 3D free-form object recognition in range images using local surface patches, Pattern Recognition Letters, 28 (10), 1252-1262, 2007.
31. Rusu, R. B., Marton, Z. C., Blodow, N., Beetz, M., Persistent point feature histograms for 3D point clouds, In Proc 10th Int Conf Intel Autonomous Syst (IAS-10), Baden-Baden, Germany, 119-128, 2008.
32. Rusu, R. B., Blodow, N., Beetz, M., Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration, In 2009 IEEE international conference on robotics and automation, 3212-3217, 2009.
33. Avşar, E. Ö., Bozkurtoğlu, E., Aydar, U., Şeker, D. Z., Kaya, Ş., Gazioğlu, C., Determining roughness angle of limestone using optical laser scanner, International Journal of Environment and Geoinformatics, 3 (3), 57-75, 2016.
34. Uzar, M., Tunalioglu, N., Arican, D., Arda, T. Investigation of the filtering methods on 3D models using terrestrial laser scanning data, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 1765-1775, 2019.
35. Duran, Z., Aydar, U., Digital modeling of world's first known length reference unit: The Nippur cubit rod, Journal of cultural heritage, 13 (3), 352-356, 2012.
36. Yıldız, F., Altuntaş, C., Georeferencing Methods for Terrestrial Laser Scanner Point Clouds, Harita Dergisi, 142, 51-58, 2009.
37. Boehler, W., Marbs, A., 3D scanning instruments. Proceedings of the CIPA WG, 6 (9), 2002.
38. Dorai, C., Jain, A. K., COSMOS-A representation scheme for 3D free-form objects, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19 (10), 1115-1130, 1997.
39. Tombari, F., Salti, S., Di Stefano, L., Performance evaluation of 3D keypoint detectors, International Journal of Computer Vision, 102 (1-3), 198-220, 2013.
40. Guo, Y., Bennamoun, M., Sohel, F., Lu, M., Wan, J., Kwok, N. M., A comprehensive performance evaluation of 3D local feature descriptors, International Journal of Computer Vision, 116 (1), 66-89, 2016.
41. He, Y., Liang, B., Yang, J., Li, S., He, J. An iterative closest points algorithm for registration of 3D laser scanner point clouds with geometric features, Sensors, 17 (8), 1862, 2017.



Estimation of clustering parameters and anomaly detection in tracking devices with changeable position time

Mustafa Tolga Datlıca¹ , Erman Çakıt^{2*} 

¹Atel Teknoloji ve Savunma A.Ş., Ankara, Turkey

²Department of Industrial Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- Anomalies in the location behavior
- A density-based clustering algorithm
- Estimation of clustering parameters

Keywords:

- Tracking devices
- Clustering algorithms
- ST-DBSCAN
- Machine learning
- Anomaly detection

Article Info:

Research Article
Received: 31.12.2019
Accepted: 23.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.668215

Correspondence:

Author: Erman Çakıt
e-mail: ecakit@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3820

Graphical/Tabular Abstract

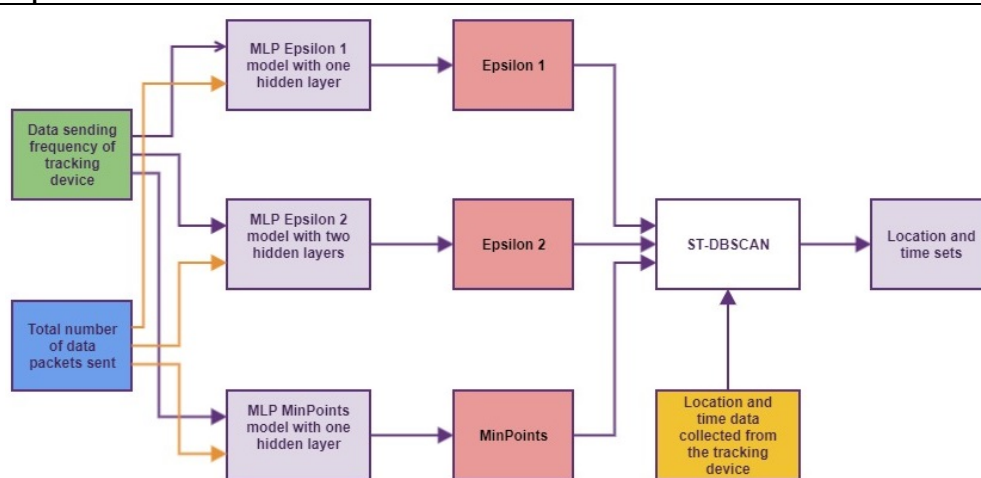


Figure A. Overview of applied methods

Purpose: In this study, it was aimed to detect anomalies in the location behavior of objects followed by a tracking device.

Theory and Methods:

ST-DBSCAN (Spatial-Temporal Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) density-based clustering algorithm was applied on the data obtained, and weekly patterns were determined for the subject to be located at which time intervals. The input parameters of the ST-DBSCAN algorithm vary according to the frequency of the data from the tracker and the total number of data packets. In this context, the parameters used in the St-DBSCAN algorithm, as well as the frequency of sending data and the number of data packets, are labeled according to the behavior of the object being followed. On these tagged data, linear regression and artificial neural networks methods were compared and a model was proposed that could predict clustering parameters.

Results:

Weekly patterns were determined by methods developed using information about the object being followed, and these patterns were considered to be normal behaviors of the object being tracked. The instantaneous position is defined as an anomaly if the data obtained is contrary to the pattern.

Conclusion:

In this study, the temporal data of the object, called time and coordinate data, were grouped with similar ones with the help of clustering algorithms, and were defined as anomalies when data other than sets that were normally considered to be able to predict with these sets.



Değiştirilebilir konum süresine sahip takip cihazlarında kümeleme parametrelerinin tahmini ve anormallik tespiti

Mustafa Tolga Datlıca¹ , Erman Çakıt^{2*} 

¹Atel Teknoloji ve Savunma A.Ş., Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Konum davranışlarındaki anormallikler
- Yoğunluk bazlı kümeleme algoritması
- Kümeleme parametrelerinin tahminini

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 31.12.2019
Kabul: 23.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.668215

Anahtar Kelimeler:

İzleme cihazları,
kümeleme algoritmaları,
ST-DBSCAN,
makine öğrenmesi,
anormallik tespiti

ÖZET

Bu çalışmada, takip cihazı kullanılarak konum ve zaman verilerinin toplanması ve takip edilen nesnelerin konum davranışlarındaki anormalliklerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen verilere ST-DBSCAN (Spatial-Temporal Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) yoğunluk bazlı kümeleme algoritması uygulanmış ve takip edilen nesneye ait hangi zaman aralıklarında nerede olduğuna dair haftalık örüntüler tespit edilmiştir. ST-DBSCAN algoritmasının girdi parametreleri, takip cihazından gelen verinin sıklığı ve toplam veri paketi sayısına göre değişiklik göstermiştir. Takip edilen nesnenin davranışlarına göre ST-DBSCAN algoritmasındaki parametreler kullanılarak veri gönderme sıklığı ve veri paketi sayısı etiketlenmiştir. Etiketlenen veriler kullanılarak doğrusal regresyon ve yapay sinir ağları yöntemleri karşılaştırılmış ve kümeleme parametrelerinin tahminini yapabilecek bir model önerilmiştir. Haftalık örüntüler, geliştirilen yöntemler ile takip edilen nesneye ait bilgiler kullanılarak belirlenmiş ve bu örüntüler takip edilen nesneye ait normal davranışlar olarak kabul edilmiştir. Anlık konumu elde edilen veri örüntüye aykırı ise anormal olarak tanımlanmıştır. Böylece normal davranışı bilinen nesnenin, normal davranış desenine uymayan davranışları karşılaştırılarak anormallik tespitini yapabilecek bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem farklı gruplar için (çocuk, yaşlı, hasta vb.) erken uyarı sistemi olarak kullanılabilir.

Estimation of clustering parameters and anomaly detection in tracking devices with changeable position time

H I G H L I G H T S

- Anomalies in the location behavior
- A density-based clustering algorithm
- Estimation of clustering parameters

Article Info

Research Article
Received: 31.12.2019
Accepted: 23.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.668215

Keywords:

Tracking devices,
clustering algorithms,
ST-DBSCAN,
machine learning,
anomaly detection

ABSTRACT

In this study, it was aimed to detect anomalies in the location behavior of objects followed by a tracking device. ST-DBSCAN (Spatial-Temporal Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) density-based clustering algorithm was applied on the data obtained, and weekly patterns were determined for the subject to be located at which time intervals. The input parameters of the ST-DBSCAN algorithm vary according to the frequency of the data from the tracker and the total number of data packets. In this context, the parameters used in the St-DBSCAN algorithm, as well as the frequency of sending data and the number of data packets, are labeled according to the behavior of the object being followed. On these tagged data, linear regression and artificial neural networks methods were compared and a model was proposed that could predict clustering parameters. Weekly patterns were determined by methods developed using information about the object being followed, and these patterns were considered to be normal behaviors of the object being tracked. The instantaneous position is defined as an anomaly if the data obtained is contrary to the pattern. Thus, a method has been proposed to detect anomalies by comparing the behavior of the object known to be normal behavior that does not fit the normal behavior pattern. The proposed method can be used as an early warning system for different groups (children, elder people, sick people, etc.).

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: mdatlica@atel.com.tr, ecakit@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 582 3820

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Makine öğrenmesi literatürde büyük veri içeren istenmeyen e-postaların tanınması (Spam Detection), hile denetimi (fraud detection), rakam tanıma (digit recognition), doğal dil işleme (natural language processing), yüz tanıma (face detection), ürün tavsiye etme (product recommendation), medikal teşhis (medical diagnosis), hisse senedi alım satım (stock trading), müşteri bölümlenme (customer segmentation), ve şekil tanıma (shape detection) alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır [1].

Takip cihazlarındaki gelişmeler, cihazların artık çok küçük boyutlarda kullanıldığını göstermektedir. Bu teknolojik gelişmeler ile giyilebilir ve taşınabilir cihaz tasarımlarında hızlı bir artış görülmektedir. Konum tabanlı arama gibi çeşitli uygulamalar için elektronik cihaz ve araçların büyük bölümü navigasyon ve (Küresel Konumlandırma Sistemi) GPS modülü ile donatılmıştır [2]. Bütün GPS sistemlerinde temel olarak enlemden ve boylamdan oluşan koordinat diğer bir adı ile uzamsal bilgiler üretilir. Takip sistemlerinde ek olarak zamansal veri de bunlara eklenir. Bu iki türdeki veri uzamsal-zamansal (spatial-temporal) veri olarak adlandırılır. Diğer bir ifade ile uzamsal-zamansal veriler, uzamsal veri kümesinin zamansal dilimleri olarak depolanan verileri belirtir [3]. Mekânsal-zamansal veriler, mekânsal ve zaman boyutlarına göre toplanmakta olup, zaman ve koordinat açısından verilerin yoğunlaştığı yerler küme analizi ile tespit edilebilir [3]. Küme analizi; veri bölümlenme, veri azaltma, aykırı değer tespiti, gürültü filtreleme, örüntü tanıma ve görüntü işleme dahil birçok mühendislik ve bilimsel uygulama alanında sıklıkla kullanılmaktadır [3]. Kümeleme ya da küme analizi, örnekler arasındaki benzerlikleri bulup, benzerleri bir araya getirmek olarak tanımlanabilir [4]. Kümeleme algoritmalarının amacı ise bir veri setini anlamlı gruplara ayırmaktır [5]. Algoritması olmayıp örnek veriye sahip olan birçok uygulamada makine öğrenimi kullanılabilir [4]. Bu kapsamda, takip cihazlarında konum anlık olarak izlenebilmektedir. Ancak sistemlerin sadece bilgi almak için kullanılması yerine, bilgilendirici olması adına takip sistemleri tarafından uyarılar verebilmesi planlanmaktadır. Hâlihazırda var olan bu uyarılar standart parametrelere, kullanıcı girişine ve sabit algoritmalara bağlı olduğu için günlük hayat içerisinde karşılık bulamamaktadır. Ayrıca her takip edilecek nesne için ayrı bir algoritma yazılması pek mümkün olmamaktadır.

Anormallikler, iyi olarak tanımlanmış bir normal davranış durumuna uymayan veri kalıplarıdır [6]. Genel olarak, çoğu anormallik saptama yöntemi normal durumların bir profilini oluşturur, ardından normal profile uymayan anormallikleri tanımlar [7]. Diğer bir ifade ile anormallik tespiti, veri içerisinde beklenen davranışa uymayan desenlerle ilgili problemi belirlemeyi amaçlar. Literatürde farklı anormallik tespit teknikleri geliştirilmiş olup, bu tekniklerin çoğu belirli uygulama alanları için özel olarak geliştirilmiştir [6]. Bu yöntemler mesafeye dayalı, kümeleme temelli, sınıflandırma temelli, ve istatistiksel anormallik tespit yöntemleri olarak

sınıflandırılmıştır [7]. Kümeleme temelli yöntemlerde, normal gözlemlerin aynı kümeye / kümelere ait olduğu varsayılmaktadır. Yeni bir gözlem, küme merkez (ler) inden uzaktaysa, anormallik olarak değerlendirilmektedir [7]. Gelişen yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleri ile GPS verilerinin anormal davranışlar sergileyip sergilemediği tespit edilebilir. Ayrıca, yapay zekâ ve makine öğrenimi ile geçmiş veriler kullanılarak gelecek ile ilgili tahmin modelleri oluşturulabilir [4].

Bu çalışma kapsamında, literatürdeki eksikliklerden yola çıkılarak, takip edilen nesnenin ve yapay sinir ağları kullanılarak belirlenen takip cihazının özelliklerine göre kümeleme algoritma girdileri belirlenmiş, dışarıdan herhangi bir müdahaleye gerek kalmadan rutinleri ortaya çıkarabilecek bir yöntemler dizisi oluşturulmuştur. Böylece normal davranış bilinen nesnenin, normal davranış desenine uymayan davranışları karşılaştırılarak anormallik tespitini yapabilecek bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem farklı gruplar için (çocuk, yaşlı, hasta vb.) erken uyarı sistemi olarak kullanılabilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE RESEARCH)

Kümeleme algoritmaları konum verileri üzerinde sıkça kullanılan algoritmalarındandır. Hong vd. [8] çalışmalarında, toplu taşıma araçları üzerinden elde edilen konum verilerinden seyahat desenleri tespit edilmiştir. Çalışmanın odak noktası çeşitli akıllı ulaşım sistemi uygulamalarını desteklemek için ulaşım ağlarında araç yörüngesi kümelenmesini ve yolculuk düzenini tanımadır. Çalışmada hareket analizi için mekansal-zamansal veri madenciliğinin daha fazla gelişmeye ihtiyaç duyduğu vurgulanmış ve ST-TOPOSCAN adı verilen yoğunluk bazlı bir algoritma önerilmiştir. Bu kapsamda Şikago şehrinde hareket halindeki taşıtlardan 200,000 taşıt rotası ele alınmış, otoyol ve normal yollara ilişkin sabah saatlerinde farklı yoğunluklar tespit edilmiştir. Yapılan araştırma sonucunda sabah saatlerinde özellikle 06:30, 07:30 ve 08:00 saatlerinde yapılan kalkışların, sabah karşılaşılan trafik sıkışıklığına sebep olduğu ortaya konmuştur. Yuan vd. [9] çalışmalarında taksiler üzerinden elde edilen konum verilerinden kümeleme algoritmaları yardımı ile en kısa rotalar elde edilmiştir. Bu kapsamda çok sayıda taksinin geçmiş tarihli GPS verileri alınmış ve belirli bir kalkış zamanında belirtilen hedefe ulaşabilmek için en hızlı yol tahmini yapılmıştır. Ayrıca, taksilere ait dinamik yol ağları, sıkça geçtikleri bir yol doğrultusu üzerinde zamana bağlı olarak modellenmiştir. Ardından iki yer arasındaki seyahat süresini tahmin etmek için varyans-entropi tabanlı kümeleme (VE-Clustering) adı verilen bir kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak, oluşturulan sistem tarafından önerilen rotalar, diğer sistemlere göre yüzde 60 ile yüzde 70 arasında daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma ile konum ve zaman verisi üzerinde uygulanan kümeleme algoritmalarının, rota tahmini gibi zor problemlerde dahi iyi sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

Lee ve Whang [10] konum verileri üzerinde kullanılan kümeleme algoritmalarına ilişkin olarak, takip edilen konum verilerinin alt rotalarına odaklanmışlardır. Çalışmalarında kümeleme rotalarının alt rotalarının önemli olduğu senaryolar vurgulanmış, alt rotaların bulunmadığı durumlara TRACCLUS adını verdikleri algoritma ile çözüm önerisinde bulunmuşlardır. Çalışma kapsamında kasırgaların rotalarına ilişkin bir veri seti ve hayvan hareketlerinin bulunduğu bir başka veri seti üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Veri setine uygulanan TRACCLUS algoritması ile alt rotaların oldukça doğru şekilde tespit edildiği görülmüş ve konum verileri üzerinde kümeleme algoritmalarının iyi sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma kapsamında zaman, enlem ve boylam verileri üzerine odaklanılan bir başka konu ise rotalama problemidir. Bu problemin çözümünde bu çalışmada kullanılan kümeleme algoritmalarına benzer DBSCAN algoritmasının genişletilmiş ya da özelleştirilmiş uyarlamaları kullanılmaktadır. Won vd. [11] T-DBSCAN adı verilen ve DBSCAN algoritmasının uyarlaması olan bir algoritma geliştirmiştir. Çalışma kapsamında Şanghay şehrinde yer alan 10,000 rota üzerinde çalışılmıştır. Veriler işleme hazırlandıktan sonra FastMap ve hiyerarşik kümeleme algoritmaları uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar işinde uzman olan kişilerce belirlenen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda öneri olarak sunulan çözüm, uzman bir kişi ile elde edilebilecek sonuçlara göre yüzde 95 oranında daha verimli bulunmuştur.

Cep telefonları gibi GPS özelliği bulunan cihazlar sayesinde konum ve zaman verilerinin erişimi artık oldukça kolaydır. Zhang vd. [12] cep telefonlarından toplanan bilgiler ile tıp merkezlerinin ne kadar ziyaret edildiği ve bu ziyaretlere ait desenlerin tespiti üzerine odaklanmıştır. Çalışmada semantik olarak anlamlı vakit geçirilen yerleri tanımlamak için Gizli Markov Modeli kullanılmış olup, zaman ve konum verilerini kümelemek için TRACCLUS kümeleme algoritması kullanılmıştır. Kullanılan gizli markov modeli ile takip edilen nesnelere tıbbi bir tedavi için belirtilen yerde olup olmadığı ayırımı yapılmıştır. Çalışma sonucunda sık sık tedavi merkezleri ziyaret edenler ile tedavi merkezlerini az ziyaret edenler arasında bir ayırım yapılabilmektedir.

Taksi yolculuklarından üretilen küresel konumlandırma sistemi (GPS) verileri, yüksek mekansal-zamansal çözünürlüğe sahip kentsel nüfusların seyahat davranışları hakkında fikir veren değerli bir bilgi kaynağıdır. Buradan elde edilen bilgiler ile günlük aktiviteler hakkında analizler yapılabilir ve şehir planlaması adına çıkarımlar elde edilebilir. Gong vd. [13] iki katmanlı birleşik bir çözüm sunarak bu aktivite rutinleri üzerine odaklanmıştır. Bu kapsamda k-Means algoritması ile iki katmanlı yöntem karşılaştırılmış olup, birden fazla yöntem ile daha başarılı tahminlerin konum ve zaman verileri üzerinden elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Nesnelerin interneti (IoT) kullanımının artışı ile gerçek zamanlı olarak nesnelere izlenmesi kolaylaşmış ve bu

nesnelere hakkında GPS verilerinin toplanması sonucu üzerinde çalışılabilecek birçok veri elde edilmiştir. Literatürde yapılan birçok çalışmada yoğunluk bazlı kümeleme algoritmalarının kullanımı bu veriler üzerinde yapılmaktadır. Wang vd. [14] büyük yük gemilerinin ve yolcu taşıyan gemilerin kullanılması zorunlu olan otomatik tanımlama sistemi üzerinden elde edilen konum verilerinden yararlanmışlardır. Çalışma kapsamında dinamik zaman bükme (Dynamic Time Warping, DTW) algoritması ile HDBSCAN hiyerarşik yoğunluk bazlı algoritma kullanılmıştır. Sonuç olarak HDBSCAN kümeleme algoritmasının kümeleme algoritmalarının rota ve yoğunluk tahmininde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Akıllı sensörler, akıllı telefonlar ve sosyal medyanın hızlı gelişimi ile dağıtılmış sensörler ve izleme sistemleri aracılığı ile büyük miktarlarda uzamsal veri üretilmektedir. Bu üretilen verilerin coğrafi benzerlikleri çoğu kez kümeleme algoritmaları ile tespit edilirken, coğrafi benzerliklerin sıcaklık, hız, zaman ve birçok semantik benzerlikleri de kümeleme algoritmaları ile ölçülebilir. Wai ve Nwe Aung [15] çalışmalarında enlem ve boylamdan oluşan bir konum verisinin yanında diğer bir üçüncü boyut verisi olarak semantik verilerin kullanılabilirliği ve kümeleme algoritmalarında bu verilere ilişkin bir uzaklık ölçüm yöntemi üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada uygulandığı gibi konum verilerini oluşturan enlem ve boylam bilgisinin yanında farklı bilgiler de kullanılarak, yakınlıklarının ölçülebilirliği ve kümelerin tespit edilebileceği görülmüştür.

Kümeleme algoritmaları, özellikle ST-DBSCAN algoritması, birçok alanda kullanılmakla beraber, salgın hastalıkları konu alan tıp alanı olan epidemiyoloji gibi çok özel alanlarda da uygulanmıştır. Chimway ve Anuradha [16], epidemiyolojide, yeni bilgileri keşfetmek için uzamsal-zamansal kümeleme gibi yöntemlerden faydalanılarak bazı hastalıklara ait örüntülerin ve eğilimlerin tespit edilebileceği vurgulanmıştır. Bu kapsamda, 2007 ile 2017 yılları arasında Batı Nil Virüsü olarak bilinen hastalığa ait zaman ve konum verilerinden yararlanılmıştır. Çalışmada, zamansal niteliklerin uzaklıklarını belirleme konusunda belirsizlik olduğu için, ST-DBSCAN algoritmasının bulanık mantık uyarlaması olan ST-Fuzzy DBSCAN (ST-FDBSCAN) algoritmasını uygulamışlardır. Literatürde yer alan diğer uzam-zamansal veri tipi ile veri madenciliği yaklaşımlarının kullanıldığı çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiş ve mevcut çalışma ile karşılaştırılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalar, sadece kümeleme algoritmalarını veriler üzerine uygulamıştır. Bu çalışmada ise kümeleme algoritmalarının parametrelerinin tahmini yapılmış ve özgün veriler kullanılmıştır. Özgün ve saha verilerinin kullanılması bu çalışmayı diğer çalışmalara göre daha özgün kılmaktadır. Ek olarak, literatürde çok az yer alan bir algoritma olan ST-DBSCAN kümeleme algoritması bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Diğer çalışmalar sık kullanılan kümeleme algoritmaları üzerine odaklanmaktadır. Yapay sinir ağları da kullanarak diğer çalışmalarda yer almayan farklı hiperparametreler ile sonuçların değerlendirilmesi de bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayırmaktadır.

Tablo 1. Uzam-zamansal veri tipi ile veri madenciliği metodları kullanılan çalışmalar
(Studies on spatiotemporal data types and data mining techniques proposed for them)

İlk yazar	Uzam- zamansal veri tipi	Veri madenciliği metodu	Kullanılan algoritma
Chimwayi [16]	Noktalar (olaylar)	Kümeleme	ST-DBSCAN
Trisminingsih [17]	Noktalar (olaylar)	Kümeleme	ST-DBSCAN
Wang [18]	Poligonlar (coğrafi alanlar)	Kümeleme	ST-SNN
Briant [3]	Noktalar (olaylar)	Kümeleme	ST-DBSCAN
Joshi [19]	Poligonlar (coğrafi alanlar)	Kümeleme	STPC
Wang [20]	Noktalar (olaylar)	Kümeleme	ST-DBSCAN
Chen [21]	Noktalar (olaylar)	Kümeleme	ST-DBSCAN
Wang [22]	Poligonlar	Kümeleme	Multilevel graph-partition algorithms
Zhang [23]	Poligonlar (coğrafi alanlar)	Kümeleme	ST-SSN
Damiani [24]	Noktalar / yörüngeler	Kümeleme	SeqScan
Izakian [25]	Noktalar (zaman serileri)	Kümeleme	Fuzzy c-means
Izakian [26]	Noktalar (zaman serileri)	Kümeleme / anormallik tespiti	Fuzzy c-means
Lai [27]	Noktalar (olaylar)	Kümeleme	DBSCAN
Iyengar [28]	Ayrık olaylar	Kümeleme	Spatial scan statistics
Schubert [29]	Ayrık olaylar	Anormallik tespiti	kNN
Mohan [30]	Ayrık olaylar	Desen analizi	CSTPM
Shekhar [31]	Ayrık olaylar	Desen analizi / anormallik tespiti	Spatial statistics
Nanni [32]	Yörüngeler	Kümeleme	OPTICS
Li [33]	Yörüngeler / Ayrık olaylar	Kümeleme / desen analizi	Spatiotemporal pattern mining
Palma [34]	Yörüngeler	Kümeleme	CB-SMOT
Gudmundsson [35]	Hareketli nesnelere	Kümeleme	Geometric algorithms
Jeung [36]	Hareketli nesnelere	Kümeleme	CuTS
Li [37]	Hareketli nesnelere	Kümeleme	SWARM
Mevcut çalışma	Noktalar (olaylar)	Kümeleme / anormallik tespiti	ST-DBSCAN

Çalışmanın takip eden bölümünde materyal ve yöntemle ait gerekli tanımlar ve kullanılan formüller verilmekte ve önerilen yöntemin adımları ve önerilen yöntemin nasıl çözümler getirdiği vurgulanarak açıklanmaktadır. Bölüm 4'te uygulamaya dair bilgiler verilmekte ve son olarak Bölüm 5'te sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHODOLOGY)

Bu çalışma kapsamında özel bir savunma sanayi firması tarafından üretilmiş takip cihazı kullanılarak veriler toplanmıştır. Kullanılan cihaz, takip cihazı olarak, üzerinde bulunan GPS modül aracılığıyla konum gönderen bir nesnelere interneti (IoT) cihazıdır. Standart takip cihazlarına ek olarak GPS uydularından gerekli veri alınmaz ise Wi-Fi ve konum bazlı servisler (LBS) üzerinden konumlandırma yapabilmektedir. Cihazın temel prensibi GPS, Wi-Fi veya LBS bilgilerini elde edip, bir sunucuya iletmektir. Sunucu tarafından alınan veri, konumlandırma için kullanılmakta ve

veritabanına kaydedilmektedir. Bir web arayüz aracılığıyla cihazın topladığı verilerin enlem, boylam ve zaman bilgileri, kullanıcı tarafından alınabilmektedir. Kullanılacak cihaz her ne kadar üzerinde bulunan sensörlerden (sıcaklık, ivme vb.) farklı bilgiler gönderse de bu veriler çalışma kapsamına alınmamıştır. Çalışma kapsamında kullanılacak veri, tüm takip cihazlarında ortak olan uzamsal-zamansal veridir. Diğer takip cihazlarına benzer şekilde bu cihazdan da enlem, boylam ve zaman bilgileri alınabilmektedir. Bir diğer özellik ise cihazın belli zaman aralıklarında göndermekte olduğu verinin, gönderme sıklığı ayarlanabilmektedir. Bu bakımdan cihaz üzerinden farklı zaman aralıklarında veri toplanabilmesine imkan vermektedir.

Çalışma kapsamında kullanılan takip cihazı ile 4 hafta boyunca veriler toplanmıştır. Takip cihazının veri gönderim sıklığı 5 dakika olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda cihaz 5 dakikada bir aktif hale gelmekte, cihazın konumuna ilişkin verileri toplamakta, veriyi sunuculara gönderdikten sonra tekrar uyku moduna geçmektedir. Veri toplama işlemi

sırasında, çalışma kapsamında toplanacak verilerin davranışına uygun olmasına dikkat edilmiştir. Takip cihazının belli bir rutin içerisinde olan bir kişi tarafından taşınması, mümkünse veri toplama sırasında tatil günleri, izin gibi dönemlere denk gelmemesi ve bu sayede takip cihazını taşıyan kişiye ilişkin sağlıklı verinin toplanabilmesi hedeflenmiştir. Cihazın taşınabilir olması bu kısımda ek bir avantaj sağlamıştır. Çalışmanın temel girdileri, takip cihazında elde edilecek olan konum (enlem ve boylam) ve zaman bilgisidir. Bunlara ek olarak, sisteme cihazın kaç adet konum paketi biriktirdiğini belirten bir girdi ve dakika cinsinden ne kadar zaman aralığında veri paketleri gönderdiği bilgisi sistemin girdisi olarak ele alınmıştır.

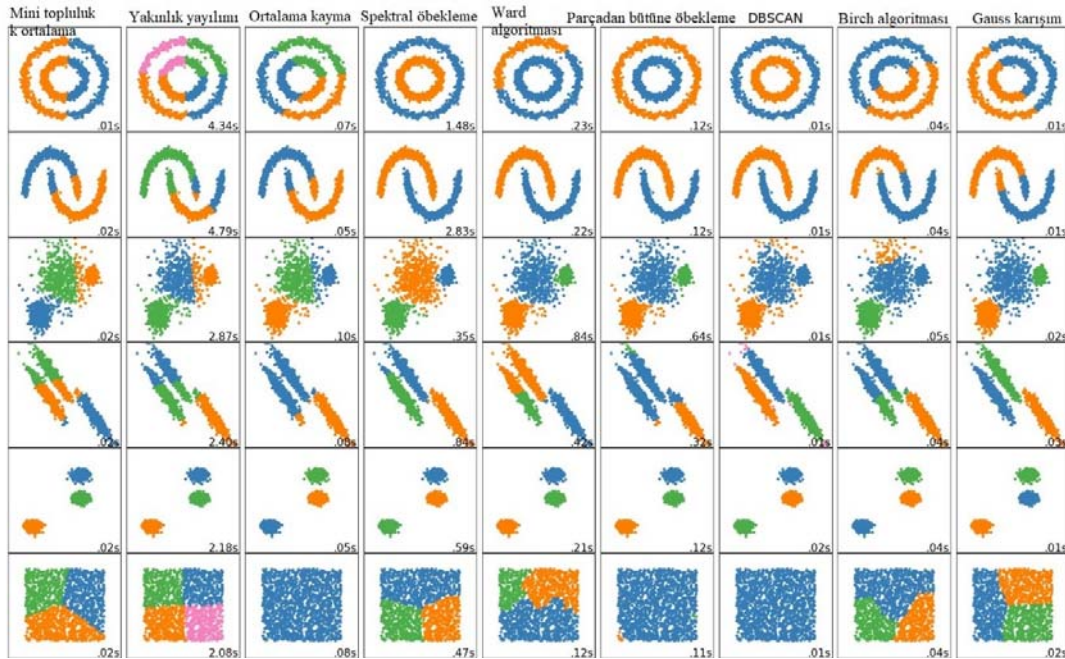
3.1. Makine Öğrenmesi (Machine Learning)

Makine öğrenimi ya da yapay öğrenme, bilgisayarların örnek veri ya da geçmiş deneyimi kullanarak bir ölçüte göre başarımlarını artıracak biçimde programlanmasıdır [6]. Takip cihazlarından oldukça fazla veri akışı gerçekleşmekte olup, bu çalışma kapsamında, gözetimli ve gözetimsiz öğrenme tipleri kullanılarak verilerin içerisinde birbirine benzer olanların bir örüntü oluşturup oluşturmadığı tespit edilecektir. Gözetimli öğrenmede eğitim kümesi sınıf adlarını içerir, yani eğitim kümesinde ki her bir nokta için doğru kategoriler verilir [5]. İlk aşamada algoritma eğitim verisini kullanarak tüm kategorileri öğrenir, daha sonra ikinci safhada gelen yeni veri için öğrenilen sınıflardan birini tahmin eder [1]. Gözetimli öğrenmede amaç, girdi değeri ile doğru değeri bir gözetmen tarafından verilen çıktı değeri arasında ki ilişkiyi öğrenmektir. Gözetimsiz öğrenmede amaç girdi değerindeki düzenli durumları bulmaktır [6]. Gözetimsiz öğrenme algoritmasının veri içerisindeki grupları bulması beklenir [6]. Kümeleme en çok kullanılan gözetimsiz öğrenme metodlarından birisi olup, büyük veri

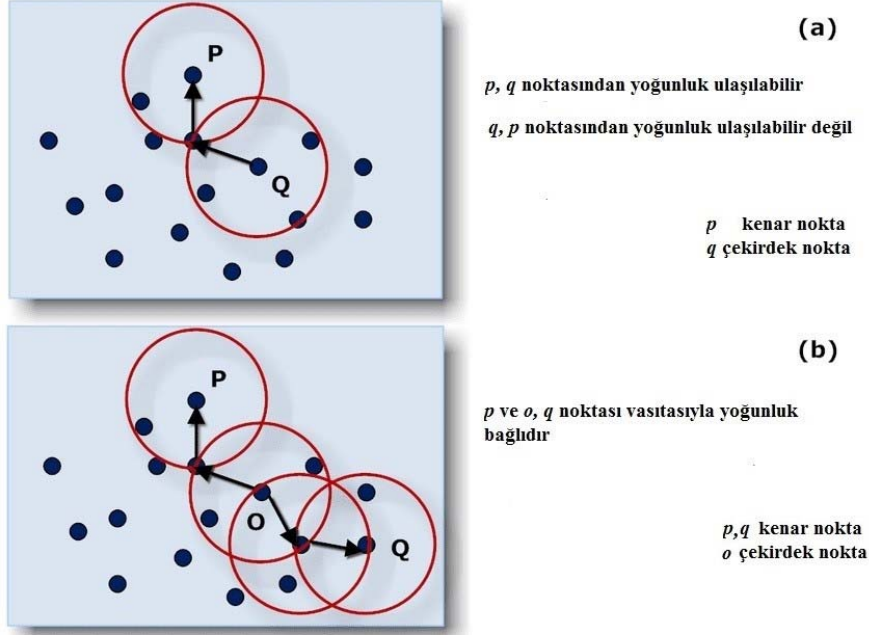
kümelere içerisindeki verilerin benzerliklerine göre ayrılmasına yardımcı olur. Çalışma kapsamında koordinat sistemi üzerinde konuma ve zamana göre binlerce veri toplanmıştır. Bu noktalar kendi aralarındaki benzerliklere ya da yakınlık derecelerine göre kümelere ayrılabilir ve kümelerin yoğunluklarına göre bir tahmin yapılabilir. Bu aşamada yoğunluk bazlı çalışan algoritmalar kullanılabilir.

Çalışma kapsamında yoğunluk bazlı algoritmalar karşılaştırılmış ve incelenmiştir (Şekil 1). Bunlardan birisi de DBSCAN (A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise) algoritmasıdır. DBSCAN algoritması yoğunluk tabanlı kümeleme algoritmasıdır [38-40]. Algoritma temel olarak çekirdek nesne, Eps, MinPts, doğrudan yoğunluk erişilebilir nokta, yoğunluğa bağlı nokta parametrelerinden oluşur. Algoritma, Eps ve MinPts değerlerini giriş parametresi olarak alır. Veritabanındaki herhangi bir nesneden başlayarak tüm nesnelere kontrol eder. Eğer kontrol edilen nesne daha önce bir kümeye dahil edilmiş ise işlem yapılmadan diğer nesneye geçer. Eğer nesne daha önce kümelenebilmiş ise, bir bölge sorgusu yaparak nesnenin Eps komşuluğundaki komşularını bulur. Komşu sayısı MinPts'den fazla ise, bu nesne ve komşularını yeni bir küme olarak adlandırır. Daha sonra, önceden kümelenebilmiş her bir komşu için yeni bölge sorgusu yaparak yeni komşular bulur (Şekil 2). Bölge sorgusu yapılan noktaların komşu sayıları MinPts'den fazla ise kümeye dahil eder [1].

Şekil 2 üzerinde yoğunluk bazlı algoritmalarda sıkça rastlanan iki terime değinilmiştir. Bunlardan birincisi yoğunluk ulaşılabilir durumudur. Şekil 2a üzerinde görüleceği üzere p ve q noktalarını içeren bir noktalar topluluğunda yoğunluk ulaşılabilir durumlar incelenmiştir. Q noktası DBSCAN algoritmasında rastgele seçilen,



Şekil 1. Yoğunluk bazlı algoritmaların karşılaştırılması (Comparison of density-based algorithms)



Şekil 2. DBSCAN algoritmasının nasıl çalıştığına ilişkin görünüm (Representation of how DBSCAN algorithm Works) [41]

herhangi bir kümeye daha önce dahil edilmemiş, epsilon komşuluğunda minpoints değeri kadar (bu durumda minpoints 5 olarak varsayılıyor) nokta içeren bir durumdur. Yani q noktası yeni oluşacak olan bir kümenin başlangıcı, bir başka deyimle çekirdek noktadır. Çekirdek nesne olan q seçildikten sonra, oluşturduğu kümedeki diğer noktalarında komşuluğuna bakılarak küme genişleyecektir. Şekil 2a üzerinde görüleceği üzere, q noktasından oluşan küme genişledikçe p noktasını da içine alan bir küme haline gelecektir. Bu durumda p noktası q noktasından yoğunluk ulaşılabilir olarak değerlendirilir. Öte yandan, Şekil 2a üzerinde yer alan p noktası rastgele seçilmiş ve daha önce hiçbir kümeye dahil edilmemiş bir durum olarak noktalar topluluğu ele alınsa, epsilon komşuluğunda minpoints parametresini sağlayamadığı için bir küme oluşturamayacaktır. Dolayısıyla p ve q noktaları, eğer DBSCAN algoritması göz önüne alındığında rastgele seçilen nokta olarak p noktası seçildiğinde aynı kümeye dahil olamamaktadır. Çünkü p noktası küme başlangıcı şartlarını sağlayamamakta diğer bir deyişle çekirdek nesne olamamaktadır. Bu durumda ise q noktası p noktasından yoğunluk ulaşılabilir değildir. Şekil 2 üzerindeki diğer bir durum ise yoğunluk bağlı durumdur. Bu durum, çekirdek nokta olamayan iki noktanın çekirdek nokta olan bir başka nokta aracılığı ile aynı kümeye dahil olmasıdır. Şekil 2b üzerinde görüleceği üzere o noktası bir çekirdek noktadır. p ve q noktaları ise o noktası aracılığı ile birbirine bağlıdır, diğer bir ifadeyle aynı kümededir.

Çalışma kapsamında verinin 3. boyutu olarak zaman parametresi de bulunmaktadır. Çalışmaların çoğu, sıradan verilerden (uzamsal olmayan ve zamansal olmayan veriler) kümeleri keşfetmeye odaklanır, bu nedenle uzamsal-zamansal verileri kümelemek için kullanmak pratik değildir

[3]. Mekansal-zamansal veriler için bilgi bulma süreci mekansal olmayan ve zamansal olmayan veriler için daha karmaşıktır [3]. Çünkü uzamsal-zamansal kümeleme algoritmaları, gerekli bilgiyi elde etmek için nesnelerin uzamsal ve zamansal komşularını dikkate almak zorundadır [3]. Uzamsal veri, enlem ve boylam bilgisi, kendi aralarındaki komşulukları kilometre, metre gibi bir uzunluk birimi ile ifade edilirken, üçüncü parametre olan zaman ile bu birimlerin komşuluğu ifade edilemez. Bu yüzden uzamsal-zamansal veriyi öbekleyebilecek bir özel algoritmaya ihtiyaç duyulur. ST-DBSCAN (Spatial-Temporal Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) algoritması bu amaç için kullanılabilir. ST-DBSCAN algoritması DBSCAN algoritmasına kıyasla zaman ve koordinat bilgilerine özgü öbekleme yapabilir. Farklı yoğunluktaki kümeler bulunduğu zaman, DBSCAN bazı gürültü noktalarını tespit edememektedir. ST-DBSCAN algoritması ise zaman ve koordinat bazlı bu noktaların tespitini yapabilir. Algoritma zamansal ve uzamsal olarak farklı sınır nesnelere sahip olduğundan ayrışmaları daha kolay olur [3, 38]. DBSCAN algoritması Eps ve MinPts parametrelerini kullanırken, ST-DBSCAN algoritması 4 parametreye ihtiyaç duyar [3, 39]. Eps1 parametresi, enlem ve boylam cinsinden olan uzamsal verinin olması gereken uzaklığıdır. Eps2 parametresi ise uzamsal olmayan verinin uzaklık mesafesini temsil eder. MinPts ise Eps1 ve Eps2 değerlerini sağlayan, küme oluşturmak için gerekli olan en az eleman sayısıdır. ΔE ise seçilen küme ortalaması ile yeni gelen değer arasında bulunması gereken eşik değerdir. Şekil 3 üzerinde yer alan kod göz önüne alındığında i 'den n 'e kadar noktalar teker teker gezinilmektedir. Eğer o_i olarak ifade edilen sıradaki nokta herhangi bir kümeye dahil değil ise diğer noktalara olan komşuluğu değerlendirilmektedir. Eps1, Eps2 ve MinPts değerleri ile noktanın bir küme oluşturup

Algorithm ST_DBSCAN (D, Eps1, Eps2, MinPts, $\Delta\epsilon$)

```

// Inputs:
// D={o1, o2,.....,on}      Set of objects
// Eps1 : Maximum geographical coordinate (spatial) distance value.
// Eps2 : Maximum non-spatial distance value.
// MinPts : Minimum number of points within Eps1 and Eps2 distance.
//  $\Delta\epsilon$  : Threshold value to be included in a cluster.

// Output:
// C={C1, C2,.....,Ck}      Set of clusters

Cluster_Label = 0
For i=1 to n                                //(i)
  If oi is not in a cluster Then              //(ii)
    X=Retrieve_Neighbors (oi, Eps1, Eps2)      //(iii)
    If |X| < MinPts Then
      Mark oi as noise                          //(iv)
    Else                                       //construct a new cluster (v)
      Cluster_Label = Cluster_Label + 1
      For j=1 to |X|
        Mark all objects in X with current Cluster_Label
      End For
      Push(all objects in X)                      //(vi)
      While not IsEmpty()
        CurrentObj = Pop()
        Y=Retrieve_Neighbors (CurrentObj, Eps1, Eps2)
        If |Y| >= MinPts Then
          ForAll objects o in Y                //(vii)
            If (o is not marked as noise or it is not in a cluster) and
              |Cluster_Avg() - o.Value| <=  $\Delta\epsilon$  Then
                Mark o with current Cluster_Label
                Push (o)
            End If
          End For
        End If
      End While
    End If
  End For
End Algorithm

```

Şekil 3. ST-DBSCAN algoritmasına ilişkin kodlar (Codes for ST_DBSCAN algorithm) [3]

oluşturmadığına bakılmakta, küme oluşturmuyor ise gürültü olarak işaretlenmektedir. Noktaya ait küme elemanları X değişkeni içerisinde tutulmaktadır. X değişkeni içerisindeki noktaların kendilerine olan komşuluklarını bulmak adına geçici olarak başka bir değişkene *Push(all objects in X)* yöntemi ile atılmaktadır. Daha sonra, bu geçici değişken boş olana dek yani koddaki *IsEmpty()* kontrolü ile kümedeki noktalar teker teker kendi komşuluklarına bakılmaktadır. Kontroller yapılırken geçici değişkende tutulan listeden nokta elemanları *Pop()* yöntemi ile listeden alınıp, *CurrentObj* değişkeni ile işleme tabi tutulmaktadır. Algoritmaya ilişkin detaylı bilgi aşağıdaki gibidir (Şekil 3).

ST-DBSCAN algoritması ile DBSCAN algoritması arasındaki fark bir örnek üzerinden açıklanabilir. Uzamsal-Zamansal veriler enlem, boylam ve zaman verisinden

oluşmaktadır. Görüldüğü üzere uzamsal-zamansal veri 3 boyutlu bir koordinat sisteminde ifade edilseydi eğer koordinatlardan birisi enlem, diğeri boylam ve üçüncüsü ise zaman olarak yer alacaktır. Enlem ve boylam bilgileri benzer birimde iken zaman bilgileri koordinat sisteminde farklı bir birimde ifade edilmektedir. Bu kapsamda, oluşturduğumuz bu 3 boyutlu koordinat sisteminde iki nokta arasındaki uzaklığı hesaplamak isteyecek olursak, iki noktanın her bir koordinat düzelemindeki farklarının karesinin toplamının kökünü alarak bu sonuca erişilebilir. Ancak burada bir toplama işlemi yapılmakta ve toplama işlemi sadece benzer cinstekileri toplayabilir. Eğer burada oluşturulan enlem, boylam ve zamandan oluşan 3 boyutlu koordinat sistemine DBSCAN algoritması uygulanır ise benzer cinsten olmayan rakamların toplanması gibi bir durum ortaya çıkacaktır. ST-DBSCAN algoritması ise bu duruma farklı bir açıdan

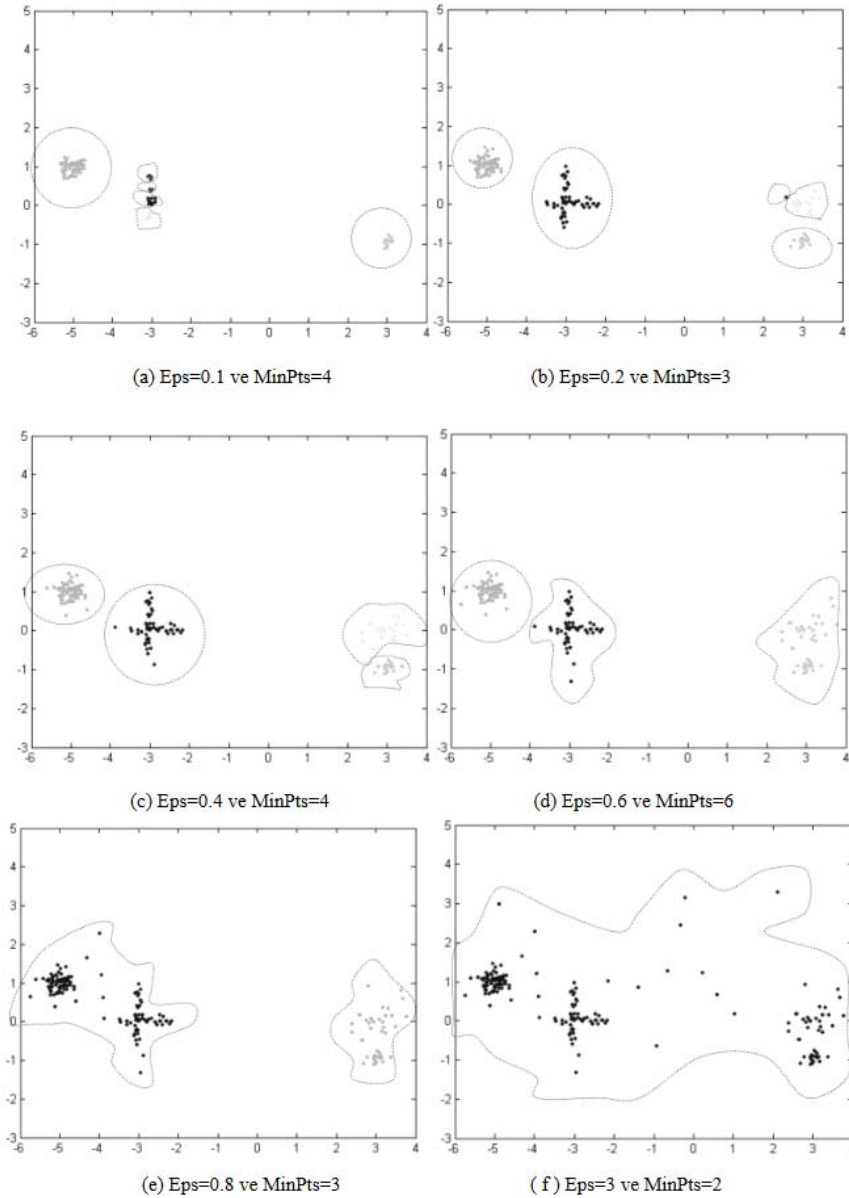
yaklaşmaktadır. Enlem ve boylam bilgileri benzer cinsteki oldukları için komşuluklarını belirleyecek olan uzaklık sadece bu değerlere uygulanmaktadır. Öte yandan, zaman verisinin uzaklığı ise kendi içerisinde hesaplanmakta ve komşuluk ilişkisi kendi özgü ayrı bir parametre ile belirlenmektedir. Bu kapsamda iki noktanın belirlediğimiz bu 3 boyutlu düzlemdeki komşulukları ise enlem, boylam ve zaman biriminin arasındaki komşuluk durumunun sağlanması ile elde edilir. Eğer enlem, boylam ya da zaman birimi komşuluklarından birisi sağlanmaz ise bu iki nokta arasındaki uzaklık komşuluğun dışındadır olarak değerlendirilmektedir.

ST-DBSCAN algoritmasındaki Eps1, Eps2 ve MinPts veya DBSCAN algoritmasındaki Eps ve MinPts girdi parametrelerinin aldıkları değerlere göre çok farklı kümeler

ortaya çıkabilmektedir (Şekil 4). Çalışma kapsamında, geçmişte toplanan veriler kullanılarak, gelecekte oluşacak veriler için bir Eps1, Eps2 ve MinPts parametrelerini tahmin edebilecek bir makine öğrenmesi metodu uygulanması amaçlanmıştır. Öncelikle geçmiş verilere ST-DBSCAN algoritması uygulanarak uygun Eps1, Eps2 ve MinPts parametreleri belirlenecek ve bu verilere ilişkin çıktılar göz önünde bulundurularak tahminler yapılacaktır.

3.1.1. Lineer regresyon algoritması (Linear regression algorithm)

Regresyon analizi, y olarak sembolize edilen bir bağımlı değişken ve x olarak sembolize edilen bir veya daha fazla bağımsız değişkenden oluşan nicel değerler arasındaki ilişkiyi incelemek ve tahmin etmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [42]. Regresyon analizi bir gözetimli öğrenme



Şekil 4. Farklı girdi parametrelerine göre DBSCAN algoritması çıktıları
(Dbscan algorithm outputs according to different input parameters)

algoritmasıdır çünkü bu yaklaşım makine öğrenimi yöntemleri ile önemli ölçüde örtüşür [1]. Basit regresyon fonksiyonunun birden fazla bağımsız değişkene ve tek bir çıktıya sahip olan geliştirilmiş yöntemine ise çoklu regresyon yöntemi adı verilir [43]. Eş. 1’de çoklu regresyon yöntemine ilişkin denklem gösterilmiştir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Burada y tahmin edilemeye çalışılan bağımlı değişken, x_1, x_2, \dots, x_k bağımsız değişkenlerdir. β ve α regresyon sabiti, ε ise hata terimini ifade etmektedir. Bu çalışmada, toplanan veriler (kaç dakikada bir konum paketi gönderiyor, toplam gönderilen konum paketi sayısı) girdi olarak kullanılıp, daha sonra bunlara ilişkin çıktılarla model eğitilecek ve seçilecek konum gönderme periyoduna göre kümeleme algoritmasının parametreleri tahmin edilecektir. Cihazdan alınan girdi verilerinden olan toplam gönderilen konum paketi sayısının temel kullanım amacı, cihazın hangi yoğunlukta veri gönderdiğini tespit edebilmektir. Cihaz üzerinde bulunan GPS modülleri konum belirleyebilmek için yeterli sayıda uyduya erişemez ise konum belirleyememektedir. Elde edilen verideki, belirlenemeyen konumların çokluğu veri karakteristiğine etki edeceğinden dolayı toplam gönderilen konum paketi sayısı girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Öte yandan cihazın kaç dakikada bir konum göndereceği bilgisi ise belirli bir konum alanındaki veri yoğunluğunu etkileyeceğinden girdi parametresi olarak seçilmiştir.

3.1.2. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

Çalışma kapsamında değerlendirilen diğer yöntem ise yapay sinir ağlarıdır. Bunun temel sebeplerinden birisi elde edilmesi planlanan parametre tahmin probleminin doğrusal bir çözümünün olmama ihtimalidir. Yapay sinir ağlarının güçlü yanlarından birisi doğrusal olmayan problemlere çözüm getirebilmesidir [42, 44-46]. Yapay zeka yöntemlerinden birisi olan yapay sinir ağları, insan sinir hücrelerini (nöron) modelleyerek çözüm üretmekte olup geleneksel yöntemler dışında problemi kendi kendine öğrenebilmesi ve problemin sahip olduğu bilgiler arasında ilişkiler oluşturabilme yeteneğine sahiptir [42]. Temel amacı, girdi değerlerine karşılık çıktı değerlerini tahmin edebilmektir [42, 44].

İnsan sinir hücrelerinde olduğu gibi yapay sinir ağlarında da bazı yapılar vardır. Bunlar girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılarıdır. Girdiler, dışardan gelen veriyi ağlara ileten kısımdır. Ağırlıklar, nörona gelen bilginin problem için önemini gösterir ve nöron üzerindeki etkisini göstermektedir [42]. Ağırlık değerinin küçük olması girişin önemsiz olduğunu gösterir iken ağırlık değerinin büyük olması girişin önemli olduğunu gösterir [42]. Toplama fonksiyonu, gelen tüm girdilerin ağırlıkları ile çarpıp toplayarak net girdisini hesaplayan kısımdır. Aktivasyon fonksiyonu, toplama fonksiyonu tarafından iletilen net bilgiyi işleyip, çıktıya dönüştüren fonksiyondur. Problemin doğrusal olmayan çözümü için genellikle sigmoid gibi türevi alınabilen doğrusal olmayan bir fonksiyon seçilir.

Çıktı ise aktivasyon fonksiyonu ile elde edilen sonucu veren birimdir [42]. Yapay sinir ağlarının işleyişi, girdilerden alınan verinin, toplama fonksiyonu aracılığı ile net değerinin üretilmesi ile başlar. Üretilen net değer, aktivasyon fonksiyonu tarafından çıkış değerine dönüştürülür. Girişe denk gelen çıkış değeri ile elde edilen değer karşılaştırılarak hata bulunur. Her seferinde bu döngü tekrarlanır, tek fark ise ağırlıkların güncellenmesidir. Bu tekrarlama işlemi iterasyon ya da dönem olarak isimlendirilir. Böylece elde edilen hata en aza indirilmeye çalışılır [44]. Ağırlıkların değişim miktarını ifade eden öğrenme katsayısı ya da öğrenme hızıdır.

Yapay sinir ağ modelleri nöronları içeren katmanlardan oluşmaktadır. Katmanlar girdi katmanı, çıktı katmanı ve gizli katmanlardan olabilir [47]. Sadece girdi ve çıktı katmanı olan yapay sinir ağ modellerine tek katmanlı sinir ağları diğer bir adıyla perceptron olarak isimlendirilir. Girişler ve onlara karşılık gelen ağırlık değerlerinin çarpımları toplamından oluşan net değeri, eşik değeri aştığı zaman çıkış üretilir [40]. Tek ağırlık katmanı olan algılayıcı girdinin yalnızca doğrusal işlevlerini öğrenebilir ve doğrusal olmayan durumu gerçekleyemez [4]. Burada her saklı birim bir algılayıcıdır. İleri beslemeli ağlar katmanlardaki nöronlar aynı katmandaki nöronlara bağlı değil iken, bir sonraki katmandaki tüm nöronlara bağlıdır. Çok katmanlı perceptron (MLP) ileri beslemeli ağlara örnektir. Çok katmanlı perceptronlar her dönem sonucunda elde edilen hatanın, belli algoritmalar ile ağırlıklara yansıtılması ile öğrenme işlemini gerçekleştirir ve buna hatayı geriye yayma (backpropagation) denir [47]. Sinir ağlarında gözetimli öğrenme işlemi için girdiler ve bunlara denk gelen çıktı bilgileri sağlanmalıdır. Eğitim sırasında kullanılan bu veriler eğitim seti ya da eğitim kümesi olarak adlandırılır. Elde edilen öğrenmenin başarımını ölçmek için eğitim kümesinden bağımsız ve ağırlık karşılaştımadığı değerler verilerek ağ test edilir. Bu veri kümesi test kümesi ya da test seti olarak adlandırılır [42]. Bunlara ek olarak, ağırlık eğitimi sırasında genellemenin kötüleştiğini yani aşırı eğitimi tespit edebilmek adına doğrulama ya da sınav kümesi adı verilen bir veri seti eğitim seti içerisinde belli bir oranda seçilebilir. Doğrulama kümesi ile ağ eğitimi sırasında öğrenme hatası ve doğrulama hatası karşılaştırılabilir. Bu sayede belli bir dönemden sonra, ağırlık eğitildiği tespit edilip, bu dönem noktasına ağ sonlandırılabilir. Bu aynı zamanda erken durma olarak bilinir. Bu aşamadan sonra elde edilen konum ve zaman kümeleri ister öngörü için kullanılabilir iken istenilir ise anlık gelen verilerin bu desenlere uyup uymaması durumunda anormallik tespiti olarak kullanılabilir. Bu aşamada anormallik tespitine ilişkin aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

- Her normal davranışı yakalayan bir normal bölge tanımlamak zordur ve normal bölge ile anormallik bölge arasında keskin bir sınır yoktur [6].
- Anormallik kavramı uygulama alanına göre değişir. Bir alanda geliştirilen tekniği diğer bir alana taşımak çok kolay değildir [6].

- Çoğu zaman model kurmak için etiketlenmiş eğitim ve doğrulama verilerini bulmak zordur [6].
- Anormallikler normalmiş gibi görülebilir. Bu durum normal davranışı tanımlamayı daha da zorlaştırır [6].
- Çoğu çalışma alanında normal davranış evrildiği için başta yapılan normal tanımın temsili yeterli olmayabilir [6].

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Çalışma kapsamında toplam 4 haftalık süre içerisinde 5558 adet konum veri paketi toplanmıştır. Cihaz verisi içerisinde cihazın kendi hatasından kaynaklı hatalı veri paketleri çalışmaya dahil edilmemiştir (Tablo 2).

Veri hazırlık aşamasında verilerin 5 dakika aralıklarla toplandığı göz önüne alındığında ortalama veri toplama süresinin 1 aydan fazla sürdüğü görülmüştür. Çalışma kapsamında düşünülen 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 60 dakika aralıkları düşünüldüğünde ise 7 aylık bir sürece denk gelmektedir. Veri toplama süreci, 5 dakika aralıklarla elde edilen konum veri paketlerinin azaltılması ile kısaltılmıştır. Azaltılmış verilerden diğer zaman aralıkları elde edilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3'te görüleceği üzere veri gönderme sıklığı 5 dakika olan verilerden 10 dakikalık veriler elde edildiğinde elde edilen rakam tam olarak 5 dakikalık verinin yarısı değildir. Bunun temel sebebi veri seyreltme işleminden kaynaklanmaktadır. Cihaz üzerindeki GPS modül konum

belirleyemediğinde gönderilecek paketin süresi de uzamaktadır. Şekilde görüleceği üzere bir cihazın 60 dakikalık zaman ekseninde 5 dakika veri gönderme sıklığına ayarlandığında toplam 7 paket (15, 23, 31, 37, 42, 49, 56) gönderdiği örnek olarak verilmiştir (Şekil 5). Cihaz konumları belirlemeye çalışıldığında, 15. dakikaya kadar konum belirleyememiştir. Bu veriler seyreltilirken 15. dakika verisi 10 dakikalık verinin ilki olarak alınmaktadır. Daha sonra üzerine 10 dakika eklenip (yani 25. dakikadan sonra), ilk sıradaki veri 10 dakikalık verinin ikinci paketi (31. dakikadaki veri paketi) olarak alınmıştır. İşlemler bu şekilde devam ettiğinde 5 dakika veri gönderme sıklığı toplam paket sayısı 7 iken 10 dakika veri gönderme sıklığı toplam paket sayısı 4 olmaktadır. Bu yüzden tabloda gösterilen sayılar veri gönderme sıklığı 2 katına çıksa dahi toplam paket sayısı ters orantılı olarak tam olarak yarısına düşmemektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Zaman aralıklarına göre konum veri paketi sayısı
(Number of location data packets by time intervals)

Hafta Sayısı	Veri Gönderme Sıklığı	Veri Paketi Sayısı
4	5	5558
4	10	2894
4	15	1969
4	20	1693
4	25	1407
4	30	1193
4	60	635

Toplanan 4 haftalık veriden 2 haftalık verilerin çıkarılması amacıyla 1 haftalık bölümlere ayrılan konum paketlerinden

Tablo 2. Takip cihazından elde edilen konum veri paketi örnekleri
(Location data packet samples obtained from the tracking device)

Cihaz Adı	IMEI	Olay Kodu	Pil (%)	Zaman	Enlem	Boylam	Hata	Kaynak	Adres Bilgisi
T01-0001	-	Bağlantı Yenilendi	80	21.06.2019 09:25:47	39.87572	32.86401	0	GPS	508. Cd. Sancak Merkez Ankara / Türkiye Katar Cd.
T01-0001	-	Bağlantı Yenilendi	75	21.06.2019 09:19:29	39.87763	32.86763	0	GPS	Birlik Merkez Ankara / Türkiye 508. Cd.
T01-0001	-	Bağlantı Yenilendi	80	21.06.2019 09:13:16	39.87574	32.86383	0	GPS	Sancak Merkez Ankara / Türkiye Turan Güneş Blv. Sancak
T01-0001	-	Bağlantı Yenilendi	75	21.06.2019 09:07:02	39.87578	32.86368	0	GPS	Merkez Ankara / Türkiye 424. Sk.
T01-0001	-	Bağlantı Yenilendi	75	21.06.2019 09:00:38	39.87834	32.86989	0	GPS	Birlik Merkez Ankara / Türkiye

2 haftalık farklı veri kümeleri elde edilmiştir. Her veri toplama sıklığı için 2 haftalık toplamda 6 farklı veri kümesi elde edilmiştir. Örnek olarak birinci hafta verileri ile dördüncü hafta verileri birleştirilerek bir veri kümesi oluşturulmuştur. Bu kombinasyon tüm veri gönderme sıkları için gerçekleştirilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Beş dakika aralıkla toplanan veriye ilişkin 2 haftalık veri paketi sayısı

(Number of 2-week data packets for data collected at a five-minute interval)

Haftalar	Veri Gönderme Sıklığı	Veri Paketi Sayısı
1. hafta – 2.hafta	5	2760
2. hafta – 3. hafta	5	2747
2. hafta- 4. hafta	5	2839
3. hafta- 4. hafta	5	2798
1. hafta- 4. hafta	5	2811
1. hafta- 3. hafta	5	2719

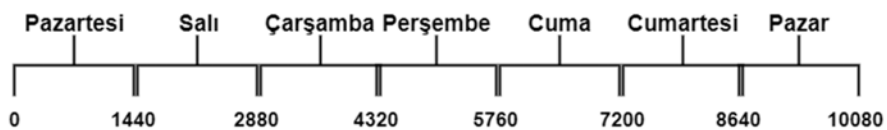
Bu çalışmada takip cihazından alınan verilerin diğer takip cihazlarında da ortak olarak elde edilebilecek konum ve zaman verisine odaklanılmıştır. Kullanılan algoritmalarda bu verilerden, konum verisine ilişkin enlem ve boylam bilgisi değiştirilmeden kullanılabilirken, zaman verisinin kullanılabilmesi için düzenlenmesi gerekmektedir. Bu ihtiyaç, çalışma sonucunda elde edilecek haftanın günlerine ilişkin zaman aralıklarının kesintisiz şekilde komşu olması ile ilgilidir. Bu yüzden veri ilk önce haftanın günlerine göre düzenlenmiştir. Veri analizinde, 1 günün 24 saat ile sonlanması ile yeniden başa dönmelerinden dolayı problemler ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda haftanın başlangıcı Pazartesi 00:01 saati 1. dakika olarak alınmış ve her geçen dakika üzerine eklenerek bir haftada 10,080 dakika olacak şekilde

zaman verisi düzenlenmiştir. Böylece zaman komşuluklarının tespiti kolaylaşmıştır (Şekil 5). İlk olarak enlem, boylam ve haftalık dakika bilgisi içeren veri paketleri, yapılacak işlemlere hazır hale getirilmiştir. Hazır hale getirilen verilere ST-DBSCAN algoritması uygulanmış ve uygulama sırasında ST-DBSCAN algoritmasının girdileri olan Epsilon1, Epsilon2 ve MinPoints parametrelerinin seçimine dikkat edilmiştir. ST-DBSCAN algoritmasının uygulanması ile veriler üzerinden elde edilen konum kümeleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda, algoritmanın kümeleri ve gürültüleri düzgün şekilde tespit ettiği anlaşılmıştır (Şekil 6). Şekil 7 de, 5 dakika veri gönderme sıklığı toplanmış veriler üzerine Epsilon1, Epsilon2 ve MinPoints parametrelerinin farklı değerlerde nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 7 üzerinde yer alan (a) kısmında 5 dakika veri gönderme sıklığı için en uygun parametreler verilmiş olup, takip edilen nesneye ait tüm rutinler düzgün şekilde elde edilmiştir. Şekil 7 üzerinde yer alan (b) kısmında ise Epsilon1, Epsilon2 ve MinPoints parametreleri değiştirilmiş olup, tespit edilmesi gereken tüm rutinlerde bir takım kayıplar yaşanmıştır. Öte yandan, Epsilon1, Epsilon2 ve MinPoints parametreleri Şekil 7 üzerinde yer alan (c) kısmında uygun değerlerinden uzaklaştıkça, tespit edilmesi gereken rutinlerin çoğunu kaybetmiştir.

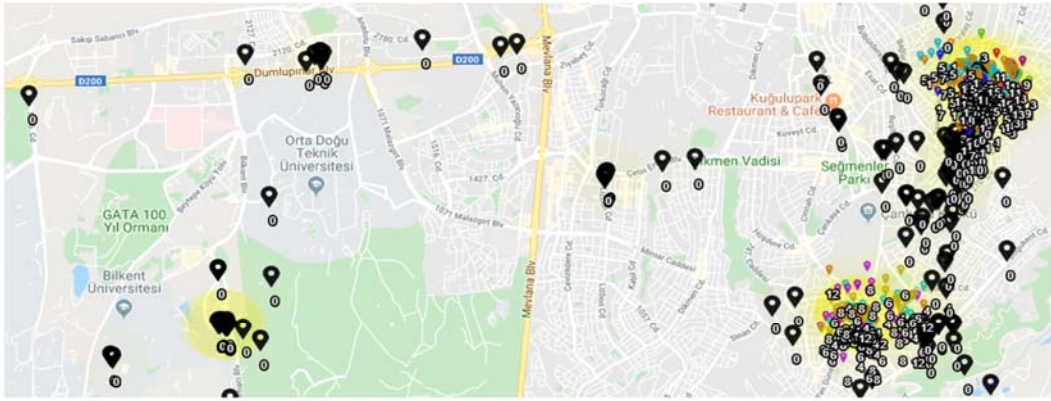
Daha sonra 2 haftalık kombinasyonlar şeklinde oluşturulan konum verileri üzerinde ST-DBSCAN algoritması uygulanmış olup, takip edilen nesnenin konum davranışlarını düzgün şekilde ortaya koyan girdi parametreleri toplanmıştır. 2 haftalık veriler üzerinden elde edilen rutinlere göz atıldığında, takip cihazı taşıyan kişiye ait evde zaman geçirme rutinleri ile işte zaman geçirme rutinleri tam olarak tespit edilebilmiştir. ST-DBSCAN algoritmasının girdi parametrelerinden birisi olan, iki nokta arasındaki zaman farkı, genel olarak takip cihazının veri gönderme sıklığının 2



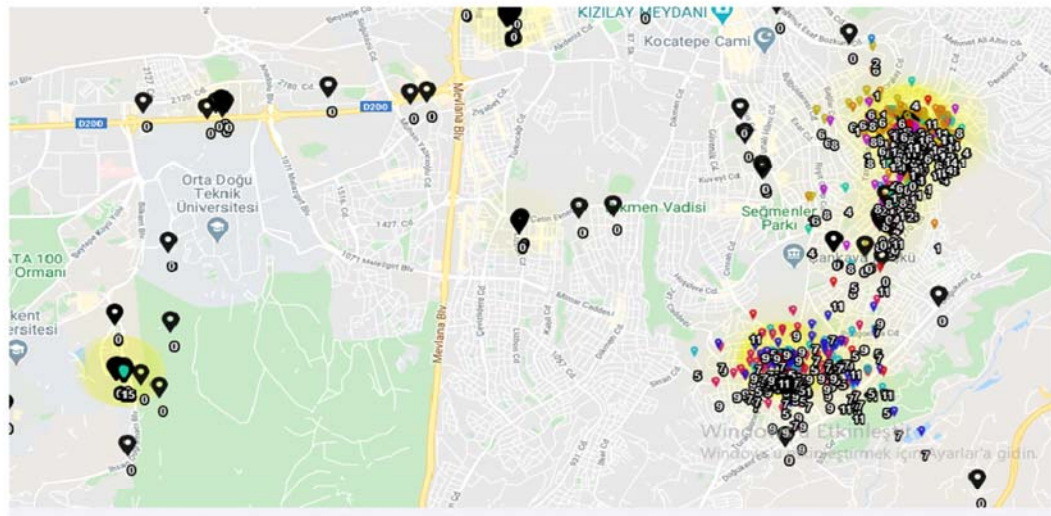
Şekil 5. Beş dakikalık veri kümesinden 10 dakikalık veri elde yöntemi
(10-minute data acquisition method from a 5-minute dataset)



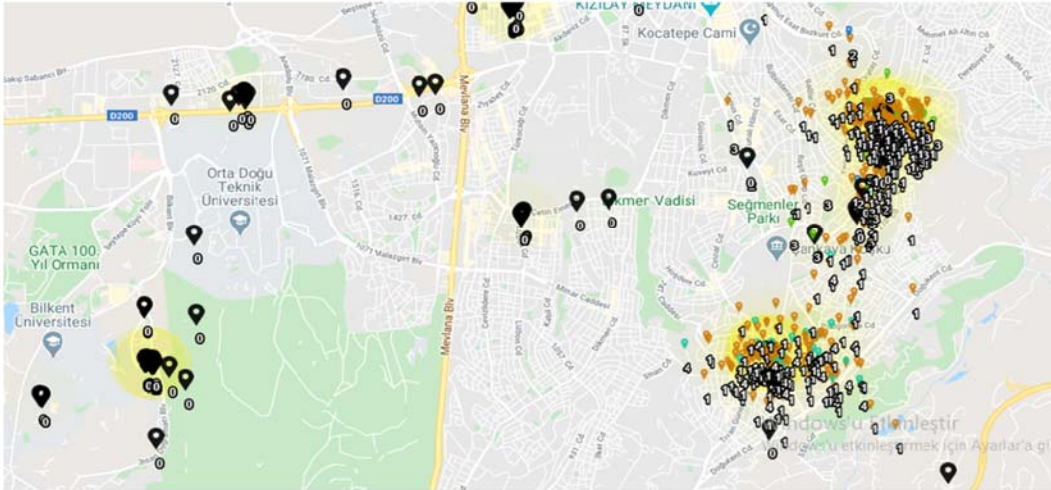
Şekil 6. Dakika bazlı haftalık konum verisinin gösterimi (Representation of minute-based weekly location data)



(a) Epsilon1 = 800, Epsilon2 = 20, MinPoints = 8



(b) Epsilon1 = 1500, Epsilon2 = 30, MinPoints = 10



(c) Epsilon1 = 2000, Epsilon2 = 40, MinPoints = 15

Şekil 7. ST-DBSCAN algoritmasının farklı parametrelere göre sonuçlarının harita üzerinde gösterimi
(Map representation of the results of ST-DBSCAN algorithm with different parameters)

ile 4 katı şeklinde seyretmiştir. Tespit edilen rutin saatlerde girdi parametresi kadar fark olabileceği görülmüştür. Bu

parametrelerin belirlenmesi sırasında oluşan konum davranışı kümeleri, takip cihazı taşıyan kişi tarafından onayı

alınarak etiketlenmiştir. Toplanan 4 haftalık verinin 2 haftalık kombinasyonları şeklinde 6 farklı bilgi elde edilmiştir. Bu verilerin 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 60 dakika aralıklarla veriler gönderen varyasyonları da göz önüne alındığında, 42 farklı ST-DBSCAN algoritması girdisi etiketlenmiştir.

Tablo 5 üzerinde 5 dakika aralıklar ile toplanmış birinci ve dördüncü hafta verilerine ST-DBSCAN algoritması uygulanmış olup, algoritma girdileri olan Epsilon1 değeri 800 seçilmiş olup, Epsilon2 değeri 20 ve MinPoints ise 8 olarak seçilmiştir. Bu işlem sonrasında elde edilen sonuç cihazı taşıyan nesneye ait rutinleri ortaya çıkarmıştır. Tablo 5 üzerinde küme numaraları nesneye ait rutinleri numaralandırır iken, başlangıç zamanı ve bitiş zamanı bu rutinlerin hangi gün ve saat aralıklarında olduğu göstermektedir. Öte yandan, Tablo 5 üzerindeki enlem, boylam ve açık adres bilgisi kısmı ise belirlenen rutinlerin alansal olarak merkez noktasını göstermektedir. Verilerin etiketlenmesi sırasında, doğru bilgilerinin elde edilip edilmediğinin kontrol edilmesi sırasında kolaylık olması açısından koordinat bilgileri ve açık adres bilgileri verilmiştir. Örnek olarak 13 numaralı rutin (diğer bir deyişle küme) pazartesi günü 07:59 ile 17:44 arasında ve açık adres olarak "508. Cd. Sancak Merkez Ankara / Türkiye" konumundadır. Veriler etiketlenir iken takip cihazını taşıyan

nesnenin bu dönemde bu aralıkta olup olmadığı bu şekilde kontrol edilmiştir.

Takip edilen nesneye ait rutinleri, Tablo 5 üzerinde görüldüğü üzere ST-DBSCAN algoritması başarılı şekilde tespit edebilmiştir. Tablo 5 üzerindeki veri elde edilirken girdi olarak Epsilon1 parametresi 800, Epsilon2 parametresi 20 ve MinPoints parametresi 8 olarak belirlenmiştir. Çıktı olarak nesnenin konum ve zaman açısından rutinleri elde edilmiştir. Veri gönderme sıklığı (5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 dakika) ve hafta kombinasyonlarından oluşan 42 farklı veri kümeleri teker teker Epsilon1, Epsilon2 ve MinPoints girdi parametreleri ile etiketlenmiştir.

ST-DBSCAN algoritmasının girdi parametreleri olan veri gönderme sıklığı ve veri paketi sayısına göre çıktı parametreleri üzerinde bir ilişki oluşmuştur (Tablo 6). Girdi parametreleri ile çıktı parametreleri arasındaki ilişki, her bir çıktı parametresi için farklıdır. Bu yüzden Epsilon1, Epsilon2 ve MinPoints parametreleri için farklı modeller geliştirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Veri gönderme sıklığı ve veri paketi sayısı girdi parametrelerine normalleştirme yöntemi uygulanmıştır. Normalleştirme yöntemi kapsamında, ortalama değer (mean value) ve standart sapması belirlenen girdi parametrelerinin standart skoru bulunmuş ve diğer adımlar bu değerler üzerinden

Tablo 5. Beş dakika aralıklarla toplanmış 1. hafta ve 4. hafta verileri üzerinde ST-DBSCAN algoritmasının tespit ettiği rutinler (The routines detected by ST-DBSCAN algorithm on the first and fourth week data collected at a five-minute interval)

Küme Numarası	Enlem	Boylam	Başlangıç Zamanı	Bitiş Zamanı	Açık Adres Bilgisi
1	39.90777	32.88257	Pazar 21:39	Pazartesi 07:56	244. Cd. Aşıkpaşa Merkez Ankara / Türkiye
2	39.90773	32.88234	Pazar 00:02	Pazar 15:12	Vedat Dalokay Cd. Aşıkpaşa Merkez Ankara / Türkiye
3	39.90762	32.88261	Cumartesi 21:19	Cumartesi 23:59	244. Cd. Aşıkpaşa Merkez Ankara / Türkiye
4	39.90603372	32.88077957	Cuma 18:58	Cumartesi 08:22	Vedat Dalokay Cd. Aşıkpaşa Merkez Ankara / Türkiye
5	39.87973	32.86152	Cuma 08:00	Cuma 17:57	Simon Bolivar Blv. Çankaya Merkez Ankara / Türkiye
6	39.90469559	32.88434387	Perşembe 18:01	Cuma 07:54	Şemsettin Günaltay Cd. Aşıkpaşa Merkez Ankara / Türkiye
7	39.8757	32.86401	Perşembe 08:13	Perşembe 17:48	508. Cd. Sancak Merkez Ankara / Türkiye
8	39.90769	32.88245	Çarşamba 19:51	Perşembe 08:12	Vedat Dalokay Cd. Aşıkpaşa Merkez Ankara / Türkiye
9	39.87921	32.8603	Çarşamba 08:06	Çarşamba 17:52	727. Sk. Yıldızevler Merkez Ankara / Türkiye
10	39.90775644	32.88251792	Salı 18:03	Çarşamba 07:53	Vedat Dalokay Cd. Aşıkpaşa Merkez Ankara / Türkiye
11	39.87550986	32.86393886	Salı 08:09	Salı 17:50	507. Sk. Sancak Merkez Ankara / Türkiye
12	39.90755	32.88247	Pazartesi 18:02	Salı 07:58	Vedat Dalokay Cd. Aşıkpaşa Merkez Ankara / Türkiye
13	39.87578878	32.86389119	Pazartesi 07:59	Pazartesi 17:44	508. Cd. Sancak Merkez Ankara / Türkiye

gerçekleştirilmiştir. Her bir çıktı parametresi için lineer regresyon ve ileri beslemeli yapay sinir ağlarından olan çok katmanlı perceptron (MLP) karşılaştırılarak incelenmiş ve en uygun model seçimi için karşılaştırılmıştır. Çok katmanlı perceptron olarak 1 ve 2 gizli katmana sahip ve her bir katmanında 50 sinir hücresi bulunan bir sinir ağı seçilmiştir. Hem lineer regresyon hem de çok katmanlı perceptron kullanılırken tahmin performans ölçütü olarak ortalama karesel hata (MSE) seçilmiştir. Çok katmanlı perceptron ağı içerisinde aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu seçilmiştir. Çıktı parametrelerine ilişkin modeller oluşturulurken, uygun dönem (epoch) ve öğrenme hızı (learning rate) sayılarının bulunabilmesi için öncelikle, epoch sayısı 2000 olarak belirlenmiştir. Test veri kümesi olarak 1.hafta – 4.hafta veri kombinasyonu ile 1. hafta – 3. hafta veri kombinasyonu seçilmiştir. Toplamda 14 farklı etiketlenmiş veriyi içermektedir. Eğitim kümesi olarak diğer ikili hafta kombinasyonları seçilmiştir. Eğitim kümesinin büyüklüğü ise 28 farklı etiketlenmiş veriden oluşmaktadır. Öğrenme işlemi sırasında eğitim kümesi 80-20 oranında olacak şekilde öğrenme ve test verisi olarak kullanılmıştır.

Epsilon1 çıktı parametresi için farklı öğrenme hızlarında, epoch sayısı 2000 olacak şekilde lineer regresyon ve çok katmanlı perceptron modelleri eğitime tabi tutulmuştur. Her bir eğitim işlemi çıktıları ile birlikte listelenmiştir (Tablo 7).

Eğitim çıktılarının ortalama karesel hata grafikleri incelenmiştir. Elde edilen ortalama karesel hata doğrulama

değerinin mümkün olduğunca ortalama karesel hata öğrenme değerine yakın olmasına dikkat edilmiştir. Uygun değerler seçilirken ortalama karesel hata doğrulama değerinin, ortalama karesel hata öğrenme değerini geçtiği nokta olan epoch değerleri alınmıştır. Ortalama karesel hata doğrulama rakamının diğer rakamı geçmediği ve belli bir epoch sayısından sonra rakamların birbirine yaklaşmalarının yavaşladığı noktalar uygun epoch sayısı olarak kabul edilmiştir. Modeli etkileyecek kadar bir değişim gözlenmediği durumlarda eğitim işlemi bitirilmiştir.

Epsilon1 parametresi için en uygun değerlere bakıldığında 1 gizli katmana sahip çok katmanlı perceptron modelinin hem ortalama karesel hata öğrenme – ortalama karesel hata doğrulama arasındaki fark hem de ortalama karesel hata test sayısı bakımından diğer modellerden daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Tablo 8).

Epsilon1 parametresi için elde edilen öğrenme modelleri 3 boyutlu düzlem üzerinde gösterilmiştir. Şekil 7 de görüleceği üzere en solda yer alan düzlem bilgisi lineer regresyon modeline aittir. Şekilde yer alan mavi noktalar ise eğitim verisinde kullanılan etiketlenmiş verilerdir. Lineer regresyon, düzleminin çoğu noktasına temas dahi edemediği ve elde edilen ortalama karesel hata test rakamının da göz önüne alındığında doğrusal olmayan bir çözüm gerektirdiği gözükülmektedir. En sağda yer alan şekil ise 2 gizli katmanlı çok katmanlı perceptron modeline aittir. Elde edilen düzlem doğrusal olmayan bir çözüm olsa da ortalama karesel hata

Tablo 6. Birinci hafta - dördüncü hafta verileri üzerinde etiketlenen ST-DBSCAN girdi parametreleri (ST-DBSCAN input parameters tagged on first and fourth week data)

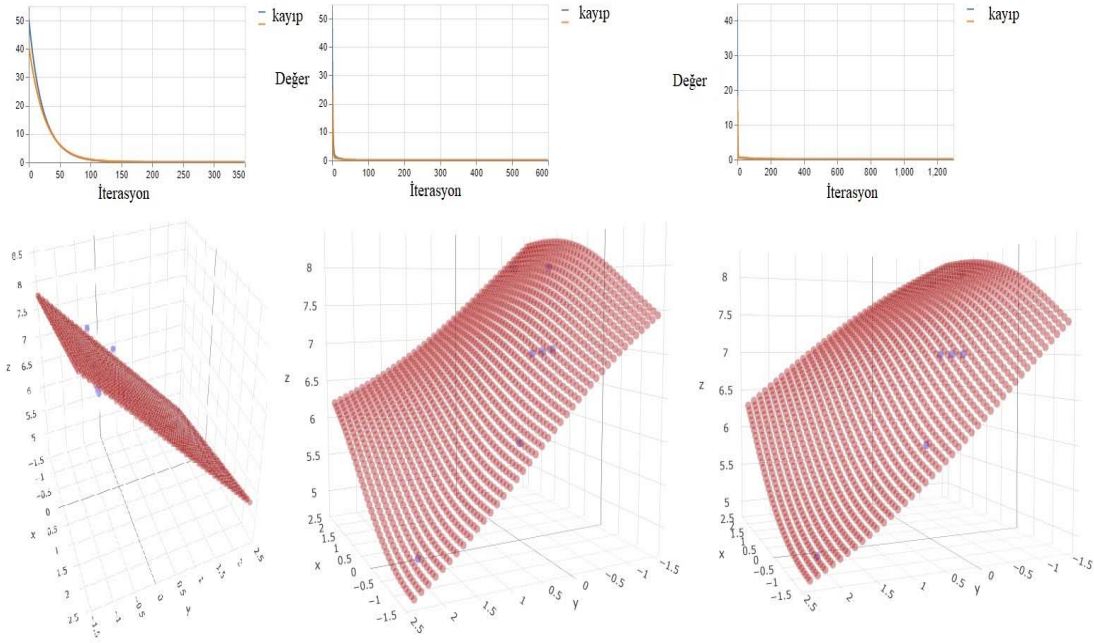
Veri Gönderme Sıklığı	Veri Paketi Sayısı	Epsilon1	Epsilon2	MinPoints
5	2811	800	20	8
10	1458	800	35	8
15	988	1500	50	7
20	830	2000	60	7
25	700	1000	65	7
30	605	800	75	6
60	317	800	140	5

Tablo 7. Epsilon 1 parametresi için model sonuçları (Model results for the Epsilon 1 parameter)

Model	Dönem	Öğrenme Hızı	Ortalama Karesel Hata Öğrenme	Ortalama Karesel Hata Test	Ortalama Karesel Hata Doğrulama
Lineer Regresyon	2000	0.01	120689.718	143814.34	87519.234
Lineer Regresyon	2000	0.001	125153.710	160592.890	91029.031
Lineer Regresyon	2000	0.0001	625451.875	764018.687	586725.625
1 Gizli Katman	2000	0.01	111643.992	132687.281	84659.296
1 Gizli Katman	2000	0.001	22599.337	18572.791	24141.367
1 Gizli Katman	2000	0.0001	49646.355	52899.167	19508.382
2 Gizli Katman	2000	0.01	137500.031	180238.109	111388.906
2 Gizli Katman	2000	0.001	124365.593	160012.359	101006.593
2 Gizli Katman	2000	0.0001	124425.734	160280.453	101052.671

Tablo 8. Epsilon1 parametresine ilişkin uygun değerler (Appropriate values for the epsilon1 parameter)

Model	Dönem	Öğrenme Hızı	Ortalama Karesel Hata Öğrenme	Ortalama Karesel Hata Test	Ortalama Karesel Hata Doğrulama
Lineer Regresyon	500	0.01	120852.9375	146024.953125	87930.3671875
1 Gizli Katman	1600	0.001	23497.578125	19417.998046875	23674.9140625
2 Gizli Katman	800	0.0001	128729.8984375	171832.953125	101036.1875

**Şekil 8.** Epsilon1 parametresi için ortalama karesel hata grafiği (Average square error graph for parameter Epsilon1)

öğrenme – ortalama karesel hata doğrulama arasındaki farkın istenilen epoch sayısında kapanmadığı ve öğrenme işleminin eksik tamamlandığı gözlemlenmiştir. Şekil 8 de ortada yer alan kısım 1 gizli katmanlı çok katmanlı perceptron modeline aittir. Elde edilen düzlem büyük oranda öğrenme verilerine yakın ve aynı zamanda ortalama karesel hata öğrenme – ortalama karesel hata doğrulama arasındaki fark diğer modellere göre çok daha düşüktür. Bu şartlar altında Epsilon1 parametresinin tahmini için 1 gizli katmana sahip çoklu katman perceptron modelinin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 9 üzerinde kullanılan veriler başlığı altında 2 hafta boyunca toplanan konum verilerinin hangi haftalara ait olduğu yer almaktadır. Veri gönderme sıklığı ve veri paketi sayısı çok katmanlı algıyıcılar için kullanılan özelliklerdir (features). Etiketli veriler Epsilon1 başlığı altında ise daha önceden ST-DBSCAN algoritması için etiketlenmiş veri (labeled data) yer almaktadır. Doğrusal regresyon, 1 gizli katman sahip MLP ve 2 gizli katmana sahip MLP başlıkları altında ise yapay sinir ağlarına girdi verileri verildiğinde çıktı olarak elde edilen değerler yer almaktadır. Epsilon2 çıktı parametresi de farklı öğrenme hızlarında epoch sayısı 2000 olacak şekilde eğitime tabi tutulmuştur. Her bir işlem

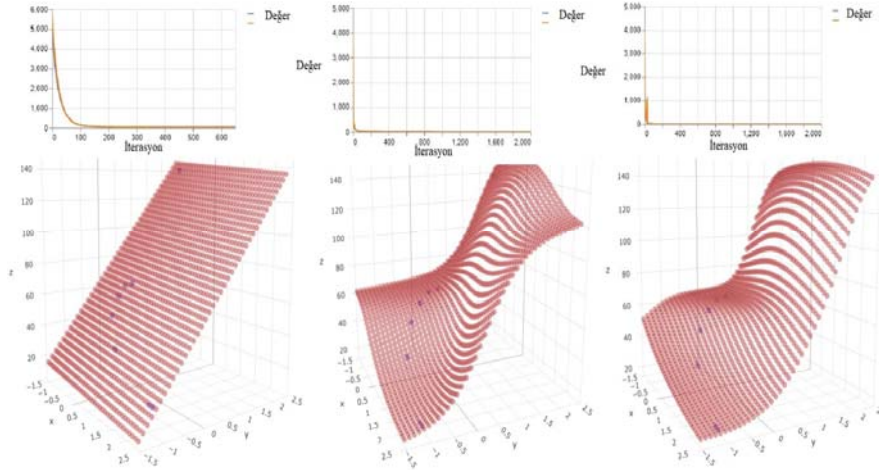
için eğitim çıktıları listelenmiştir (Tablo 10). Eğitim işlemleri sonrasında ortalama karesel hata grafikleri incelenmiştir. Ortalama karesel hata grafiği üzerinde eğitim rakamlarının yavaşladığı ya da ortalama karesel hata öğrenme değeri ile ortalama karesel hata doğrulama değerlerinin birbirine yaklaştığı noktadaki epoch değerleri uygun kabul edilmiştir.

Epsilon2 çıktı parametresi için lineer regresyon model performansının yapay sinir ağları modellerine göre daha kötü olduğu görülmüştür (Tablo 11). 1 gizli katmana sahip çok katmanlı perceptron modelinde ortalama karesel hata test değerinin en düşük değerde olmasına karşın ortalama karesel hata öğrenme ile ortalama karesel hata doğrulama değerleri, 2 katmana sahip çok katmanlı perceptron modelinden daha yüksek değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir. 2 katmana sahip çok katmanlı perceptron modelinin en düşük doğrulama değerine sahip olduğu görülmüştür (Tablo 10).

Epsilon 2 değeri için en solda lineer regresyon modeli, ortada 1 gizli katmana sahip çok katmanlı perceptron modeli ve en sağda ise 2 gizli katman sahip çok katmanlı perceptron modeline ait ortalama karesel hata grafiği ve 3 boyutlu ortamda elde edilen düzlem kesitleri Şekil 9 üzerinde

Tablo 9. Etiketli Epsilon1 parametresi ile modellerden elde edilen sonuçların karşılaştırması
(Comparison of the results obtained from the models with the labeled Epsilon1 parameter)

Kullanılan Veriler	Veri Gönderme Sıklığı	Veri Paketi Sayısı	Etiketli Veriler Epsilon1	Doğrusal Regresyon	1 Gizli Katmana Sahip MLP	2 Gizli Katmana Sahip MLP
1. hafta ve 2. hafta	5	2760	800	772	844	1145
1. hafta ve 2. hafta	10	1446	800	1111	844	1145
2. hafta ve 3. hafta	5	2747	800	776	844	1145
2. hafta ve 3. hafta	10	1436	800	1114	844	1145
2. hafta ve 4. hafta	15	1000	800	1184	1212	1145
2. hafta ve 4. hafta	20	837	1500	1170	1714	1145
3. hafta ve 4. hafta	15	989	1500	1187	1263	1145
3. hafta ve 4. hafta	20	828	1500	1173	1711	1145
3. hafta ve 4. hafta	25	692	800	1151	916	874

**Şekil 9.** Epsilon2 parametresi için ortalama karesel hata grafiği (Average square error graph for parameter Epsilon2)

gösterilmiştir. Lineer regresyon modeli hariç diğer modeller birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu kapsamda, Epsilon2 parametresi için 2 katmana sahip çok katmanlı perceptron modelinin en uygun seçenek olduğu sonucuna verilmiştir. Tablo 12 üzerinde kullanılan veriler başlığı altında 2 hafta boyunca toplanan konum verilerinin hangi haftalara ait olduğu yer almaktadır. Veri gönderme sıklığı ve veri paketi sayısı çok katmanlı algıyıcılar için kullanılan özelliklerdir (features). Etiketli veriler Epsilon2 başlığı altında ise daha önceden ST-DBSCAN algoritması için etiketlenmiş veri (labeled data) yer almaktadır. Doğrusal regresyon, 1 gizli katman sahip MLP ve 2 gizli katmana sahip MLP başlıkları altında ise yapay sinir ağlarına girdi verileri verildiğinde çıktı olarak elde edilen değerler yer almaktadır. MinPoints parametresi de farklı öğrenme hızlarında ve epoch sayısı 2000 olacak şekilde eğitilmiştir. Eğitim verileri çıktıları listelenmiştir (Tablo 13).

Ortalama karesel hata öğrenme ve ortalama karesel hata doğrulama arasındaki fark ile ortalama karesel hata test değerleri bakımından elde edilen değerler birbirine çok yakın bulunmuştur. MinPoints parametresi için değerler çok fark etmese de, 1 gizli katmana sahip çok katmanlı perceptron modeli en uygun model olarak seçilmiştir (Tablo 14). MinPoints parametresi için en solda lineer regresyon, ortada 1 katmana sahip çok katmanlı perceptron modeli ve en sağda 2 katmana sahip çok katmanlı perceptron modeli ortalama karesel hata grafiği ve 3 boyutlu düzlemde elde edilen düzlemlerden bir kesit gösterilmiştir (Şekil 10). Doğrusal olmayan çözümlerden, 1 katmana sahip çok katmanlı perceptron modelinin daha kapsayıcı olduğu görülmektedir. Tablo 15 üzerinde kullanılan veriler başlığı altında 2 hafta boyunca toplanan konum verilerinin hangi haftalara ait olduğu yer almaktadır. Veri gönderme sıklığı ve veri paketi sayısı çok katmanlı algıyıcılar için kullanılan özelliklerdir

Tablo 10. Epsilon 2 parametresi için model sonuçları (Model results for the Epsilon 2 parameter)

Model	Dönem	Öğrenme Hızı	Ortalama Kareysel Hata Öğrenme	Ortalama Kareysel Hata Test	Ortalama Kareysel Hata Doğrulama
Lineer Regresyon	2000	0.01	24.5309	16.8554	29.7313
Lineer Regresyon	2000	0.001	40.1407	31.8955	44.4264
Lineer Regresyon	2000	0.0001	2158.7526	2286.1645	2494.3520
1 Gizli Katman	2000	0.01	2.1966	6.0999	2.2535
1 Gizli Katman	2000	0.001	13.3279	9.9342	15.7525
1 Gizli Katman	2000	0.0001	153.5653	143.7384	188.4122
2 Gizli Katman	2000	0.01	0.1688	6.3210	0.1721
2 Gizli Katman	2000	0.001	2.5615	5.6403	2.6898
2 Gizli Katman	2000	0.0001	142.7105	132.5822	173.0727

Tablo 11. Epsilon 2 parametresine ilişkin uygun değerler (Appropriate values for the epsilon2 parameter)

Model	Dönem	Öğrenme Hızı	Ortalama Kareysel Hata Öğrenme	Ortalama Kareysel Hata Test	Ortalama Kareysel Hata Doğrulama
Lineer Regresyon	650	0.01	24.6302	16.8076	29.9718
1 Gizli Katman	2000	0.01	2.1966	6.0999	2.2535
2 Gizli Katman	2000	0.01	0.1688	6.3210	0.1721

Tablo 12. Etiketli Epsilon2 parametresi ile modellerden elde edilen sonuçların karşılaştırması (Comparison of the results obtained from the models with the labeled Epsilon2 parameter)

Kullanılan Veriler	Veri Gönderme Sıklığı	Veri Paketi Sayısı	Etiketli Veriler Epsilon2	Doğrusal Regresyon	1 Gizli Katmana Sahip MLP	2 Gizli Katmana Sahip MLP
1. hafta ve 2. hafta	5	2760	20	20	22	19
1. hafta ve 2. hafta	10	1446	35	34	34	37
2. hafta ve 3. hafta	5	2747	20	20	22	19
2. hafta ve 3. hafta	10	1436	35	34	35	37
2. hafta ve 4. hafta	15	1000	50	45	45	49
2. hafta ve 4. hafta	20	837	60	55	54	56
3. hafta ve 4. hafta	15	989	50	45	45	50
3. hafta ve 4. hafta	20	828	60	55	54	56
3. hafta ve 4. hafta	25	692	65	65	64	63

(features). Etiketli veriler MinPoints başlığı altında ise daha önceden ST-DBSCAN algoritması için etiketlenmiş veri (labeled data) yer almaktadır. Doğrusal regresyon, 1 gizli katman sahip MLP ve 2 gizli katmana sahip MLP başlıkları altında ise yapay sinir ağlarına girdi verileri verildiğinde çıktı olarak elde edilen değerler yer almaktadır. Çalışma kapsamında, ST-DBSCAN girdi parametrelerini tahmin edecek modeller seçildikten sonra bu modellerin konum rutinlerini bulması beklenmektedir. Takip cihazının veri gönderme sıklığı ve toplam gönderilen veri paketi sayısı, ST-DBSCAN algoritmasının girdisi olan Epsilon1, Epsilon2 ve

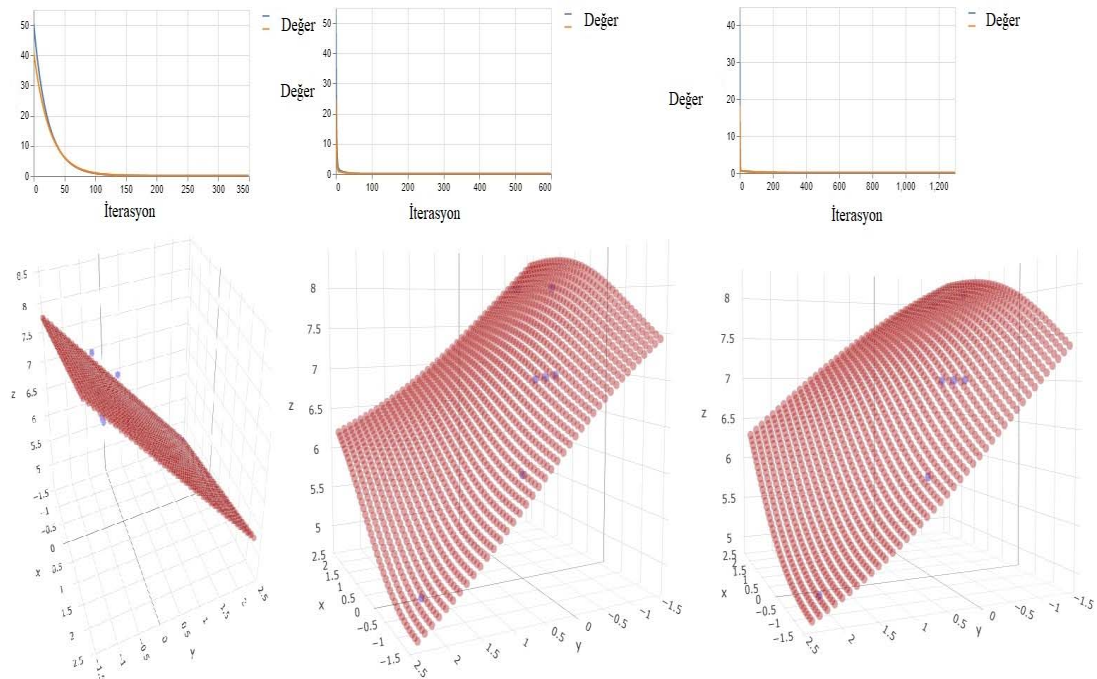
MinPoints parametrelerini tahmin için kullanılmıştır. Takip cihazından alınan konum ve zaman verileri ise ST-DBSCAN algoritmasının bir diğer girdisi olarak belirlenmiştir. Şekil 11'de gösterilen bir dizi yöntem uygulanarak, çoğu takip cihazında ortak olan veriler kullanılarak, 2 haftalık eğitim verisi ile takip edilen nesneye ait rutinlerin elde edilebileceği görülmektedir. Burada elde edilen rutin bilgileri içerisinde kalan bütün konum ve zaman verileri, takip edilen nesneye ait normal veriler olarak gösterilebilir. Bu rutin verilerin desenine uymayan bir veri ile karşılaşıldığında, bu veri anormal bir davranış ya da anormallik olarak işaretlenebilir.

Tablo 13. MinPoints parametresi için model sonuçları (Model results for the MinPoints parameter)

Model	Dönem	Öğrenme Hızı	Ortalama Karesel Hata Öğrenme	Ortalama Karesel Hata Test	Ortalama Karesel Hata Doğrulama
Lineer Regresyon	2000	0.01	0.0726	0.0756	0.0873
Lineer Regresyon	2000	0.001	0.0888	0.0932	0.1092
Lineer Regresyon	2000	0.0001	625315	763753.125	586397.5
1 Gizli Katman	2000	0.01	0.0553	0.0578	0.0677
1 Gizli Katman	2000	0.001	0.0754	0.0767	0.0826
1 Gizli Katman	2000	0.0001	49155.6367	52632.2031	19473.8339
2 Gizli Katman	2000	0.01	0.0548	0.0571	0.0667
2 Gizli Katman	2000	0.001	0.1318	0.1387	0.1631
2 Gizli Katman	2000	0.0001	124434.0390	160339.9062	101014.5625

Tablo 14. MinPoints parametresine ilişkin uygun değerler (Appropriate values for the MinPoints parameter)

Model	Dönem	Öğrenme Hızı	Ortalama Karesel Hata Öğrenme	Ortalama Karesel Hata Test	Ortalama Karesel Hata Doğrulama
Lineer Regresyon	350	0.01	0.0779	0.0800	0.0895
1 Gizli Katman	600	0.01	0.0531	0.0554	0.0648
2 Gizli Katman	1300	0.01	0.0554	0.0577	0.0672

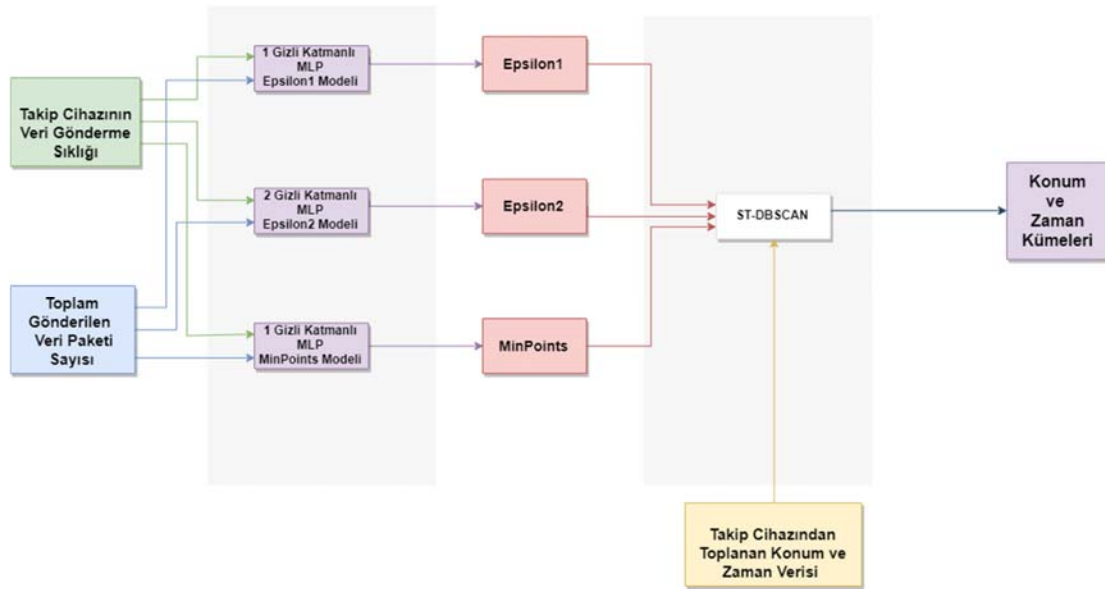
**Şekil 10.** MinPoints parametresi için ortalama karesel hata grafiği (Average square error graph for MinPoints parameter)

Normal konum davranışları bilinen takip nesnesinin, anlık olarak gelen konum verileri bu konum-zaman örüntüleri ile

karşılaştırılabilir ve normal davranışlar dışında kalan kısımlar var ise anormallik tespiti yapılabilir.

Tablo 15. Etiketli MinPoints parametresi ile modellerden elde edilen sonuçların karşılaştırması
(Comparison of the results obtained from the models with the labeled MinPoints parameter)

Kullanılan Veriler	Veri Gönderme Sıklığı	Veri Paketi Sayısı	Etiketli Veriler MinPoints	Doğrusal Regresyon	1 Gizli Katmana Sahip MLP	2 Gizli Katmana Sahip MLP
1. hafta ve 2. hafta	5	2760	8	8.08	8.11	7.52
1. hafta ve 2. hafta	10	1446	8	7.59	7.68	7.26
2. hafta ve 3. hafta	5	2747	8	8.08	8.11	7.52
2. hafta ve 3. hafta	10	1436	8	7.58	7.68	7.26
2. hafta ve 4. hafta	15	1000	7	7.25	7.24	7.04
2. hafta ve 4. hafta	20	837	7	6.98	6.90	6.89
3. hafta ve 4. hafta	15	989	7	7.25	7.23	7.04
3. hafta ve 4. hafta	20	828	7	6.97	6.89	6.89
3. hafta ve 4. hafta	25	692	7	6.70	6.57	6.74

**Şekil 11.** Uygulanan yöntemlerin genel görünümü (General view of applied methods)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma sonucunda ST-DBSCAN algoritması ile konum ve zaman verilerine ilişkin rutinlerin tespit edilebileceği görülmüştür. Ayrıca, çalışma kapsamında kullanılan takip cihazı gibi farklı veri gönderme sıklığına ayarlanabilen cihazlardan elde edilen verilerde, ST-DBSCAN algoritmasının kullanılabilmesi için girdi parametrelerini tahmin edebilecek bir model geliştirilebileceği görülmüştür. Bu çalışma ile Eps ve MinPts girdi parametrelerini belirlemek için sezgisel yöntemlerin kullanılabilmesi ve çok katmanlı perceptron uygulamalarının doğrusal olmayan

verilerin üzerinde lineer regresyon uygulamasına göre daha verimli çalıştığı ve daha düzgün tahminlerde bulunduğu görülmüştür. Ayrıca, dışardan herhangi bir müdahaleye gerek kalmadan, takip edilen nesnenin rutinlerini ortaya çıkarabilecek bir yöntemler dizisi oluşturulmuştur. Bu çalışma kapsamında, zaman ve koordinat verisi olarak adlandırılan nesneye ait zamansal verilerden kümeleme algoritmaları yardımı ile benzer olanlar gruplandırılmıştır. Normal olarak nitelendirilen kümeler dışında bir veri oluştuğunda ise anormallik olarak tanımlanmıştır. Üzerinde çalışılan veri yapısı tüm takip cihazları için ortak olduğu için, bu çalışma kapsamında önerilen yöntem çok farklı alanlarda

kullanılabilir. Ayrıca, önerilen yöntem farklı gruplar için (çocuk, yaşlı, hasta vb.) erken uyarı sistemi olarak kullanılabilir. Gelecek çalışmalar kapsamında, derin öğrenme yaklaşımları kullanılarak çalışmada kullanılan verilerle konum kümeleri tahmin edilebilir. Çalışma sonucunda önerilen anormallik tespiti kısmı daha büyük veri kümelerine uygulanıp anlık olarak tespiti kontrol edilebilir. Bunun için tespit edilen kümelere ilişkin olarak kümelerin ne kadar dışındaki davranışların anormallik kapsamına gireceği konusunda bir öneri geliştirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Topuz M.D., Makine Öğrenmesi Algoritmaları ve Anomali Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
2. Bilgin T.T., Çamurcu Y., DBSCAN, OPTICS ve K-Means Kümeleme Algoritmalarının Uygulamalı Karşılaştırılması, *Politeknik Dergisi*, 8 (2), 139-145, 2005.
3. Birant D., Kut A., ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial-temporal data, *Data and Knowledge Engineering*, 60, 208-221, 2007.
4. Alpaydın E., Yapay Öğrenme (çev. E. Alpaydın), Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, 2018.
5. Duan L., Xu L., Guo F., Lee J., Yan B., A local-density based spatial clustering algorithm with noise, *Information Systems*, 32 (7), 978-986, 2007.
6. Chandola V., Banerjee A., & Kumar V., Anomaly detection: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 41 (3), 15, 2009.
7. Kang M., Machine Learning: Anomaly Detection. In M. G. Pecht and M. Kang (Eds.), *Prognostics and Health Management of Electronics: Fundamentals, Machine Learning, and the Internet of Things*. John Wiley and Sons, NJ, 131-162, 2018.
8. Hong Z., Chen Y., and Mahmassani H., Recognizing Network Trip Patterns Using a Spatio-Temporal Vehicle Trajectory Clustering Algorithm, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2548 – 2557, 2017.
9. Yuan J., Zheng Y., Zhang C., Xie W., Xie X., Sun G., and Huang Y., T-Drive: Driving Directions Based on Taxi Trajectories, *Data and Knowledge Engineering*, 87, 357-373, 2013.
10. Lee J., and Whang K., Trajectory Clustering: A Partition-and-Group Framework, *SIGMOD International Conference on Management of Data*, 593-604, 2007.
11. Won J., Kim S., Baek J., and Lee J., Trajectory Clustering in Road Network Environment, *IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining*, 299-305, 2009.
12. Zhang D., Lee K., and Lee I., Mining Medical Periodic Patterns from Spatio-Temporal Trajectories. *Lecture Notes in Computer Science*, 123–133, 2018.
13. Gong S., Cartledge J., Bai R., Yue Y., Li Q., and Qiu G., Extracting Activity Patterns From Taxi Trajectory Data: A Two-Layer Framework Using Spatio-Temporal Clustering, *Bayesian Probability and Monte Carlo Simulation. International Journal of Geographical Information Science*, 1–25, 2019.
14. Wang Z., Hu J., and Fan Q., Extracting the Main Routes and Speed Profiles Between Two Locations from Massive Uncertain Historical Trajectories, *2018 International Symposium in Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*, 2018.
15. Wai K. P., and Nwe Aung T., Distance-based Clustering of Moving Objects' Trajectories from Spatiotemporal Big Data*, *2018 IEEE/ACIS 17th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, 2018.
16. Chimwayi K. B., and Anuradha J., Clustering West Nile Virus Spatio-temporal Data Using ST-DBSCAN, *Procedia Computer Science*, 132, 1218–1227, 2018.
17. Trisminingsih, R., & Shaztika, S. S., ST-DBSCAN clustering module in SpagoBI for hotspots distribution in Indonesia. In *2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 327-330, IEEE, 2016.
18. Wang S., Cai T., Eick C.F., New spatiotemporal clustering algorithms and their applications to ozone pollution. In: *Proceedings of the 2013 IEEE 13th International Conference on Data Mining Workshops, ICDMW 2013*, IEEE Computer Society, Washington, DC, 1061–1068, 2013.
19. Joshi D., Samal A., Soh L.K., Spatio-temporal polygonal clustering with space and time as first-class citizens, *Geoinformatica*, 17 (2), 387–412, 2013.
20. Wang M., Wang A., Li A., Mining spatial-temporal clusters from geo-databases. In: Li, X., Za'iane, O.R., Li, Z. (eds.) *ADMA 2006. LNCS (LNAI)*, Springer, Heidelberg, 4093, 263–270, 2006.
21. Chen T., Bowers K., Cheng T., Zhang Y., & Chen P., Exploring the homogeneity of theft offenders in spatio-temporal crime hotspots. *Crime Science*, 9 (1), 1-13, 2020.
22. Wang W., Du S., Guo Z., Luo L., Polygonal clustering analysis using multilevel graph-partition, *Trans. GIS*, 19 (5), 716–736, 2015.
23. Zhang Y., Eick C.F., Novel clustering and analysis techniques for mining spatiotemporal data. In: *Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL PhD Workshop, SIGSPATIAL PhD 2014*, 2:1–2:5. ACM, New York, 2014.
24. Damiani M.L., Issa H., Fotino G., Heurich M., Cagnacci F., Introducing 'presence' and 'stationarity index' to study partial migration patterns: an application of a spatio-temporal clustering technique, *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 30 (5), 907–928, 2016.
25. Izakian H., Pedrycz W., Jamal I., Clustering spatiotemporal data: an augmented fuzzy c-means, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 21 (5), 855–868, 2013.
26. Izakian H., Pedrycz W., Anomaly detection and characterization in spatial time series data: a cluster-centric approach, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 22 (6), 1612–1624, 2014.
27. Lai W., Zhou M., Hu F., Bian K., & Song Q., A new DBSCAN parameters determination method based on

- improved MVO. *IEEE Access*, 7, 104085-104095, 2019.
28. Iyengar V.S., On detecting space-time clusters. In: *Proceedings of the Tenth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 587–592. ACM, 2004.
 29. Schubert E., Zimek A., Kriegel H.P., Local outlier detection reconsidered: a generalized view on locality with applications to spatial, video, and network outlier detection. *Data Min. Knowl. Disc.* 28 (1), 190–237, 2014.
 30. Mohan P., Shekhar S., Shine J.A., Rogers J.P., Cascading spatio-temporal pattern discovery, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 24 (11), 1977–1992, 2012.
 31. Shekhar S., Evans M.R., Kang J.M., Mohan P., Identifying patterns in spatial information: a survey of methods. *Wiley Interdisc. Rev.: Data Mining Knowl. Discov.*, 1 (3), 193–214, 2011.
 32. Nanni M., Pedreschi D., Time-focused clustering of trajectories of moving objects, *J. Intell. Inf. Syst.*, 27 (3), 267–289, 2006.
 33. Li Z., Spatiotemporal pattern mining: algorithms and applications. In: Aggarwal, C.C., Han, J. (eds.) *Frequent Pattern Mining*, Springer, Cham, 283–306, 2014.
 34. Palma A.T., Bogorny V., Kuijpers B., Alvares L.O., A clustering-based approach for discovering interesting places in trajectories. In: *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Applied Computing, SAC 2008*, ACM, New York, 863–868, 2008.
 35. Gudmundsson J., van Kreveld M., Computing longest duration flocks in trajectory data. In: *Proceedings of the 14th Annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, GIS 2006*, ACM, New York, 35–42, 2006.
 36. Jeung H., Yiu M.L., Zhou X., Jensen C.S., Shen H.T., Discovery of convoys in trajectory databases, *Proc. VLDB Endow*, 1 (1), 1068–1080, 2008.
 37. Li Z., Ding B., Han J., Kays R., Swarm: mining relaxed temporal moving object clusters, *Proc. VLDB Endow*, 3 (1–2), 723–734, 2010.
 38. Scitovski R., Sabo K., DBSCAN-like clustering method for various data densities, *Pattern Analysis and Applications*, 1-14, 2019.
 39. Wang X., Zhang Y., Liu H., Wang Y., Wang L., & Yin B., An Improved Robust Principal Component Analysis Model for Anomalies Detection of Subway Passenger Flow, *Journal of Advanced Transportation*, 2018.
 40. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X., A density-based algorithm for discovering clusters a density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In E. Simoudis, J. Han, U. Fayyad (Eds.). *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. American Association for Artificial Intelligence, Portland, 226-231, 1996.
 41. Pasin O., Ankarali H., Usage of Kernel K-Means and DBSCAN Cluster Algorithms in Health Studies: An Application, *Clin Res Trials*, 1, doi: 10.15761/CRT.1000116, 2015.
 42. Çakıt E., Durgun B., & Cetik O., A neural network approach for assessing the relationship between grip strength and hand anthropometry, *Neural Network World*, 25 (6), 603, 2015.
 43. Çakıt E., Karwowski W., Estimating electromyography responses using an adaptive neuro-fuzzy inference system with subtractive clustering, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 27 (4), 177-186, 2017.
 44. Başoğlu B., Bulut M., Development of a hybrid system based on neural networks and expert systems for shortterm electricity demand forecasting, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (2), 575-583, 2017.
 45. Yıldız O., Melanoma detection from dermoscopy images with deep learning methods: A comprehensive study, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2241-2260, 2019.
 46. Çakıt E., Karwowski W., Understanding the social and economic factors affecting adverse events in an active theater of war: a neural network approach. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* Springer, Cham, 215-223, 2017.
 47. Choubin B., Khalighi-Sigaroodi S., Malekian A., & Kişi Ö., Multiple linear regression, multi-layer perceptron network and adaptive neuro-fuzzy inference system for forecasting precipitation based on large-scale climate signals, *Hydrological Sciences Journal*, 61 (6), 1001-1009, 2016.



Design of circulating microfluidic bioreactor for circulating tumor cells research and shear stress effects on breast cancer (MDA-MB-231) cell viability

Semih Çalamak*^{id}

Department of Basic Pharmaceutical Sciences, Faculty of Pharmacy, Hacettepe University, Ankara 06100, Turkey.

Highlights:

- Circulating tumor cell model
- This model is basically a mimic for the cellular microenvironment as the cell flows such as in hemodynamic circulation.
- This work hints a unique direction that cancer cells lose their viability during circulating in flow.

Keywords:

- Circulating microfluidic bioreactor
- Shear stress
- Breast cancer
- Cell viability

Article Info:

Research Article

Received: 02.04.2020

Accepted: 31.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.713409

Correspondence:

Author: Semih Çalamak

e-mail:

semihcalamak@hacettepe.edu.tr

phone: +90 312 305 1499

Graphical/Tabular Abstract

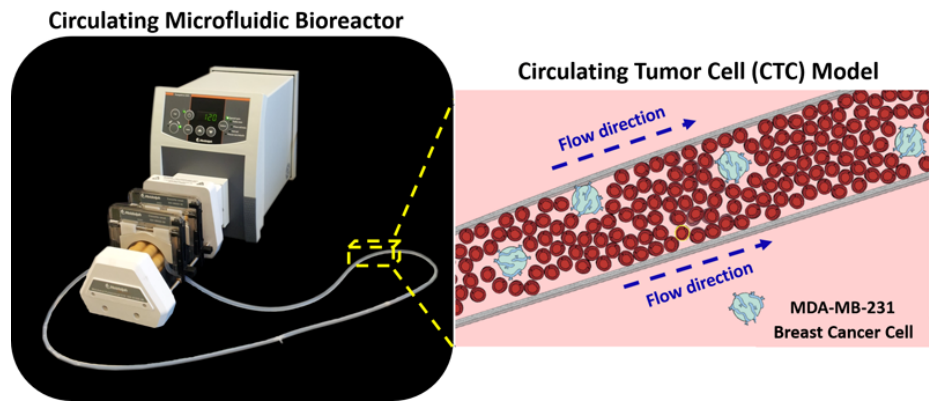


Figure A. Circulating microfluidic bioreactor and circulating tumor cell model

Purpose: The purpose of the study is to design a broadly applicable experimental method to model hemodynamic biomechanical factors (fluid flow and shear stress) under well-controlled parameters and investigate how hemodynamic shear stress affects MDA-MB-231 breast cancer cell viability.

Theory and Methods: In this study, a peristaltic circulating flow bioreactor is designed and applied to MDA-MB-231 breast cancer cells to mimic the fluid dynamics of hemodynamic circulation. For this purpose, we designed a bioreactor system to evaluate the effect of hemodynamic shear stress on a model system to represent the morphogenetic changes of MDA-MB-231 breast cancer cells as an *in-vitro* cancer bioreactor model. To mimic hemodynamic conditions, we first theoretically evaluated and characterized the physical environmental parameters such as shear stress and velocity profiles in order to assess and predict their influence on cancer cells in peristaltic flow culture. During the circulation culture, MDA-MB-231 breast cancer cell viability was determined with MTT and live/dead analyzes under various hemodynamic shear stresses (33, 49 and 66 dyn cm⁻²) and circulation time (6, 12 and 24 h).

Results: MTT test results on MDA-MB-231 cells showed that cell viability decreased as hemodynamic shear stress and circulation time increased compared to breast cancer cells cultured under static conditions attached to the surface. Significant reductions in cell viability of up to 20% occurred as increased hemodynamic shear stress (66 dyn cm⁻²) and culture time (24 h) increased with flow rate.

Conclusion: Our model is a simplified version of blood circulation, simulating fluid shear stresses in absence of other cellular components with this system, the viability of cancer cells under hemodynamic flow conditions can be evaluated. Also, this system allows exploring the unknowns in circulating tumor cell heterogeneity.



Dolaşımdaki tümör hücreleri araştırmalarında kullanılmak üzere sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktörün tasarımı ve hemodinamik kayma gerilimi kuvvetlerinin meme kanseri (MDA-MB-231) hücre canlılığı üzerine etkisinin incelenmesi

Semih Çalamak*^{ID}

Hacettepe Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Eczacılık Temel Bilimleri Anabilim Dalı, 06100, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Dolaşımdaki tümör hücresi modeli
- Bu model temel olarak hemodinamik dolaşımda olduğu gibi hücresel mikroçevreyi taklit eder
- Bu çalışma, kanser hücrelerinin dolaşım sırasında hücre canlılıklarını kaybettiklerini işaret etmektedir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 02.04.2020
Kabul: 31.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.713409

Anahtar Kelimeler:

Sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör, kayma gerilimi, meme kanseri, hücre canlılığı

ÖZET

Kanser metastazı sırasında dolaşımdaki tümör hücreleri (CTC) mikro ortamlarında hidrostatik basınç ve kayma gerilimi gibi biyomekanik kuvvetlere maruz kalmaktadırlar. Bu faktörler kanser hücresinin heterojenitesinde önemli bir rol oynarken, hücre canlılığını da büyük oranda etkilemektedir. Bu çalışmada, CTC hücrelerinin metastaz sürecinde maruz kaldıkları hemodinamik kayma gerilimini taklit etmek için sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör geliştirilmiş ve mikroakışkan biyoreaktörün hız, duvar basıncı ve kayma gerilimleri için teorik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, mikroakışkan kanal boyutları sabit tutularak üç farklı akış hızında (6, 9 ve 12 mL dk⁻¹) artan hemodinamik kayma gerilimlerinde ve sirkülasyon zamanlarında (6, 12 ve 24 saat) MDA-MB-231 meme kanseri hücrelerinin canlılıkları MTT ve Canlı/Ölü testi ile incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, statik koşullarda kültür edilen meme kanseri hücrelerine kıyasla, hücreler üzerindeki hemodinamik kayma gerilimi ve sirkülasyon süresi arttıkça hücre canlılığının azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte yüksek hemodinamik kayma gerilimi (66 dyn cm⁻²) ve uzun sirkülasyon süresinde (24 saat) hücre canlılığının %20'ye kadar düştüğü bildirilmiştir. Bu çalışma ile geliştirilen sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör ile kanser hücrelerinin hemodinamik akış koşullarında canlılıkları değerlendirilebileceği gibi fenotipik ve genotipik değişimler de incelenebilecektir.

Design of circulating microfluidic bioreactor for circulating tumor cells research and shear stress effects on breast cancer (MDA-MB-231) cell viability

H I G H L I G H T S

- Circulating tumor cell model
- This model is basically a mimic for the cellular microenvironment as the cell flows such as in hemodynamic circulation
- This work hints a unique direction that cancer cells lose their viability during circulating in flow

Article Info

Research Article
Received: 02.04.2020
Accepted: 31.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.713409

Keywords:

Circulating microfluidic bioreactor, shear stress, breast cancer, cell viability

ABSTRACT

During cancer metastasis, circulating tumor cells (CTC) are exposed to biomechanical forces such as hydrostatic pressure and shear stress in their microenvironments. While these factors play an important role in the heterogeneity of the cancer cell, they also greatly affect cell viability. In this study, a circulating microfluidic bioreactor was developed to mimic the hemodynamic shear stress that CTC cells are exposed to during the metastasis process and theoretical calculations were carried out for the velocity, wall pressure and shear stresses of the microfluidic bioreactor. After that, the viability of MDA-MB-231 breast cancer cells at increasing hemodynamic shear stresses and circulation times (6, 12, and 24 hours) at three different flow rates (6, 12 and 24 hours), was investigated via MTT test and live/dead assay. Experimental results showed that cell viability decreased as the hemodynamic shear stress and circulation time on cells increased compared to breast cancer cells cultured in static conditions. Also, it has been reported that cell viability decreases up to 20% in high hemodynamic shear stress (66 dyn cm⁻²) and long circulation time (24 hours). With this circulating microfluidic bioreactor, the viability of cancer cells in hemodynamic flow conditions can be evaluated as well as phenotypic and genotypic changes can be examined.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: semihcalamak@hacettepe.edu.tr / Tel: +90 312 305 1499

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

In-vivo sistemlerde ve fizyolojik ortamlarda bütün hücrelerin kayma gerilimine maruz kaldıkları uzun zamandır bilinen bir fenomendir. Son yıllarda *in-vivo* ortamda meydana gelen akış dinamiklerinin kanser hücreleri üzerine etkileri *in-vitro* deneyler ve çeşitli simülasyon çalışmalarıyla aydınlatılmaya çalışılmaktadır. *In-vivo* çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre vücudumuzdaki hücreler kan akış hızı ve hücre dışı matrikste (ECM) meydana gelen sıvı transferlerindeki değişikliklere bağlı olarak farklı seviyelerde kayma gerilimlerine maruz kalmaktadırlar [1]. Kayma gerilimi olarak adlandırılan bu vektör, birim yüzeye etki eden normal ve kayma elemanlarının bileşkesi olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, ECM içerisinde bulunan hücreler sıvı kayma geriliminin dışında hidrostatik basınç, gerinim ve sıkıştırma gibi çok sayıda fiziksel kuvvete maruz kalırlar. Kayma gerilimlerinin yanı sıra hücrelerin tutunduğu yüzeyin biyomekanik özelliklerinin hücre farklılaşmasına, karsinojenize, epitelden mezenkimal geçişe ve metastaz gibi hücresel süreçler üzerinde etkili olduğu bilinmektedir [2]. Bu süreçlerin yönetiminde hücreler mikro ortamlarını transmembran proteinleri aracılığıyla algırlar. Literatürde yapılan çalışmalar ECM'nin biyomekanik özelliklerinin neoplastik hastalığın ilerlemesinde doğrudan etkili olduğu ve kanser metastazında ECM'nin sertliğinin karsinom hücrelerinin hareketliliğini etkilediği gösterilmiştir [2-4]. Ayrıca, ECM sertliği, yoğunluğu kanser hücrelerinde bir dizi yanıt ortaya çıkarır. ECM sertliğinin ve yoğunluğunun kanser hücresi davranışını değiştirdiği mekanizmalardan biri integrin aktivasyonudur. ECM sertliği ile birlikte integrinlerin aktifleştirilmesi, ERK ve Rho/ROCK ekspresyonu ile tümör oluşumu teşvik edilmektedir [3]. Hücrelere etki eden biyomekanik kuvvetlerin arasında sıvı kayma gerilimi en çok öne çıkan kuvvettir. Bunun en büyük nedeni kan hücreleri endotel hücreleri ve kas hücreleri başta olmak üzere birçok hücre türü kayma gerilimine maruz kalırlar [1]. Fizyolojik ortamlarda kayma geriliminin oluşturduğu akış dinamikleri damarların içerisinde dolaşan kan akışı ve ECM içerisinde bulunan interstisyel akış olarak ikiye ayrılmaktadır. İnterstisyel akış, vücut sıvılarının (kan, plazma, lenf sıvısı vb.) hücreler etrafında ve intersitium oluşturulan gözenekleri boyunca yavaş hareket etmesidir. İnterstisyel akışın ana fonksiyonlarından biri, kılcal damarlardan sızan ve kan dolaşımına geri dönen lenfatik drenajdır. Bu drenaj, kan damarları, interstitium ve lenfatikler arasındaki ozmotik ve hidrostatik basınç gradyanları olan Starling'in kuvvetleri nedeniyle oluşur [4, 5]. İnterstisyel sıvının bileşimi, vücuttaki yerine bağlı olarak değişebilir, ancak yumuşak dokularda genellikle kılcal damarlardan sızan kan plazmasına benzer ve plazma proteinlerinin yaklaşık %40'ını içeren bir sıvıdır. İnterstisyel sıvıların akış hızının normal dokularda 0,1 ila 1,0 $\mu\text{m s}^{-1}$ arasında olduğu bilinmekle birlikte hücrelerinin yüzeyine uygulanan kayma geriliminin yaklaşık 0,1 dyn cm^{-2} olduğu öngörülmektedir [6-8]. Son dönemdeki mikroçip çalışmalarında taklit edilmeye çalışılan akış dinamikleri interstisyel akışlar olup genellikle bu akışın laminar akış

olarak varsayıp çözümlendiği bilinmektedir [9, 10]. Bu nedenle son dönemdeki fonksiyonel mikrodokuların araştırılması ve gerçek doku ilaç etkileşimlerinin incelenmesi için mikroçipler büyük önem kazanmıştır [11, 12]. Metastaz süreci sadece biyolojik ve biyokimyasal düzenleyicilerden değil, aynı zamanda tümör mikroçevresindeki hemodinamik kuvvetler ve bu mikroçevredeki interstisyel sıvı akışı gibi farklı fiziksel kuvvetlerden etkilenmektedir [13]. Ayrıca, hidrostatik basınç, sıkıştırma ve gerginlik gibi mekanik kuvvetler de kanser hücrelerinin heterojenliğini ve metastazını önemli ölçüde etkiler [9, 14]. Kan dolaşımı, tüm organların normal faaliyetlerini sürdürebilmesi için oldukça kritiktir. Kan dolaşımı sayesinde insan vücudundaki her bir hücreye sürekli besin ve oksijen sağlanırken metabolik atıklar hücre dokulardan uzaklaştırılır. Hem arter hem de venlerdeki akış pulsattır. Arteriyel ve venöz kan akışı için fizyolojik akış gerilimi aralığı sırasıyla 10-70 dyn cm^{-2} civarındadır [15]. Literatür çalışmaları, kanser hücrelerinin vasküler sistemde arteriyel dolaşımında 4,0 – 70,0 dyn cm^{-2} arasında değişen hemodinamik kayma kuvvetlerine maruz kaldığını göstermiştir. Kan damarlarındaki akışkan kayma gerilimi mevcut literatüre göre dört derece olarak tanımlanmıştır: mikro, düşük, orta ve yüksek; bunlar sırasıyla 0-0,5 dyn cm^{-2} , 0,5-15 dyn cm^{-2} , 15-30 dyn cm^{-2} ve > 30 dyn cm^{-2} sıvı kayma gerilimi aralıklarına karşılık gelmektedir. Kayma oranları damarlarda yaklaşık 160 s^{-1} ile atar damarlarda 900 s^{-1} arasında değişebilir [16, 17].

Kayma geriliminin yüzeye tutunmuş kanser hücrelerinin canlılıklarına etkisi daha önceki çalışmalarda rapor edilmiştir [18, 19]. Tümör mikro çevresinde oluşan kayma geriliminin yarattığı fiziksel uyarıya maruz kalan over ve özofagus kanseri hücrelerinin davranışını araştırmak için *in-vitro* ortamda mikroakışkan platformlar kullanılmıştır [9, 14]. Mikroakışkan tabanlı *in-vitro* modeller kanser hücreleri tarafından oluşturulan tümörlerin heterojenliğini taklit ederek tümör dinamiği mekanizmalarının anlaşılması için güçlü araçlar olarak bilinirler. Her ne kadar daha kök hücre benzeri bir fenotipe sahip CTC'lerin sekonder tümörler oluşturma olasılığı daha yüksek olsa da; bu fenotipi nasıl veya ne zaman kazandıkları iyi anlaşılabilmiştir [20]. Akışa bağlı kayma gerilimi gibi mekanik mikro çevresel faktörler, hücre döngüsüne, kanser hücrelerinin metastatik karakterini modüle edebilir. Bu konudaki çalışmalar, hemodinamik kan akışının hücresel zar bileşenlerini ve kanser hücrelerinin morfolojik karakterini etkileyebileceğini göstermiştir [21, 22]. Bu çalışmada, CTC hücrelerinin metastaz sürecinde orta boy arterlerde maruz kaldıkları hemodinamik kayma gerilimini taklit etmek için sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör geliştirilmiş ve mikroakışkan biyoreaktörün hız, duvar basıncı ve kayma gerilimleri için teorik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, mikroakışkan kanal boyutları sabit tutularak üç farklı akış hızında (6, 9 ve 12 mL dk^{-1}) artan hemodinamik kayma gerilimlerinde ve sirkülasyon zamanlarında (6, 12 ve 24 saat) MDA-MB-231 meme kanseri hücrelerinin canlılıkları MTT ve Canlı / Ölü testi ile incelenmiştir.

2. MATERYAL METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada dolaşımdaki meme kanseri hücrelerinin (MBA-MD-231) damar içinde buldukları biyofiziksel kuvvetleri taklit edilmesi ve kayma gerilimi kuvvetlerinin meme kanseri hücreleri üzerine hücre canlılığının incelenmesi için sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktörün geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktörün tasarımı gerçekleştirilmiş ve farklı akış hızlarında mikrokanallarda oluşan hız profilleri ve kayma gerilmeleri sayısal olarak incelenmiştir.

2.1. Sirkülasyonlu Mikroakışkan Biyoreaktörün Tasarımı (Design of Circulating Microfluidic Bioreactor)

Sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktörün tasarımı iki temel bölümden oluşmaktadır: (1) programlanabilir bir peristaltik pompa ve (2) sirkülasyon elemanları (silikon tüpler ve kasetler). Programlanabilir peristaltik pompa dolaşımdaki akış hızlarını ve kayma gerilmelerini optimize etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada hücre canlılığı ve CO₂ (g) ve O₂(g) gaz geçirgenliklerini sağlamak için silikon tüpler (Uxcell (ID:0,5 mm x OD:1mm) kullanılmıştır. Biyoreaktör elemanlarının sterilizasyonu için silikon tüpler 70 cm uzunluğunda kesilerek tüm borular ve bağlantı noktaları (polypropylene ID:0,5 mm) alüminyum folyo ile sarılıp 120°C'de 20 dakika boyunca otoklavda sterilize edilmiştir. Sterilizasyon işleminden sonra silikon tüpler ve bağlantı noktaları laminer akış kabininin altında steril koşullarda birleştirilmiştir.

2.2. Sirkülasyonlu Mikroakışkan Biyoreaktörünün Hesaplamalı Akışkan Dinamik (CFD) Modeli (Computational Fluid Dynamic (CFD) Model of Circulating Microfluidic Bioreactor)

Süspans edilmiş meme kanseri hücresi üzerindeki kayma gerilimi etkisini değerlendirmek için dolaşımdaki akış sisteminin teorik olarak incelemesi yapılmıştır. Borudaki Reynolds sayısı (Re) Eş. 1 'den hesaplanmıştır:

$$Re = \frac{QDh\rho}{\mu A} \quad (1)$$

Q, hacimsel akış hızı (6, 9 ve 12 mL dk⁻¹), D_h borunun hidrolik çapı, ρ akışkan yoğunluğu, μ akışkanın dinamik viskozitesi ve A, borunun kesit alanıdır. 37°C'de akışkan yoğunluğu ve dinamik viskozite sırasıyla 1000 kg m⁻³ ve 0,000692 kg m⁻¹ s⁻¹'dir.

Arterlerdeki fizyolojik kayma gerilim 4,0–70 dyn cm⁻² arasında olduğu bilinmektedir. Burada besiyeri akış dinamiği zamana bağlı Navier-Stokes denklemleri kullanılarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, besiyerinin Newtonian bir davranışla sınırlanamaz ve homojen olduğu varsayılmıştır, çünkü viskozitesi nispeten büyük çaplı arterlerde neredeyse sabittir; bu nedenle, Newtonian olmayan etkiler ihmal edilmiştir [23]. Stokes akışında, Eş. 2'ye göre kanalın ortasındaki kayma gerilimi hesaplanır.

$$T = \frac{6\mu Q}{h^2 w} \quad (2)$$

Burada μ akışkanın dinamik viskozitesi (0.000692 kg m⁻¹ s⁻¹), Q hacimsel akış hızı (6, 9 ve 12 mL dk⁻¹), h mikrokanalın yüksekliği (0,5 mm) ve w mikrokanalın genişliğidir (0,5 mm). Mikroakışkan kanalda kaymaz (no-slip) sınır koşulları kabul edilmiş ve lokal duvar kayma gerilimi dağılımını değerlendirmek için, sonlu elemanlar yöntemi COMSOL Multiphysics™ 5.2a kullanarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli kullanılmıştır. Mikroakışkan biyoreaktörün kanal tasarımı belirlendikten sonra sayısal çözümlemenin yapılabilmesi için modelin ağ yapısının belirlenmesine geçilmiştir. Bu amaçla, mikroakışkan kanalın ağ tasarımı için üçgen ve dörtgen ağ yapısından faydalanılmıştır. Bu amaçla, kanal duvarı düzleminden kanal iç kısmına doğru paralel olarak belli bir orantıyla büyüyen üçgen ağ yapısı kullanılmıştır. Sayısal çözümler için ilk olarak en iyi ağ yapısı bulunmuştur. Bundan sonra akış hızı, kayma gerilimi ve basınç değişimi gibi değişkenler için sayısal çözümler yapılmıştır [24-26]

2.3. Meme Kanseri (MDA-MB-231) Hücre Kültürü Çalışmaları (Breast Cancer (MDA-MB-231) Cell Culture Studies)

Meme kanseri hücreleri 75 cm²'lik yüzey alanına sahip doku kaplarında, %10 fetal sığır serumu (FBS) ve %1 penisilin-streptomisin ile hazırlanmış yüksek glukozlu DMEM ile kültür edilmiştir. Bu amaçla hücreler 48 saat boyunca kültür edildikten sonra meme kanseri hücreleri yüzeyden tripsin enzimi kullanılarak kaldırılmıştır. Daha sonra 1x10⁵ hücre 550 μL besiyeri içerisinde dağıtılarak laminer akış kabini içerisindeki silikon tüplere konularak tüplerin bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktöre konulan hücreler 6, 12 ve 24 saat boyunca 6, 9 ve 12 mL dk⁻¹ akış hızlarında inkübe edilmişlerdir (37°C ve %5 CO₂). Hücre kültürü çalışmalarında kontrol grubu olarak aynı hücre konsantrasyonunda petri kaplarına tutundurulmuş hücreler kullanılmıştır. Herbir deney grubu için n=3 çalışılmıştır.

2.4. Hücre Canlılığı Analizleri (Cell Viability Analyses)

Sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktörde üç farklı kayma gerilimine maruz bırakılan meme kanseri hücrelerinin hücre canlılıklarının incelenmesi için 3-(4,5-Dimetil Thiazol-2-yl)-2,5-Difenil Tetrazolyum Bromür (MTT) ve canlı/ölü (live/dead) hücre testleri gerçekleştirilmiştir.

2.4.1. MTT testi (MTT test)

Sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör ile farklı kayma gerilimlerine maruz bırakılan MDA-MB-231 hücrelerinin canlılığının belirlenmesi için ISO10993, Bölüm 5: *in-vitro* sitotoksitesite testleri "standartının "MTT sitotoksitesite testi" prosedürü kullanılmıştır. Buna göre, süspansede haldeki hücreler 6, 12 ve 24 saat boyunca mikroakışkan biyoreaktörde sirkülasyonlu akışa maruz bırakıldıktan sonra

hücreler 24 kuyucuklu petri kabına yerleştirilmiş ve üzerlerine 2 mL besiyeri yeri (%90 DMEM, %10 FBS %1 L-Glutamin %0,2 Penisilin/Streptomisin) eklenmiştir. Daha sonra, her bir kuyucuğa fosfat tamponlu salin (PBS) içinde hazırlanmış 1 mg/mL derişimindeki 25 µL MTT çözeltisi eklenerek hücreler 4 saat boyunca inkübatörde (37°C ve %5 CO₂) bekletilmiştir. Inkübasyondan sonra hücrelerin mitokondrilerinde oluşturduğu formazan kristallerini açığa çıkarmak ve hücre zarlarını parçalamak için kuyucuklara izoopropanol/HCl çözeltisi eklenmiştir. 30 dk boyunca hücreler karanlık ortamda tutularak hücrelerin absorbanları 570 nm'de mikropilaka okuyucuda okunmuştur. % Hücre canlılığı kontrol grubunun absorbanı %100 sayılarak hesaplanmıştır.

2.4.2. Canlı/ölü hücre canlılığı analizi (Live / dead cell viability analysis)

Canlı/ölü hücre analizi için sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör ile farklı kayma gerilimlerine maruz bırakılan MDA-MB-231 hücreler biyoreaktörden alınarak 24 kuyucuklu petri kabına yerleştirilmiştir. Daha sonra, kalsein-AM ve etidyum bromid homodimeri ile hücrelerin boyaması gerçekleştirilerek hücre canlılığı analizleri yapılmıştır. Canlı hücreler, hücre içi esteraz aktivitesinin varlığı sayesinde floresan olmayan ve hücre içerisine geçebilen Kalsein-AM'nin, yoğun floresan kalseine enzimatik dönüşümü sonucu ayırt edicidir. Etidyum bromid homodimeri ise hasarlı membranlı hücrelere girerek nükleik asitlere bağlanma suretiyle floresan ışınmasını artırarak ölü hücreleri işaretlemektedir. Hücre canlılığının analizi için her örnekten rastgele bölgeler seçilerek görüntülenmiştir [27].

2.5. İstatistiksel Yöntemler (Statistical Methods)

DeneySEL çalışmalarından elde edilen sayısal veriler GraphPad Prism yazılımı ile çift kuyuklu t testi kullanılarak analiz edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

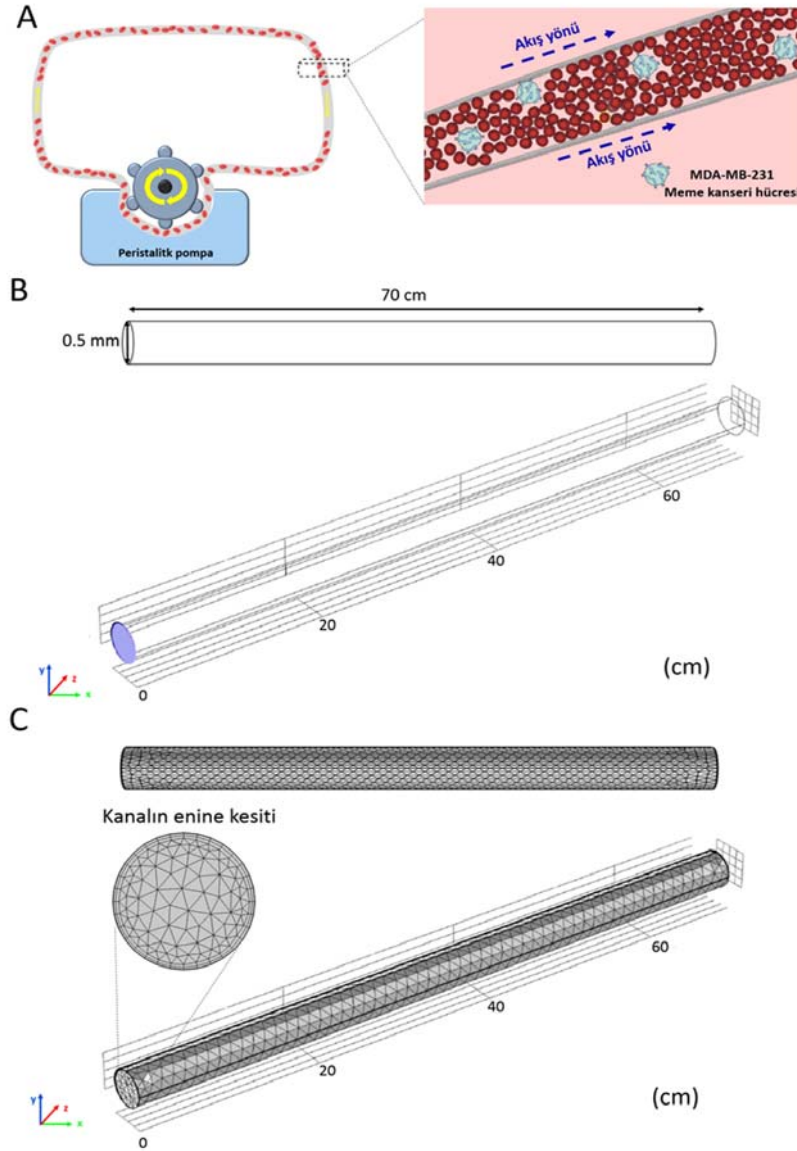
Bu çalışmada dolaşımdaki MDA-MB-231 meme kanseri hücreleri üzerine etki eden biyomekanik kuvvetlerin etkisini sayısal olarak incelemek ve arterlerdeki kan akışını taklit etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sayısal çözümlemenin yapıldığı mikroakışkan kanalın geometrik boyutları Şekil 1'de verilmiştir. Uygulanan deney düzeneği Şekil 1A'da şematik olarak gösterilmiştir. Kullanılan mikroakışkan kanalın geometrisi ve boyutları (h,w, ID: 0,5 mm L: 70 cm), Şekil 1B'de verilmiştir. Sayısal çözümlerinde mikroakışkan kanalın ağ yapısı belirlenirken ağ yapısı ölçeği küçültüldükçe ağ sayısı artmış olup, belli bir ağ sayısından sonra yapılan çözümlerin sonuçları belirli ölçülerde değiştirmedeği gözlemlenmiştir. Sonuçların değişmediği gözlenen ilk ağ yapısı ölçeği, optimum ağ yapısı olarak belirlenip ağ yapısı farkının sonuçlar üzerinde herhangi bir etki yapmaması sağlanmıştır (Şekil 1C). Optimum ağ yapısı belirlendikten sonra akış hızı değişkeni için sayısal çözümler yapılmıştır. Şekil 1B'de

verilmiş olan mikroakışkan kanalda Q: 6, 9 ve 12 mL dk⁻¹ akış hızı değerleri için kanalın hız profili, duvar basıncı ve kayma gerilimi değerleri hesaplanmıştır. Problemin hız profili, kayma gerilimi ve basınç davranışlarını incelerken bu değerlerin mikroakışkan kanal içerisinde dağılımları belirlenmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerine göre mikroakışkan kanalın orta noktasından alınan enine kesitin hız profili Şekil 2A'da verilmiştir. Üç farklı başlangıç akış hızı (6, 9 ve 12 mL dk⁻¹) için kanalın orta noktasında akış hızı en yüksek değere ulaşırken mikroakışkan kanalın duvarına doğru akış hızı azalmaktadır. Buna göre peristaltik pompadan 6 mL dk⁻¹ akış hızı uygulandığında mikroakışkan kanalın ortasında akış hızı 0,196 µm dk⁻¹ iken duvar kısmında bu değer 0,022 µm dk⁻¹'ye kadar düşmektedir (Şekil 2A). Peristaltik pompanın akış hızı 12 mL dk⁻¹'ye yükseltildiğinde mikroakışkan kanalın ortası ve duvarındaki akış hızları sırasıyla 0,213 µm dk⁻¹ ve 0,038 µm dk⁻¹ olarak hesaplanmıştır (Şekil 2A). Aynı akış hızında mikroakışkan kanalın boyuna kesiti Şekil 2C'de verilmiştir. Buradaki hız profilinden akış hızının kanalın merkezinden duvarına doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. Peristaltik pompa ile 12 mL dk⁻¹ akış hızı uygulandığında mikroakışkan kanalın duvar basıncı profili Şekil 2D'de gösterilmiştir. Buna göre mikroakışkan kanalın duvarı boyunca uygulanan basınç 19,07 µPa'a kadar çıkmaktadır.

Şekil 3'te kanalın enine kesitinin ve boyuna kesitinin kayma gerilimi dağılımları verilmiştir. Buna göre peristaltik pompa ile verilen üç farklı başlangıç akış hızı için hemodinamik kayma gerilimleri hesaplanmış ve mikroakışkan kanalın orta noktasından alınan enine kesitlerinin kayma gerilimi dağılımları Şekil 3A'da verilmiştir. Buna göre, 6, 9 ve 12 mL dk⁻¹ akış hızları için kayma gerilimleri sırasıyla 33, 49 ve 66 dyn cm⁻² olarak hesaplanmıştır. Ayrıca mikroakışkan kanalın boyuna kesiti ve boyuna kesitinin hemodinamik kayma gerilimi dağılımı Şekil 3B ve C'de verilmiştir. Yapılan CFD analizlerinde en büyük hemodinamik kayma gerilimlerinin mikroakışkan platformun duvar kısmında meydana geldiği belirlenmiştir.

Şekil 3A ve C'den anlaşılacağı üzere akış hızı arttıkça mikroakışkan kanalın duvar kısmına doğru uygulanan kayma gerilimi artmıştır. Hesaplamalı akışkanlar diamiği analizlerine göre yüksek akış hızlarında mikroakışkan kanalın duvar bölgelerinde akış hızındaki ani değişimlerden dolayı kayma gerilimi arttığı görülmüştür. Özellikle sirkülasyon sırasında mikroakışkan kanal duvarına yakın olan hücreler yüksek hemodinamik kaya gerilimine maruz kalarak canlılıklarını yitirebilmektedir [28]. Sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör sistemindeki karmaşık pulsatil üç boyutlu akış nedeniyle, dolaşımdaki hücrelerin yakınında lokal kayma geriliminin kantitatif olarak tanımlanmasının deneysel olarak zor olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle hesaplanan hemodinamik kayma gerilimi, akıştaki yaklaşık ortalama kayma değerlerini temsil eder ve tek bir hücrenin maruz kaldığı kesin kayma gerilimi olarak değerlendirilmemektedir. Bir akışkan içerisindeki

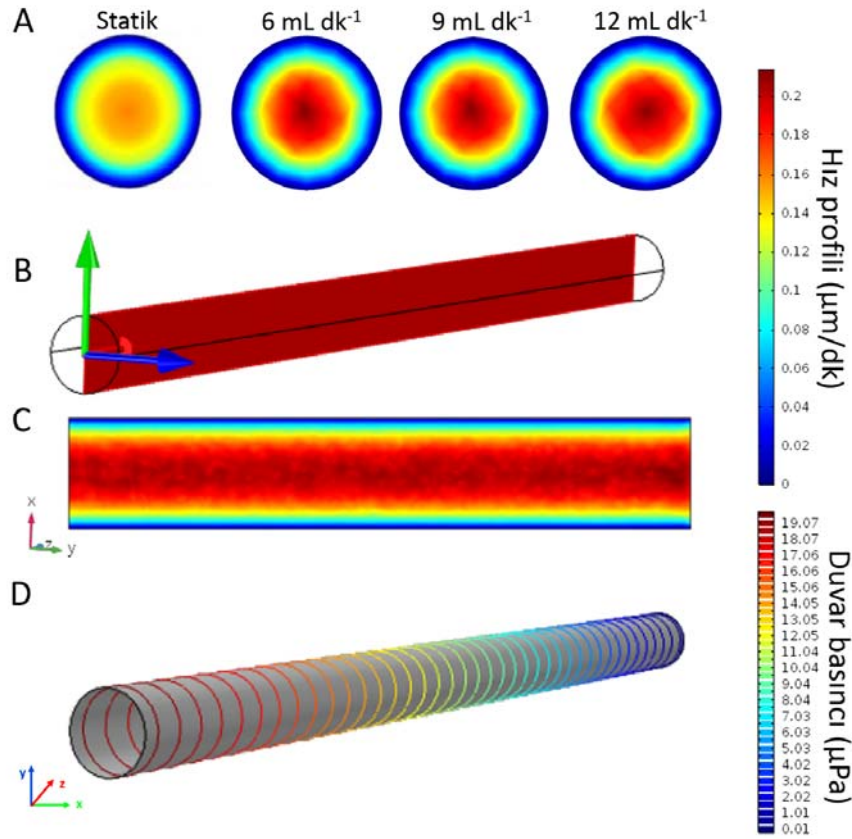


Şekil 1. Sirkülasyonlu mikroakışkan kanalın boyutları ve 3-boyutlu tasarımı A) Sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktörün ve MDA-MB-231 meme kanseri hücrelerinin sirkülasyonunun şematik gösterimi B) Mikroakışkan kanalın boyutlarının gösterilmesi C) Mikroakışkan kanalın ağ yapısının gösterilmesi. (The dimensions and 3D design of circulating microfluidic channel A) Schematic representation of the circulating microfluidic bioreactor and MDA-MB-231 breast cancer cells B) Demonstration of the dimensions of the microfluidic channel C) Demonstration of the mesh size of the microfluidic channel).

partiküllerin veya hücrelerin hareketlerinin incelenmesi (odaklama, ayırma ve sayma vb) ve ayrıntılı bir şekilde anlaşılması çeşitli biyomedikal uygulamalar için önemlidir. Partiküllerin mikrokanallar içerisinde hareketlerini indükleyen hidrodinamik kuvvetler kanal geometrisine ve akışkanın fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak değişmektedir [29, 30]. Newtonian sıvısındaki parçacığın akış sırasındaki hareketleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Segre ve Silberberg, boru akışındaki küresel bir parçacığın merkezden dışarıya ve duvardan içe doğru belirli bir denge radyal konumuna hareket ettiğini gözlemlemiştir. Bu fenomen, parçacıkları $0.6R$ (R : boru yarıçapı) etrafında bir halka oluşturmak üzere akış çizgileri boyunca hareket ettirir [31]. Bu fenomen, sınırlı

geometrilere normal stres farkına eşit olmayan dağılım gösterir [32]. Diğer taraftan, akışkanın viskoelastisitesi, akışkan içerisindeki partiküllerin ateletsel odaklanmasını sağlar. Leshansky vd. kanal içerisindeki parçacıklar üzerine uygulanan normal gerilimlerdeki dengesizlik nedeniyle parçacıkların merkez çizgisine doğru göç ettiğini gözlemlemiştir [33]. Diğer bir çalışmada D'Avino vd. mikro boyutta kılcal bir boruda partiküllerin duvardan merkeze doğru hareket eden parçacıkları gözlemlemiştir [34].

Bu çalışmada hücreler için kullanılan besiyerinin Newtonian ve homojen olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle Newtonian olmayan etkiler ihmal edilmiştir. Besiyerinin 37°C 'de yoğunluğu ve dinamik viskozite sırasıyla 1000 kg m^{-3} ve



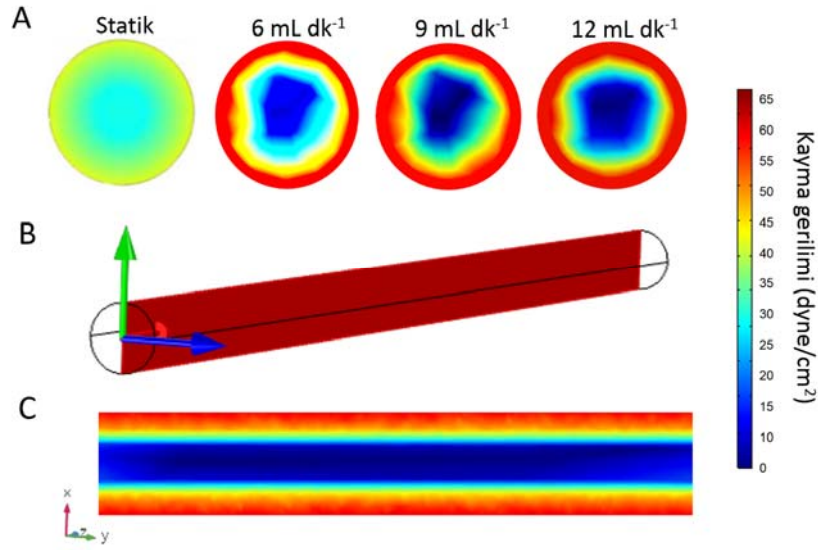
Şekil 2. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine göre sirkülasyonlu mikroakışkan kanalın hız ve basınç profili analizi. A) 6, 9 ve 12 mL dk⁻¹ akış hızlarında mikroakışkan kanalın enine kesitinin hız profilleri B) Mikroakışkan kanalın boyuna kesitinin gösterilmesi C) 12 mL dk⁻¹ akış hızında mikroakışkan kanalın boyuna kesitinin hız profili D) 12 mL dk⁻¹ akış hızında mikroakışkan kanal duvarlarında oluşan basınç profili.

(Velocity and pressure profiles of the circulating microfluidic channel according to computational fluid dynamics analysis. A) Velocity profile of the cross-section of the microfluidic channel at flow rates of 6, 9 and 12 mL min⁻¹ B) The longitudinal section of the microfluidic channel C) Velocity profile of the longitudinal section of the microfluidic channel at 12 mL min⁻¹ flow rate D) Pressure profile of the microfluidic channel at 12 mL min⁻¹ flow rate).

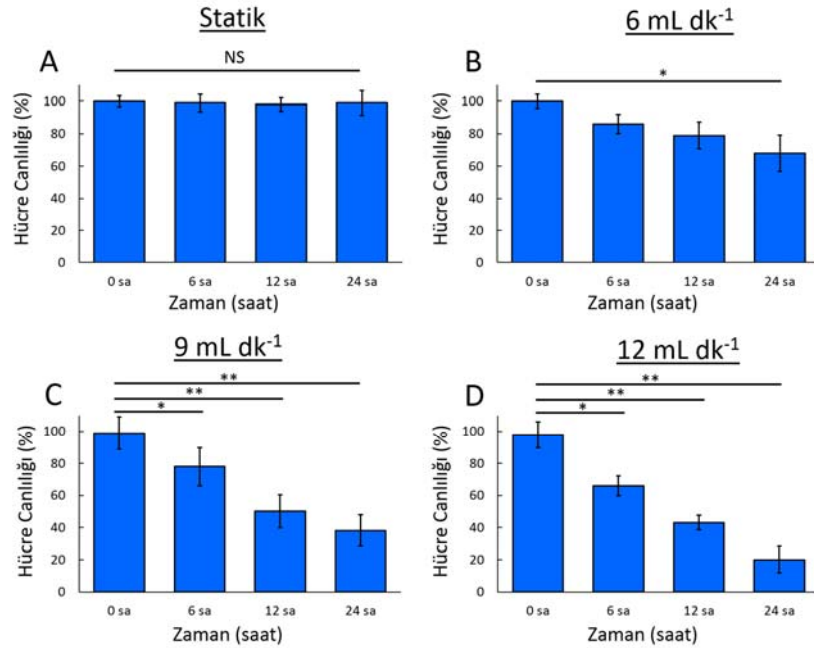
0,000692 kg m⁻¹ s⁻¹ olarak belirlenmiştir. Literatürde meme kanseri hücrelerinin boyutları yaklaşık 15 µm olarak bildirilmiştir [35]. Buna göre, belirlenen akış hızlarında (6, 9 ve 12 mL dk⁻¹) hücrelerin hareketi için iki olasılık bulunmaktadır. Bunlardan ilki hücrelerin Segre ve Silberberg'in teorisine göre borunun merkezinden 0.6R uzaklıkta halka şeklinde akış çizgileri boyunca hareket etmeleri ya da ikinci olasılık olarak normal stres farkına eşit olmayan heterojen bir dağılım göstermeleridir. Bu nedenle kanser hücreleri Şekil 3'te hemodinamik kayma profili verilen borunun farklı zamanlarında farklı hemodinamik kayma gerilimine maruz kalmaktadırlar.

Sıvı kayma geriliminin MDA-MB-231 hücre canlılığı üzerine etkilerini incelemek için Şekil 1A'da gösterilen sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktörde MDA-MB-231 hücrelerinin süspand e kültürleri 6, 9 ve 12 mL dk⁻¹ akış hızlarında 24 saat boyunca (37°C ve %5 CO₂) sıvı kayma gerilimlerine maruz bırakılarak hücre canlılıkları incelenmiştir. MDA-MB-231 hücreleri üzerine yapılan MTT testi sonuçları, yüzeye tutunmuş olan, statik koşullarda kültür edilen meme kanseri hücrelerine kıyasla

hemodinamik kayma gerilimi ve dolaşım süresi arttıkça hücre canlılığının azaldığını göstermiştir. Buna göre statik ortamda kültür edilen MDA-MB-231 hücreleri için canlılık değerleri 6, 12, 24. saatlerde değişmemiş ve %~100 olarak hesaplanmıştır. Farklı hemodinamik koşullarda, 6, 9 ve 12 mL dk⁻¹ akış hızları için 6 saatlik hücre canlılığı sonuçları sırasıyla %99, %86, %78 ve %66 olarak hesaplanırken, bu sonuçlar 12. saatte %98, %79, %50 ve %43 olarak belirlenmiştir. Görüldüğü üzere akış hızıyla birlikte arttırılan hemodinamik kayma gerilimi ve kültür süresi hücre canlılığında %20'ye varan anlamlı düşüşler meydana getirmiştir (**p<0.01) (Şekil 4). Farklı oranlarda hemodinamik kayma gerilimlerine maruz bırakılan MDA-MB-231 meme kanseri hücrelerinin canlı/ölü hücre canlılığı analizleri Şekil 5'te verilmiştir. Hemodinamik kayma gerilimi değerlerine göre hücre canlılık değerleri incelendiğinde 33, 49 ve 66 dyn cm⁻² kayma gerilimine maruz bırakılan MDA-MB-231 meme kanseri hücrelerinin 24 saat sonundaki canlı/ölü hücre canlılığı sonuçları incelendiğinde en çok ölü hücrenin 66 dyn cm⁻² hemodinamik kayma gerilimine maruz kalan örneklerde görüldüğü tespit edilmiştir (Şekil 5D).



Şekil 3. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine göre sirkülasyonlu mikroakışkan kanalın hemodinamik kayma gerilimi analizleri A) 6, 9 ve 12 mL dk⁻¹ akış hızlarında mikroakışkan kanalın enine kesitinin hemodinamik kayma gerilimi profilleri B) Mikroakışkan kanalın boyuna kesitinin gösterilmesi C) 12 mL dk⁻¹ akış hızında mikroakışkan kanalın boyuna kesitinin hemodinamik kayma gerilimi. (Hemodynamic shear stress analysis of the circulating microfluidic channel according to computational fluid dynamics A) Hemodynamic shear stress profiles of the cross-section of the microfluidic channel at flow rates of 6, 9 and 12 mL min⁻¹ B) The longitudinal section of the microfluidic channel C) The hemodynamic shear stress of the longitudinal section of the microfluidic channel at 12 mL min⁻¹ flow rate).



Şekil 4. Sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktörde MDA-MB-231 meme kanseri hücrelerinin 6, 12 ve 24 saat boyunca, 6, 9 ve 12 mL dk⁻¹ akış hızlarında canlılık yüzdeleri. A) Statik kültür B) 6 mL dk⁻¹ akış hızında sirküle edilen hücrelerin canlılık yüzdesi C) 9 mL dk⁻¹ akış hızında sirküle edilen hücrelerin canlılık yüzdesi ve D) 12 mL dk⁻¹ akış hızında sirküle edilen hücrelerin canlılık yüzdesi. (The viability (%) of MDA-MB-231 breast cancer cells at flow rates of 6, 9 and 12 mL min⁻¹ for 6, 12 and 24 hours in the circulating microfluidic bioreactor. A) Static culture B) The viability of cells circulating at a flow rate of 6 mL min⁻¹ C) The viability of cells circulating at a flow rate of 9 mL min⁻¹ and D) The viability of cells circulating at a flow rate of 12 mL min⁻¹)

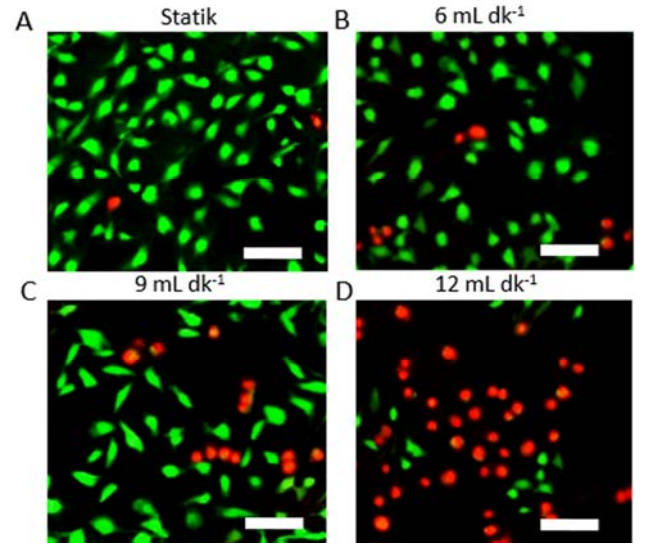
Bu çalışmada, yüksek oranda hemodinamik kayma gerilimlerinde meme kanseri hücrelerinin canlılıklarını yitirmesinin mekanizması üzerine farklı yorumlar

yapılabilir. Hücre canlılık analizlerinde 66 dyn cm⁻² hemodinamik kayma gerilimine maruz kalan örneklerde ilk 6 saatte meme kanseri hücre canlılığı %66 iken 24. saatte

kanser hücresi canlılık oranı %20'ye düşmüştür. Ayrıca canlı/ölü hücre analizlerinde 66 dyn cm^{-2} hemodinamik kayma gerilimine maruz kalan hücrelerin 24 saat sonra yüzeye yapışmadığını ve apoptoz geçirdikleri gözlemlenmiştir. Buarada yüksek hemodinamik kayma gerilimine maruz kalan hücrelerin iskeletlerinin zarar görmesi, hücre yapışmasının önlenmesi ve anoikis yoluyla apoptozu indüklemesi mümkündür [17]. Hücre ölümünün diğer bir nedeni ise kanser hücrelerinde yüksek hemodinamik kayma gerilimiyle oluşan reaktif oksijen türlerinin (ROS) seviyesinin artması ve bunun da oksidatif stresin neden olduğu hücre ölümünü tetikleyebileceği düşünülmüştür [36]. Hemodinamik kayma gerilimi dolaşım sisteminin her yerinde farklı oranlarda olmasıyla birlikte dolaşıma karışan CTC'ler bu mekanik kuvvete maruz kalmaktadırlar. Literatürde hemodinamik kayma geriliminin kanser hücreleri üzerine etkilerini incelemek için koni plakalı viskozimetre ve şırınga iğnesi gibi çeşitli cihazlar kullanılmıştır [37, 38]. Rana vd. yaptıkları çalışmada hemodinamik dolaşıma karışan kanser hücrelerini dolaşımdayken uyurarak, sağlıklı hücrelere zarar vermeden kanser hücrelerini apoptotik bir sinyal ile uyarmak için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bilindiği üzere, dolaşımdaki kanser hücreleri, metastazın ilk aşamalarında vaskülatürün endotelial hücreleri ile etkileşime girerler. Bu çalışmada, kapiler bir tüp içerisine apoptozu indükleyen ligand (TRAIL) immobilize edilerek kanser hücreleri bu kapiler içerisinde 1 saat boyunca döndürülmüş ve kanser hücrelerinin yaklaşık %30'unun apoptozu uğrayarak öldükleri tespit edilmiştir. Statik koşullar altında benzer bir öldürme oranı elde etmek için, hücrelerin yüzeye 4 saat boyunca temas halinde olması gerektiği belirlenmiştir. Bu nedenle geliştirilen biyomimetik yaklaşımla apoptotik sinyal metastatik kanser hücrelerine daha verimli bir şekilde iletilmiştir [16].

Literatür çalışmalarında akciğer kanseri (CL1-5) hücrelerinin yüksek kayma gerilimine maruz bırakıldıklarında reaktif oksijen türleri (ROS) üretiminin artışıyla birlikte hücre hasarı olduğu görülmüştür [39]. Diğer bir çalışmada ise kayma geriliminin integrin ve fokal kinaz aktivitesini düzenleyerek kolon kanseri hücrelerinin (T84 (BCRC 60149) apoptozu duyarlı hale getirdiği rapor edilmiştir [40]. Buna benzer olarak Rana vd. yaptıkları çalışmada kolorektal karsinoma (HCT116) hücrelerine $8-60,5 \text{ dyn cm}^{-2}$ sürekli kayma gerilimi uygulandığında ilk 2 dakika içinde neredeyse hiç hücre ölümü gerçekleşmezken 20 saat kültür sonrasında kolorektal kanser hücresi ölüm oranının %40'a kadar gerilediği gösterilmiştir [16]. Başka bir çalışmada ise Regmi vd. yüksek kayma geriliminin (60 dyn cm^{-2}) düşük kayma gerilimine göre daha fazla dolaşımdaki tümör hücrelerini ortadan kaldırdığını ve yüksek kayma geriliminin 4 saatlik kültür sonrasında tümör hücrelerinin %90'ından fazlasını ortadan kaldırdığını rapor etmiştir [17]. Çalamak vd. yapmış oldukları diğer bir çalışmada HCT116 kolorektal kanseri hücrelerine 12 saat boyunca 16 dyn cm^{-2} kayma gerilimi uyguladıklarında hücre canlılığının %40'a kadar düştüğünü rapor edilmiştir [41]. Bu çalışmadan da anlaşılacağı üzere dolaşımdaki tümör hücrelerinin çoğu

hemodinamik kayma gerilimi ile ortadan kaldırılabilir de, dolaşımda metastatik tümörler oluşturabilen heterojen CTC'ler küçük bir hücre popülasyonu olarak canlı kalarak metastaza sebep olmaktadır. Bu nedenle, hayatta kalan bu tümör hücrelerinin işlevlerini karakterize etmek çok önemlidir. Yapılan çalışmalar kan dolaşımındaki kanser hücrelerinin ömrünün, hücrenin metastatik potansiyeline ve kan akışının fiziksel koşullarına bağlı olarak 0,5 - 4 saat arasında olduğu göstermiştir [42, 43]. Literatürde yapılan çalışmalar, kanser hücrelerinin yüksek miktarda hemodinamik kayma gerilimine maruz kaldıklarında canlılıklarının büyük oranda yitirdiklerini gösterirken, kanser hücreleri, kan damarları içerisinde meydana gelen kayma gerilimleriyle baş edebilmek için kan hücrelerini ve trombositleri hücre membranlarına bağlayarak yüksek kayma geriliminde canlı kalabilmektedirler [1].



Şekil 5. Hemodinamik kayma geriliminin MBA-MD-231 meme kanseri hücreleri canlılığına etkisi ve canlı/ölü hücre analizi için alınan floresan mikroskop görüntüleri A) Statik koşullarda kültür edilen polistren yüzeye tutunmuş MDA-MB-231 meme kanseri hücreleri B) 6 mL dk^{-1} akış hızında sirküle edilen MDA-MB-231 meme kanseri hücreleri C) 9 mL dk^{-1} akış hızında sirküle edilen MDA-MB-231 meme kanseri hücreleri D) 12 mL dk^{-1} akış hızında sirküle edilen MDA-MB-231 meme kanseri hücreleri Kırmızı (Etidyum bromid) Ölü hücreler Yeşil (Kalsein) Canlı hücreler Skala çubuğu $200 \mu\text{m}$.

(The effect of hemodynamic shear stress on MBA-MD-231 breast cancer cell viability and fluorescence microscope images were taken for live / dead cell analysis A) Polystyrene surface-attached MDA-MB-231 breast cancer cells cultured under static conditions B) MDA-MB-231 breast cancer cells circulating at a flow rate of 6 mL min^{-1} C) MDA circulating at a flow rate of 9 mL min^{-1} -MB-231 breast cancer cells D) MDA-MB-231 breast cancer cells circulating at a flow rate of 12 mL min^{-1} Red (Ethidium bromide) Dead cells Green (Calcein) Living cells Scale bar $200 \mu\text{m}$).

4. SİMGELER(SYMBOLS)

A	: Kanalın kesit alanı
CFD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
$\text{CO}_2(\text{g})$	: Karbon dioksit gazı

CTC	: Dolaşımdaki tümör hücresi
dyn cm ⁻²	: Kayma gerilimi birimi
DMEM	: Dulbecco's Modified Eagle's Medium
ECM	: Hücre dışı matris
FBS	: Fetal Sığır Serum
<i>h</i>	: Mikrokanalın yüksekliği
HCT116	: Kolorektal kanseri hücre hattı
ID	: İç çap
kgm ⁻¹ s ⁻¹	: Dinamik viskozite birimi
kgm ⁻³	: Akışkan yoğunluk birimi
<i>L</i>	: mikrokanalın uzunluğu
MDA-MB-231	: Meme kanseri hücre hattı
mL dk ⁻¹	: Akış hızı birimi
MTT	: 3-(4,5-Dimetil Thiazol-2-yl)-2,5-Difenil Tetrazolyum Bromür
O ₂ (g)	: Oksijen gazı
OD	: dış çap
<i>Q</i>	: Hacimsel akış hızı
Re	: Reynold sayısı
<i>w</i>	: Mikrokanalın genişliği
μ	: Akışkan dinami viskozitesi
$\mu\text{m s}^{-1}$	: Akış hızı birimi
$\mu\text{m dk}^{-1}$	: Akış hızı birimi
μPa	: Mikrokanal duvar basıncı birimi
ρ	: Akışkan yoğunluğu

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Damarın yapısında bulunan düz kas destekli endotel hücrelerinin ve dolaşımdaki kırmızı ve beyaz kan hücrelerinin yüksek kayma gerilimlerine maruz kaldıkları bilinmektedir. Damarda meydana gelen biyomekanik kuvvetler sayesinde hemostaz ve damar gelişimi gibi süreçler düzenlenmektedir. Kanser metastazı sırasında dolaşımdaki CTC'ler mikro ortamlarında hidrostatik basınç ve kayma gerilimi gibi biyomekanik kuvvetlerle etkileşime girerler. Kanser metastazının deneysel olarak modellenmesi oldukça zordur. Bu nedenle bu alandaki birçok çalışma tümör oluşumu ve metastazı incelemek için *in-vivo* hayvan modelleri kullanmaktadır [44, 45]. Ancak bu çalışmalar, metastaz gerçekleşikten sonra sonuç verirken metastazı meydana getiren süreçler hakkında hiçbir fikir vermemektedir. Literatürde kayma geriliminin yüzeye tutunmuş kanser hücrelerinin canlılıklarına etkisi daha önceki çalışmalarda rapor edilmiştir [9, 14]. Bu çalışmada hemodinamik kayma geriliminin taklit eden sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktörün tasarımı gerçekleştirilmiş olup, mikroakışkan kanalın hız, duvar basınç ve kayma gerilimleri hesaplamalı akışkanlar dinamiğine göre hesaplanmıştır. Daha sonra, sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör kullanılarak dolaşımdaki MDA-MB-231 meme kanseri hücrelerinin farklı hemodinamik kayma gerilimlerinde hücre canlılıkları rapor edilmiştir. Sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör kullanarak MDA-MB-231 meme kanseri hücreleri 66 dyn cm⁻² kayma gerilimine kadar maruz bırakılmıştır. MTT ve Canlı/Ölü hücre canlılığı testleri akış hızıyla birlikte artırılan hemodinamik kayma gerilimi ve kültür süresinin hücre canlılığında %20'ye varan anlamlı düşüşler meydana getirdiğini gösterilmiştir. Son olarak, bu

çalışma ile geliştirilen sirkülasyonlu mikroakışkan biyoreaktör kullanılarak kanser hücrelerinin hemodinamik akış koşullarında canlılıkları değerlendirilebileceği gibi kayma geriliminin kanser hücrelerinin fenotipik ve genotipik değişimleri üzerine etkileri de incelenebilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Mitchell, M.J., King, M.R., Computational and experimental models of cancer cell response to fluid shear stress, *Frontiers in Oncology*, 3 (44), 1-11, 2013.
2. Ermis, M., Akkaynak, D., Chen, P., Demirci, U., Hasirci, V., A high throughput approach for analysis of cell nuclear deformability at single cell level, *Scientific Reports*, 6 (1), 1-13, 2016.
3. Shieh, A.C., Biomechanical forces shape the tumor microenvironment, *Annals of Biomedical Engineering*, 39 (5), 1379-1389, 2011.
4. Dixon, J.B., Greiner, S.T., Gashev, A.A., Cote, G.L., Moore Jr, J.E., Zawieja, D.C., Lymph flow, shear stress, and lymphocyte velocity in rat mesenteric prenodal lymphatics, *Microcirculation*, 13 (7), 597-610, 2006.
5. Schmid-Schonbein, G.W., Microlymphatics and lymph flow, *Physiological Reviews*, 70 (4), 987-1028, 1990.
6. Dafni, H., Israely, T., Bhujwalla, Z.M., Benjamin, L.E., Neeman, M., Overexpression of vascular endothelial growth factor 165 drives peritumor interstitial convection and induces lymphatic drain: magnetic resonance imaging, confocal microscopy, and histological tracking of triple-labeled albumin, *Cancer Research*, 62 (22), 6731-6739, 2002.
7. Pedersen, J.A., Boschetti, F., Swartz, M.A., Effects of extracellular fiber architecture on cell membrane shear stress in a 3D fibrous matrix, *Journal of Biomechanics*, 40 (7), 1484-1492, 2007.
8. Tarbell, J.M., Shi, Z.-D., Effect of the glycocalyx layer on transmission of interstitial flow shear stress to embedded cells, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 12 (1), 111-121, 2013.
9. Kocal, G.C., Güven, S., Foygel, K., Goldman, A., Chen, P., Sengupta, S., Paulmurugan, R., Baskin, Y., Demirci, U., Dynamic Microenvironment Induces Phenotypic Plasticity of Esophageal Cancer Cells Under Flow, *Scientific Reports*, 6, 38221, 2016.
10. Ip, C.K., Li, S.-S., Tang, M.Y., Sy, S.K., Ren, Y., Shum, H.C., Wong, A.S., Stemness and chemoresistance in epithelial ovarian carcinoma cells under shear stress, *Scientific Reports*, 6, 26788, 2016.
11. Gold, K., Gaharwar, A.K., Jain, A., Emerging trends in multiscale modeling of vascular pathophysiology: Organ-on-a-chip and 3D printing, *Biomaterials*, 196, 2-17, 2019.
12. Rothbauer, M., Rosser, J.M., Zirath, H., Ertl, P., Tomorrow today: organ-on-a-chip advances towards clinically relevant pharmaceutical and medical in vitro models, *Current Opinion in Biotechnology*, 55, 81-86, 2019.
13. Jain, R.K., Martin, J.D., Stylianopoulos, T., The role of mechanical forces in tumor growth and therapy, *Annual Review of Biomedical Engineering*, 16, 321-346, 2014.

14. Rizvi, I., Gurkan, U.A., Tasoglu, S., Alagic, N., Celli, J.P., Mensah, L.B., Mai, Z., Demirci, U., Hasan, T., Flow induces epithelial-mesenchymal transition, cellular heterogeneity and biomarker modulation in 3D ovarian cancer nodules, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (22), E1974-E1983, 2013.
15. Malek, A.M., Alper, S.L., Izumo, S., Hemodynamic shear stress and its role in atherosclerosis, *Jama*, 282 (21), 2035-2042, 1999.
16. Rana, K., Liesveld, J.L., King, M.R., Delivery of apoptotic signal to rolling cancer cells: A novel biomimetic technique using immobilized TRAIL and E-selectin, *Biotechnology and Bioengineering*, 102 (6), 1692-1702, 2009.
17. Regmi, S., Fu, A., Luo, K.Q., High shear stresses under exercise condition destroy circulating tumor cells in a microfluidic system, *Scientific Reports*, 7, 39975, 2017.
18. Xin, Y., Chen, X., Tang, X., Li, K., Yang, M., Tai, W.C.-S., Liu, Y., Tan, Y., Mechanics and Actomyosin-Dependent Survival/Chemoresistance of Suspended Tumor Cells in Shear Flow, *Biophysical Journal*, 116 (10), 1803-1814, 2019.
19. Fan, R., Emery, T., Zhang, Y., Xia, Y., Sun, J., Wan, J., Circulatory shear flow alters the viability and proliferation of circulating colon cancer cells, *Scientific Reports*, 6, 27073, 2016.
20. Onstenk, W., Sieuwerts, A.M., Weekhout, M., Mostert, B., Reijm, E.A., van Deurzen, C.H., Bolt-de Vries, J.B., Peeters, D.J., Hamberg, P., Seynaeve, C., Gene expression profiles of circulating tumor cells versus primary tumors in metastatic breast cancer, *Cancer Letters*, 362 (1), 36-44, 2015.
21. Potdar, P.D., Lotey, N.K., Role of circulating tumor cells in future diagnosis and therapy of cancer, *Journal of Cancer Metastasis Treatment*, 1, 44-56, 2015.
22. Cornelius, V.J., Majcen, N., Snowden, M.J., Mitchell, J.C. and Voncina, B., Preparation of SMART wound dressings based on colloidal microgels and textile fibres, *International Society for Optics and Photonics*, 6413, 64130X, 2006.
23. Selmi, M., Belmabrouk, H., Bajahzar, A., Numerical Study of the Blood Flow in a Deformable Human Aorta, *Applied Sciences*, 9 (6), 1216, 2019.
24. Calamak, S., Ulubayram, K., Controlled synthesis of multi-branched gold nanodendrites by dynamic microfluidic flow system, *Journal of Materials Science*, 54 (10), 7541-7552, 2019.
25. Özsunar A., Başkaya Ş., Sivrioğlu M., Numerical investigation of fluid flow in a duct with rectangular cross section under laminar mixed convection conditions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 15 (2), 71-86, 2000.
26. Gürkan K., Başkaya Ş., Numerical analysis of air motion inside a ventilated office room, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 17 (2), 35-52, 2002.
27. Akpek A., Analysis of biocompatibility characteristics of stereolithography applied three dimensional (3D) bioprinted artificial heart valves, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 929-938, 2018.
28. Lyczkowski, R.W., Alevriadou, B.R., Horner, M., Panchal, C.B., Shroff, S.G., Application of multiphase computational fluid dynamics to analyze monocyte adhesion, *Annals of Biomedical Engineering*, 37 (8), 1516-1533, 2009.
29. Karimi, A., Yazdi, S, Ardekani, A., Hydrodynamic mechanisms of cell and particle trapping in microfluidics, *Biomicrofluidics*, 7 (2), 021501, 2013.
30. D'Avino, G., Maffettone, P.L., Particle dynamics in viscoelastic liquids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 215, 80-104, 2015.
31. Segre, G., Silberberg, A., Radial particle displacements in Poiseuille flow of suspensions, *Nature*, 189 (4760), 209-210, 1961.
32. Seo, K.W., Byeon, H.J., Huh, H.K., Lee, S.J., Particle migration and single-line particle focusing in microscale pipe flow of viscoelastic fluids, *RSC Advances*, 4 (7), 3512-3520, 2014.
33. Leshansky, A.M., Bransky, A., Korin, N., Dinnar, U., Tunable nonlinear viscoelastic "focusing" in a microfluidic device, *Physical Review Letters*, 98 (23), 234501, 2007.
34. D'Avino, G., Romeo, G., Villone, M.M., Greco, F., Netti, P.A., Maffettone, P.L., Single line particle focusing induced by viscoelasticity of the suspending liquid: theory, experiments and simulations to design a micropipe flow-focuser, *Lab on a Chip*, 12 (9), 1638-1645, 2012.
35. Shashni, B., Ariyasu, S., Takeda, R., Suzuki, T., Shiina, S., Akimoto, K., Maeda, T., Aikawa, N., Abe, R., Osaki, T., Size-based differentiation of cancer and normal cells by a particle size analyzer assisted by a cell-recognition PC software, *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 41 (4), 487-503, 2018.
36. Fu, A., Ma, S., Wei, N., Tan, B.X.X., Tan, E.Y., Luo, K.Q., High expression of MnSOD promotes survival of circulating breast cancer cells and increases their resistance to doxorubicin, *Oncotarget*, 7 (31), 50239, 2016.
37. Mitchell, M.J., King, M.R., Fluid shear stress sensitizes cancer cells to receptor-mediated apoptosis via trimeric death receptors, *New Journal of Physics*, 15 (1), 015008, 2013.
38. Egan, K., Cooke, N., Kenny, D., Living in shear: platelets protect cancer cells from shear induced damage, *Clinical & experimental metastasis*, 31 (6), 697-704, 2014.
39. Lo, K.-Y., Zhu, Y., Tsai, H.-F., Sun, Y.-S., Effects of shear stresses and antioxidant concentrations on the production of reactive oxygen species in lung cancer cells, *Biomicrofluidics*, 7 (6), 064108, 2013.
40. Luo, C.-W., Wu, C.-C., Ch'ang, H.-J., Radiation sensitization of tumor cells induced by shear stress: The roles of integrins and FAK, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*, 1843 (9), 2129-2137, 2014.
41. Calamak, S., Ermis, M., Sun, H., Islam, S., Sikora, M., Nguyen, M., Hasirci, V., Steinmetz, L.M., Demirci, U.,

- A Circulating Bioreactor Reprograms Cancer Cells Toward a More Mesenchymal Niche, *Advanced Biosystems*, 4 (2), 1900139, 2020.
42. Galanzha, E.I., Kim, J.W., Zharov, V.P., Nanotechnology-based molecular photoacoustic and photothermal flow cytometry platform for in-vivo detection and killing of circulating cancer stem cells, *Journal of Biophotonics*, 2 (12), 725-735, 2009.
43. Galanzha, E.I., Zharov, V.P., Circulating tumor cell detection and capture by photoacoustic flow cytometry in vivo and ex vivo, *Cancers*, 5 (4), 1691-1738, 2013.
44. Hamza, B., Ng, S.R., Prakadan, S.M., Delgado, F.F., Chin, C.R., King, E.M., Yang, L.F., Davidson, S.M., DeGouveia, K.L., Cermak, N., Optofluidic real-time cell sorter for longitudinal CTC studies in mouse models of cancer, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (6), 2232-2236, 2019.
45. Helzer, K.T., Barnes, H.E., Day, L., Harvey, J., Billings, P.R., Forsyth, A., Circulating tumor cells are transcriptionally similar to the primary tumor in a murine prostate model, *Cancer Research*, 69 (19), 7860-7866, 2009.



A hybrid heuristic solution based on simulated annealing algorithm for energy efficient single machine scheduling problem with sequence dependent setup times

Gülçin Bektur*^{ID}

Industrial Engineering, Iskenderun Technical University, Hatay, 31200, Turkey

Highlights:

- Energy efficient single machine scheduling problem
- Multi- objective heuristic algorithm
- Sequence dependent setup times

Keywords:

- Energy efficient single machine scheduling
- ϵ - Constraint method
- Mixed integer linear programming model
- Multi- objective heuristic algorithm
- NSGA II algorithm

Article Info:

Research Article
Received: 29.07.2019
Accepted: 08.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.598082

Correspondence:

Author: Gülçin Bektur
e-mail:
gulcin.bektur@iste.edu.tr
phone: +90 326 613 5600

Graphical/Tabular Abstract

In this study, energy efficient single machine scheduling problem with sequence dependent setup times is considered. Speed scaling mechanism is taken in to account. Objective functions of the problem are minimization of the total number of tardy jobs and total energy consumption. A multi- objective heuristic algorithm is proposed for the problem. The proposed heuristic algorithm is compared with NSGA II and ϵ -constraint method. The Pareto front obtained by NSGA II and proposed heuristic algorithm is given in Figure A. The proposed heuristic algorithm outperforms NSGA II significantly.

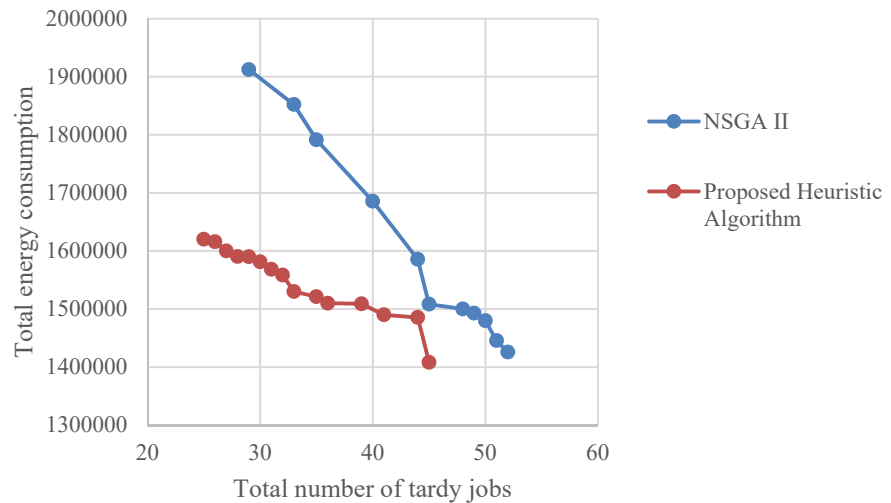


Figure A. Pareto front of the problem

Purpose: The aim of the study is to propose a successful heuristic algorithm for large scale problems due to the problem is addressed is NP- hard.

Theory and Methods:

A MILP (Mixed integer linear programming) model is proposed for the problem. Due to the NP- hard nature of the problem a multi- objective heuristic algorithm is proposed for the problem. The results of the algorithm is compared with state- of - the - art NSGA II algorithm.

Results:

Experimental studies shows the proposed heuristic algorithm found complete Pareto front for problems with 10 jobs. For test problems with more than 10 jobs proposed heuristic algorithm outperforms NSGA II significantly.

Conclusion:

By means of this study a different and successful algorithm is proposed for the problem. In future studies, an exact algorithm or matheuristic algorithms can be proposed for the problem.



Enerji etkin ve sıra bağımlı hazırlık süreli tek makine çizelgeleme problemi için tavlama benzetimi algoritması tabanlı hibrit sezgisel çözüm önerisi

Gülçin Bektur*^{ID}

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 31200 İskenderun Hatay, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Enerji etkin tek makine çizelgeleme problemi
- Çok amaçlı sezgisel algoritma
- Sıra bağımlı hazırlık süreleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.07.2019

Kabul: 08.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.598082

Anahtar Kelimeler:

Enerji etkin tek makine çizelgeleme, ϵ -kısıt yöntemi, çok amaçlı sezgisel algoritma, sıra bağımlı hazırlık süreleri, çok amaçlı matematiksel model

ÖZET

Artan karbondioksit emisyonu ve enerji tüketimi, enerji etkin çizelgeleme problemlerine ilgiyi arttırmıştır. Bu çalışmada çok amaçlı enerji etkin tek makine çizelgeleme probleminde enerji tasarrufunun sağlanması amacıyla hız ayarlama metodu ele alınmıştır. Literatürde hız ayarlama metodunda, makina yüksek hızda çalıştırıldığında enerji tüketim oranı artmakta fakat işler daha kısa sürede tamamlanmaktadır. Makine düşük hızda çalıştırıldığında ise enerji tüketim oranı azalmakta fakat işlerin tamamlanma zamanı da uzamaktadır. Çalışmada, amaç fonksiyonları toplam tüketilen enerji miktarının ve geciken iş sayısının enküçüklenmesidir. Problem plastik parça üreten bir üretim işletmesindeki çizelgeleme problemi üzerinden tanımlanmıştır. İşler sıra bağımlı hazırlık süresine sahip olup, bir işin hazırlık süresi kendisinden önce tamamlanan işe bağlıdır. Probleme özgü bir matematiksel model önerilmiştir. Problemin çok amaçlı çözümünde ϵ -kısıt yöntemi kullanılmıştır. İlgili yöntemin kullanımıyla küçük boyutlu problemler için tüm Pareto etkin çözümler elde edilmektedir. Fakat problemin polinom zamanda çözülememesi sonucu büyük boyutlu problemlerin çözümü için çok amaçlı sezgisel bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmanın başarısı Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

A hybrid heuristic solution based on simulated annealing algorithm for energy efficient single machine scheduling problem with sequence dependent setup times

H I G H L I G H T S

- Energy efficient single machine scheduling problem
- Multi-objective heuristic algorithm
- Sequence dependent setup times

Article Info

Research Article

Received: 29.07.2019

Accepted: 08.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.598082

Keywords:

Energy efficient single machine scheduling, ϵ -constraint method, multi-objective heuristic algorithm, sequence dependent setup times, multi-objective mathematical model

ABSTRACT

Increased carbon dioxide emissions and energy consumption increase interest in energy efficient scheduling problems. In this study, speed scaling method is discussed in order to provide energy saving in multi-objective energy efficient single machine scheduling problem. In the literature with the speed scaling method, the energy consumption rate increases when the machine is operated at high speed, but the job is completed in a shorter time. When the machine is operate at low speed, the energy consumption rate decreases but the completion time of the jobs are prolonged. In the study, the objective functions are minimization of the total amount of energy consumption and the number of tardy jobs. The problem is defined by the scheduling problem in a manufacturing firm that produces plastic parts. Jobs have a sequence dependent setup times, and the setup time of a job depends on the job completed before it. A mathematical model is proposed for the problem. The ϵ -constraint method is used for the solution of the problem. All Pareto efficient solutions for small size problems are obtained by using the proposed heuristic method. However, as a result of the problem not being solved in polynomial time, a multi-objective heuristic algorithm is proposed for solving large-scale problems. The success of the proposed algorithm is shown by comparing with Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: gulcin.bektur@iste.edu.tr / Tel: +90 326 613 5600

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hayatın devamlılığı için enerji vazgeçilemez, kıt bir kaynaktır. Enerjinin etkin kullanımı ise oldukça önemlidir. Çünkü enerji üretimi ve tüketimi süresince büyük miktarlarda sera gazı atmosfere salınmaktadır. Son yıllarda etkin olmayan enerji tüketimi ve büyük oranda sera gazı salınımı Dünya çapında bir problem haline gelmiştir. Bu nedenle araştırmacılar enerji tasarrufunun sağlanması konularına yönelmişlerdir. Ayrıca Uluslararası enerji ajansına göre 2040 yılında küresel enerji talebi %37 oranında artış gösterecektir [1]. Sonuçta enerjinin etkin kullanımı giderek önem kazanan bir konudur. Dünya genelinde üretim endüstrisi mevcut enerjinin neredeyse yarısını kullanmaktadır. Üretim endüstrisi enerjinin büyük bir kısmını kullandığı için atmosfere sera gazı salınımında da etkisi oldukça fazla olmaktadır. Enerjinin etkin kullanımı ve atmosfere sera gazı salınımının kontrolü için üretim endüstrisinin dikkate alınması son derece önemlidir [2]. Üretim endüstrisinde ise pek çok çözümlenmiş çalışmada sadece üretim etkinliği ile ilgili amaçlar dikkate alınmaktadır. Örneğin işlerin gecikme miktarının, tamamlanma zamanının, geciken iş sayısının enküçüklenmesi vb. amaçlar ele alınmaktadır. Oysa enerji etkin çözümlenmiş problemlerinde üretim etkinliğinin yanında enerji tasarrufu sağlayacak stratejiler de dikkate alınmaktadır. Literatürde enerji- etkin çözümlenmiş problemlerinde ele alınan stratejiler dört sınıfta düşünülmektedir [2]. 1. Hız ayarlama stratejisi (Speed scaling strategy): Makinaların hızları üretim etkinliği mümkün olduğunca az etkilenecek şekilde azaltılmaktadır. Burada üretim etkinliği ile ilgili amaçlar ve enerji ile ilgili amaçlar çalışmaktadır. Çünkü makinaların hızları azaltıldığında enerji tüketim oranı azalmakta, işlerin tamamlanma süreleri ise uzamaktadır. Amaç ise makinaların işlem hızının, tüketilen enerji miktarı ve üretim etkinliği bir arada dikkate alınarak belirlenmesidir.

2. Güç kapatma stratejisi (Power down strategy): Makinalar ardışık iki işlem arasında boş duruma geldiğinde kapatılmaktadır. Fakat makinaların tekrar çalışır duruma getirmek de belirli bir maliyete neden olmaktadır. Burada amaç makine boş duruma geldiğinde kapatılması ve sıradaki iş işlem için hazır olunca tekrar çalışır duruma getirilmesi sonucu kullanılan enerji mi ya da makinanın boş duruma çalışması sonucu kullanılan enerjinin mi daha tasarruflu olduğunun karar verilmesidir. Çünkü bazen ardışık iki iş arasında boş beklemler çok uzunsa makinanın kapatılıp, sıradaki iş işlem için hazır duruma gelince açılması daha mantıklıdır [3]. 3. Dinamik elektrik fiyatları (Dynamic electricity prices): Bu strateji ile elektriğin yüksek fiyatlandırıldığı periyotlarda makinaların mümkün olduğunca az çalıştırılması planlanmaktadır. Amaç toplam elektrik maliyetlerinin enküçüklenmesidir.

4. Önceden belirlenmiş toplam enerji tüketimi kısıtı (Pre-determined total energy consumption constraint): Çözümlenmiş periyodu boyunca önceden belirlenmiş toplam

enerji tüketimi miktarı aşılmayacak şekilde bir çözümlenmektedir. Enerji etkin tek makina çözümlenmiş literatürü incelendiğinde pek çok çalışmada güç kapatma stratejisinin ve dinamik elektrik fiyatlarının dikkate alındığı görülmüştür. Güç kapatma stratejisini dikkate alan çalışmalardan Mouzon ve Yıldırım [4], toplam gecikme ve toplam enerji tüketiminin enküçüklenmesinde sezgisel bir algoritma önermişlerdir. Mouzon vd. [5], ise atama kuralları ve matematiksel model önermişlerdir. Yıldırım ve Mouzon [6], toplam tamamlanma zamanı ve enerji tüketiminin enküçüklenmesinde çok amaçlı genetik algoritma (GA) önermişlerdir. Gong vd. [7], toplam enerji maliyetinin enküçüklenmesi için matematiksel model önermişlerdir. Che vd. [8], en büyük gecikme ve toplam enerji tüketiminin enküçüklenmesinde ϵ - kısıt yöntemini kullanmışlardır. İncelenen çalışmada, enerji etkin strateji olarak güç kapatma stratejisi benimsenmiştir. Yapılan çalışmada ise enerji etkin strateji makinalarda hız ayarlama stratejisidir. Amaç fonksiyonları açısından da çalışmalar farklıdır. İlgili çalışmada amaç fonksiyonları toplam enerji tüketim miktarının ve enbüyük gecikmenin enküçüklenmesidir. Yapılan çalışmada ise tüketilen toplam enerji miktarı ve toplam geciken iş sayısı enküçüklenmiştir. Ayrıca [8] numaralı kaynaktan sıra bağımlı hazırlık süreleri de dikkate alınmamıştır. Bu anlamda ele alınan problemler birbirlerinden farklıdır. Tarakçı vd. [9], toplam enerji tüketiminin enküçüklenmesi amaç fonksiyonunu dikkate almışlar ve problemin çözümünde GA önermişlerdir. Dinamik elektrik fiyatlarını dikkate alan çalışmalarda ise amaç fonksiyonu pek çok çalışmada toplam enerji maliyetinin enküçüklenmesi olup, tek amaçlıdır. Toplam enerji maliyetinin enküçüklenmesi çalışmalardan Shrouf vd. [10], GA önermişlerdir. Tsao vd. [11], toplam enerji maliyetinin enküçüklenmesi için bulanık GA önermişlerdir. Zhou vd. [12], toplam enerji maliyeti ve en büyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi için sezgisel algoritma önermişlerdir. Mikhaylidi vd. [13], işlerin bölünebilir olduğu durum için dinamik programlamayı kullanmışlardır. Aghelinejad vd. [14] ve Gong vd. [15], probleme özgü matematiksel model önermişlerdir. Gong vd. [16], problemi stokastik yapıda ele almışlar ve matematiksel model önermişlerdir. Aghelinejad vd. [17], işlerin bölünebilir olduğunu kabul etmişler ve toplam enerji maliyetinin enküçüklenmesi problemler için karmaşıklık analizi yapmışlardır. Gong vd. [18], toplam enerji maliyetinin yanında toplam işgücü maliyetini de dikkate almışlar ve sezgisel bir algoritma önermişlerdir. Lee vd. [19], erkenlik ve geçlik için toplam ceza maliyetini ve toplam enerji maliyetini enküçükleyen çok amaçlı sezgisel bir algoritma önermişlerdir. Aghelinejad vd. [20] ve Zhang vd. [21], sezgisel algoritma önermişlerdir. Rubaiee vd. [22], toplam gecikme ve toplam enerji maliyetini dikkate almışlar ve problemin çözümünde çok amaçlı GA önermişlerdir. Önceden belirlenmiş enerji tüketim kısıtı aşılmayacak şekilde tek makina çözümlenmiş problemini inceleyen çalışmalardan, Artigues vd. [23], iki aşamalı kısıt programlama yaklaşımı önermişlerdir. Nattaf vd. [24], ise hibrit dal-sınır algoritması önermişlerdir. Ayrıca

çizelgelemede kaynak kullanımını dikkate almışlardır. Liao vd. [25], toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı ve toplam ağırlıklı gecikme amaç fonksiyonlarını dikkate almışlardır. Problemin çözümünde çok amaçlı parçacık sürüsü algoritması önermişlerdir. Chen vd. [26], makinaların fiziksel koşullarını dikkate almışlar ve toplam gecikme ve enerji tüketim maliyetinin enküçüklendiği problemin çözümü için Karınca Kolonisi algoritmasını önermişlerdir.

Hız ayarlama stratejisini dikkate alan çalışmalar diğer çalışmalara göre daha azdır. Hız ayarlama stratejisini dikkate alan tek makina çizelgeleme çalışmalarından Albers ve Fujiwara [27], toplam akış zamanı ve toplam enerji maliyeti enküçükleyen bir algoritma önermişlerdir. Antoniadis ve Huang [28], hız ayarlama stratejisini dikkate alan toplam enerji tüketiminin enküçüklendiği tek makina çizelgeleme probleminin NP- zor olduğunu göstermişlerdir. Problemi tek amaçlı olarak ele almışlardır. Antoniadis vd. [29], toplam enerji tüketimi amaç fonksiyonunun dikkate alındığı problem için yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Fang vd. [30], toplam enerji maliyetinin enküçüklenmesi amaç fonksiyonunu incelemişlerdir. Hız ayarlama stratejisini ve dinamik elektrik fiyatlarını dikkate almışlardır. Problemin çözümü için bir algoritma geliştirmişlerdir. Tasgetiren vd. [31], tek makina çizelgeleme probleminde hız ayarlama stratejisini dikkate almışlardır. Yapılan çalışmada [31] numaralı çalışmaya göre incelenen problem ve çözüm yöntemi farklıdır. İlgili çalışmada amaç fonksiyonu toplam enerji tüketimi ve toplam ağırlıklı gecikmenin enküçüklenmesidir. Ele alınan problemde ise toplam geciken iş sayısı ve toplam enerji tüketimi enküçüklenmiştir. İncelenen çalışmada iki farklı sezgisel algoritma önerilip, birbiriyle karşılaştırılmıştır. Matematiksel modelin kullanımıyla küçük boyutlu problemler için Pareto optimal yüzey elde edilmemiştir. Bu çalışmada farklı olarak küçük boyutlu problemler için ε - kısıt yönteminin kullanımıyla Pareto optimal yüzey elde edilmiştir. Böylece küçük boyutlu problemlerde önerilen sezgisel algoritmanın sonuçları Pareto optimal yüzey ile karşılaştırılabilir. Ayrıca yapılan çalışmada problemin çözümünde farklı bir sezgisel algoritma önerilip, önerilen algoritmanın başarısı literatürdeki NSGA II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. [31] numaralı çalışmada en çok 60 iş için sezgisel algoritma çalıştırılmıştır. Yapılan çalışmada ise problem boyutu daha büyük alınmıştır. Çalışmaların benzer özellikleri ise sıra bağımlı hazırlık sürelerinin ve makinalarda hız ayarlama stratejisinin dikkate alınmasıdır. Toplam geciken iş sayısının enküçüklenmesi amaç fonksiyonu pek çok çalışmada dikkate alınan önemli bir amaç fonksiyonu olmasına rağmen enerji etkin çizelgeleme problemlerinde daha önce ele alınmamıştır. Toplam geciken iş sayısının dikkate alındığı bazı çalışmalar verilmiştir. Seo vd. [32], toplam beklenen geciken iş sayısının en küçükleme amaç fonksiyonunu dikkate almışlardır. Stokastik yapıdaki tek makine çizelgeleme problemi için matematiksel model önerilmiştir. Chen [33], tek makine çizelgeleme probleminde periyodik bakımı dikkate almıştır. Amaç fonksiyonu toplam geciken iş sayısının enküçüklenmesi olup, dal- sınırlı algoritması

önerilmiştir. Cyril ve Samia [34], toplam geciken iş sayısının enküçüklendiği tek makine çizelgeleme problemi için alt sınırın ve üst sınırın dikkate alındığı bir matematiksel model önermişlerdir. Liu ve Liao [35], toplam erkenlik ve geçlik ile toplam enerji tüketiminin enküçüklendiği tek makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Aydılek vd. [36], tek makine çizelgeleme probleminde stokastik işlem sürelerini dikkate almıştır. Amaç fonksiyonunun toplam geciken iş sayısının enküçüklenmesi olan problemin çözümünde farklı bir algoritma geliştirmiştir. Bu çalışmada enerji etkin tek makine çizelgeleme probleminde hız ayarlama stratejisi dikkate alınmıştır. Amaç fonksiyonları toplam enerji tüketiminin ve geciken iş sayısının enküçüklenmesidir. Yüksek makine hızı işlerin hızlı bir şekilde tamamlanmasını sağlamakta fakat yüksek enerji tüketim oranına neden olmaktadır. Düşük makine hızı ise düşük enerji tüketim oranı sağlamakta fakat işlerin tamamlanma zamanını uzatmaktadır. Sonuçta enerji ve üretim etkinliği amaçları birbirleriyle çelişen amaçlar olup problem çok amaçlı ele alınmalıdır. Problemden işler sıra bağımlı hazırlık sürelerine sahip olup, bir işin hazırlık süresi kendisinden önce tamamlanan işe bağlıdır. Probleme özgü bir matematiksel model önerilmiştir. Problemin çözümünde tüm Pareto çözümlerinin bulunmasını sağlayan ε -kısıt yaklaşımı kullanılmıştır. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için çok amaçlı sezgisel algoritma önerilmiştir. Küçük boyutlu problemlerde önerilen sezgisel algoritmanın başarısı ε - kısıt yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Fakat ele alınan problemin NP- zor yapısı gereği büyük boyutlu problemlerde matematiksel modelde ε - kısıt yöntemi kullanılarak eniyi çözüm garanti edilememektedir. Bu nedenle önerilen algoritmanın başarısı küçük boyutlu problemlerde ε - kısıt yöntemi ile karşılaştırılarak ve büyük boyutlu problemlerde literatürdeki NSGA II algoritmasıyla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Literatür dikkate alındığında, enerji etkin tek makina çizelgeleme problemlerinde hız ayarlama stratejisini dikkate alan çalışmalar az sayıdadır. Bu çalışmalardan sıra bağımlı hazırlık sürelerini dikkate alan sadece bir çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmanın literatürden farkı, enerji etkin tek makina çizelgeleme problemlerinde toplam geciken iş sayısının ilk defa ele alınmasıdır. Ele alınan problem gerçek bir çizelgeleme probleminden tanımlanmıştır. Ayrıca önerilen ε - kısıt yönteminin kullanımıyla küçük boyutlu problemler için tüm Pareto etkin çözümler bulunmuştur. Büyük boyutlu problemler için literatürden farklı çok amaçlı sezgisel bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma literatürdeki NSGA II algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ilk bölümü giriş bölümüdür. İkinci bölümde kullanılan matematiksel model ve ε -kısıt yaklaşımı anlatılmıştır. Üçüncü bölümde önerilen sezgisel algoritmaya yer verilmiştir. Dördüncü bölümde önerilen algoritmanın başarısı NSGA II ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Son bölüm sonuç bölümüdür.

2. PROBLEMİN TANIMLANMASI (DESCRIPTION OF THE PROBLEM)

Bu çalışmada ele alınan problem plastik enjeksiyon makinasının çizelgelemesi üzerinden tanımlanmıştır. Ele

alınan problem plastik parça üretiminin yapıldığı ve enjeksiyon makinasının kullanıldığı bir işletme dikkate alınarak belirlenmiştir. Firmada bir uygulama yapılmamış olup, sadece problemin tamamen gerçek hayat problemini yansıtmayı amacıyla firma dikkate alınmıştır. Bunun nedenlerinden biri de test problemlerinin firmanın gerçek verilerine göre daha büyük boyutlu olmasıdır. Bir başka deyişle firmadan alınacak veri daha küçük boyutlu olduğundan uygulama makaleye eklenmemiştir. Plastik parçalar plastik enjeksiyon makinası ile üretilmektedir. Plastik parça üreten firma farklı renk, boyut ve özelliklere sahip siparişler almaktadır. Üretimin gerçekleştirilebilmesi için alınan siparişe uygun kalıp enjeksiyon makinasına bağlanmalı, hammaddenin koyulduğu hazne temizlenmeli ve siparişe uygun hammadde hazneye alınmalıdır. Tüm bu işlemler hazırlık aşamasını oluşturmaktadır. Hazırlık süreleri sıra bağımlıdır. Birbirine benzer parçalar ardışık üretildiğinde hazırlık süresi farklı parçaların ardışık üretimine göre kısalmaktadır. Örneğin siyah bir parçanın üretiminden sonra beyaz parçanın üretimi olacaksa, kazanların çok iyi temizlenmesi gerekmektedir ve hazırlık süresi uzayabilmektedir. İncelenen enjeksiyon makinasının hızı ayarlanabilir özelliktedir. Makine hızlı çalıştırıldığında işlem süresi kısalmakta fakat enerji tüketim oranı ise artmaktadır. Makinanın çalışma aşamasında tüketilen enerji oranı dijital olarak görünmektedir. Firma geciken iş sayısının ve toplam enerji tüketiminin en küçüklüklenmesini istemektedir. Bir iş işlenmeye başladıktan sonra makinanın hızı değiştirilememektedir. j işinin tamamlanması için gereken iş yükü L_j olarak gösterilmektedir. İşin işlem zamanı ise iş yükünün makine hızına bölünmesiyle bulunmaktadır. Bir işin tamamlanma zamanı ise kendisinden önce çizelgelenen işin tamamlanma zamanına ilgili işin işlem zamanının ve sıra bağımlı hazırlık süresinin eklenmesiyle bulunmaktadır. Eğer j işi q hızı ile işleniyorsa, enerji tüketim oranı p_{jq} ile gösterilir. j işi için makine hızı arttırılırsa enerji tüketim oranı p_{jq} artışı göstermektedir. Başka bir deyişle, x hızı y hızından büyükse ($v_x > v_y$), ilgili iş için x hızında enerji tüketim oranı y hızında enerji tüketim oranından büyük ($p_{jx} > p_{jy}$) olmaktadır. Makine yüksek hızda çalıştırıldığında, işin işlem süresi L_j/v_q ya eşit olduğu için, kısalmaktadır. Fakat enerji tüketim oranı da artmaktadır. Toplam enerji tüketimi ise işlem süreleri ile işlerin enerji tüketim oranının çarpılmasıyla bulunmaktadır. İş bölünmelerine izin verilmemektedir. Probleme özgü çok amaçlı matematiksel model aşağıda verilmiştir.

2.1. Önerilen Matematiksel Model (Proposed Mathematical Model)

Matematiksel model önerilirken [2, 34] tarafından yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır.

Kümeler ve indisler

- N : İş kümesi, $N = \{1, 2, \dots, n\}$
 S : Makine hızı kümesi, $S = \{1, 2, \dots, s\}$
 j, i : İşleri göstermek için kullanılan indis, j ve $i \in N$
 k : Sırayı göstermek için kullanılan indis, $k \in N$

q : Hızı göstermek için kullanılan indis, $q \in S$

Parametreler

- L_j : j işinin iş yükü
 s_{ij} : i işinden sonra gelen j işinin sıra bağımlı hazırlık süresi
 d_j : j işinin teslim zamanı
 v_q : q hızı seviyesinde işlem yapan makinanın hızı
 p_{jq} : j işinin q hızı seviyesinde enerji tüketim oranı
 M : Yeterince büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

- E : Toplam enerji tüketimi,
 T_j : j işinin gecikme miktarı,
 C_j : j işinin tamamlanma zamanı
 $U_j = \begin{cases} 1; & \text{Eğer } j \text{ işi gecikiyorsa} \\ 0; & \text{d. d.} \end{cases}$
 $x_{jk} = \begin{cases} 1; & \text{Eğer } j \text{ işi } k. \text{ sırada işlem görüyorsa} \\ 0; & \text{d. d.} \end{cases}$
 $y_{jq} = \begin{cases} 1; & \text{Eğer } j \text{ işi } q \text{ hızı seviyesinde} \\ 0; & \text{işlem görüyorsa} \\ & \text{d. d.} \end{cases}$

Model

$$\text{Min } \sum_j U_j \quad (1)$$

$$\text{Min } E \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k x_{jk} = 1 \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j x_{jk} = 1 \quad \forall k \quad (4)$$

$$C_j \geq \frac{L_j}{v_q} y_{jq} \quad \forall j, q \quad (5)$$

$$C_j \geq C_i - M(2 - x_{i(k-1)} - x_{jk}) + s_{ij} + \frac{L_j}{v_q} y_{jq} \quad \forall j, i, q \text{ ve } k > 1, i \neq j \quad (6)$$

$$E = \sum_j \sum_q \frac{L_j}{v_q} y_{jq} p_{jq} \quad (7)$$

$$C_j - d_j \leq T_j \quad \forall j \quad (8)$$

$$T_j \leq M U_j \quad \forall j \quad (9)$$

$$\sum_q y_{jq} = 1 \quad \forall j \quad (10)$$

$$C_j, E, T_j \geq 0 \quad \forall j \quad (11)$$

$$x_{jk}, y_{jq}, U_j \in \{0, 1\} \quad \forall j, k \text{ ve } q \quad (12)$$

Kısıt 1 ve Kısıt 2 amaç fonksiyonları olup, sırasıyla toplam geciken iş sayısının ve toplam enerji tüketiminin en

küçüklenmesidir. Kısıt 3 her işin bir sıraya atanmasını sağlar. Kısıt 4 her sıraya bir işin atanmasını sağlar. Kısıt 5 ile işlerin tamamlanma zamanının işlem süresinden büyük olması sağlanır. Kısıt 6) işlerin tamamlanma zamanlarını hesaplar. İşin tamamlanma zamanı ise kendisinden önceki işin tamamlanma zamanına ilgili işin sıra bağımlı hazırlık süresi ile işlem süresinin eklenmesiyle bulunur. Kısıt 7 enerji tüketim miktarını hesaplar. Toplam enerji tüketimi ise işlem süreleri ile işlerin enerji tüketim oranının çarpılmasıyla bulunmaktadır. Kısıt 8 işlerin gecikme miktarını hesaplar. Gecikme miktarı işlerin tamamlanma zamanı ile teslim zamanının farkıdır. Kısıt 9 geciken işlerin bulunmasını sağlar. Eğer işin gecikme miktarı sıfırdan büyükse iş gecikiyor demektir ve U_j değeri 1' e eşittir. Aksi halde U_j değeri sıfıra eşittir. Kısıt 10 her işin bir hız seviyesinde işlenmesini sağlar. Kısıt 11 ve Kısıt 12 işaret kısıtlarıdır.

2.2. ε -Kısıt Yöntemi (ε - Constraint Method)

ε - kısıt yöntemi çok amaçlı optimizasyonda Pareto etkin yüzeyin bulunmasında kullanılmaktadır. Çalışmada, toplam enerji tüketimi (F_2) amaç fonksiyonu olarak alınmakta ve toplam geciken iş sayısı (F_1) ise bir kısıt olarak eklenmektedir. ε - kısıt yöntemi aşağıda açıklanmıştır ve aşağıdaki matematiksel model *Problem X* olarak isimlendirilmiştir:

$$\text{Min } F_2$$

s. t.

$$\text{Kısıt 3-Kısıt 12 ve } F_1 \leq \varepsilon \quad (13)$$

Kısıt 13 toplam geciken iş sayısının ε değerine eşit ya da küçük olmasını sağlar. Başlangıçta ε değeri n olarak alınmakta ve *Problem X* çözülmektedir. Elde edilen çözüm ve amaç fonksiyonları (F_1, F_2) kaydedilir. Problemin çözümü sonucu bulunan toplam geciken iş sayısı 1 birim azaltılır ve ε değeri bu değere eşit alınır. *Problem X* tekrar çözülür. Algoritma ilgili ε değerinde uygun çözüm bulamayana kadar çalışır. Tüm Pareto etkin yüzeyin bulunmasında kullanılan ε -kısıt yöntemi Algoritmik olarak aşağıda verilmiştir. Benzer bir yöntem Bootaki vd. [37], tarafından çok amaçlı kübik hücre oluşturma probleminde kullanılmıştır.

Procedure ε - kısıt yöntemi

Input: Problem parametreleri

Output: Etkin çözümler

$\varepsilon = n; \Delta \leftarrow 1; \text{check} = 1; k = 1;$

While ($\text{check} = 1$)

Problem X çözülür;

If mümkün çözüm elde edildiyse

Çözüm k . çözüm olarak kaydedilir; $k = k + 1; \varepsilon = F_1 - \Delta;$

Else

$\text{check} = 0;$

End

End

Etkin çözümleri kaydet

Aşağıda örnek bir problem verilmiştir. Bu problem 1 numaralı test problemidir.

Örnek problem için sıra bağımlı hazırlık süreleri (s_{ij}), işlerin yükü (L_j), teslim tarihleri (d_j) ve enerji tüketim oranları (p_{jq}) Tablo 1'de verilmiştir. Makine hızı 0,75, 1, 1,25 ve 1,50 olarak alınmış olup, $v_1 = 0,75, \dots, v_4 = 1,50$ ' dir. İlk etkin çözüm (4;89917,33) olarak bulunmuştur. Bu çözümde toplamda 4 iş gecikmekte ve toplam enerji tüketimi de 89917.33' dir. Toplam geciken iş sayısı 1 birim azaltılıp ε değeri 3 olarak alınır ve *Problem X* çözülür. Elde edilen çözüm (3;97320,67)' dir. Toplam geciken iş sayısı 1 birim azaltılıp ε değeri 2 olarak alınır. Elde edilen çözüm (2; 124724,53)' dir. ε değeri 1 alınıp, *Problem X* çözüldüğünde 100000 sn' de uygun çözüm bulunamadığı için, algoritma sonlandırılmıştır. Belirlenen U_j değerinde elde edilen eniyi çözümler Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2: Örnek problem için Pareto etkin çözümler (Pareto efficient solutions for the problem)

$\sum U_j$	E	CPU
4	89917,33	266,94
3	97320,67	34269,13
2	124724,53	83090,05

Tablo 1. Örnek problemin parametreleri (Parameters of the example problem)

j	S_{ij}										L_j	d_j	p_{j1}	p_{j2}	p_{j3}	p_{j4}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
1	-	15	9	14	9	12	7	6	6	10	39	162	110	195	305	439
2	12	-	4	13	7	13	14	13	7	15	48	168	432	768	1200	1728
3	8	14	-	6	9	11	4	13	4	14	17	171	153	272	425	612
4	5	10	3	-	7	6	12	4	10	8	9	136	46	81	127	182
5	4	9	10	7	-	3	7	11	5	11	45	165	253	450	703	1013
6	14	8	10	14	15	-	11	12	7	7	47	166	238	423	661	952
7	13	10	11	6	11	11	-	9	5	14	35	164	354	630	984	1418
8	9	7	5	9	9	5	7	-	15	14	17	162	163	289	452	650
9	12	15	6	8	12	4	11	11	-	11	12	166	108	192	300	432
10	15	9	15	3	7	5	13	9	12	-	9	174	41	72	113	162

3. ÖNERİLEN SEZGİSEL ALGORİTMA (PROPOSED HEURISTIC ALGORITHM)

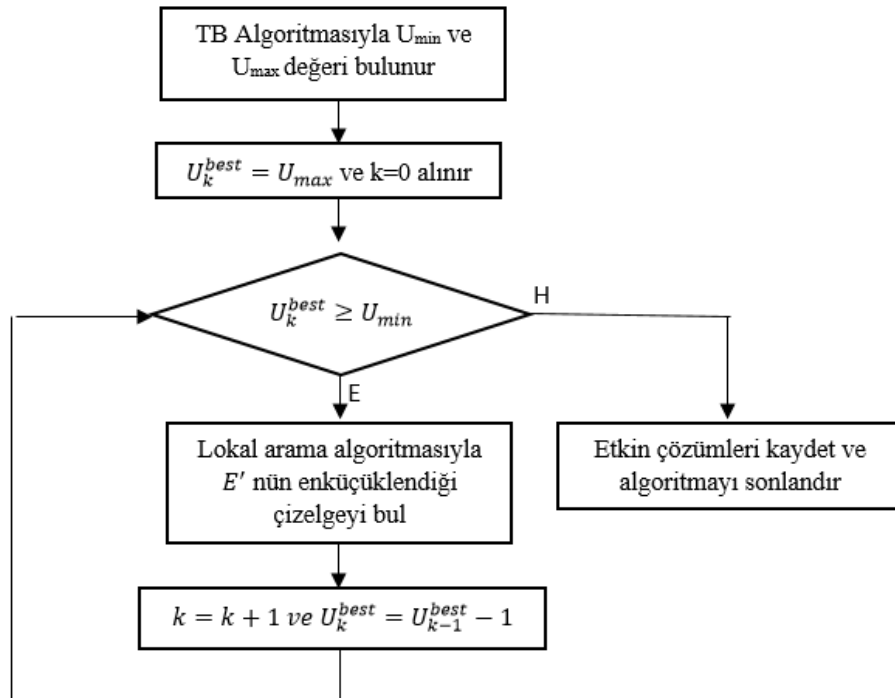
Önerilen sezgisel algoritmada öncelikle tüm işler için makine hızı en yüksek hız kabul edilip, Tavlama Benzetimi (TB) algoritmasıyla sıra bağımlı hazırlık süreli toplam geciken iş sayısının enküçükleme problemi ($1|s_{ij}|\sum U_j$) çözülmekte ve çözüm sonucu incelenen problem için toplam geciken iş sayısı amaç fonksiyonunun alabileceği en küçük değer (U_{min}) belirlenmektedir. Toplam geciken iş sayısı amaç fonksiyonunun alacağı en büyük değerin (U_{max}) belirlenmesi için de makine hızı tüm işler için en düşük hız kabul edilmekte ve $1|s_{ij}|\sum U_j$ problemi TB algoritmasıyla çözülmektedir. U_k^{best} k. çözümde toplam geciken iş sayısını göstermektedir. Başlangıçta U_k^{best} değeri, U_{max} değerine eşit alınır. En çok U_k^{best} değerinde iş gecikecek ve toplam enerji tüketimini enküçükleyen çizelgenin bulunması için lokal arama algoritması kullanılmaktadır. Elde edilen çözüm kaydedilmekte ve U_k^{best} değeri bir birim azaltılarak lokal arama algoritması en çok ($U_k^{best}-1$) sayıda iş gecikecek ve toplam E enküçüklenecek şekilde tekrar çalıştırılmaktadır. Bu adım, U_k^{best} değeri U_{min} ' den küçük bir değere ulaşana kadar tekrar edilmekte ve etkin çözümler kaydedilmektedir. Eğer ilgili U_{min} değerine sahip çözüm bulunamazsa sonraki U_{min} değerine geçilir. Bu yöntemin kullanımıyla U_{min} ve U_{max} arasında toplam geciken iş sayısı olduğu durumda E nin enküçük değerinin bulunması amaçlanmaktadır. Sezgiselde kullanılan algoritmaların durdurma kriterlerini belirtmek gerekirse ana algoritmayı sonlandırma kriteri tavlama benzetimi algoritmasının bulunduğu minimum toplam geciken iş sayısına ulaşılmasıdır.

Çünkü bulunan bu değerden daha az sayıda işin geciktiği bir çizelge mümkün olmamaktadır. Lokal arama algoritmasının durdurma kriteri ise önceden belirlenmiş sayıda çözümün türetilmesidir. Tavlama benzetimi algoritması ise belirlenen son sıcaklığa ulaştığında durmaktadır. Algoritmayı sonlandırma kriterleri belirlenirken literatür ve yapılan testler dikkate alınmıştır. Algoritma durduktan sonra, etkin çözümler kaydedilmektedir. Önerilen sezgisel algoritmanın adımları Şekil 1'de verilmiştir.

Sezgisel algoritmanın yazımında kullanılan kısaltmalar verilmiştir. $T_{final(c)(0)}$: Final (mevcut)(başlangıç) sıcaklığı; $M_{2,max}$: Metod 1 sonucu elde edilen çözüme Metod 2' nin uygulanma sayısı; $maxtry$: Metod 2' nin kullanımı sonucu uygun olmayan çözüm sayısı; $V_{max(min)}$: en yüksek (en düşük) makine hızı; il : iterasyon sayacı; IT : Her bir sıcaklıktaki iterasyon sayısı; q : soğutma oranı; U_k^{best} : k. çözümde toplam geciken iş sayısı; $maxiter$: lokal arama algoritması için maksimum iterasyon sayısı; E_{best} : En iyi çözümde toplam enerji tüketim miktarı; U_{best} : En iyi çözümde toplam geciken iş sayısı; E_n : Komşu çözümde toplam enerji tüketim miktarı; S_n : Komşu çözüm; S_{best} : En iyi çözüm; $iter$: Lokal arama algoritması iterasyon sayacı

3.1. Tavlama Benzetimi Algoritması (Simulated Annealing Algorithm)

Tavlama benzetimi algoritması çoğu çizelgeleme probleminde başarılı bulunan sezgisel bir algoritmadır. Lokal eniyiden kaçmak için iyileşme sağlamayan çözümleri de belirli olasılıkla kabul eder. Algoritmanın sonlarına doğru iyileşme yapmayan çözümlerin kabul olasılığı azalır. Burada



Şekil 1. Sezgisel algoritmanın adımları (Steps of the heuristic algorithm)

amaç umut vaad eden bölgelerde aramayı yoğunlaştırmaktır. TB algoritması özellikle kapasite kısıtsız NP- zor problemlerin çözümünde çok başarılıdır. Ele alınan problem kapasite kısıtsız bir problem olduğu için TB algoritmasının mantığına uygundur. Bu nedenle TB algoritması tercih edilmiştir.

Çalışmada, TB algoritması makine hızı en düşük veya en yüksek hız kabul edildiğinde tek makine, sıra bağımlı hazırlık süreli ve toplam geciken iş sayısının en küçüklenmesi probleminin $(1|s_{ij}|\sum_j U_j)$ çözümü için kullanılmaktadır. Böylece toplam geciken iş sayısı amaç fonksiyonu için U_{max} ve U_{min} değerleri bulunmaktadır. TB algoritması başlangıç bir çözümle başlar. Bu çalışmada başlangıç çözüm EDD (Earliest due date first) kuralına göre oluşturulmaktadır. Komşu çözüm başlangıç çözümden türetilmektedir. Bu çalışmada rassal seçilmiş iki iş yer değiştirerek komşu çözüm oluşturulmaktadır. Komşu çözümle mevcut çözüm amaç fonksiyonları arasındaki fark Δ ile gösterilir. Eğer Δ sıfırdan küçükse, komşu çözüm daha iyi bir çözüm demektir ve bu durumda mevcut çözüm olarak kabul edilir. TB algoritması yerel en iyiden kaçmak için iyileşme yapmayan çözümleri de belirli bir olasılıkla kabul eder. Bu amaçla rassal olarak türetilmiş sayı $exp(-\Delta/T_c)$ değerinden daha küçükse, iyileşme sağlamayan çözüm kabul edilir. T_c mevcut sıcaklığı göstermektedir. TB algoritmasında sıcaklık azaldıkça algoritmanın iyileşme yapmayan çözümleri kabul olasılığı düşmektedir. Önceden belirlenmiş iterasyon sayısı sağlanana kadar mevcut çözümden komşu çözüm türetilir ve Δ değerine göre çözüm mevcut çözüm olarak kabul ya da red edilir. Önceden belirlenmiş iterasyon sayısına ulaşılmca sıcaklık $T_c = T_c * q$ denklemi ile düşürülür. q soğutma oranını göstermektedir. Algoritma son sıcaklığa ulaşana kadar çalışmaktadır. TB algoritması aşağıda verilmiştir.

Procedure TB Algoritması

Input: $n, L_j, S_{ij}, d_j, p_{jq}, V_{\min(\max)}, T_0, T_{\text{final}}, q, IT, f$

Output: $U_{\min}, U_{\max};$

U_0 amaç fonksiyonuna sahip başlangıç çözüm (S_0) EDD kuralına göre oluşturulur;

$S_{\text{best}}=S_c=S_0; U_{\text{best}}=U_c=U_0; T_c=T_0;$

If ($f==0$)

$V=V_{\max};$

Else

$V=V_{\min};$

End

While ($T_c > T_{\text{final}}$)

$il=0;$

While ($il < IT$)

U_n amaç fonksiyonuna sahip komşu çözüm (S_n) türetilir;

$il=il+1; \Delta=U_n-U_c;$

If ($\Delta < 0$) or ($\Delta \geq 0$ and random $(0-1) < exp(-\Delta/T_c)$)

$S_c=S_n; U_c=U_n;$

End

If ($U_c < U_{\text{best}}$)

$S_{\text{best}}=S_c; U_{\text{best}}=U_c;$

End

End

$T_c=T_c * q;$

End

If ($f==0$)

$U_{\min}=U_{\text{best}};$

Else

$U_{\max}=U_{\text{best}};$

End

3.2. Lokal Arama Algoritması (Local Search Algorithm)

Lokal arama algoritması NP- zor problemlerin çözümünde sıklıkla başvurulan bir algoritmadır. Lokal arama algoritmasının kullanımındaki amaç sezgiselin umut vaad eden bölgelerde yoğun arama yapmasını sağlamaktır. Lokal arama algoritması en çok U_k^{best} sayıda geciken iş sayısını sağlayan ve toplam enerji tüketiminin en küçüklendiği çizelgenin bulunması için kullanılmaktadır. Komşu çözümlerin oluşturulmasında farklı bir yöntem kullanılmıştır. Bu bölümde lokal arama algoritmasının adımları, çözümlerin gösterimi ve komşu çözümlerin nasıl oluşturulduğu anlatılmıştır.

3.2.1. Lokal arama algoritmasının adımları

(Steps of the local search algorithm)

Lokal arama algoritmasında önceden belirlenmiş sayıda komşu çözüm türetilmektedir. Türetilen komşu çözümlerde en çok U_k^{best} sayıda iş gecikecek şekilde komşu çözüm türetme yöntemi kullanılmaktadır. Türetilen komşu çözümlerden toplam enerji tüketiminin en küçük olduğu çözüm alınmaktadır. Bu çözüm eldeki en iyi çözümden daha iyi bir çözüme (toplam enerji tüketimi daha küçükse), en iyi çözüm güncellenmektedir. İterasyon sayısı bir arttırılmakta ve algoritma önceden belirlenmiş iterasyon sayısına ulaşana kadar çalışmaktadır. Algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir.

Procedure lokal arama algoritması

Input: Problem parametreleri, $M_{2\max}, \text{maxtry},$

$U_k^{\text{best}}, \text{maxiter}, IT$

Output: Etkin çözümler

$iter \leftarrow 1; E_{\text{best}} \leftarrow \infty;$

While ($iter \leq \text{maxiter}$)

$t \leftarrow 0;$

While ($t < IT$)

$(S_n^t, E_n^t) \leftarrow$ **Komsu çözüm türetme**

(problem data, $M_{2\max}, U_k^{\text{best}}, \text{maxtry}$);

$t \leftarrow t+1;$

End

$t' \leftarrow \min_t E_n^t; S_n \leftarrow S_n^{t'}; E_n \leftarrow E_n^{t'};$

If ($E_n < E_{\text{best}}$)

$S_{\text{best}} \leftarrow S_n; E_{\text{best}} \leftarrow E_n;$

End

$iter \leftarrow iter+1;$

End

3.2.2. Çözümlerin gösterimi (Solution representation)

Önerilen algoritmada çözümler string olarak gösterilmektedir. 5 işin olduğu bir örnek aşağıda Şekil 2' de verilmiştir. İlk satır makine hızını, ikinci satır işleri göstermektedir. Buna göre, 2. iş ilk sırada çizelgelenmiştir ve 1 makine hızıyla işlem görmüştür. Benzer şekilde, 3 işi 2. sırada çizelgelenmiştir ve 4 makine hızıyla işlem görmüştür.

Makine hızı	1	4	2	1	1
İşler	2	3	1	4	5

Şekil 2. Örnek gösterim (An example representation)

3.2.3. Komşu çözümlerin oluşturulması (Neighborhood generation)

Önerilen algoritmada, komşu çözümlerin oluşturulmasında 2 yöntem ardışık olarak kullanılmaktadır.

Yöntem 1: Yöntem 1 ile rassal olarak bir iş sırası oluşturulur. Tüm işler için makine hızı en yüksek hız kabul edilir. Bu durumda toplam geciken iş sayısı U_k^{best} değerinden daha fazlaysa, yeni bir iş sırası rassal olarak tekrar türetilir. Çünkü işler en yüksek makine hızında işlenmesi durumunda bile U_k^{best} değerinden büyük sayıda iş gecikiyorsa, ilgili sırada U_k^{best} değerinin sağlanamayacağı anlaşılmaktadır. Yöntem 1 en fazla U_k^{best} sayıda iş gecikecek şekilde çözüm türetene kadar rassal olarak iş sırası türetmektedir. En fazla U_k^{best} sayıda iş gecikecek şekilde çözüm türetildikten sonra, bu çözüme Yöntem 2 uygulanmaktadır.

Yöntem 2: Yöntem 1 ile elde edilen çözüm Yöntem 2' nin uygulanmasıyla toplam enerji tüketimi açısından iyileştirilmektedir. Rassal seçilmiş işlerde makine hızı düşürülerek toplam enerji tüketimi iyileştirilmekte fakat U_k^{best} değerini sağlamaya devam eden çözümler elde edilmektedir. Bu amaçla aşağıda verilen özellikler kullanılmaktadır.

İş yükü L_j olan j işi v_q hızıyla işlendiğinde, işin işlem süresi (L_j/v_q) olur. Enerji tüketim miktarı ise ($L_j/v_q \times y_{jq} \times p_{jq}$) olarak hesaplanır. Eğer işlem hızı v_q değerinden $v_{(q-1)}$ değerine düşürülürse, işlem zamanı ($L_j/v_{(q-1)}$) olur ve işlem zamanı artar. Bu durumda enerji tüketim oranı ise ($L_j/v_{(q-1)} \times y_{jq} \times p_{j(q-1)}$) olarak hesaplanır. $p_{j(q-1)} < p_{jq}$ olduğu için enerji tüketimi makine hızı düşürüldüğünde düşebilir. Fakat j işinin işlem süresi arttığı için toplam enerji tüketimi artabilir. En son sırada çizelgelenen ve ardışık geciken işlerin işlem süreleri arttırıldığında toplam geciken iş sayısı değişmez. Fakat toplam enerji tüketimi makine daha yavaş çalıştırılarak azaltılabilir. En son sırada çizelgelenen ve ardışık olarak geciken her bir iş için toplam enerji tüketiminin en küçük olduğu hız, makine hızı olarak seçilir. Eğer bir işin tamamlanma zamanı işin teslim tarihinden küçükse, iş gecikmemektedir. Bir çizelgede her bir iş için $B_j = (d_j - C_j)$

değeri hesaplanır. Ardışık olarak gecikmeyen işlerde en küçük B_j değeri kadar işlerin işlem süreleri arttırılacak şekilde rassal seçilmiş işlerin makine hızları düşürülür. Böylece U_k^{best} değerini sağlayan ve toplam enerji tüketimini en küçükleyen çözümlerin bulunması amaçlanır.

Yöntem 2'nin kullanımında rassallık olduğu için farklı çözümler elde edilebilir. Yöntem 1 sonucu elde edilen çözüme M_{2max} sayıda yöntem 2 uygulanmakta, bu sayıya ulaşıldığında yöntem 2' nin uygulanması durdurulmaktadır. Yöntem 2' nin uygulanması sonucu U_k^{best} değerinden daha fazla sayıda işin geciktiği çizelge sayıları $maxtry$ sayısına ulaştığında da Yöntem 2' nin uygulaması durdurulmaktadır. Yöntem 2' nin uygulaması sonucu elde edilen çözümlerden toplam enerji tüketiminin en küçük olduğu çözüm alınmaktadır. Belirli bir sayıda deneme sonucu U_{best} değerine ulaşılmıyorsa algoritma sonlanır. Komşu çözüm türetme mekanizması aşağıda verilmiştir.

Procedure komşu çözüm türetme yöntemi

Input: Problem parametreleri,

$M_{2max}, maxtry, U_k^{best}$

Output: Komşu çözüm

Rassal bir çözüm oluştur ve bu çözüme

makine hızını en yüksek hız kabul et ve

çözümde U_k geciken iş sayısını bul;

While ($U_k > U_k^{best}$)

Rassal çözüm oluştur ve çözümde U_k

geciken iş sayısını bul;

End

$m \leftarrow 1; try \leftarrow 1;$

While ($m < M_{2max}$ and $try < maxtry$)

Toplam E' yi en küçükleyecek şekilde

işlerin makine hızını revize et ve U_k

değerini hesapla;

If ($U_k > U_k^{best}$)

$try \leftarrow try + 1;$

End

$m \leftarrow m + 1;$

End

4. NSGA II ALGORİTMASI (NSGA II ALGORITHM)

Deb, Pratap, Agarwal ve Meyarivan [38] tarafından 2002 yılında ortaya atılan çok amaçlı bir evrimsel algoritmadır. NSGA II pareto en iyi kümeyi araştırmak için GA tabanlı olarak tasarlanmıştır. NSGA II algoritmasında öncelikle N büyüklüğündeki başlangıç popülasyonu oluşturulur. Çalışma kapsamında başlangıç popülasyonu rassal olarak oluşturulmuştur. Bu popülasyon hızlı baskın olmayan sıralama yaklaşımıyla derecelendirilir. Bu yaklaşımda ise her bireyin baskın olduğu bireyler ve bu bireye baskın gelen bireyler kaydedilir. Eğer bir bireye baskın olan hiçbir birey yok ise bu bireyin n_j değeri sıfıra eşittir ve bu birey birinci baskınlık derecesine aktarılır. Daha sonra birinci baskınlık derecedeki bireylerin bastırıldığı bireylerin n_j değerleri bir azaltılır ve n_j değeri sıfır olan bireyler ikinci dereceye aktarılır. Sonra ikinci derecedeki bireylerin bastırıldığı bireylerin n_j değerleri bir azaltılır ve n_j değeri sıfır olan bireyler üçüncü dereceye aktarılır. Bu işlem tüm bireyler bir dereceye

aktarılan kadar devam eder. Sonra yığındaki bireylere yeniden üretim, çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanarak Q_t popülasyonu oluşturulur. Yeniden üretim mekanizmasında baskınlık derecelerinden yararlanıldığı için başlangıç popülasyonunun öncelikle baskınlık derecelendirmesi yapılmaktadır. Başlangıç popülasyonu ve Q_t popülasyonunun olduğu $2N$ büyüklüğündeki popülasyon R_t popülasyonu olarak isimlendirilir ve bu popülasyona baskınlık derecelendirmesi uygulanır. Diğer jenerasyona aktarılan bireylerin seçiminde baskınlık derecelendirmesi dikkate alınır [39]. Diğer popülasyonun da birey sayısı N olması istendiğinden $2N$ büyüklüğündeki popülasyondaki tüm bireyler diğer jenerasyona aktarılamamaktadır. Şöyleki baskınlık derecesi en küçük bireylerden başlayarak bireyler $(t+1)$. popülasyona aktarılır. Aktarılan bireylerin sayısının N olduğu son baskınlık derecesine ise yığılma uzaklığı hesabı uygulanır. Çünkü diğer jenerasyonun birey sayısının N olması istendiği için büyük olasılıkla bu baskınlık derecesine sahip tüm bireyler diğer popülasyona aktarılamayacaktır. Buradaki bireyler yığılma uzaklığı dikkate alınarak diğer popülasyona seçilir. Yığılma uzaklığı büyük olan bireyler diğer popülasyona seçilmektedir. Sonuç olarak bir bireyin baskınlık derecesi ne kadar küçükse bireyin diğer popülasyona aktarılma olasılığı o kadar yüksektir. Eşit baskınlık derecesinde olan bireylerde ise bir tercih yapılması gerekiyorsa yığılma uzaklığı büyük olan bireyin yeni jenerasyona aktarılma olasılığı yüksek olmaktadır [40]. Daha sonra yeni jenerasyondan yeniden üretim, çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile $Q_{(t+1)}$ popülasyonunu oluşturur ve işlemler nesil sayısı sağlanana kadar devam eder.

4.1. Yığılma Uzaklığı Hesaplaması (Calculation of the Crowding Distance)

Öncelikle her bir amaç için yığındaki bireyler küçükten büyüğe sıralanır ve en küçük ve en büyük değerlere sahip bireylerin yığılma uzaklığı sonsuz alınır. Böylece uç değerlerdeki bireylerin yeni jenerasyona aktarılma olasılığı artırılır. Arada kalan diğer çözümlere, iki komşu çözümün amaç fonksiyonu değerlerinin mutlak normalize edilmiş farklarından bulunan bir uzaklık değeri atanır. Toplam yığılma uzaklığı değeri her amaç için hesaplanan bireysel uzaklıkların toplamıdır. Yığılma uzaklığı hesaplaması aşağıda verilmiştir [40].

Procedure Yığılma uzaklığı sıralaması

Input: F_k (Yığılma uzaklığı hesaplanacak baskınlık derecesindeki bireyler)

Output: I_i (bireylerin yığılma uzaklığı)

$L=|F_k|;$

//her bir amaç fonksiyonuna göre bireyleri küçükten büyüğe sırala

For $j=1:m$

$I_{i(j)}=\text{sort}(I_{i(j)});$

$I_{1(j)}=I_{L(j)}=1000000000;$

End

For $i=2:L-1$

For $j=1:m$

$$I_{i(j)}=I_{i(j)}+|f_{i+1}^j-f_{i-1}^j|/(f_{max}^j-f_{min}^j);$$

$$I_i=I_i+I_{i(j)};$$

End

End

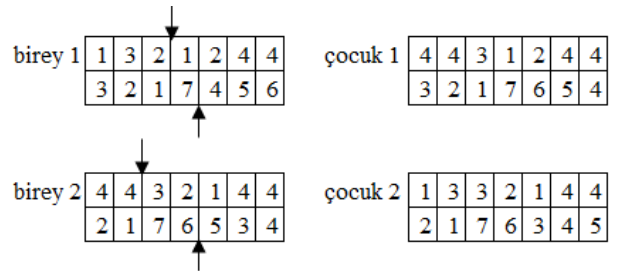
4.2. NSGA II Algoritmasının parametreleri (Parameters of NSGA II)

NSGA II algoritmasının parametreleri yığın büyüklüğü (N), çaprazlama oranı, mutasyon oranı ve jenerasyon sayısıdır. Literatür dikkate alınarak ve yapılan denemeler sonucu yığın büyüklüğü 150, çaprazlama oranı 0,9, mutasyon oranı 0,1 belirlenmiştir. Parametre değerleri Tablo 3' de verilmiştir. NSGA II algoritması önceden belirlenen jenerasyon sayısına ulaştığında durmaktadır. Yani jenerasyon sayısı algoritmanın durdurma kriteridir. Algoritma önerilen sezgisel algoritmayla eşit sürede çalışması amaçlandığından jenerasyon sayısı belirlenmemiştir. Yani algoritma önerilen algoritmaya eşit sürede çalıştığına sonlanmaktadır.

Tablo 3. NSGA II Algoritmasının parametre değerleri
(Parameters of the NSGA II)

Parametre adı	Değeri
Yığın büyüklüğü (N),	150
Çaprazlama oranı	0,9
Mutasyon oranı	0,1

Başlangıç çözüm rassal olarak oluşturulmuştur. Çaprazlamada ise literatürde sıklıkla kullanılan pozisyon tabanlı çaprazlama (position based crossover) yöntemi kullanılmıştır. Buna göre aşağıdaki Şekil 3' de verilen Birey 1 ve Birey 2 çaprazlanacağı zaman Birey 1' in birinci satırı için rassal bir sayı ve ikinci satırı için rassal bir sayı türetilmektedir. Örneğin birey 1 için birinci satır için 3, ikinci satır için 4 sayısı türetilmiştir. Çocuk 1' e, birey 1' in birinci satırı için türetilen genlerden sonraki genler direkt aktarılmıştır. Önceki genler ise Birey 2' den alınmıştır. Çocuk 1' nin ikinci satırı ise birey 1 in ikinci satırı için rassal türetilen gene kadar olan genler direkt aktarılmış, kalan genler ise birey 2' deki iş sırası dikkate alınarak eklenmiştir. Aynı işlem çocuk 2' ye uygulanmıştır. Sonuçta birey 1 ve 2' nin çaprazlaması sonucu şekilde verilen Çocuk 1 ve 2 oluşmaktadır. Çaprazlama sonucu oluşan bireylerde ardışık geciken son işlerin makine hızı en düşük toplam enerji tüketimi sağlanacak şekilde değiştirilmektedir. Böylece toplam geciken iş sayısı değişmemekte ve enerji tüketim oranı azaltılmaktadır.



Şekil 3. Çaprazlama örneği (Example crossover)

Mutasyonda ise rassal olarak seçilmiş bir iş için makine hızı rassal olarak değiştirilmektedir. Yeniden üretim operatöründe ise ikili turnuva yöntemi kullanılmakta olup, rassal seçilmiş iki bireyden derecesi daha küçük olan çaprazlamaya sokulmaktadır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Tüm algoritmalar MATLAB R2012b' da kodlanmış ve Intel(R) Core (TM) i7-5500 U CPU at 2.40 GH z, 12GB bellekli ve Windows 10 işletim sistemine sahip bir bilgisayarda çalıştırılmıştır. Önerilen matematiksel model GAMS Cplex çözücüsü ile çözülmüştür

5.1. Test Problemlerinin Türetilmesi ve Önerilen Sezgisel Algoritmanın Parametreleri

(Test Problem Generation and Parameters of the Heuristic Algorithm)

Konuyla ilgili test problemlerine ulaşamadığından, önerilen sezgisel algoritmanın başarısının gösterilmesinde literatür dikkate alınarak test problemleri türetilmiş ve bu problemler dikkate alınmıştır. İş sayısı 10, 30, 50, 70 ve 100 olarak alınmıştır. İş yükü L_j ise $U(5,50)$ aralığında düzgün dağılıma uygun türetilmiştir. Hazırlık süreleri s_{ij} , $U(3,15)$ aralığında düzgün dağılıma uygun türetilmiştir. Literatür dikkate alınarak makine hızları 0.75, 1, 1.25 ve 1.50 olarak alınmıştır. İşlerin teslim zamanları ise Lee vd. [39], tarafından önerildiği şekilde türetilmiştir. Teslim tarihi sıklık faktörü τ ve teslim zamanı aralık faktörü R teslim zamanlarının türetilmesinde kullanılmaktadır. τ ve R Eş. 15'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\tau = 1 - \bar{d} / C_{\max} \quad (14)$$

$$R = (d_{\max} - d_{\min}) / C_{\max} \quad (15)$$

(C_{\max} : Son işin tamamlanma zamanı, \bar{d} : Ortalama teslim tarihi, $d_{\max(\min)}$: maksimum (minimum) teslim tarihi)

Çalışmada τ 0.3 veya 0.7 ve R 0.2 veya 0.8 olarak alınmıştır. Teslim tarihleri τ olasılıkla $[\bar{d} - R\bar{d}, \bar{d}]$ ve $(1 - \tau)$ olasılıkla $[\bar{d}, \bar{d} + (C_{\max} - \bar{d})R]$ aralığında türetilir. C_{\max} için alt sınır Eş. 16'daki gibi bulunmuştur.

$$S_j = \min_{h \in J} s_{hj} \quad \forall j \quad (16)$$

Eş. 16 ile her bir iş için hazırlık süresi en küçük hazırlık süresi olarak alınmaktadır.

$$S^1 = \sum_j S_j \quad (17)$$

S^1 değeri tüm S_j değerlerin toplamı olarak alınmakta olup Eş. 17 ile gösterilmiştir

$$C_{\max} = (\sum_j L_j / v_{q^*} + S^1) \quad (18)$$

Alt sınır ise Eş. 18 ile hesaplanmaktadır. (v_{q^*} : En yüksek makina hızı) [41].

Enerji tüketim oranları Wu ve Che [36], tarafından önerildiği şekilde türetilmiştir. Enerji tüketim oranlarını türetmek için öncelikle p_j parametresi $U[4,18]$ aralığında düzgün dağılıma uygun türetilir. Enerji tüketim oranları ise $p_{jq} = p_j * L_j * v_q^{\alpha-1}$ olarak hesaplanır. $p_j * L_j$ değerleri $v_q^{\alpha-1}$ ile çarpılmakta, böylece yüksek hızda enerji tüketim oranı yüksek olmaktadır. Literatür dikkate alınarak, $\alpha=3$ olarak alınmıştır. Her bir özelliğindeki problemden iki farklı test problem türetilmiş olup, toplam 40 adet test problemi çözülmüştür. Önerilen sezgisel algoritmanın parametreleri belirlenirken yapılan testler dikkate alınmıştır. Bu amaçla aşağıdaki tabloda verilen parametre seviyeleri için denemeler yapılmış ve * ile belirtilen seviyeler parametre değeri olarak alınmıştır.

Tablo 4. Önerilen sezgisel algoritmanın parametreleri
(Parameters of the heuristic algorithm)

Parametre	Değer
maxtry	20*, 30 ve 40
$M_{2\max}$	25, 50* ve 75
IT	100, 200* ve 300
T_0	500, 1000* ve 1500
q	0.99*, 0.95 ve 0.90
T_{final}	1
maxiter	100, 150 ve 200*

5.2. Performans Ölçütleri (Performance Criteria)

Performans ölçütleri olarak literatürde en sık kullanılan 4 kriter dikkate alınmıştır. Bu kriterler: Bastırılmamış çözüm sayısı (N_{nd}), bastırılmamış çözüm oranı (R_{nd}), referans kümesinden ortalama uzaklık (AD) ve çözüm süresidir [36]. PF_a a yönteminin kullanımı sonucu elde edilen pareto etkin yüzeyi göstermektedir. a algoritmasının başarısı PF_a ' ı RS ile karşılaştırılması sonucu belirlenir. RS (reference set) ise probleme ait optimal ya da optimale yakın pareto yüzeyi göstermektedir. Fakat RS problemin NP- zor yapısından dolayı pek çok test problemi için optimal şekilde bulunamamaktadır. Bu yüzden RS önerilen algoritmanın kullanımı sonucu elde edilen pareto etkin yüzey ile (PF_{her}), NSGA II algoritmasının çalıştırılması sonucu elde edilen pareto etkin yüzeyin (PF_{NSGAI}) birleşimi olarak alınmaktadır. ($RS = PF_{her} \cup PF_{NSGAI}$) Daha sonra RS kümesinde bastırılmış çözümler ayıklanmaktadır ve RS kümesinde sadece bastırılmamış çözümler bırakılmaktadır. $N_{nd}(a)$ ise RS kümesinde olup a yöntemi sonucu bulunan çözümlerin sayısını göstermektedir. $N_{nd}(a)$ değeri ne kadar büyükse algoritma o kadar başarılıdır [42]. $R_{nd}(a) = \frac{N_{nd}(a)}{|PF_a|}$

olarak hesaplanmaktadır. $|PF_a|$, PF_a kümesinin eleman sayısını gösterir. $R_{nd}(a)$ değerinin sıfır olması algoritmanın bulunduğu çözümlerin diğer algoritma tarafından bastırıldığını göstermektedir. Değerin 1 olması ise algoritmanın çok başarılı olduğunu, yani algoritmanın bulunduğu sonuçların diğer algoritmanın bulunduğu sonuçlar tarafından bastırılmadığını gösterir. Bir başka kriter ise AD(a) olup, referans kümesinden ortalama uzaklığı göstermektedir. Bu kriter RS deki bir çözüme en yakın çözümün ortalama normalize uzaklığını göstermektedir. Aşağıda Eş. 19' de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$\frac{1}{|RS|} \sum_{y \in RS} \left\{ \min_{x \in PF_a} \sqrt{\left(\frac{U(x)-U(y)}{\bar{U}-\underline{U}} \right)^2 + \left(\frac{E(x)-E(y)}{\bar{E}-\underline{E}} \right)^2} \right\} \quad (19)$$

\bar{U} ve \underline{U} (veya \bar{E} ve \underline{E}) RS' deki maksimum ve minimum geciken iş sayısı (veya toplam enerji tüketimi) değerlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi AD(a), PF(a)'nın RS' ye uzaklığını gösterir ve düşük AD(a) değeri algoritmanın yüksek performansı olduğunu gösterir.

5.3. Karşılaştırma Sonuçları (Comparison Results)

Tablo 5'de ε - kısıt yöntemi, önerilen sezgisel algoritma ve NSGA II algoritmasının literatürdeki performans ölçütlerine

göre karşılaştırılması verilmiştir. 30 ve daha fazla iş olduğu test problemlerinde belli bir ε değerinde 18000 sn de uygun çözüm elde edilemediği için ε - kısıt yöntemiyle sadece 10 iş olduğu test problemleri karşılaştırılmıştır. ε - kısıt yöntemiyle 10 iş olduğu test problemlerin tüm Pareto etkin çözümler bulunmuştur. Önerilen sezgisel algoritma da 10 iş olduğu test problemlerinde tüm Pareto etkin çözümleri bulmaktadır. 10 iş olduğu test problemlerinde önerilen sezgisel algoritma ile R_{nd} değeri 1 bulunmuştur. Pareto etkin çözüm sayısı ise ε - kısıt yöntemiyle aynıdır. 30 ve daha fazla iş olduğu test problemlerinde ise önerilen sezgisel algoritma ve NSGA II algoritması karşılaştırılmıştır. NSGA II algoritmasının bulunduğu pek çok çözüm önerilen sezgisel

Tablo 5. Karşılaştırma sonuçları (Comparison results)

n	τ	R	ε - kısıt yönt.				Önerilen sezgisel				NSGA II			
			N_{nd}	R_{nd}	AD	CPU	N_{nd}	R_{nd}	AD	CPU	N_{nd}	R_{nd}	AD	
10	0.3	0.2	3	1	0	17452	3	1	0	352,21	1	0,25	5,02	
			4	1	0	56852	4	1	0	422,52	2	0,5	6,12	
		0.8	4	1	0	36985	4	1	0	411,2	2	1	11,01	
			4	1	0	46521	4	1	0	366,45	3	0,42	5,13	
	0.7	0.2	3	1	0	42638	3	1	0	223,14	1	0,2	2,21	
			3	1	0	39852	3	1	0	306,41	3	1	1,18	
		0.8	4	1	0	54852	4	1	0	312,14	2	0,4	10,2	
			3	1	0	38966	3	1	0	302,45	2	0,33	9,45	
			0.3	0.2	-	-	-	9	1	0	651,41	2	0,33	12,52
				-	-	-	-	11	1	0	758,42	1	0,16	10,56
0.8	-	-		-	8	1	0	542,63	3	0,6	14,51			
-	-	-		-	7	1	0	699,52	0	0	11,89			
0.7	0.2	-	-	-	-	6	1	0	534,41	1	0,1	12,32		
		-	-	-	-	5	1	0	608,85	0	0	15,41		
	0.8	-	-	-	-	5	1	0	501,35	0	0	6,52		
		-	-	-	-	5	1	0	852,74	2	0,25	14,12		
		0.3	0.2	-	-	-	14	1	0	854,63	3	0,33	13,62	
			-	-	-	-	12	1	0	786,96	4	0,4	13,85	
0.8	-		-	-	12	1	0	985,41	0	0	21,32			
-	-		-	-	8	1	0	982,41	0	0	25,41			
0.7	0.2	-	-	-	-	8	1	0	993,42	0	0	18,63		
		-	-	-	-	8	0,8	0,05	953,45	2	0,33	10,89		
	0.8	-	-	-	-	7	1	0	874,65	0	0	11,68		
		-	-	-	-	5	1	0	904,12	1	0,16	15,41		
		0.3	0.2	-	-	-	17	1	0	1206,52	0	0	22,21	
			-	-	-	-	17	1	0	1198,85	3	0,33	20,49	
0.8	-		-	-	21	1	0	1058,41	0	0	20,2			
-	-		-	-	20	0,9	0,02	1002,41	4	0,4	25,19			
0.7	0.2	-	-	-	-	12	1	0	1287,65	0	0	9,88		
		-	-	-	-	10	1	0	1185,13	3	0,2	8,89		
	0.8	-	-	-	-	11	1	0	1174,41	0	0	18,84		
		-	-	-	-	15	1	0	1102,1	1	0,08	10,42		
		0.3	0.2	-	-	-	20	1	0	1478,52	0	0	22,52	
			-	-	-	-	24	0,92	0,5	1585,41	4	0,25	20,19	
0.8	-		-	-	21	1	0	1563,42	1	0,06	25,57			
-	-		-	-	20	1	0	1685,13	4	0,19	22,17			
0.7	0.2	-	-	-	-	14	1	0	1341,65	4	0,4	12,85		
		-	-	-	-	19	1	0	1585,36	3	0,27	11,1		
	0.8	-	-	-	-	15	1	0	1574,65	2	0,14	11,41		
		-	-	-	-	16	1	0	1515,78	0	0	10,17		
		Ortalama						11	0,99	0,01	918,158	2	0,23	13,78

algoritmanın bulunduğu çözümlerce bastırılmıştır. Sonuçta önerilen algoritma ile 10 işin olduğu test problemlerinde tüm Pareto etkin çözümler bulunabilmektedir. 30 ve daha fazla sayıda işin olduğu test problemlerinde ise çok amaçlı problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılan NSGA II algoritmasına göre performans kriterlerine göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, enerji etkin, sıra bağımlı hazırlık süreli tek makine çizelgeleme problemi incelenmiştir. Ele alınan problemde hız ayarlama metodu dikkate alınmıştır. Amaç fonksiyonları toplam enerji tüketiminin ve toplam geciken iş sayısının enküçüklenmesi olup, problem çok amaçlıdır. Probleme özgü çok amaçlı matematiksel model önerilmiştir. Tüm Pareto etkin yüzeyin bulunması için ϵ - kısıt yöntemi kullanılmıştır. Fakat problemin NP- zor yapısı sonucu, pek çok test problemi için ϵ - kısıt yöntemi en iyi çözümü garanti edememektedir. Bu yüzden çok amaçlı sezgisel bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmanın başarısı küçük boyutlu problemlerde ϵ - kısıt yönteminin sonucuyla, diğer problemlerde ise NSGA II algoritmasının sonuçlarıyla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Sonuçta önerilen çok amaçlı sezgisel algoritma NSGA II algoritmasından daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Bu çalışmayla birlikte enerji etkin çizelgeleme problemlerinde ilk defa toplam geciken iş sayısının enküçüklenmesi amacı dikkate alınmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ding J. Y., Song S., Wu C., Carbon- efficient scheduling of flow shops by multi- objective optimization, *European Journal of Operational Research*, 248, 758-771, 2016.
- Che A., Wu X., Peng J., Yan P., Energy- efficient bi-objective single machine scheduling with power-down mechanism, *Computers and Operations Research*, 85, 172- 183, 2017.
- Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M., Li, W., Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic- simulated annealing algorithm, *Robotic and Computer Integrated Manufacturing*, 29, 418- 429, 2013.
- Mouzon, G., Yildirim, M. B., A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine, *International journal of Sustainable Engineering*, 105- 116, 2008.
- Mouzon, G., Yildirim, M. B., Twomey, J., Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment, *International Journal of Production Research*, 45 (18-19), 4247- 4271, 2010.
- Yildirim, M. B., Mouzon, G., Single- machine sustainable production planning to minimize total energy consumption and total completion time using a multiple objective genetic algorithm, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 59 (4), 585- 597, 2012
- Gong, X., Pessemier, T. D., Joseph, W., Martens, L., A generic method for energy- efficient and energy- cost-effective production at the unit process level, *Journal of Cleaner Production*, 113, 508- 522, 2016
- Che, A., Wu, X., Peng, J., Yan, P., Energy- efficient bi-objective single- machine scheduling with power- down mechanism, *Computers and Operations Research*, 85, 172- 183, 2017.
- Tarakçı, E., Zaim A.H., Öztaş, O., Design of a genetic algorithmic approach for reducing energy consumption in single machine production systems, *Journal of International Trade, Logistics and Law*, 4 (1), 101, 2018.
- Shrouf, F., Ordieres- Mere, J., Garcia-Sanchez, A., Ortega-Mier, M., Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs, *Journal of Cleaner Production*, 67, 197- 207, 2014
- Tsao, Y., Thanh, V., Hwang, F., Energy- efficient single- machine scheduling problem with controllable job processing times under differential electricity pricing, *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104902, 2020.
- Zhou, S., Jin, M., Du, N., Energy- efficient scheduling of a single batch processing machine with dynamic job arrival times, *Energy*, 209, 118420, 2020.
- Mikhaylidi, Y., Naseraldin, H., Yedidsion, L., Operations scheduling under electricity time- varying prices, *International Journal of Production Research*, 53 (23), 7136- 7157, 2015
- Aghelinejad, M., Ouazene, Y., Yalaoui, A., Machine and production scheduling under electricity time varying prices, *IEEM*, 2016 IEEE International conference on IEEE, 992- 996, 2016.
- Gong, X., Pessemier, T. D., Joseph, W., Martens, L., An energy- cost aware scheduling methodology for sustainable manufacturing, *Procedia CIRP*, 29, 185- 190, 2015.
- Gong, X., De Pessemier, T., Joseph, W., Martens, L., A power data driven energy-cost-aware production scheduling method for sustainable manufacturing at the unit process level, 2016 IEEE 21 st international conference on IEEE, 1-8, 2016.
- Aghelinejad, M., Ouazene, Y., Yalaoui, A., Preemptive scheduling of a single machine with finite states to minimize energy costs, *Springer International Publishing*, 591-599, 2017.
- Gong, X., Wee, M., Pessemier, T., Verbrugge, S., Colle, D., Martens, L., Joseph, W., Integrating labor awareness to energy- efficient production scheduling under real time electricity pricing: An empirical study, *Journal of Cleaner Production*, 168, 239- 253, 2017
- Lee, S., Chung, B. D., Jeon, H. W., Chang, J., A dynamic control approach for energy- efficient production scheduling on a single machine under time-varying electricity pricing, *Journal of Cleaner Production*, 165, 552- 563, 2017.
- Aghelinejad, M., Ouazene, Y., Yalaoui, A., Production scheduling optimisation with machine state and time-dependent energy costs, *International Journal of Production Research*, 56 (16), 5558- 5575, 2018.

21. Zhang, H., Fang, Y., Pan, R., Ge., C., A new greedy insertion heuristic algorithm with a multi- stage filtering mechanism for energy- efficient single machine scheduling problems, *Algorithms*, 11 (2): 18, 2018.
22. Rubaiee, S., Cinar, S., Yildirim, M. B., An energy-aware multiobjective optimization framework to minimize total tardiness and energy cost on a single machine nonpreemptive scheduling, *IEEE Transactions on Engineering Manegement*, 99, 1- 16, 2018.
23. Artigues, C., Lopez, P., Hait, A., The energy scheduling problem: Industrial case- study and constraint propagation techniques, *International Journal of Production Economics*, 143, 13- 23, 2013.
24. Nattaf, M., Artigues, C., Lopez, P., A hybrid exact method for a scheduling problem with a continuous resoruce and energy constraints, *Constraints*, 20, 304-324, 2015.
25. Liao, X., Zhang, R., Chiong, R., Multi- objective optimization of single machine scheduling with energy consumption constraints, *Computational Intelligence (SSCI)*, 2017 IEEE Symposium series on IEEE, 1-8, 2017.
26. Chen, L., Wang, J., Xu, X., An energy- efficient single machine scheduling problem with machine reliability constraints, *Computers and Industrial Engineering*, 137, 106072, 2019.
27. Albers, S., Fujiwara, H., Energy efficient algorithms for flow time minimization, *ACM Transactions on Algorithms*, 3 (4), 49, 2007.
28. Antoniadis, A., Huang, C. C., Non- preemptive speed scaling, *Journal of scheduling*, 16 (4), 385- 394, 2013.
29. Antoniadis, A., Huang, C. C., Ott, S., A fully polynomial- time approximation scheme for speed scaling with speed state, *Proceedings of the twenty-sixth annual ACM- SIAM symposium on discrete algorithms*, Society for industrial and applied mathematics, 1102- 1113, 2015.
30. Fang, K., Uhan, N. A., Zhao, F., Sutherland, J. W., Scheduling on a single machine under time- of –use electricity tariffs, *Annals of Operations Reserach*, 238, 199- 227, 2016.
31. Tasgetiren, M. F., Öztop, H., Eliiyi, U., Eliiyi D. T., Pan, Q. K., Energy efficient single machine total weigted tardiness problem with sequence- dependent setup times, *International conference on intelligent computing*, Springer, 746- 758, 2018.
32. Seo, D. K., Klein, C. M., Jang, W., Single machine stochastic scheduling to minimize the expected number of tardy jobs using mathematical programming models, 1. *Computers and Industrial Engineering*, 48 (2), 153- 161, 2005.
33. Chen, W. J., Minimizing number of tardy jobs on a single machine subject to periodic maintenance, *Omega*, 37, 591- 599, 2009.
34. Cyril, B., Samia, O., Minimizing the number of tardy jobs for the single machine scheduling problem: MIP-based lower and upper bounds, *RAIRO*, 47 (1), 33-46, 2013.
35. Liu, Y., Liao, X., An enhanced MOPSO algorithm for energy- efficient single- machine production scheduling, *Sustainability*, 11, 5381, 2020.
36. Aydilek, A., Aydilek, H., Allahverdi, A., Algorithms for minimizing the number of tardy jobs for reducing production cost with uncertain prpcessing times, *Applied mathematical modelling*, 45, 982- 996, 2017.
37. Bootaki, B., Mahdavi, I., Paydar, M. M., A hybrid GA- AUGMECON method to solve a cubic cell formation problem considering different worker skills, *Computers and Industrial Engineering*, 75, 31- 40, 2014.
38. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA II, *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 6 (2), 182- 197, 2002.
39. Lee, Y., Bhaskaran, K., Pinedo, M., A heuristic to minimize the total weighted tardiness with sequence-dependent setups. *IIE Transactions*, 29 (1), 45-52, 1997.
40. Durmaz, E., Şahin R., NSGA- II and goal programming approach for the multi- objective single row facility layout problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (3), 941- 955, 2017.
41. Bektur, G., Saraç, T., Two parallel injection machine scheduling under crane constraint, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (4), 903- 911, 2016.
42. Wu, X., Che, A., A memetic differential evolution algorithm for energy- efficient parallel machine scheduling. *Omega*, 82, 155- 165, 2019.



Effect of dendritic copper powder addition to polyamide 12 in selective laser sintering

Aylin Bekem^{1*}, Burçin Özbay^{2,3}, Mustafa Enes Bulduk²

¹Department of Metallurgical and Materials Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, 34220, Turkey

²Aluminum Test Training and Research Center (ALUTEAM), Fatih Sultan Mehmet Vakıf University, Istanbul, 34445, Turkey

³Department of Polymer Science and Technology, Istanbul Technical University, Istanbul, 34496, Turkey

Highlights:

- Dendritic copper filled polyamide 12 production
- Determination of SLS parameters
- Physical and mechanical evaluation

Keywords:

- Dendritic copper powder
- Polyamide 12
- Selective laser sintering

Article Info:

Research Article

Received:21.05.2020

Accepted: 16.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.728198

Correspondence:

Author: Aylin Bekem

e-mail:

abekem@yildiz.edu.tr

phone: +90 212 383 4619

Graphical/Tabular Abstract

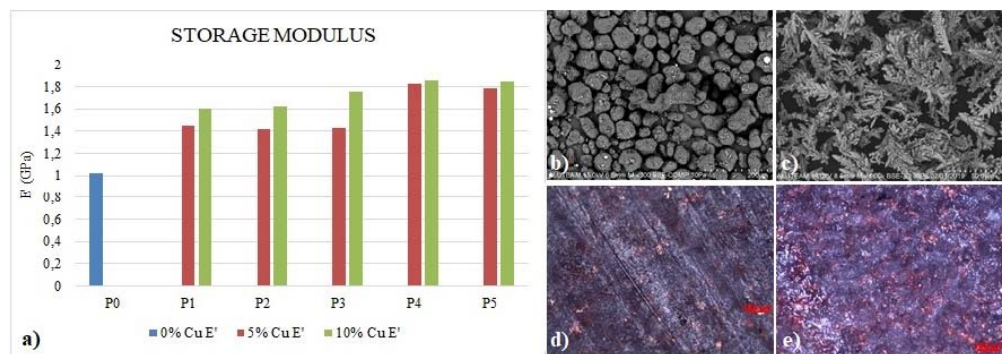


Figure A. a) Storage modulus values, b) Polyamid powders, c) Dendritic copper powders, d) 5% dendritic copper filled sample, e) 5% dendritic copper filled sample.

Purpose: The aim of this paper was to investigate the properties of polyamide 12 when dendritic copper powder was added as filler in selective laser sintering (SLS) process and to optimize the process parameters.

Theory and Methods:

The addition of fillers can increase the properties of polymer materials. It is also possible to use fillers in SLS powder bed fusion additive manufacturing method, which is a new manufacturing method based on the sintering of polymer powders with an infrared laser beam. Although the use of fillers is not very common in this method, the most preferred fillers are ceramics based inorganic materials. However, fine metallic particles could also be used as fillers. This study investigates the processing of dendritic copper powder filled polyamide 12 by SLS method. Spherical polyamide 12 powder with an average particle size of 60 μm and dendritic copper powder with an average particle size of 40 μm was used. Powder mixtures in 5% and 10% filler contents were characterized to determine process parameters, and 5 processing parameters were applied to obtain samples.

Results:

Results of powder mixture characterizations were indicated that increasing energy densities should be used in process. From the processed sampled, it was determined that density of the samples increased with increasing filler addition. Bending properties decreased slightly with filler addition, and no significant change was determined with increasing filler content and change in processing parameters. However, storage modulus increased significantly with the addition of filler in dynamic mechanical analysis (DMA). Also, transition temperatures increased. Process parameters with higher energy densities gave better results in DMA. However, converse effect was observed in dimensional sensitivity, and decreased results were taken with increasing filler content and raised energy densities. Surface roughness did not change with increasing filler content. Finally, homogenous filler dispersion was seen in optical observations.

Conclusion:

It can be concluded that the bending properties and dimensional sensitivity decreased slightly with the filler addition, while the storage modulus improved.



Seçici lazer sinterlemede poliamid 12'ye dendritik bakır tozu ilavesinin etkisi

Aylin Bekem^{1*}, Burçin Özbay^{2,3}, Mustafa Enes Bulduk²

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, Türkiye

²Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi (ALUTEAM), 34445, Beyoğlu, İstanbul, Türkiye

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Polimer Bilim ve Teknolojisi Bölümü, 34496, Maslak, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Dendritik bakır katkılı poliamid 12 üretimi
- SLS parametrelerinin belirlenmesi
- Fiziksel ve mekanik değerlendirme

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 21.05.2020

Kabul: 16.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.728198

Anahtar Kelimeler:

Dendritik bakır tozu,
poliamid 12,
seçici lazer sinterleme

ÖZET

Günümüzde polimer malzemeler ev eşyalarından mühendislik uygulamalarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu nedenle özelliklerinin geliştirilmesi önemlidir. Katkı maddeleri ilavesi, polimer malzemelerin özelliklerini artırabilmektedir. Katkı ilave tekniği ve bileşimleri imalat yöntemine göre değişebilmektedir. Yeni bir üretim yöntemi olup kızılötesi lazer ışını ile polimer tozlarının sinterlenmesine dayanan Seçici Lazer Sinterleme (SLS) toz yataklı eklemeli imalat metodunda da katkı maddelerinin kullanılması mümkündür. Bu metotta katkı kullanımı çok yaygın olmasa da en çok tercih edilen katkı maddeleri seramik esaslı inorganik malzemelerdir. Bununla birlikte, ince metalik parçacıklar da katkı maddesi olarak kullanılabilir. Bu çalışmada dendritik bakır tozu katkılı poliamid 12'nin SLS ile prosesi incelenmiştir. İki farklı katkı içeriğindeki toz karışımları proses parametreleri belirlemek amacıyla karakterize edilmiş ve artan enerji yoğunluğunun kullanılması gerektiği saptanmıştır. Beş farklı parametre kullanılarak üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik testleri sonucu katkı ilavesiyle eğme özellikleri ve boyutsal hassasiyet düşerken, yüzey pürüzlülüğü değişmemiş ve depolama modülü iyileşme göstermiştir.

Effect of dendritic copper powder addition to polyamide 12 in selective laser sintering

HIGHLIGHTS

- Dendritic copper filled polyamide 12 production
- Determination of SLS parameters
- Physical and mechanical evaluation

Article Info

Research Article

Received: 21.05.2020

Accepted: 16.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.728198

Keywords:

Dendritic copper powder,
polyamide 12,
selective laser sintering

ABSTRACT

Today, polymer materials have a wide range of usage areas that are from household goods to engineering applications. Therefore, improvements in their properties are essential. The addition of fillers can increase the properties of polymer materials. Filler addition techniques and compositions can vary with the manufacturing methods. It is also possible to use fillers in selective laser sintering (SLS) powder bed fusion additive manufacturing method, which is a new manufacturing method based on the sintering of polymer powders with an infrared laser beam. Although the use of fillers is not very common in this method, the most preferred fillers are ceramic based inorganic materials. However, fine metallic particles could also be used as fillers. This study investigates the processing of dendritic copper powder filled polyamide 12 by SLS method. Powder mixtures in two different filler contents were characterized to determine process parameters, and it was determined that increased energy density should be used. As a result of the physical and mechanical tests of the sintered samples produced using five different parameters, the bending properties and dimensional sensitivity decreased with the filler addition, while surface roughness did not change, and the storage modulus improved.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: abekem@yildiz.edu.tr, burcinozbay@fsm.edu.tr, mebulduk@fsm.edu.tr / Tel: +90 212 383 4619

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Genelde 3D yazıcı olarak bilinen eklemeli imalat teknolojileri son 25 yılda gelişen ve üç boyutlu karmaşık şekilli parçaların hızlı, ucuz, temiz ve sağlığa zararsız şekilde üretimini sağlayan yöntemlerdir [1-3]. Toz, levha, tel veya sıvı hammadde kullanımına yönelik farklı çeşitleri bulunmakta olup; mum, seramik, polimer, metal ve biyomalzemelerle çalışabilmektedir [1, 4]. Tüm eklemeli imalat yöntemlerinde parçalar, bilgisayar destekli tasarım (CAD) kullanılarak; malzemeyi seçici füzyon, sinterleme veya polimerizasyon yoluyla tabaka tabaka biriktirerek üretilmektedir [5, 6].

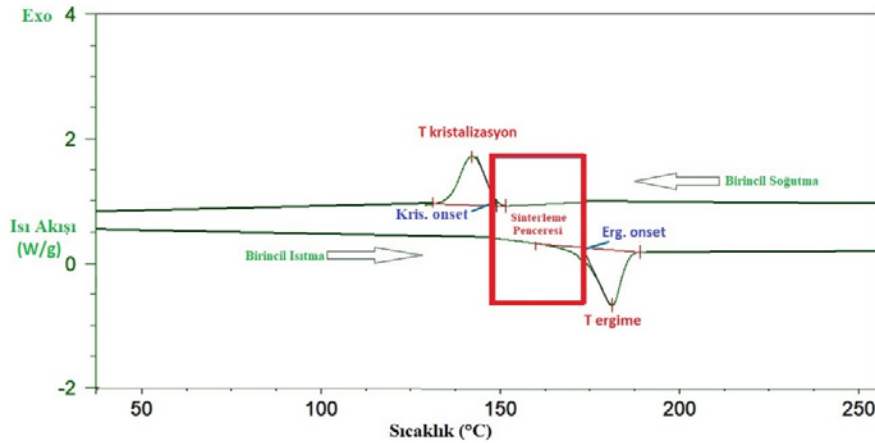
Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Seçici Lazer Sinterlemede (SLS) hammadde olarak toz formundaki malzemeler kullanılabilir [1, 7]. Akışkan yatak içine belirli bir kalınlıkta tabaka oluşturacak şekilde toz serdirilip, bu toz hammadde ergime derecesinin altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Optik lazer tarayıcısı tarafından parça dilimini oluşturacak tozun belirli yerleri istenilen geometride taratılarak bir tabaka oluşturulmuş olur. Aynı işlemler parça tamamlanana kadar hammaddenin üst üste biriktirilmesiyle devam etmektedir. Son olarak parçadan beklenen yüzey düzgünlüğüne göre ilave bir işlemlerle yüzey hazırlama uygulanabilmektedir [7]. Öte yandan “Sinterleme Penceresi”, lazer sinterlemede bir polimer tozunun işlenebilirliğinin tespitindeki en önemli kriterlerinden biridir. Sinterleme penceresi, polimerin kristalleşme ve ergime sıcaklığının başlangıç noktaları arasındaki alanı kapsamakta olup polimerlerin diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) değerlendirmesi sonucu tespit edilmektedir [8, 9]. Şekil 1’de sinterleme penceresi aralığını gösteren saf PA 12’ye ait örnek bir DSC ölçümü yer almaktadır.

SLS metodu her türlü malzemenin üretimine uygun ve diğer üretim yöntemlerine muadil sonuçlara ulaşılabilen bir yöntem olarak anılmasına karşın gerçekte işlenebilirlik çoğu malzemede sınırlı veya kalitesiz parça üretimi ile sonuçlanabilmektedir [10-12]. Günümüzde özellikle toz

yataklı eklemeli imalatın polimer uygulamalarında kolay işlenebilirliği sayesinde en çok kullanılan malzemelerin başında poliamid (PA) ailesi gelmekte olup, poliamid 12 (PA12) medikal uygulamalardan havacılığa kadar en yaygın kullanım alanına sahip olan poliamid türüdür [13].

SLS yöntemiyle PA12’nin özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla çeşitli katkı malzemesi ilaveleri mümkündür [14]. Cam küre [15-17] karbon siyahı [18], karbon fiber [19] ve silisyum karbür (SiC) [20] gibi seramik esaslı katkılarla çalışmalar yapılmıştır. Cano vd. PA12’ye ağırlıkça (ağ.) %40 oranında cam küre ilave ettikleri çalışmada malzemenin elastik özelliklerinde elde edilen gelişmeyle birlikte çekme dayanımı ve uzamanın olumsuz etkilendiğini belirlemişlerdir [15]. Goodridge vd. [21] PA12’ye eriyik karıştırma yöntemi ile ağ. %3 karbon nanofiberi ekleyip ardından kriyojenik öğütme yaparak SLS’ye beslemişler ve yapılan dinamik mekanik analiz test sonuçlarına göre depolama modülünde %22 artış ve kayıp modülünde %15 artış sağlamalarına rağmen kriyojenik kırmanın SLS için uygun toz morfolojisi üretmediğini ortaya koymuşlardır. Gill vd. [22] ağ. %0-50 aralığında SiC içeren karışımları doğrudan SLS’de proses ederek maksimum dayanım ve minimum gözenekli üretim için optimum enerji yoğunluğunun 0,04 J/mm² olduğunu ve bunun başlangıç toz karışımı bileşiminden bağımsız olduğunu ortaya koymuştur. Athreya vd. [18] ağ. %4 karbon siyahı katkılı PA12’nin eğme özelliklerini arttırmak amacıyla SLS prosesini optimize etmişler ve katkısız polimere göre eğme modülünde azalma elde etmelerine rağmen elektrik iletkenliğinde beş kat artış tespit etmişlerdir. Zhang vd. [23] ise hacmen %30 ve %50 oranlarında hidroksiapatit katkılı PA12’de partikül boyutu ve lazer gücü etkilerini araştırmış ve küçük partiküllerin daha yüksek yoğunluk ve rijitlik sağladığını raporlamışlardır.

Ayrıca alüminyum (Al) [24-26] ve bakır (Cu) [27, 28] gibi metal tozlarının da katkı olarak kullanıldığı çalışmalar sınırlı sayıda da olsa mevcuttur. Bassoli vd. [25] SLS yöntemiyle üretilmiş Al katkılı poliamidin katkısız poliamide göre çok daha rijit ve görece yüksek sıcaklıklara dayanıklı



Şekil 1. DSC analizi-Örnek lazer sinterleme aralığı (DSC analysis-An example of a sintering window range)

olduğundan ve tam yoğunluğa ulaşmış parçaların taşlama veya parlatma sonrası mükemmel yüzey düzgünlüğü sağladığından bahsetmektedirler [26]. Lanzl vd. [27] Cu katkılarda şekil ve bileşim etkisini incelemiş ve yüksek termal iletkenlik değerlerinin pul şekilli katkı ilavesi olan sinterlenmiş parçalarda çok daha az oranda katkı ile sağlanabildiği ve öte yandan toz akışının küresel şekilli parçalarda ise yüksek katkı içeriklerinde bile daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Balzereit vd. [28] ise ağırlık %5, %10 ve %20 sıçratılmış partikül geometrisinde Cu içerikli PA12'yi incelemiş ve tüm bileşenlerde 0,35 J/mm³ enerji yoğunluğu değerinde çekme dayanımı ve gerinme değerlerinde yükselme sağlandığını ifade etmişlerdir.

Literatürdeki benzer katkılı çalışmalar incelendiğinde kullanılan katkının çoğunlukla küresel şekilli partiküller olduğu görülmektedir. Küresel şekilli partiküller lazer sinterleme tekniğinde tozların kuru akışını arttırması dolayısıyla önerilmektedir [8]. Ancak her ne kadar küresel yapılı olmasalar da oluşan polimer kompozit yapılarda farklı etkilerini araştırmak üzere fiber, tabakalı, sıçratılmış partikül ve pul şekilli gibi yapılardaki katkıların da SLS tekniğinde kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. SLS tekniğinde Cu katkılarda dendritik şekil ve bileşim etkisi henüz incelenmemiştir. Bu çalışmada, dendritik şekilli Cu partikülleri PA12'ye çeşitli oranlarda katılarak SLS proses parametreleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar katkısız PA12 ile karşılaştırılmıştır. Dendritik şekilli bakır partiküllerinin sahip olduğu çoklu iğnesel kolları sayesinde matrise daha iyi tutunabileceği öngörülmüştür.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

Çalışmada kullanılan matris malzemesi ortalama 60 µm partikül boyutuna sahip PA12 olup EOS GmbH'den (PA2200) temin edilmiştir. Katkı malzemesi olarak Merck'in ortalama partikül boyutu 63 µm olan dendritik şekilli Cu tozları kullanılmıştır. Toz karışımı döner karıştırıcı kullanılarak ağırlık %5 ve %10 katkı içeriğinde hazırlanmıştır.

Tozların şekil ve partikül boyut dağılımlarını gözlemek amacıyla Hitachi SU3500 T2 taramalı elektron mikroskopunda (SEM) görüntüleri alınmıştır. Ayrıca Shimadzu SALD 2300 ile partikül boyut dağılımları belirlenmiştir. Toz karışımlarının görünür yoğunlukları BS EN ISO 60'a göre 100 ml'lik bir silindirik huninin doldurulup kütesinin hacmine bölünmesiyle tespit edilmiştir. Termal özelliklerin belirlenmesinde ise TA Instruments Discovery SDT 650 diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) kullanılmıştır. Eriyik haldeki akış özelliklerini incelemek için ise DSC analizleri (MFR) tayini cihazı kullanılmıştır.

Toz karışımları EOS Formiga P110 SLS eklemeli imalat cihazına beslenerek üretimler gerçekleştirilmiştir. Üretim sıcaklığı katkısız PA12 için 170°C'dir. Sıcaklık dendritik bakır katkılı tüm üretimlerde 173°C'de sabit tutulmuştur. Üretim öncelikle katkısız PA12'nin optimum üretim sıcaklığı olan 170°C'de denenmiş ancak birkaç katmanın

ardından numunelerde ciddi kıvrılma (curling) problemi [8], gözlenmiş ve bu sebeple sıcaklık 1'er °C basamaklarla arttırılmış ve 173°C'de optimum olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık artırılıp optimum sıcaklık seçimi yapılırken sinterleme penceresi aralığı dikkate alınmıştır. Öte yandan detayları sonraki bölümde verilmiş olan termal analizler neticesinde elde edilen kristalizasyon sıcaklık değerleri de göz önünde bulundurularak, dendritik bakır katkılı PA 12 polimer kompozitlerin SLS ile üretiminde 0,42 j/mm³-0,47 j/mm³ aralığında ve 0,2 ila 0,5 watt değerlerinde, değişen aralıklarla enerji yoğunlukları seçilmiştir. Lazer hızı ve tarama aralığı değerleri de sırasıyla 1900 mm/s ve 0.20 mm olarak sabitlenmiştir. Çeşitli lazer gücü ve enerji yoğunlukları değerlerinde deney parametreleri oluşturulmuştur. Tablo 1'de oluşturulan parametre değerleri verilmiştir. PA katkısız PA12'nin üretim koşulunu ifade ederken; P1, P2, P3, P4 ve P5 katkılı PA12'lerin üretimi için denenen farklı üretim parametrelerini temsil etmektedir. Her parametre için beşer numune üretilmiştir.

Tablo 1. Üretim parametreleri (Production parameters)

Parametre Numarası	Lazer Gücü (W)	Lazer Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (mm)	Enerji Yoğunluğu (j/mm ³)
PA	21,0	2500	0,25	0,336
P1	16,3	1900	0,20	0,429
P2	16,5	1900	0,20	0,434
P3	17,0	1900	0,20	0,447
P4	17,5	1900	0,20	0,461
P5	18,0	1900	0,20	0,474

Farklı katkı miktarları ve her bir farklı parametre için eğme ve DMA test numuneleri üretilmiştir. Üretimlerde her bir toz katmanı 100 µm kalınlığında olup, örneğin 4 mm kalınlıkta numuneleri elde etmek için 40 kez (40 katman) toz serdirilerek sinterleme işlemi uygulanmıştır. Üretilen numunelerdeki katkı dağılımları ZEISS Axio Lab. A1 optik ters metal mikroskopuyla gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo SJ-500 yüzey pürüzlülük cihazı ile saptanmıştır. Numune kalınlıkları Mitutoyo kumpas ile ölçülmüştür. BS EN ISO 1183'e göre daldırma metodu ile numunelerin yoğunlukları belirlenmiştir. BS EN ISO 178'e göre eğme testleri yapılmıştır. Dinamik mekanik analiz (DMA) Perkin Elmer-DMA 8000 ile yapılmış ve camısı geçiş sıcaklıkları, depolama ve kayıp modülleri belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Tozların Karakterizasyonu (Characterization of Powders)

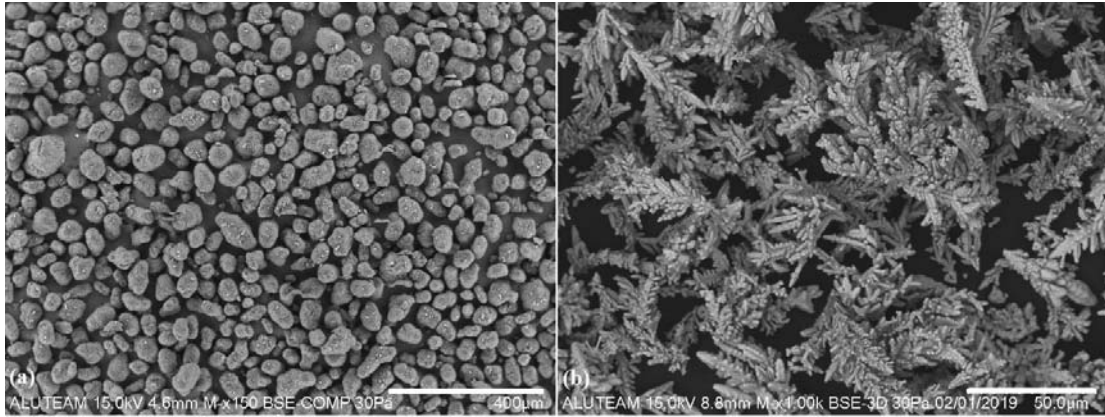
SLS'de üretim için bazı parametrelerin belirlenmesinde proses öncesinde hammadde olan tozları gerek ayrı ayrı gerekse belirlenen oranlarda karışımlar halinde karakterize etmek gerekmektedir [29]. Bu amaçla partikül geometrisi inceleme, partikül dağılımı, MFR, DSC analizleri ve görünür yoğunluk tayini yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan PA12 ve Cu tozlarının SEM görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir. PA12’nin yuvarlak hatlı olmakla birlikte tam küre formunda olmadığı ve eşit boyut dağılımına sahip olmadığı gözlenmiştir. Cu tozlarının ise tamamı dendritik yapıda olmakla birlikte boyutlarında farklılıklar gözlenmiştir.

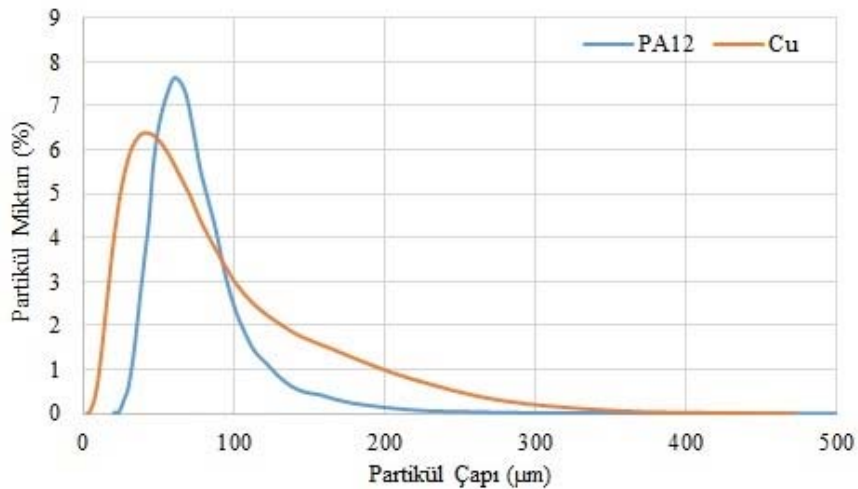
PA12 ve Cu tozlarının hacimsel partikül boyut dağılımı Şekil 3’te verilmiştir. Her iki dağılım analizinin de benzer eğilimde olup aralıkları birbirine yakındır. PA12’nin ortalama (d_{50}) $60 \mu\text{m}$ partikül çapında, d_{10} ve d_{90} değerleri sırasıyla $34 \mu\text{m}$ ve $97 \mu\text{m}$ olup; daha dar bir dağılım sergilediği görülmektedir. Cu partiküllerinde ise d_{10} ve d_{90} değerleri sırasıyla $16 \mu\text{m}$ ve $108 \mu\text{m}$ olup, daha geniş dağılım göstermesine karşılık; ortalama partikül boyutu (d_{50}) $40 \mu\text{m}$ ’dir. Cu partiküllerinin bu geniş dağılıma sahip olmasında ince-uzun dendritik geometri formunun da etkisi vardır. Sonuç olarak herhangi bir orandaki PA12 ve Cu karışımı, katkısız PA12’den daha küçük ve Cu’dan daha büyük olmak üzere iki dağılım arasında olacaktır. Yang vd. [30] partikül çapının $20 \mu\text{m}$ ’dan küçük olması durumunda tozun yayılmasının zorlaştığı, $50 \mu\text{m}$ ’dan büyük olduğunda ise sinterleme karakteristiklerinin ve üretilen parçanın bütünlüğünün bozulduğunu belirtmişlerdir. Goodridge vd.

[31] ise proses kabiliyeti açısından optimum boyutun $45-90 \mu\text{m}$ aralığı olduğunu saptamıştır. Bu saptamalar doğrultusunda çalışmamızda kullanılan tozların büyük oranda SLS prosesine uygun olduğu söylenebilir.

SLS prosesinde kullanılan tozların benzer özelliklerde olması istenmektedir. Tozların sabit hacimde serbest düşme sonucu kapladığı alan olarak tanımlanan görünür yoğunluk da bir başka önemli özelliktir ve karışımlarda bu değerlerin birbirine yakın olması parça içi dağılım homojenliği açısından önemlidir. Üreticileri tarafından verilen bilgilerde PA12 ve Cu tozlarının görünür yoğunlukları sırasıyla $0,45 \text{ g/cm}^3$ ve $1,29 \text{ g/cm}^3$ ’tür. Karışımlar kuralına göre teorik bir hesaplama ile %5 Cu ilavesi sonucunda görünür yoğunluğun $0,49 \text{ g/cm}^3$ iken %10 Cu ilavesinde $0,534 \text{ g/cm}^3$ olduğu bulunmuştur. Deneysel ölçümlerde ise katkısız PA12 tozunun değeri $0,47163 \text{ g/cm}^3$, %5 Cu katkılıının $0,47696 \text{ g/cm}^3$ ve %10 Cu katkılıının $0,47935 \text{ g/cm}^3$ olduğu tespit edilmiştir. Teorik ve deneysel ölçümler arasındaki farkın sebebi büyük olasılıkla tozların farklı tane büyüklüğü ve yapısına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Teorik hesaplamada kullanılan veriler saf tozlara ait olduğundan, karışım etkisi göz ardı edilmiştir. Ancak deneysel sonuçlardan küresel tozların içene farklı boyutlarda dendritik



Şekil 2. Tozların SEM görüntüleri: (a) PA12 ve (b) Cu (SEM images of powders: (a) PA12 and (b) Cu)



Şekil 3. PA12 ve Cu tozlarının hacimsel partikül boyut dağılımı (Volumetric particle distribution of PA12 and Cu powders)

tozların ilavesinin toz karışımının görünür yoğunluğunun düşmesine sebep olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte ölçümlerde, küresel şekilli matris tozlarının içine düşük oranlarda dentritik şekilli toz ilavesinin görünür yoğunluğu çok fazla değiştirmedeği görülmüştür. Her ne kadar karışımın bileşenleri olan PA12 ve Cu tozlarının görünür yoğunlukları birbirine yakın olmasa bile numune üretimi için SLS'ye beslenen toz karışımlarının görünür yoğunlukları birbirine oldukça yakın bulunmuştur.

MFI ölçümleri 200°C'de 2,16 kg ile yapılmıştır. Değerler katkısız PA12 için 2,32 g/10 dakika; %5 katkılı için 4,94 g/10 dakika; %10 katkılı için ise 5,90 g/10 dakika olarak bulunmuştur. Cu katkı ilavesinin MFI sonuçlarını ciddi oranda arttırdığı ve eriyik karışımını daha akışkan hale getirdiği görülmüştür. Bu da karışımın oluşumu sırasında farklı akış davranışları sergileyebileceği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla katkılı PA12'yi proses etmede katkısız PA12'den farklı parametreler kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır.

SLS eklemeli imalat yönteminde polimer hammaddenin işlenebilirliği ve uygun proses sıcaklıklarının tespiti için termal analiz yöntemleri, özellikle DSC büyük öneme sahiptir. Sıcaklık, kristalizasyon başlangıcı (Kris. Onset) ve ergime başlangıcı (Erg. Onset) arasında kalan ve sinterleme penceresi adı verilen bölgede seçilmelidir. Bu bölge bir malzemede ne kadar geniş olursa SLS metodu ile hatasız işlenebilme kabiliyeti de o kadar yüksek olmaktadır [13, 32].

Katkısız PA12, %5 ve %10 Cu ilave edilmiş karışımlardan yaklaşık 5'er mg ağırlığında alınan örnekler, erime davranışlarını incelemek amacıyla azot atmosferi altında 10°C/dk'da 300°C'ye kadar ısıtılmış ve daha sonra kristalleşme davranışlarını gözlemek için 5°C/dk'da oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Daha sonra, sinterleme penceresi genişliğini ifade eden ΔT değerleri Eş. 1 ile hesaplanmış.

$$\Delta T = T_{Erg.Onset} - T_{Kris.Onset} \quad (1)$$

Tablo 2'de yapılan DSC ölçüm sonuçları verilmiştir. Değerler birbirine yakın olmakla birlikte, Cu ilavesi ile ergime ve kristalizasyon sıcaklıklarında yükselme ve sinterleme penceresinde çok az bir miktar genişleme görülmektedir. Bu durum, burada kristalizasyonun artmasının bir sebebinin katkının çekirdekleştirici gibi davranıyor olması [29] ve bu sebeple katkı ilavesi ile birlikte proseste daha yüksek enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyabileceği şeklinde yorumlanabilir. Tüm bu veriler doğrultusunda Tablo 1'de görülen parametreler ile üretim yapılmıştır. SLS prosesinde parametre seçimi uygun

olmadığı takdirde, numune yüzeyi veya bütünlüğünde gözle görülür hatalar oluşmakta, hatta bu hataların çok fazla olması durumunda üretimi dahi durduracak düzeyde katman problemleri oluşabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı üretim sonrası ilk olarak elde edilen numunelerin fiziksel görünüşleri incelenmiş ve herhangi bir kusur (çarpılma, çekme, vb.) veya çatlak oluşumu ile karşılaşılmamıştır. Dolayısıyla buradan ilk aşamada seçilen parametrelerin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen numunelerin iç yapısı ile ilgili özellikler numune karakterizasyonu kapsamında detaylı olarak incelenmiştir.

3.2. Numunelerin Karakterizasyonu (Characterization of Samples)

Proses öncesi hammadde olan toz ve toz karışımlarının karakterizasyonundan sonra SLS prosesi uygulanmıştır. Üretilen sinterlenmiş numunelerin özellikleri yoğunluk, eğme ve DMA ile belirlenmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü, boyut hassasiyeti ve yüzey görüntüleri gibi fiziksel özellikleri de incelenmiştir.

Proses sonrası parça yoğunlukları ölçülmüş ve beklenildiği üzere yoğunlukları katkı ilavesi ile artmıştır. Ancak numuneler sinterlenmiş parçalar olmasından dolayı gözenek ihtiva etmesi dolayısıyla teorik değerlerden daha düşük sonuçların eldesine sebep olmuştur. Parça doluluğu hakkında daha detaylı inceleme yapabilmek için numunelerin teorik yoğunluklarına oranı alınarak göreceli yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 4'te görülmektedir. Buna göre PA12'de oldukça yüksek değerler elde edilmiş ve yüksek dolulukta parça üretiminin söz konusu olduğu görülmüştür. Ancak dentritik Cu ilavesi ile değerlerde ciddi azalma gözlenmiş ve parçalardaki gözenek oranının arttığı anlaşılmıştır. Uygulanan farklı parametrelerin parçaların göreceli yoğunlukları üzerinde etkisi olmamıştır.

Ancak Şekil 7'deki kesit görüntülerinde makro düzeyde belirgin gözenekler gözlemlenmemiştir. Göreceli yoğunluk değerlerinden parçaların artan Cu oranı ile gözenek ihtiva ettiği sonucuna varılmıştır. Ancak incelenen kesit görüntülerinde bu gözeneklerin gözlenmemesinin nedeninin gözeneklerin dentritik Cu'nun ince kolları arasında oluşmasından kaynaklı olup, mikro seviyede olup gözlenememiş olabileceği sonucuna ulaşabilir.

Şekil 5'te eğme testi sonuçlarından her grup için temsili grafikler verilmiştir. Grafiklerde katkısız PA12'nin, Cu katkılı numunelerden daha yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç göreceli yoğunluğun Cu ilavesi ile azalması ile açıklanabilir. Parça içi

Tablo 2. DSC verileri (DSC data)

	Ergime (°C)	Erg. Onset (°C)	Kristalizasyon (°C)	Kris. Onset (°C)	ΔT
PA12	187,59	174,43	140,24	145,65	28,78
%5 C	187,88	175,52	141,75	146,56	28,96
%10 Cu	188,22	176,74	142,10	146,68	30,06

olası gözenekler Cu dentrit kolları arasında sıkışması durumunda polimer ile katkı arasında bağlanma problemine sebep olmuş olabilir. Diğer olası bir sebep ise parça içi Cu dağılımının homojen olmaması olabilir.

Öte yandan göreceli yoğunluk değerlerinde %10 Cu oranında büyük oranda düşüş gözlenmesine rağmen eğme testi sonuçlarında %5 ile %10 katkı arasında fark gözlenmemiştir. Dolayısıyla yapıda gözenek olmasına rağmen dentritik Cu katkının polimere tutunmasının gerçekleştiği ve değerlerdeki düşüşün devam etmediği yorumu yapılabilir.

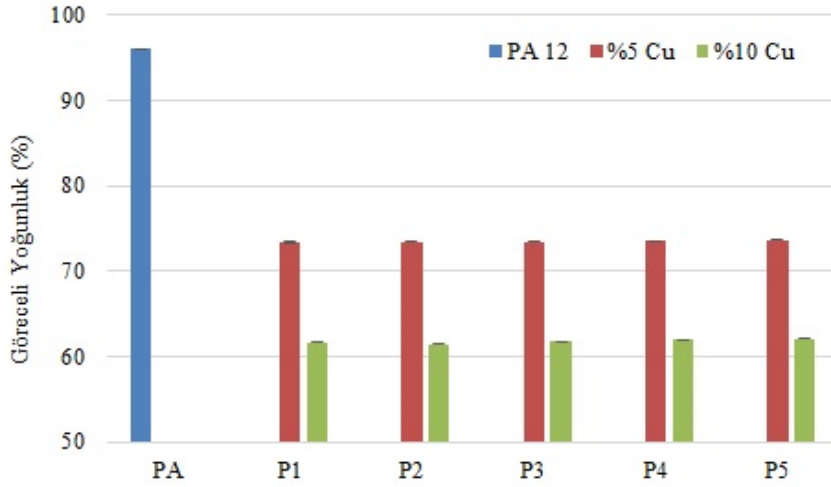
Sonuç olarak kullanılan oranlarda katkı ilavesi kendi aralarında yakın değerler verirken, katkısız PA12'ye göre az miktarda da olsa dayanımı azaltmıştır. Bu, partikül takviyeli polimerlerde partiküllerin gerilim artırıcı rol almasından ötürü görülen bir durumdur [33]. Grup içi parametre değerlendirmeleri arasında ise anlamlı bir fark yoktur. Bu da seçilen SLS üretim parametrelerinin proses için uygun olduğunu göstermektedir.

Benzer bir katkı ekleme çalışması Balzereit vd. [28] tarafından ortalama partikül çapı 10 µm olan sıçratılmış partikül geometrisinde Cu katkılı PA12'nin farklı enerji

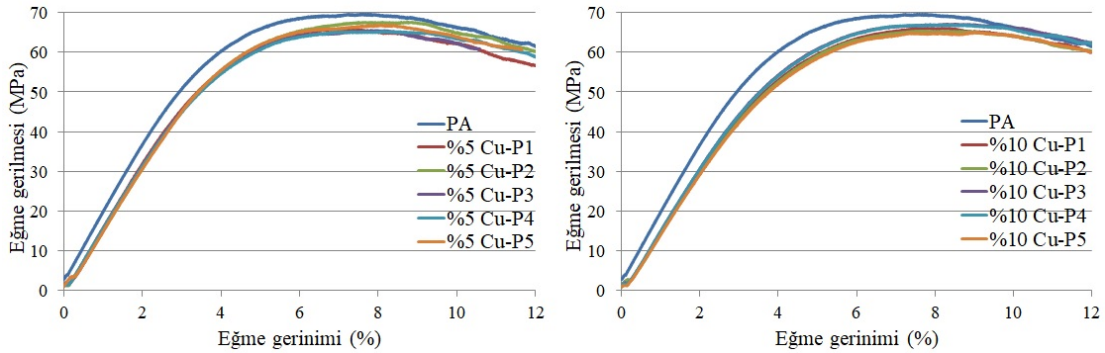
yoğunlukları değerlerinde proses edilmesi sonucunda çekme testi sonuçlarını irdelenmesi ile yapılmış ve enerji yoğunluğu değişimi ile gerilme ve gerinim sonuçlarında belirgin bir artış görülmemiştir. Bununla beraber uygulanan en iyi proses koşulları bazında değerlendirildiğinde katkısız PA12 bizim çalışmamıza benzer şekilde en yüksek değerlere sahip olmuştur.

Gerek camı geçiş sıcaklıklarının tespiti gerekse dinamik mekanik performansın detaylı incelenmesi amacıyla DMA incelemesi yapılmıştır. Numuneler DMA'da, -100°C ile +150°C aralığında, üç nokta eğme modunda incelenmiştir. Bu sıcaklık aralıklarında elde edilen eğrilerde polimerin camı geçiş sıcaklığının (T_g) yanı sıra beta geçiş sıcaklığı (T_β) değerleri de net olarak gözlenebilmiştir. Tablo 3'te eğrilerde gözlemlenen geçiş sıcaklıkları verilmiştir. Buna göre Cu ilavesinin geçiş sıcaklıklarını etkilediği ve geçiş sıcaklıklarını yükselttiği görülmüştür.

DMA incelemelerinde bunların dışında malzemenin depoladığı enerji miktarını veren depolama modülü, harcanan enerji miktarını veren kayıp modülü ve ikisinin oranını veren kayıp faktörü olarak da anılan tan delta değerleri elde edilmektedir. Numunelerin kayıp modülleri ve tan delta değerleri çok küçük bulunmuştur. Buradan



Şekil 4. Göreceli yoğunluk sonuçları (Relative density results)



Şekil 5. Eğme testi grafikleri (Graphs of bending test)

PA12'nin büyük oranda elastik özellik gösterip, az oranda viskoz davranış sergilediği anlamı çıkartılabilir. Parametreler arasında anlamlı bir fark bulunmazken, Cu katkısı ile geçiş sıcaklıkları arttırmıştır. Benzer artışlar Tablo 2'deki DSC verilerinde de gözlenmiştir. Geçiş sıcaklıklarındaki artışın sebebi büyük olasılıkla Cu katkının polimerin moleküler zincirlerinin hareketini kısıtlamasıdır.

Tablo 4, eğrilerden okunan depolama modüllerinin (E'), beta geçiş sıcaklığında (@ T_{β}), oda sıcaklığında (@ 23°C) ve cam geçiş sıcaklığında (@ T_g) iken nasıl değiştiğini göstermektedir. Tüm numunelerde sıcaklık yükselişi ile modül azalmıştır. Bu polimerlerin doğal davranışının bir sonucudur; sıcaklık artışı polimerin rijitliğini kaybedip yumuşamasına ve böylece yük taşıma kapasitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Eğme testi sonuçlarından farklı olarak, DMA'da Cu katkısı ilavesi ile modül değerlerinde artış gözlenmiş ve artış katkı oranı artışı ile devam etmiştir.

Parametre 4 ve 5 (P4 ve P5) değerleri her iki katkı oranında da daha yüksek sonuçlar vermiştir. Burada Cu ilavesi ile artan geçiş sıcaklığındaki polimer karışımını daha yüksek enerji yoğunluğunda proses etmenin daha etkili olduğu yorumu yapılabilir.

Tablo 5'te yüzey pürüzlülüğü (R_a) ölçüm sonuçları standart varyasyon değerleri ile birlikte yer almaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün küçük değerinde olması daha pürüzsüz, düz bir yüzey anlamı taşımaktadır. Sonuçlar varyasyon değerleri arasında değerlendirildiğinde Cu katkının yüzey pürüzlülüğünde değişime sebep olmadığı görülmektedir. Üretim için başka bir önemli özellik, ürünlerin boyut hassasiyetidir. Bu konuda numunelerin 4 mm olması gereken kalınlık değerleri incelenmiştir. Şekil 6'da katkı içeriği ile numune kalınlıklarında değişim görülmektedir. Katkı ilavesiz PA12 numunelerde kalınlığın 3,95-4,05 arasında değiştiği görülmektedir. %5 Cu ilavesinde de benzer

Tablo 3. DMA ile belirlenen geçiş sıcaklıkları (Transition temperatures determined by DMA)

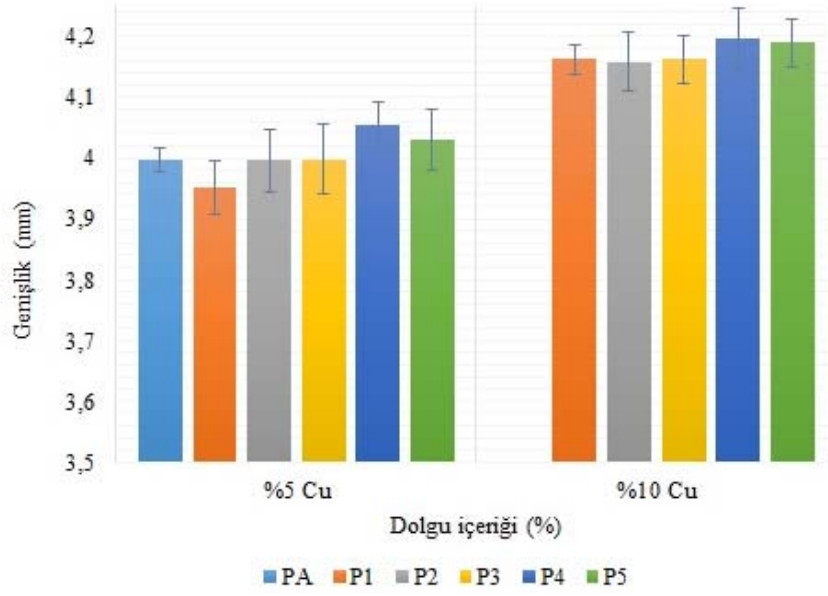
Parametre Numarası	%0 Cu İçeren		%5 Cu İçeren		%10 Cu İçeren	
	T_{β} ($^{\circ}\text{C}$)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_{β} ($^{\circ}\text{C}$)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_{β} ($^{\circ}\text{C}$)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
PA	-71,4	55,4	-	-	-	-
P1	-	-	-69,6	56,1	-59,8	55,7
P2	-	-	-70,2	55,5	-69,4	56,4
P3	-	-	-69,6	55,4	-68,8	56,2
P4	-	-	-67,4	55,7	-68,4	56,1
P5	-	-	-67,6	56,2	-69,7	56,5
Ortalama	-71,4	55,4	-69,3	55,8	-67,2	56,2

Tablo 4. DMA sonuçlarının sıcaklıkla değişimi (Change in DMA results with temperature)

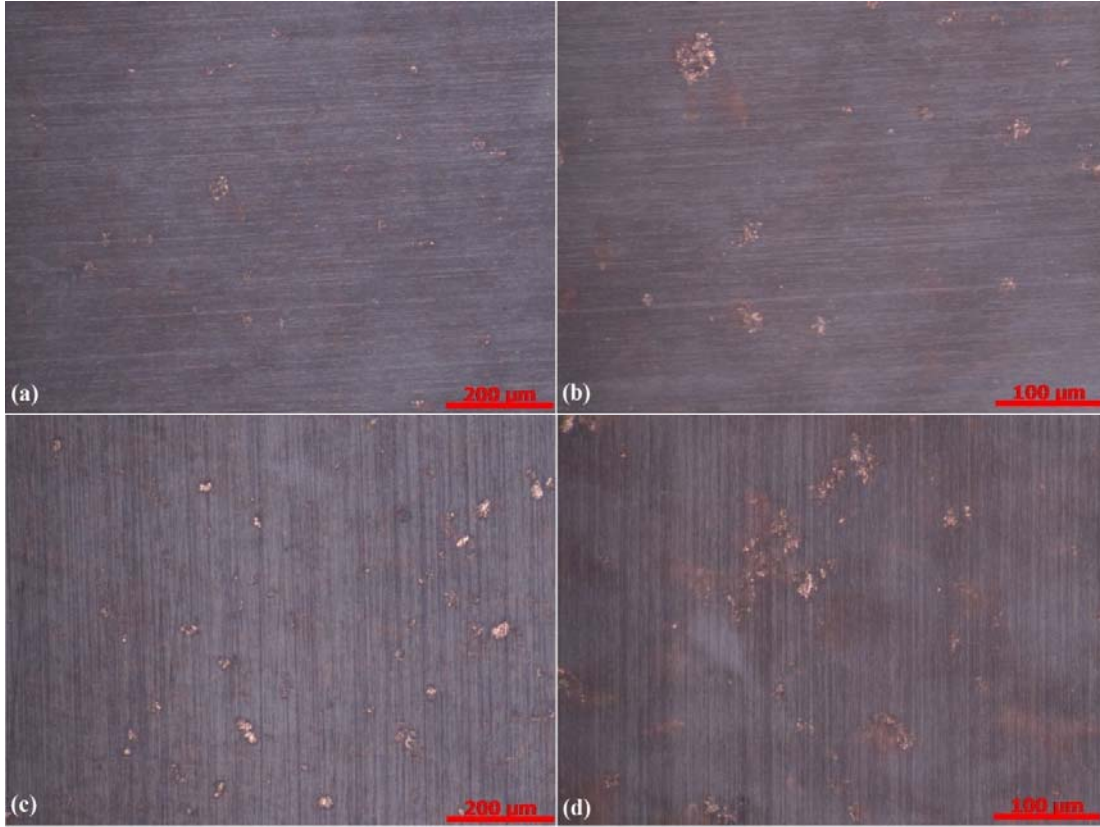
Parametre Numarası	%0 Cu İçeren			%5 Cu İçeren			%10 Cu İçeren		
	E' @ T_{β} (GPa)	E' @ 23°C (GPa)	E' @ T_g (GPa)	E' @ T_{β} (GPa)	E' @ 23°C (GPa)	E' @ T_g (GPa)	E' @ T_{β} (GPa)	E' @ 23°C (GPa)	E' @ T_g (GPa)
P0	1,43	1,02	0,55	-	-	-	-	-	-
P1	-	-	-	1,91	1,45	0,78	2,12	1,60	0,92
P2	-	-	-	1,91	1,42	0,78	2,13	1,62	0,91
P3	-	-	-	1,91	1,43	0,77	2,30	1,75	0,99
P4	-	-	-	2,36	1,82	1,02	2,35	1,86	1,06
P5	-	-	-	2,35	1,78	1,00	2,40	1,84	1,03
Ortalama	1,43	1,02	0,55	1,98	1,49	0,82	2,26	1,73	0,98

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü (Surface roughness)

Parametre Numarası	%0 Cu İçeren (μm)	%5 Cu İçeren (μm)	%10 Cu İçeren (μm)
P0	13,441±0,880	-	-
P1	-	11,870±1,168	11,291±0,799
P2	-	12,491±0,969	12,555±0,610
P3	-	12,487±0,185	12,113±0,321
P4	-	12,148±0,651	12,459±0,820
P5	-	12,870±0,783	12,079±0,962
Ortalama	13,441±0,880	12,373±0,844	12,099±0,837



Şekil 6. Katkı oranlarına göre numune kalınlıkları (Thickness of the specimen according to filler ratio)



Şekil 7. Numunelerin optik mikroskop görüntüleri (a) ve (b) %5 Cu; (c) ve (d) %10 Cu
(Optic microscope images of samples: (a) and (b) %5 Cu; (c) and (d) %10 Cu)

sonuçlar elde edilmiştir. Ancak katkı oranı artışı kalınlık değerlerini ciddi oranda arttırmıştır. Bu istenmeyen bir durum olmakla birlikte katkı içerikli SLS üretimlerinde karşılaşılan bir durumdur [27]. Genel olarak bakıldığında parametre 2 ve 3'ün (P2 ve P3) boyut hassasiyeti bakımından daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.

Katkılı numunelerin yüzeylerinden alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. Görüntülerde yarı-saydam PA12 matris içindeki Cu partikülleri parlak kırmızı rengi ile ayırt edilebilmektedir. Bu görüntülerde partiküllerin boyutlarında farklılık olmasına rağmen her iki oranda da homojen bir dağılım olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada SLS yöntemiyle üretilen PA12 numuneler %5 ve %10 oranında Cu katkı ilavesinin etkisi incelenmiştir. Kullanılan PA12, ortalama partikül boyutu 60 µm olan küresel şekilli polimerken; katkı olarak kullanılan Cu, 40 µm ortalama partikül boyutunda ve dendritik şekillidir. Katkısız PA12 ile karışımlarının görünür yoğunlukları arasında önemli bir artış gözlenmemiştir. Yapılan MFI ölçümünde Cu ilavesinin eriyik akışkanlığını arttığı, DSC ölçümünde ergime ve kristalizasyon sıcaklıklarının Cu ilavesi ve artan miktarı ile birlikte arttığı ve sinterleme penceresinin bir miktar genişlediği belirlenmiştir. Cu katkı ilavesiyle artan kristalizasyon sıcaklıkları sebebiyle de proseste daha yüksek enerji yoğunluğuna ihtiyaç olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Enerji yoğunluğu artacak şekilde beş farklı parametrede üretimler yapılmış; fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Numunelerin yoğunlukları katkı ilavesi ile beklenildiği üzere artarken, göreceli yoğunlukları azalmıştır. Eğme testi sonuçlarına göre eğme özellikleri katkısız polimere göre bir miktar azalmışken, DMA incelemesinde depolama modülünün katkı miktarı ile orantılı arttığı tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün katkı ilavesi ile değişmediği ve boyut hassasiyetinin azaldığı belirlenmiştir. Bunların yanı sıra yüzey görüntülerinde homojen katkı dağılımı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Tiwari S.K., Pande S., Agrawal S., Bobade S.M., Selection of Selective Laser Sintering Materials for Different Applications, *Rapid Prototyping Journal*, 21 (6), 630–648, 2015.
2. Ngoa T.D., Kashania A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D., Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges, *Composites Part B*, 143, 172-196, 2018.
3. Kayacan M.C., Delikanlı Y.E., Duman B., Özsoy K., Examining of Mechanical Properties of Transitive (Variable) Porous Specimens Produced by SLS Using Ti6Al4V Alloy Powder, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 127-143, 2018.
4. Bourell D., Kruth J.P., Leu M., Levy G., Rosen D., Beese A.M., Clare A., *Materials for Additive Manufacturing*, CIRP Annals-Manufacturing Technology 66, 659–681, 2017.
5. Wong K.V., Hernandez A., A Review of Additive Manufacturing, *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1-10, 2012.
6. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, New York, A.B.D., 2015.
7. Kruth, J.P., Wang, X., Laoui, T., Froyen, L., *Laser and Materials in Selective Laser Sintering*, Assembly Automation, 23 (4), 357-371, 2003.
8. Schmid M., *Laser Sintering with Plastics Technology, Processes, and Materials*, Hanser Publications, Cincinnati, A.B.D., 2018.
9. Schmid M., Wegener K., *Additive manufacturing: Polymers Applicable for Laser Sintering (LS)*, International Conference on Manufacturing Engineering and Materials (ICMEM 2016), Nový Smokovec-Slovakya, 457-464, 6-10 Haziran, 2016.
10. Kruth J.P., Levy G., Schnidel R., Craeghs T., Yasa E., *Consolidation of Polymer Powders by Selective Laser Sintering*, 3rd International PMI Conference (PMI2008), Ghent-Belçika, 1-16, Eylül, 2008.
11. Goodridge R.D., Tuck C.J., Hague R.J.M., *Laser Sintering of Polyamides and Other Polymers*, Progress in Materials Science, 57, 229-267, 2012.
12. Verbelen L., Dadbakhsh S., Van den Eynde M., Kruth J.P., Goderis B., Puyvelde P.V., *Characterization of Polyamide Powders for Determination of Laser Sintering Processability*, European Polymer Journal, 75, 163-174, 2016.
13. Schmid M., Amado A., Wegener K., *Materials Perspective of Polymers for additive manufacturing with Selective Laser Sintering*, Journal of Materials Research, 29 (17), 1824-1832, 2014.
14. Salmoria G.V., Leite J.L., Vieira L.F., Pires A.T.N., Roesler C.R.M., *Mechanical Properties of PA6/PA12 Blend Specimens Prepared by Selective Laser Sintering*, Polymer Testing, 31, 411–416, 2012.
15. Cano, A.J., Salazar, A., Rodríguez, J., *Effect of Temperature on the Fracture Behavior of Polyamide 12 and Glass-Filled Polyamide 12 Processed by Selective Laser Sintering*, Engineering Fracture Mechanics, 203, 66-80, 2018.
16. Seltzer R., Martín de la Escalera F., Segurado J., *Effect of water conditioning on the fracture behavior of PA12 composites processed by selective laser sintering*, Materials Science and Engineering A, 528, 6927–6933, 2011.
17. Mousa A.A., *The Effects of Content and Surface Modification of Filler on the Mechanical Properties of Selective Laser Sintered Polyamide 12 Composites*, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 8 (5), 265-274, 2014.
18. Athreya, S.R., Kalaitzidou, K., Das S., *Processing and Characterization of a Carbon Black-Filled Electrically Conductive Nylon-12 Nanocomposite Produced by Selective Laser Sintering*, Materials Science and Engineering A, 527 (10–11), 2637-2642, 2010.
19. Jing W., Hui C., Qiong W., Hongbo L., Zhanjun L., *Surface Modification of Carbon fibers and the Selective Laser Sintering of Modified Carbon Fiber/Nylon 12 Composite Powder*, Materials and Design, 116, 253–260, 2017.
20. Hon, K.K.B., Gill, T.J., *Selective Laser Sintering of SiC/Polyamide Composites*, CIRP Annals, 52 (1), 173-176, 2003.
21. Goodridge R.D., Shofner M.L., Hague R.J.M., McClelland M., Schlea M.R., Tuck C.J., Johnson R.B., *Processing of a Polyamide-12/Carbon Nanofibre Composite by Laser Sintering*, Polymer Testing, 30, 94-100, 2011.

22. Gill T. J., Hon K.K.B., Experimental Investigation into the Selective Laser Sintering of Silicon Carbide Polyamide Composites, *Proc. Instn Mech. Engrs Part B: J. Engineering Manufacture*, 218 (10), 1249-1256, 2004.
23. Zhang Y., Hao L., Savalani M.M., Harris R.A., Tanner K.E., Characterization and Dynamic Mechanical Analysis of Selective Laser Sintered Hydroxyapatite-Filled Polymeric Composites, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 86 (3), 607-616, 2008.
24. Mazzoli A., Moriconi G., Pauri M.G., Characterization of an Aluminum-Filled Polyamide Powder for Applications in Selective Laser Sintering, *Materials & Design*, 28 (3), 993-1000, 2007.
25. Bassoli E., Gatto A., Iuliano L., Joining Mechanisms and Mechanical Properties of PA Composites Obtained by Selective Laser Sintering, *Rapid Prototyping Journal*, 18 (2), 100-108, 2012.
26. Violante, M.G., Iuliano, L. and Minetola, P., Design and Production of Fixtures for Free-Form Components Using Selective Laser Sintering, *Rapid Prototyping Journal*, 13 (1), 30-37, 2007.
27. Lanzl, L., Wudy, K., Greiner, S., Drummer, D., Selective Laser Sintering of Copper Filled Polyamide 12: Characterization of Powder Properties and Process Behavior, *Polymer Composites*, 40, 1801-1809, 2018.
28. Balzereit S., Proes F., Altstädt V., Emmelmann C., Properties of Copper Modified Polyamide 12-Powders and Their Potential for the Use as Laser Direct Structurable Electronic Circuit Carriers, *Additive Manufacturing*, 23, 347-354, 2018.
29. Wudy K., Lanzl L., Drummer D., Selective Laser Sintering of Filled Polymer Systems: Bulk Properties and Laser Beam Material Interaction, *Physics Procedia*, 83, 991-1002, 2016.
30. Yang J., Shi Y., Yan C., Selective Laser Sintering of Polyamide 12/Potassium Titanium Whisker Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 117 (4), 2196-2204, 2010.
31. Goodridge R.D., Dalgarno K.W., Wood D.J., Indirect Selective Laser Sintering of an Apatite-Mullite Glass-Ceramic for Potential Use in Bone Replacement Applications, *Proceedings of IMechE Part H: J Eng Med*, 220, 57-68, 2006.
32. Schmid M., Wegener K., Thermal and Molecular Properties of Polymer Powders for Selective Laser Sintering (SLS), *AIP Conference Proceedings*, 1664, 160009, 2015.
33. Móczó J. ve Pukánszky B., *Particulate Fillers in Thermoplastics, Fillers for Polymer Applications*, Editör: Rothon R, Springer, Chester, UK, 51-93, 2017



Brass alloy blending problem from quality and cost perspectives: A multi-objective optimization approach

Burak Birgören^{ID}, Ümit Sami Sakallı*^{ID}

Department of Industrial Engineering, Kirikkale University, Kirikkale, 71450, Turkey

Highlights:

- Evaluating quality and cost simultaneously
- Multi-objective stochastic mathematical model and fuzzy programming
- A solution procedure to implement in real life casting processes

Keywords:

- Process capability index
- Cost
- Blending problem
- Multi-objective optimization
- Fuzzy programming

Article Info:

Research Article
Received: 06.05.2020
Accepted: 19.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.732960

Correspondence:

Author: Ümit Sami Sakallı
e-mail: ssakalli@kku.edu.tr
phone: +90 318 357 4242 / 1047

Graphical/Tabular Abstract

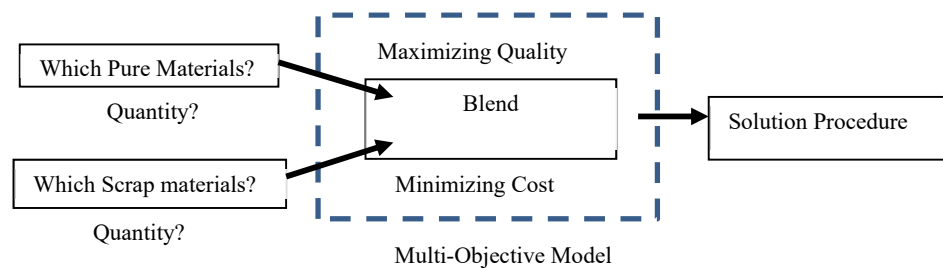


Figure A. The framework of the multi-objective blending problem

Purpose: In this study we developed a mathematical programming model that aims both cost minimization and quality maximization and a solution procedure for stochastic blending problem in brass casting

Theory and Methods:

Quality and cost are connected and challenging issues for production systems. Managers aims to improve the product quality and decrease product cost. However, generally, improvements in a product's design quality level cause an increase in the production cost. In many production systems, it is hard to formulate a product's quality as a function in a model. However, in brass casting blending process, it is possible to model the product quality by using process capability indices thanks to the nature of the blending problem. In this study, a multi-objective stochastic mathematical model has been developed which aims to present to the managers a blend with minimum cost at the highest quality level. The stochastic uncertainty has been converted into a deterministic counterpart by using chance-constrained approach. Therefore, the multi-objective stochastic model has been transformed into a multi-objective deterministic nonlinear mathematical model. The multi-objective model has been handled as a single objective model by using fuzzy programming. In order to implement developed model into real life applications, a solution procedure has been proposed.

Results:

The proposed model and the solution procedure have been tested in a numerical example using data supplied from a brass factory. The solution of the numerical example showed that the proposed model and solution procedure can easily select a blend with minimum cost and maximum process capability level.

Conclusion:

This study is the first attempt that consider both quality and cost in a model for blending problem. The proposed model and solution approaches can be used in different production processes including a blending problem.



Kalite ve maliyet perspektiflerinden pirinç alaşımı harmanlama problemi: Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı

Burak Birgören^{ID}, Ümit Sami Sakallı*^{ID}

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Kalite ve maliyetin birlikte değerlendirilmesi
- Çok amaçlı stokastik matematiksel model ve bulanık programlama
- Gerçek hayat problemlerinde kullanılması için çözüm prosedürü

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.05.2020

Kabul: 19.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.732960

Anahtar Kelimeler:

Süreç yetenek indisi, maliyet, harmanlama problemi, çok amaçlı optimizasyon, bulanık programlama

ÖZET

Pirinç alaşımı ana olarak bakır ve çinko'dan oluşan ve gerekli hallerde kurşun, demir, alüminyum, kalay, nikel, antimon elementlerini de içeren bir malzemedir. Pirinç alaşımı dökümü sürecinde temel problemlerden biri, istenilen element oranlarını sağlayacak şekilde hangi saf ve hurda malzemelerin ne miktarlarda karıştırılacağı araştırılan harmanlama problemidir. Saf malzemelerin içeriği kesin bir şekilde bilinmektedir, ancak pahalıdır; hurda malzemeler ise ucuzdur, fakat içeriklerindeki element oranları değişkendir. Literatürde yoğun olarak maliyet minimizasyonunu amaçlayan stokastik matematiksel modeller geliştirilmiştir. Ancak bu modellerin çözümünde bazı elementlerin oranları spesifikasyon sınırlarına eşit çıkar. Dolayısıyla, model çözümlerine göre dökülen pirinç alaşımları spesifikasyon sınırı dışına taşabilmekte ve kalite problemlerinde neden olmaktadır. Kalite ölçeği olarak süreç yetenek indisini maksimize etmeyi amaçlayarak bu problemi çözmeye çalışan çalışmalar da mevcuttur. Ancak süreç yetenek indisinin artması ile harman maliyeti de artmaktadır. Bu çalışmada, literatürde ilk kez hem harman maliyetini minimize etmeyi hem de süreç yetenek indisini maksimize etmeyi hedefleyen çok amaçlı stokastik matematiksel model geliştirilmiştir. Model şans kısıtlı programlama kullanılarak doğrusal olmayan deterministik eşleniğine dönüştürülmüş ve bulanık programlama yardımı ile tek amaçlı yapıya çevrilmiştir. Geliştirilen modelin gerçek hayat problemlerinde kullanılabilmesi için çözüm prosedürü önerilmiştir. Geliştirilen model ve çözüm prosedürü bir pirinç fabrikasından elde edilen verilerle çözülmüştür. Sonuçlar model ve prosedürün başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Brass alloy blending problem from quality and cost perspectives: A multi-objective optimization approach

H I G H L I G H T S

- Evaluating quality and cost simultaneously
- Multi-objective stochastic mathematical model and fuzzy programming
- A solution procedure to implement into real life applications

Article Info

Research Article

Received: 06.05.2020

Accepted: 19.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.732960

Keywords:

Process capability index, cost, blending problem, multi-objective optimization, fuzzy programming

ABSTRACT

Brass alloy is a composition of copper and zinc and it also includes lead, iron, tin, aluminum, nickel, antimony if necessary. One of the basic problems in brass casting is to determine which pure and scrap materials will be mixed at what quantities; this problem is known as the blending problem. The ingredient ratios of pure materials are exactly known, however they are expensive. The scrap materials are cheaper than the pure ones with varying ingredient ratios. Stochastic mathematical models aiming to minimize blend cost have been developed in the literature. In the solutions of these models, some of the ingredient ratios exactly equal to the specification limits. Because of the variation, some of them may violate the specification limits and cause quality problems in the actual blends. There is only one study in the literature to solve the quality problem by maximizing the process capability index. However, the blend cost increases when the process capability index maximized. In this study, a multi-objective stochastic mathematical model, which aims both to minimize blend cost and to maximize process capability index, has been developed. The developed model has been converted to a deterministic non-linear counterpart by using chance-constrained programming. Then, fuzzy programming is used to transform the multi-objective model into a single objective one. A solution procedure has been proposed to use it effectively in real life applications. The developed model and solution procedure have been tested by the data supplied from a brass factory. The solution of the numerical example has shown that the developed model and solution procedure can be used successfully in real life applications.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: birgoren@kku.edu.tr, ssakalli@kku.edu.tr / Tel: +90 318 357 4242 / 1047

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Pirinç, bakır (Cu) ve çinko (Zn) elementlerinden oluşan ve döküm yoluyla üretilen bir alaşımdır. Pirinç alaşımının içerisinde empürite olarak isimlendirilen kurşun (Pb), kalay (Sn), antimon (Sb), nikel (Ni), demir (Fe), alüminyum (Al) gibi başka elementler de bulunabilir. Pirinç alaşımları, içerdiği element oranlarına göre farklılaşmakta ve isimlendirilmektedir. DIN 17660 standartlarına göre on dokuz çeşit pirinç alaşımı mevcuttur. Bir örnek olarak Ms 58 CuZn39Pb2 pirinç alaşımının içeriği Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Ms 58 CuZn39Pb2 içeriği
(Specification of Ms 58 CuZn39Pb2)

	En az	En çok
Cu	58,5	60
Pb	1,5	2,5
Al	0	0,1
Fe	0	0,4
Ni	0	0,3
Sb	0	0,02
Sn	0	0,2
Diğer	0	0,3
Zn	Geri kalan	

Tablo 1.'deki 'En az' başlıklı sütun, elementlerin alaşımda bulunması gereken en az miktarını, 'En çok' başlıklı sütun ise alaşımda bulunması gereken en fazla miktarı göstermektedir. Zn için bu sınırlamalara ihtiyaç duyulmamaktadır. Diğer satırı, oranları nispeten çok düşük olan ve alaşım için önemli olmayan elementlerin toplamını ifade etmektedir. Pirinç alaşımı üretim süreci, şarj hazırlama olarak isimlendirilen ve istenilen ürün standartları sağlayacak hammadde ve malzeme karışımlarının hazırlanmasıyla başlamaktadır. Bu hammadde ve malzemeler, saf malzemeler olabileceği gibi hurda malzemeler de olabilir. Hazırlanan bu şarjlar eritme ocaklarında eritilerek dinlendirme ocaklarına dökülürler. Ergitme ve dinlendirme süreçlerinde üründen numuneler alınarak element oranları spektral analizle ölçülür. Element yüzdelерinin En az-En çok aralığının dışına çıkması durumunda ocaklara saf Zn veya Cu ilave edilerek ürün istenilen standartlara çekilir.

Karışımda kullanılacak saf malzemelerin içeriği bellidir, ancak bunlar hurda malzemelere göre daha pahalıdır. Hurda malzemeler ise birden çok elementi değişen yüzdelerde içerebilmektedir. Bu nedenle, pirinç alaşımı üretim sürecindeki en temel problemlerden biri şarj hazırlama sürecinde hangi saf ve hangi hurda malzemelerin ne miktarlarda karıştırılacağına belirlenmesidir. Bu problem Yöneylem araştırması literatüründe "Harmanlama Problemi" olarak isimlendirilmiştir. Stigler'in [1] diyet problemi üzerine yapmış olduğu çalışmadan bu yana rafineri, gıda sanayi, kimya sanayi ve metal sanayi gibi çeşitli proses endüstrilerinde literatüre girmiş birçok harmanlama problemi çalışması mevcuttur [2, 3]. Bu

çalışmalar genel olarak iki başlık altında toplanabilir: belirli ve belirsiz modeller. Belirli modellerde, problem parametrelerine ait tüm bilgiler tam ve kesindir. Bu problem türleri için genel olarak doğrusal programlama (DP) ve karışık tamsayılı programlama (KTP) tekniklerinden faydalanılmıştır. Wilson ve Willis [4], Kim ve Lewis [5], De Cock ve Sinclair [6], Munford [7], Al-Shammari ve Dawood [8], Buehlmann vd. [9], Liu ve Sherali [10], Sakallı ve Birgören [11] ve Atac vd. [12] çeşitli alanlardaki harmanlama problemlerini DP tekniği kullanarak modellemiştir. Williams [13] ve Ashayeri ve van Eijs [14] ise belirli harmanlama problemi için KTP tekniğini kullanmışlardır.

Ancak problem parametreleri her zaman belirli-kesin değildir; ürüne değer katan girdilere ait bilgiler belirsiz olabilir [15]. Bliss [16], ve Sakallı ve Birgören [11] çalışmalarında belirsizlik içeren harmanlama problemini belirlilik kabulü altında modellemiştir. Fakat bu belirsizliklerin yol açacağı uygun olmayan çözümleri önlemek için modelin kısıtlarına güvenlik miktarları eklemek ya da belirsiz parametreler için kötümser değer kullanmak gibi pratik çözüm yolları üretmişlerdir. Ancak bu pratik çözümler belirsizliği modellemekte yetersiz kalmakta, sadece sonuçlar açısından uygun çözüm uzayını daraltarak alt eniyi sonuçlar üretmektedir. Dolayısıyla hurda malzeme içerisindeki belirsizlikler, dikkatli bir şekilde analiz edilip doğru tanımlandıktan sonra yapılarına uygun olarak modellenmelidir.

Bu bağlamda belirsizlik içeren harmanlama problemi için stokastik ve/veya bulanık programlama modelleri geliştirmek de mümkündür. Candler [17], Shih ve Frey [18], Blanchard-Gaillard vd. [19], Kumral [20], Lu vd. [21], Gholomnijad vd. [22], Noh vd. [23], Kumar ve Dimitrakopoulos [24] istatistiksel belirsizlik içeren harmanlama problemleri için iki aşamalı stokastik programlama ya da şans kısıtlı programlama gibi tekniklerden faydalanarak stokastik modeller geliştirmişlerdir. Rong ve Lahdelma [25] ise hem istatistiksel hem de bulanık belirsizlikleri içeren harmanlama problemi üzerine çalışmış ve bulanık şans kısıtlı bir yaklaşım önermiştir.

Harmanlama problemi literatüründeki çalışmalar genel olarak maliyet minimizasyonunu ya da kar maksimizasyonunu amaçlamıştır. Ancak matematiksel programlamanın bir sonucu olarak problem çözümünde bazı kısıtlar bağlayıcı olmaktadır. Bu sonuç, bazı element yüzdelерinin üst ya da alt sınıra dayanması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, matematiksel modellerden elde edilen sonuçlara göre dökülen bir üründe element yüzdelерinin spesifikasyon dışına çıkması muhtemel bir durumdur. Spesifikasyonların ihlal edilmesi ise kalite problemine neden olmaktadır.

Genel olarak maliyet ile kalite arasında bir ödünleşim söz konusudur, çünkü maliyet minimizasyonu (ya da kar

maksimizasyonu) pirinç karışım içeriğinde, saf malzemelere kıyasla fiyatı daha düşük olan hurda malzemelere azami yer vermeye çalışır. Daha çok hurda malzeme kullanılması harman içeriğindeki belirsizliği artırır, dolayısıyla kaliteyi düşürür. Literatürde harmanlama probleminde kalite üzerine yapılan tek bir çalışma mevcuttur [26]; bu çalışmada karışım maliyeti sabit tutularak karışım içeriğindeki elementlerin c_{pk} süreç yetenek indis değerlerinin ek küçüğü maksimize edilmiştir. Çalışmada karar vericilerin farklı karışım maliyetleri için üretilen Pareto çözüm kümelerinden seçim yapmaları beklenmektedir. Ancak çözümün karar vericilere bırakılması ciddi bir dezavantajdır. Çünkü, genellikle kalitesizliğin üreteceği maliyet büyük belirsizlik barındırır; harmanlama probleminde hangi c_{pk} değerinin ne tür bir maliyete yol açacağı genellikle bilinmez. Kalite maliyetleri fireler, yeniden işleme maliyetleri gibi iç başarısızlık maliyetlerini kapsadığı gibi ürün iadeleri, müşteri kaybı gibi tahmin edilmesi oldukça zor olan dış başarısızlık maliyetlerini de kapsar [27]. Dolayısıyla kalite indis değerlerinin parasal maliyet terimlerine dönüştürülmesi çok zordur ve karar vericilerden iyi bir kalite indis ve harman maliyet kombinasyonu belirlemelerini beklemek gerçekçi değildir. Diğer yandan harmanlama problemi doğası gereği kalite-maliyet ödünleşimini matematiksel olarak modelleyebilmek için eşsiz bir fırsat sunmaktadır, çünkü bulanık programlama yardımıyla kalite maliyetleri ile karışım maliyetleri tek bir model çatısı altında bir araya getirilebilir. Bu çalışmada literatürde ilk kez hem harman maliyetini minimize etmeyi hem de süreç yetenek indisini maksimize etmeyi hedefleyen çok amaçlı bir stokastik matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model şans kısıtlı programlama kullanılarak doğrusal olmayan deterministik eşleniğine dönüştürülmüş ve bulanık programlama yardımı ile tek amaçlı yapıya çevrilmiştir. Geliştirilen modelin gerçek hayat problemlerinde etkin bir

şekilde kullanılabilmesi için bir çözüm prosedürü önerilmiş ve bir pirinç fabrikasından elde edilen verilere uygulama yapılmıştır. Bölüm 2’de maliyet minimizasyonu amaçlayan, Bölüm 3’te süreç yetenek indis maksimizasyonu amaçlayan stokastik harmanlama problemi modelleri verilmiştir. Geliştirilen çok amaçlı stokastik harmanlama modelleme ve çözüm yaklaşımları Bölüm 4’te sunulmuştur. Önerilen modelleme ve çözüm yaklaşımı Bölüm 5’te sayısal bir örnek üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar ve değerlendirme Bölüm 6’da verilmiştir.

2. MALİYET MİNİMİZASYONU İÇİN STOKASTİK HARMANLAMA PROBLEMİ MODELİ (STOCHASTIC BLENDING PROBLEM MODEL FOR COST MINIMIZATION)

Pirinç üretiminde kullanılan hammadde ve malzemeler, içerdikleri elementlere ait oranların belirli ve belirsiz olmasına göre üç grup altında toplanmıştır. Birinci grup saf malzemeleri içermektedir. İkinci grup tedarikçilerden temin edilen hurda parçalardan oluşmaktadır. Üçüncü grup ise fabrika bünyesindeki diğer atölyelerden döküm atölyesine dönen atıl kalmış ya da üretim sırasında fireye çıkmış mamul ve yarı mamulleri kapsamaktadır. Birinci gruptaki malzemelerin içeriği belli-kesindir; bu grupta yer alan malzemelere örnek olarak saf Cu, saf Zn ve saf Pb verilebilir. Üçüncü gruptaki malzemelerin içeriğindeki element oranları, döküm sürecinde dinlendirme ocağından alınan numunelerin analizi sonucunda belirlendiği üzere normal dağılımı takip etmektedir [28]. İkinci gruptaki hurda malzemeler ise kendi içinde 2 alt gruba ayrılmaktadır. Birinci alt grupta içeriğindeki element oranlarının kesin olarak bilindiği hurda malzemeler bulunmaktadır. Birinci alt gruba örnek olarak Cu kablolar verilebilir. İkinci alt gruptaki malzemelerin içerisindeki element oranları ise olasılıksal belirsizliğe sahiptir. Şekil 1’de gösterilen su saati hurdaları



Şekil 1. Hurda su saati yığını (Pile of scrap water clock)

bu grup malzemelere örnek olarak verilebilir. Yığının çeşitli bölgelerinden alınan numunelerin analizi sonucu bu yığma ait element oranlarının hurda ürünlerde (Üçüncü grup) olduğu gibi normal dağılımı takip ettiği görülmüştür.

Pirinç üretimi harmanlama problemi i . hammadde içerisindeki j elementi oranını ifade eden belli-kesin (P_{ij}) ve normal dağılımı takip eden ($R_{ij} \sim N(\mu_{ij}, \sigma_{ij}^2)$) rassal parametreler olmak üzere iki farklı türde parametreler içermektedir. Sakallı, Baykoç, ve Birgören [29] stokastik harmanlama problemi için şans kısıtlı doğrusal olmayan matematiksel bir model önermişlerdir. Modelin genel yapısı şu şekildedir:

Model notasyonu

- i hammadde, $i = 1, \dots, n$
- j element, $j = 1, \dots, m$
- C_i i . hammadde kg maliyeti
- P_{ij} i . hammadde içerisindeki j element oranı (Belirli) $i=1, \dots, h$
- R_{ij} i . hammadde içerisindeki j element oranı (Rassal) $i=h+1, \dots, k$
- V_i i . hammadde kayıp oranı
- W_j j . element kayıp oranı
- U_j pirinç ürünü içindeki j . element oranının üst spesifikasyon sınırı
- L_j pirinç ürünü içindeki j . element oranının alt spesifikasyon sınırı
- E_i i . hammaddenin stoktaki miktarı
- MX_i i . hammaddeden kullanılabilir izin verilen üst miktar
- MN_i i . hammaddeden kullanılabilir izin verilen alt miktar
- D ürüne olan talep miktarı (kg)
- $K_{1-\alpha}$ standart normal rastgele değişkenin olasılığının $1-\alpha$ 'ya eşit yada küçük olduğu değer

Karar değişkeni

- X_i i . hammaddeden harmanda kullanılacak miktar (kg)

Model 1

Amaç fonksiyonu

$$\text{Min: } \sum_{i=1}^n (C_i X_i) \tag{1}$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^h (V_i W_j P_{ij} X_i) + \sum_{i=h+1}^n V_i W_j \mu_{ij} X_i + K_{1-\alpha} * \sqrt{\sum_{i=h+1}^n (V_i^2 W_j^2 \sigma_{ij}^2 X_i^2)} \leq (U_j D) \quad \forall j \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^h (V_i W_j P_{ij} X_i) + \sum_{i=h+1}^n V_i W_j \mu_{ij} X_i - K_{1-\alpha} \tag{3}$$

$$* \sqrt{\sum_{i=h+1}^n (V_i^2 W_j^2 \sigma_{ij}^2 X_i^2)} \geq (L_j D)$$

$j = \text{bakır ve kurşun}$

$$X_i \leq \min\{E_i, MX_i\} \quad \forall i \tag{4}$$

$$X_i \geq \max\{0, MN_i\} \quad \forall i \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \geq D \tag{6}$$

Eş. 1 toplam karışım maliyetinin minimize edilmesini sağlamaktadır. Ergitme işlem sırasında malzemenin yapısına ve kullanılan teknolojiye bağlı olarak malzeme kaybı ya da element kaybı oluşabilir. Malzemenin bir kısmının cürufa dönüşmesi ya da elementin buharlaşarak gaz fazına geçmesi bu kayıplara birer örnektir. Malzemeye bağlı kayıplar V_i parametresi ile elemente bağlı kayıplar ise W_j parametresi ile modellenmiştir. Bu parametreler [0 1] aralığında değerler alır; 1 hiçbir kaybın olmadığını, 0 ise tamamen kayıp olduğunu ifade eder ve malzemelerin ve elementlerin verimi olarak da görülebilir. Bu konu ile ilgili detaylı tartışma Kim ve Lewis [5]'in çalışmalarında bulunabilir. Eş. 2 ve Eş. 3, ürünlerdeki element oranlarının DIN standartlarına uyması için oluşturulmuş kısıtlardır. Eş. 2 ile üst spesifikasyon sınırı, Eş. 3 ile de alt spesifikasyon sınırı $1-\alpha$ minimum olasılık değeriyle sağlanır. Eş. 4 ve Eş. 5 ise sürece özgü geliştirilmiş olup, belli malzemelerin kullanımını zorunlu hale getirmek ve belli malzemelerin kullanımını sınırlamak için modele yerleştirilmiştir. Bu kısıtlara metalürjik nedenlerden dolayı ihtiyaç duyulmuştur. Örneğin, ocaklardaki cüruf kalınlığını azaltmak için belli malzemelerin harmana katılması zorunlu olabilir (harmanda bulunması istenen en az miktar MN_i parametresine atanarak), ya da bazı malzemelerin tek bir harmanda kullanılarak tükenmesi önlemek gerekebilir (harmanda bulunması istenen en çok miktar MX_i parametresine atanarak). Ayrıca MN_i ve MX_i parametrelerine aynı değer atanarak o malzemeden kullanılacak miktar sabitlenebilir. Eğer MN_i ve MX_i parametrelerine herhangi bir değer atanmamışsa, o malzemelerden en fazla stokta bulunan miktar kadar kullanılabilir. Eş. 6, kullanılacak malzeme miktarlarının toplamının talepten küçük olmamasına dair kısıttır.

Eş. 1-Eş. 6'da verilen şans kısıtlı doğrusal olmayan bu modelin çözümlenmesi için minimum olasılık seviyesini gösteren $1-\alpha$ parametresinin önceden belirlenmesi gerekir. Bu durum ise başka problemlere neden olur. $1-\alpha$ olasılık herhangi bir kısıtın bağlayıcı kısıt olup olmamasını doğrudan etkilemektedir. Bağlayıcı kısıtlarda ise ilgili elementin oranı, alt ya da üst spesifikasyon sınırına dayanır. Problemin çözüm sürecinin başında hangi elementlere ait kısıtların bağlayıcı olup olmayacağı bilinemeyeceğinden, karar vericiler risk almaktan kaçınmak için çok düşük α değerleriyle çalışmayı

tercih ederler. Bu durum ise maliyette gereksiz yere bir artış ile sonuçlanır.

3. SÜREÇ YETENEK İNDİSİ MAKSİMİZASYONU İÇİN STOKASTİK HARMANLAMA PROBLEMİ MODELİ
(STOCHASTIC BLENDING PROBLEM MODEL FOR PROCESS CABABILITY INDEX MAXIMIZATION)

Süreç yetenek indisleri sürecin değişiminin spesifikasyon sınırlarını karşılama yeteneğini bir istatistiksel değerle gösterir. Dolayısıyla, pirinç harmanlama probleminde element yüzdelilerinin ürün kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmede kullanılabilir. Eğer süreç sadece üst ya da alt spesifikasyon sınırına (USL veya ASL) sahip ise süreç yetenek indisi Eş. 7’de verildiği gibi tanımlanır. Eğer süreç hem alt hem de üst spesifikasyon sınırlarına sahipse süreç yetenek indisi Eş. 8’deki gibi hesaplanır.

$$C_p = C_{pu} \quad (\text{sadece üst spesifikasyon var ise}) \quad (7)$$

$$C_p = C_{pl} \quad (\text{sadece alt spesifikasyon var ise})$$

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) \quad (8)$$

$$\text{öyleki } C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad \text{and} \quad C_{pl} = \frac{\mu - ASL}{3\sigma}$$

Sakallı ve Birgören [26], en küçük süreç yetenek indisini maksimize etmeyi amaçlayan doğrusal olmayan stokastik bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu modelde, Bölüm 2’de sunulan maliyet minimizasyonu modelinin notasyonları kullanılmakla beraber ilave bir parametre ve yeni bir karar değişkeni tanımlanmıştır. Bu parametre ve karar değişkenleri şu şekildedir:

Parametre

TCST harman maliyeti

Karar Değişkeni

δ en düşük süreç yetenek indisi

Sakallı ve Birgören’ nin [26], Şans kısıtı yaklaşımını kullanarak geliştirdiği bu model Eş. 9-Eş. 15’te verilmiştir.

Model 2

Amaç fonksiyonu

$$\text{Max: } \delta \quad (9)$$

Kısıtlar

$$\frac{(U_j D) - \sum_{i=1}^h (V_i W_j P_{ij} X_i) - \sum_{i=h+1}^n (V_i W_j \mu_{ij} X_i)}{3 \sqrt{\sum_{i=h+1}^n (V_i^2 W_j^2 \sigma_{ij}^2 X_i^2)}} \geq \delta \quad \forall j \quad (10)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^h (V_i W_j P_{ij} X_i) + \sum_{i=h+1}^n (V_i W_j \mu_{ij} X_i) - (L_j D)}{3 \sqrt{\sum_{i=h+1}^n (V_i^2 W_j^2 \sigma_{ij}^2 X_i^2)}} \geq \delta \quad (11)$$

j=bakır ve kurşun

$$\sum_{i=1}^N X_i = D \quad (12)$$

$$X_i \leq \min\{E_i, MX_i\} \quad \forall i \quad (13)$$

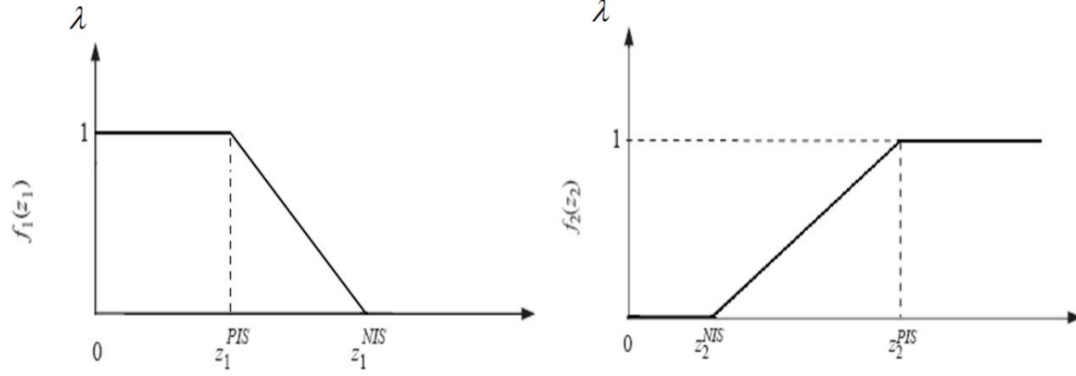
$$X_i \geq \max\{0, MN_i\} \quad \forall i \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N (C_i X_i) = TCST \quad (15)$$

Eş. 9, belirli bir maliyete sahip çeşitli harmanlar içerisinde en düşük süreç yetenek indisi değerini maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Eş. 10 ve Eş. 11’de verilen kısıtların sol taraf değerleri sırasıyla C_{pu} ve C_{pl} değerlerini vermektedir. Hem alt hem de üst spesifikasyon limitlerine sahip Bakır ve Kurşun elementleri için süreç yetenek indisi Eş. 8’de verildiği üzere C_{pk} olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle, bu elementler için en düşük C_{pk} değeri Eş. 10 ve Eş. 11 kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak, Bakır ve Kurşun dışında geriye kalan elementler sadece üst spesifikasyon sınırına sahip oldukları için süreç yetenek indisi Eş. 7’de verildiği üzere C_{pu} olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle, bu elementler için en düşük C_p değeri Eş. 10 kullanılarak hesaplanmaktadır. Eş. 12, talebin karşılanması için oluşturulmuş bir kısıttır. Eş. 13 ve Eş. 14 ise belli malzemelerin kullanımını zorunlu hale getirmek ve belli malzemelerin kullanımını sınırlamak için modele yerleştirilmiştir. Eş. 15, harman maliyetini önceden belirlenmiş bir değere sabitlemek için kullanılmaktadır.

Eş. 9-Eş. 15’te verilen şans kısıtlı doğrusal olmayan bu modelin çözülebilmesi için Eş. 15’in sağ taraf değeri olan ve *TCST* parametresinin çözüm sürecinin başında belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, Sakallı ve Birgören [26] parametrik programlama yaklaşımını kullanıp *TCST*’yi olabileceği en düşük seviyeden en üst seviyeye kadar tekrarlı şekilde artırarak bir seri çözüm elde etmeyi önermişlerdir. Önerilen bu yöntem işe yaramaktadır; ancak en düşük süreç yetenek indisinin artmasıyla birlikte harman maliyeti de artarak Pareto optimal bir çözüm seti elde edilmesine neden olmaktadır. Bu durum ise karar vericinin hangi maliyet seviyesini seçerek hangi süreç yetenek indisini elde edeceği gibi bir başka karar problemini ortaya çıkartmaktadır.

Bu çalışmanın temel motivasyonu bahsi geçen Pareto optimal çözüm seti içerisinde karar vericiyi en üst seviyede tatmin edecek çözümü seçmesine yardımcı olacak bir yöntem sunmaktır. Önerilen yöntem Bölüm 4’te sunulmuştur.



Şekil 2. Amaçların tercihe dayalı üyelik fonksiyonları (Preference based membership functions)

$$f_1(z_1) = \begin{cases} 1 & z_1 < z_1^{PIS} \\ \frac{z_1^{NIS} - z_1}{z_1^{NIS} - z_1^{PIS}} & z_1^{PIS} \leq z_1 \leq z_1^{NIS} \\ 0 & z_1 > z_1^{NIS} \end{cases}$$

$$f_2(z_2) = \begin{cases} 1 & z_2 > z_2^{PIS} \\ \frac{z_2^{NIS} - z_2}{z_2^{NIS} - z_2^{PIS}} & z_2^{NIS} \leq z_2 \leq z_2^{PIS} \\ 0 & z_2 < z_2^{NIS} \end{cases} \quad (19)$$

Böylelikle harmanlama problemi ÇAOM nihai olarak aşağıda verilen tek amaçlı modele dönüştürülür:

Karar Değişkeni

λ Karar verici tatmin seviyesi

Model 3

Max: λ

Kısıtlar

$$\frac{z_1^{NIS} - \sum_{i=1}^N (C_i X_i)}{z_1^{NIS} - z_1^{PIS}} \geq \lambda$$

$$\frac{z_2^{NIS} - \delta}{z_2^{NIS} - z_2^{PIS}} \geq \lambda \quad (20)$$

Eş. 10 – 14, $\lambda \geq 0, \lambda \leq 1.$

4.2. CAOM Çözüm Prosedürü (Solution Procedure of MOOM)

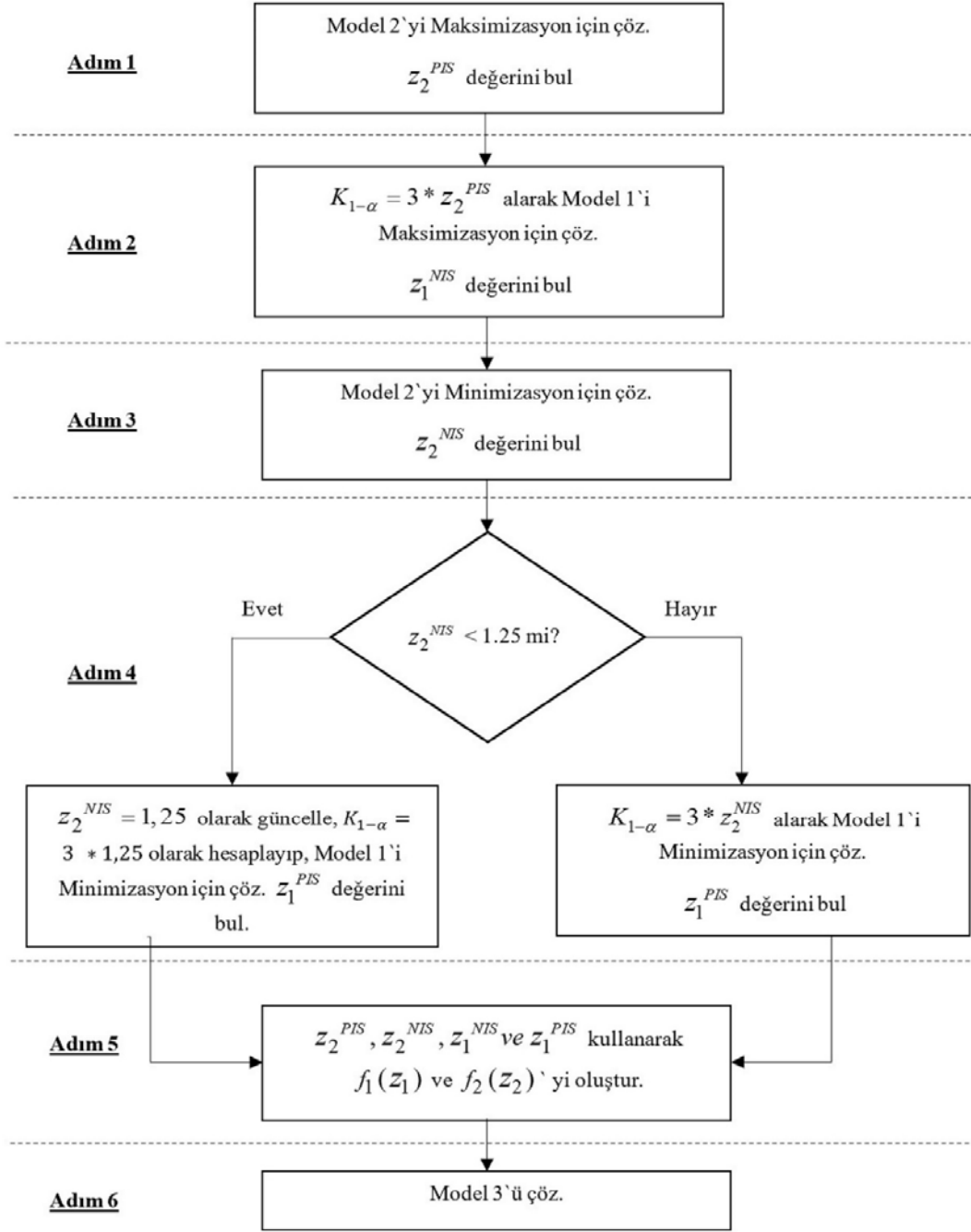
Önerilen harmanlama problemi ÇAOM çözülebilmesi için bir sistematik dahilinde Model 1, Model 2 ve Model 3'un

çözülmesi gerekmektedir. Bu sistematik için bir prosedür geliştirilmiştir. Geliştirilen prosedür Şekil 3`de verilmiştir.

Prosedürün ilk 4 adımında öncelikle Model 1 ve Model 2`nin çözümlerine $z_2^{PIS}, z_2^{NIS}, z_1^{NIS}$ ve z_1^{PIS} değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Ancak Model 1`in çözülebilmesi için $K_{1-\alpha}$ parametre değerinin belirlenmesi gerekir. Dolayısıyla Model 1`i çözebilmek için öncelikle Model 2`nin çözümlerine ilgili $K_{1-\alpha}$ parametre değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Böylelikle Z_1 ve Z_2 için aynı çözüm uzayı sağlanmış olunur. Adım 1`de Model 2, Eş. 15 kaldırılıp amaç fonksiyonu maksimize edilerek çözülür ve minimum süreç yetenek indisinin maksimum değeri (δ) bulunur. Bu değer δ `nın hiçbir maliyet kısıtı olmaksızın alabileceği en büyük değerdir ve z_2^{PIS} olarak kullanılır. Adım 2`de, Adım 1`de bulunan δ (yani z_2^{PIS}) 3 ile çarpılarak $K_{1-\alpha}$ hesaplanır ve bu $K_{1-\alpha}$ değeri için Model 1 amaç fonksiyonu maksimize edilerek çözülür; optimal değer z_1^{NIS} olarak kullanılır. Diğer bir deyişle z_1^{NIS} , olabilecek en iyi δ değerini maksimum maliyetle üreten harmanın maliyetidir. Böylece süreç yetenek indisinin ve maliyetin alabileceği maksimum değerler (z_2^{PIS} ve z_1^{NIS}) bulunmuş olur.

Adım 3`te Model 2, z_2^{NIS} değerini bulmak için Eş. 15 kaldırılıp amaç fonksiyonu minimize edilerek çözülür ve minimum süreç yetenek indisinin minimum değeri (δ) bulunur. Teorik olarak bu değer 0 çıkabilir. Oysa, gerçek hayatta birçok imalat ve proses endüstrisinde süreç yetenek indisinin kabul edilebilir alt sınırı 1,25 olarak alınmaktadır [27]. Dolayısıyla bu adımda bu değer 1,25`in üzerindeyse z_2^{NIS} olarak kullanılır, altındaysa $z_2^{NIS}=1.25$ alınır. Ardından $K_{1-\alpha}=3 * z_2^{NIS}$ alınarak Model 1 amaç fonksiyonu minimizasyon olarak çözülür; optimal değer z_1^{PIS} olarak kullanılır. Diğer bir deyişle z_1^{PIS} izin verilen ya da olabilecek en küçük δ değerini minimum maliyetle üreten harmanın maliyetidir. Böylece süreç yetenek indisinin ve maliyetin alabileceği minimum değerler (z_2^{NIS} ve z_1^{PIS}) bulunmuş olur.

Adım 5, $z_2^{PIS}, z_2^{NIS}, z_1^{NIS}$ ve z_1^{PIS} değerlerine göre maliyet ve süreç yetenek indisi için tercihe dayalı üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasını içermektedir. Adım 5`te formüle edilen üyelik fonksiyonları Model 3`e eklenerek Adım 6 uygulanır.



Şekil 3. Harmanlama problemi Bulanık ÇAOM prosedürü (Solution procedure for fuzzy CAOM)

5. SAYISAL ÖRNEK (NUMERICAL EXAMPLE)

Önerilen harmanlama problemi CAOM ve çözüm prosedürü, MKEK Pirinç fabrikasından sağlanan veriler ile oluşturulmuş örnek problem üzerinde test edilmiştir. Örnek problemde, spesifikasyon sınırları Tablo 1'de verilen Ms 58 CuZn39Pb2 ürününden 28000 kg üretilmek istenmektedir.

Kullanıma hazır halde bulunan hammadde ve malzemelerin stoktaki miktarlarına, maliyetlerine, izin verilen alt ve üst

miktarlarına ve içeriğindeki element oranlarına ait veriler Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de içeriğindeki element oranları belirli olan hammadde ve malzemelere ait standart sapma değerleri sıfırdır. Ayrıca, hammadde ve element kayıp oranlarının ihmal edilecek kadar az olduğu saptanmış ve bu nedenle W_j ile V_i parametresi değerleri 1 olarak alınmıştır.

Örnek problem Intel® Core i7-7700 K CPU (4.20GHz) işlemcili ve 64GB RAM kapasiteli bir bilgisayar ile önerilen prosedür çerçevesinde GAMS optimizasyon yazılımı

kullanılarak çözülmüştür. Önerilen prosedürün uygulama adımları aşağıda açıklanmıştır.

Adım 1

Tablo 1 ve 2’de sunulan veriler kullanılarak Model 2 maksimizasyon olarak çözülmüş ve $z_2^{PIS} = 1,765$ olarak bulunmuştur.

Adım 2

Model 1, $K_{1-\alpha} = 3 * z_2^{PIS} = 5,295$ alınarak maksimizasyon olarak çözülmüş ve $z_1^{NIS} = 101933$ olarak bulunmuştur.

Adım 3

Model 2 minimizasyon olarak çözülmüş ve $z_2^{NIS} = 0$ olarak bulunmuştur.

Adım 4

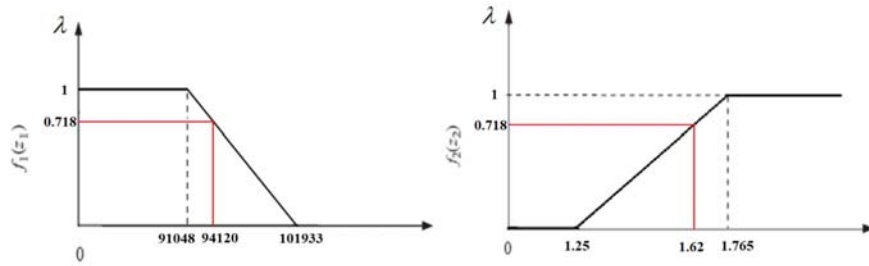
$z_2^{NIS} < 1,25$ olduğu için $K_{1-\alpha} = 3 * 1,25 = 3,75$ olarak hesaplanmıştır. Model 1, minimizasyon olarak çözülmüş ve $z_1^{PIS} = 91048$ olarak bulunmuştur.

Adım 5

$z_2^{PIS}, z_2^{NIS}, z_1^{NIS}$ ve z_1^{PIS} kullanarak $f_1(z_1)$ ve $f_2(z_2)$ Eş. 21 gibi formüle edilmiştir.

$$f_1(z_1) = \begin{cases} 1 & z_1 < 91048 \\ \frac{(101933 - z_1)}{(101933 - 91048)} & 91048 \leq z_1 \leq 101933 \\ 0 & z_1 > 101933 \end{cases}$$

$$f_2(z_2) = \begin{cases} 1 & z_2 > 1.765 \\ \frac{(1.25 - z_2)}{(1.25 - 1.765)} & 1.25 \leq z_2 \leq 1.765 \\ 0 & z_2 < 1.25 \end{cases} \quad (21)$$



Şekil 4. Çözüm neticesinde elde edilen karar verici tatmin seviyeleri (Decision maker’s satisfaction levels in the solution)

Tablo 2. Hammadde ve malzemeler ait ilgili veriler (Data for raw materials)

A	B	C	D	E	% Cu		% Zn		% Pb		% Fe		% Sn		% Al		% Sb		% Ni	
					Ort.	Sts.	Ort.	Sts.	Ort.	Sts.	Ort.	Sts.	Ort.	Sts.	Ort.	Sts.	Ort.	Sts.	Ort.	Sts.	Ort.	Sts.
Saf Cu	10000	3000	4500	9,48	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oksitsiz kablo	3000	0	3000	3,4	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu kablo	20000	0	2000	1,9	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saf Pb	3450	0	500	3,1	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
İngot Zn	8000	0	3000	2,63	0	99	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bronz talaşı	9500	0	500	2,1	90	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0
Reganya takoz	10000	0	1000	1,8	62	0	25,4	0	2,5	0	2	0	4	0	1,5	0	1	0	1,6	0
Çelikli kovan	4000	0	2000	1,7	70	0,32	29,91	0,395	0	0,09	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hurda radyatör	20000	0	1200	1	97,5	0	0	0	1,25	0	0	0	1,25	0	0	0	0	0	0	0
Su saati	4500	0	4500	2,12	55,32	0,545	42,03	0,624	1,89	0,286	0,14	0,058	0,21	0,097	0,25	0,108	0,009	0,005	0,155	0,094
Ms 58 Zn40Pb2	3200	0	3200	2,31	58,41	0,436	39,04	0,505	2,09	0,305	0,105	0,043	0,181	0,077	0,02	0,022	0,01	0,008	0,148	0,087
Ms 58 Pb3	3000	0	3000	2,35	58,35	0,411	37,9	0,495	3,15	0,212	0,13	0,065	0,24	0,084	0,065	0,011	0,009	0,006	0,16	0,075
Ms 58 Zn39Pb2	2500	0	2500	2,45	59,37	0,325	38,12	0,488	1,95	0,256	0,19	0,059	0,14	0,032	0,058	0,018	0,012	0,005	0,165	0,071
Ms 60 Pb1,5	1300	0	1300	2,8	60,78	0,42	37,37	0,467	1,44	0,24	0,154	0,05	0,085	0,043	0,017	0,01	0,008	0,005	0,15	0,062
Ms 60 Pb0,5	1600	0	1600	2,75	60,72	0,45	38,3	0,473	0,52	0,15	0,158	0,058	0,09	0,045	0,021	0,012	0,01	0,006	0,18	0,066
Ms 63 Pb1,5	740	0	740	3,85	63,28	0,482	34,42	0,429	1,86	0,31	0,14	0,035	0,081	0,017	0,032	0,009	0,015	0,003	0,176	0,044
Ms 60	1000	0	1000	3,3	60,92	0,364	38,25	0,402	0,26	0,03	0,159	0,024	0,143	0,035	0,038	0,006	0,007	0,001	0,22	0,039
Ms 63 Zn37	800	0	800	4	63,62	0,31	35,95	0,41	0,077	0,016	0,081	0,011	0,065	0,025	0,015	0,008	0,008	0,001	0,187	0,037
Ms 67	550	0	550	4,35	67,42	0,28	32,36	0,38	0,035	0,14	0,036	0,009	0,038	0,009	0,011	0,004	0	0	0,105	0,031
Ms 72	1500	0	1500	4,82	72,06	0,265	27,79	0,367	0,02	0,016	0,02	0,008	0,02	0,01	0,01	0,004	0	0	0,08	0,028

A: Hammadde ve malzemeler B: Eldeki miktar (kg) C: İzin verilen en az (kg) D: İzin verilen en çok (kg) E: Maliyet (TL/kg) Ort: Ortalama, Sts: Standart Sapma

Tablo 3. Harmanda kullanılacak hammadde ve malzeme miktarları (Raw materials and their quantities in the blend)

Hammadde ve malzemeler	Kullanılan miktar (kg)	Hammadde ve malzemeler	Kullanılan miktar (kg)
Saf Cu	3000	Ms 58 Zn40Pb2	3200
Oksitsiz kablo	---	Ms 58 Pb3	3000
Cu kablo	613,541	Ms 58 Zn39Pb2	2500
Saf Pb	277,93	Ms 60 Pb1,5	1300
İngot Zn	3000	Ms 60 Pb0,5	1600
Bronz talaşı	---	Ms 63 Pb1,5	740
Reganya takoz	---	Ms 60	1000
Çelikli kovan	2000	Ms 63 Zn37	800
Hurda radyatör	440,855	Ms 67	550
Su saati	2814,445	Ms 72	1163,23

Adım 6

Model 3 çözülerek optimal çözüm elde edilmiştir. Optimal çözüme göre karar vericinin tatmin seviyesi $\lambda=0,718$ olarak bulunmuştur. $\lambda=0,718$ için hazırlanacak harmanın maliyeti $z_1=94120,054$ süreç yetenek indis değeri $z_2=1,62$ olarak hesaplanmış ve Şekil 4'te sunulmuştur.

Problemin optimal çözümünde harmanda kullanılacak hammadde ve malzemelerin miktarları Tablo 3'te verilmiştir. Hazırlanan harman incelendiğinde, karışımın yaklaşık % 66,7'lik kısmı Su saati ile Ms 72 arasındaki, nispeten element varyasyonları yüksek malzemelerden oluşmaktadır. Bu durum süreç yetenek indisinin artmasına engel oluşturmaktadır. Diğer taraftan metalürjik nedenlerden ötürü en az 3000 kg kullanılması istenen Saf Cu'nun tam bu miktarda kullanılması maliyeti artıran bir etkidir.

Diğer taraftan süreç yetenek indisini sınırlayan, Cu, Pb, Sn ve Al elementlerinin C_{pu} değerleridir. Bu 4 elementin üst spesifikasyon sınırlarını karşılama yeteneği birbirlerine eşit ve 1,62'dir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Pirinç alaşımı, radyatör, somun ve civata, elektrik bağlantıları, yapı malzemesi, makine parçaları, mühimmat malzemesi, optik malzemeler, dişli parçalar, otomotiv yedek parçaları gibi pek çok alanda kullanılan bir malzemedir. Pirinç alaşımının bu kadar çok alanda kullanılmasının temel nedeni içerdiği elementlerdir (Cu, Zn, Pb, Fe, Al, Sn, Ni, Sb). Bu elementlerin alaşım içerisindeki oranları değiştirilerek malzemeye kullanım alanına göre sertlik ve kırılgenlik, mukavemet, mekanik özellik, korozyona karşı dayanım, talaş kaldırma, sıcak / soğuk şekil verme gibi çeşitli özellikler kazandırılır. Bu nedenle alaşım içeriğindeki element oranları, istenilen ürünün kalitesi için belirleyicidir.

İstenilen element oranlarını tutturacak şekilde bir karışım hazırlayarak pirinç alaşımı dökmek, karışıma sadece saf malzeme katılması durumunda bir problem değildir. Çünkü saf malzemelerin içeriği kesin bir şekilde bilinmektedir, ancak saf malzemeler pahalıdır ve ürün maliyetini artırmaktadır. Ürün maliyetini düşürmek için ise genellikle hazırlanan karışıma hurda malzemeler katılır. Hurda

malzemelerin içeriklerindeki element oranları saf malzemelerde olduğu gibi kesin olarak bilinmemektedir; bir belirsizliğe sahiptir. Literatürde, karışım maliyetini minimize etmeyi amaçlayan ve hurda malzeme içeriklerinin olasılıksal olarak ele alındığı stokastik matematiksel modeller mevcuttur. Ancak bu modellerin çözümlerinde bazı element oranları spesifikasyon sınırlarına dayanmaktadır. Bu nedenle, modellerin çözümlerine göre dökülen pirinçler spesifikasyon sınırlarını ihlal ederek kalite problemlerine neden olabilmektedir. Kalite problemlerinin önüne geçebilmek için ise sürecin değişiminin spesifikasyon sınırlarını karşılama yeteneğini bir istatistiksel değerle gösteren süreç yetenek indisini maksimize etmeyi amaçlayan stokastik matematiksel modeller geliştirilmiştir, fakat süreç yetenek indisinin artması beraberinde maliyeti de artırmaktadır. Süreç yetenek indisini maksimize etmek ile karışım maliyetini minimize etmek birbirleriyle çelişen amaçlardır.

Bu çalışmada, hem süreç yetenek indisini maksimize etmeyi hem de karışım maliyetini minimize etmeyi amaçlayan çok amaçlı bir stokastik doğrusal olmayan matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, yapılan literatür araştırması kapsamında, bu iki amacı aynı anda eniyilemeyi amaçlayan ilk çalışmadır. Geliştirilen stokastik doğrusal olmayan matematiksel model, şans-kısıtlı yaklaşım kullanılarak deterministik eşleniğine dönüştürülmüştür. Deterministik çok amaçlı doğrusal olmayan model, bulanık programlama kullanılarak tek amaçlı bir yapıya çevrilmiştir. Çalışmada bulanık programlamanın, çok amaçlı harmanlama probleminde uygulanabilmesi için altı adımdan oluşan bir prosedür önerilmiştir. Geliştirilen model ve çözüm prosedür ile karar vericiye farklı maliyet ve süreç yetenek indis değerlerine sahip Pareto optimal çözüm seti içerisinden tatmin düzeylerini maksimize edecek bir çözüm sunulabilmektedir. Bunun için açık bir şekilde Pareto optimal çözüm setinin üretilmesine ve bu setin karar verici tarafından değerlendirilmesine gerek kalmamaktadır; seçimi geliştirilen model yapmaktadır. Çok amaçlı harmanlama problemi bir fabrikadan sağlanan gerçek veriler ile test edilmiştir; sonuçlar geliştirilen model ve çözüm prosedürünün etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Çalışmada, iki amacın tek amaç fonksiyonuna dönüştürüldüğü bulanık programlama yaklaşımının uygulanmasında süreç yetenek indisine ait tercihe dayalı üyelik fonksiyonu monoton artan bir

fonksiyon olarak modellenmiştir. Ancak kalite perspektifine göre süreç yetenek indisindeki artışın karar vericinin tatmin düzeyinde üstel bir şekilde artışa neden olacağı değerlendirilebilir. Gelecek çalışma olarak süreç yetenek indisine ait tercihe dayalı üyelik fonksiyonun üstel bir fonksiyon olarak modelleneceği çalışmalar yapılabileceği öngörülmektedir. Pirinç alaşımı harmanlama problemi için geliştirilen bu yaklaşımlar, süreç tipi üretim yapan çelik, gıda ve rafineri gibi diğer endüstri alanlarında da uygulanma potansiyeline sahiptir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Stigler G., The cost of subsistence, *Journal of Farm Economics*, 27 (2), 303-314, 1945.
2. Vismara P., Remi C., and Gilles T, Constrained Global Optimization for Wine Blending, *Constraints*, 21 (4), 597–615, 2016.
3. Cerdá J, Pautasso P.C., Cafaro D.C., Optimizing Gasoline Recipes and Blending Operations Using Nonlinear Blend Models, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55 (28), 7782–7800, 2016.
4. Wilson E, Willis R, Microcomputers and linear programming – Feedstock revisited, *European Journal of Operational Research*, 19, 297-304, 1985.
5. Kim J., Lewis R.L., A large scale linear programming application to least cost charging for foundry melting operations, *American Foundrymen's Society Transactions*, 95, 735–744, 1987.
6. De Cock H.C., Sinclair M., Multi-mix feedstock problems on microcomputers, *Operational Research Quarterly*, 38, 585-590, 1987.
7. Munford A.G., A microcomputer system of formulating animal diets which may involve liquid raw materials, *European Journal of Operational Research*, 41, 270–276, 1989.
8. Al-Shammari M., Dawood I., Linear programming applied to a production blending problem: A spreadsheet modeling approach, *Production and Inventory Management*, 38, 1-7, 1997.
9. Buehlmann U., Ragsdale C.T., Gfeller B., A spreadsheet-based decision support system for wood panel Manufacturing, *Decision Support Systems*, 29, 207-227, 2000.
10. Liu C.M., Sherali H.D., A Coal Shipping and Blending Problem for an Electric Utility Company, *Omega*, 28, 433-444, 2000.
11. Sakallı Ü.S., Birgören B., A Spreadsheet-Based Decision Support Tool for Blending Problems in Brass Casting Industry, *Computers & Industrial Engineering*, 56 (2), 724–35, 2009.
12. Atac B., Adiguzel D., Tuylu S., Alp B.S., Study of the Optimal Aggregate Blending Model for Quarries, *Environmental Earth Sciences*, 75 (19), 1–11, 2016.
13. Williams, H.P., *Model building in Mathematical Programming*, Wiley, New York, 1989.
14. Ashayeri J., Van Eijs A.G.M., Nederstigt P., Blending Modelling in a Process Manufacturing: A Case Study, *European Journal of Operational Research*, 72 (3), 460–68, 1994.
15. Amini S.H., Vass C., Shahabi M., Noble A., Optimization of Coal Blending Operations under Uncertainty – Robust Optimization Approach, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1–21, 2019.
16. Bliss N.G., Advances in Scrap Charge Optimization, In *One Hundred First Annual Meeting of the American Foundrymen's Society*, Rosemont, 27–30, 1997.
17. Candler W., Coal blending with acceptance sampling, *Computers and Operations Research*, 18, 591-596, 1991.
18. Shih J., Frey H., Coal blending optimization under uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 83, 452–465, 1995.
19. Blanchard-Gaillard D., Yano C.A., Leung J.M.Y., Brown M.J., Discrete deterministic and stochastic blending problems with two quality characteristics: aluminum blending, *IIE Transactions*, 31, 1001-1009, 1999.
20. Kumral M., Application of chance-constrained programming based on multi-objective simulated annealing to solve a mineral blending problem, *Engineering Optimization*, 35 (6), 661–673, 2003.
21. Lu M., Qian J., Ekşioğlu S.D., Roni M.S., Stochastic Models for an Optimal Blending of Biomass under Cost, Quality and Uncertainty Considerations, 67th Annual Conference and Expo of the Institute of Industrial Engineers, 1103–9, 2017.
22. Gholamnejad J., Azimi A., and Teymouri M, R., Application of stochastic programming for iron ore quality control, *Journal of Mining and Environment*, 9 (2), 331-338, 2018.
23. Noh N.M., Bahar A., Zainuddin Z.M., Scenario Based Two-Stage Stochastic Programming Approach for the Midterm Production Planning of Oil Refinery, *Matematika: Malaysian Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 34 (3), 45-55, 2018.
24. Kumar A., Dimitrakopoulos R., Application of simultaneous stochastic optimization with geometallurgical decisions at a copper–gold mining complex, *Mining Technology*, 128 (2), 88-105, 2019.
25. Rong A., Lahdelma R., Fuzzy Chance Constrained Linear Programming Model for Optimizing the Scrap Charge in Steel Production, *European Journal of Operational Research* 186 (3), 953–64, 2008.
26. Sakallı Ü.S., Birgören B., Joint optimization of quality and cost in brass casting using stochastic programming, *Engineering Optimization*, 1-13, 2019.
27. Montgomery D.C., *Introduction to Statistical Quality Control* 6th ed, John Wiley & Sons, New York, 2012.
28. Sakallı Ü.S., Döküm sanayinde harmanlama problemleri için olabilirlik ve olasılık teorisi tabanlı modelleme ve çözüm yaklaşımları, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
29. Sakallı Ü.S., Baykoç Ö.F., Birgören B., Stochastic Optimization for Blending Problem in Brass Casting

- Industry, *Annals of Operations Research*, 186 (1), 141–57, 2011.
- 30.** Lu J., Zhang G., Ruan D., Wu F., Multi-Objective Group Decision Making Methods, *Software and Applications With Fuzzy Set Techniques*, Imperial College Press, London, 2007.
- 31.** Zimmermann, H.J., Fuzzy programming and linear programming with several objective functions, *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 45–55, 1978.



Simulation and performance analysis of a spark ignition engine using gasoline and LPG as fuel

Emre Arabacı*

Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Bucak-Burdur, 15300, Turkey

Highlights:

- Finite time thermodynamics method for different fuels
- Quasi-realistic simulation of spark ignition engines
- Engine performance change in gasoline and LPG use

Keywords:

- LPG-gasoline comparison
- Performance analysis
- Spark ignition engine
- Engine simulation
- Otto cycle

Article Info:

Research Article
Received: 08.05.2019
Accepted: 20.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.561583

Correspondence:

Author: Emre Arabacı
e-mail:
earabaci@mehmetakif.edu.tr
phone: +90 546 274 6595

Graphical/Tabular Abstract

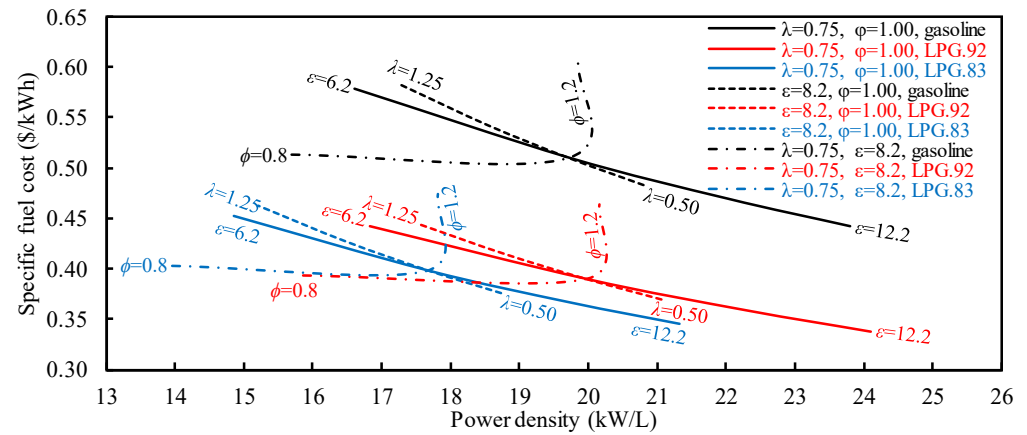


Figure A. Variation of specific fuel cost and power density depending on compression ratio (ϵ), stroke/bore ratio (λ) and equivalence ratio (ϕ)

Purpose: In this study, it is aimed to investigate the change in thermal efficiency, power density, specific fuel consumption, and specific fuel cost depending on the compression ratio, stroke/bore ratio, and equivalence ratio for an engine working with both gasoline and LPG. For this purpose, a detailed simulation model is presented to examine these design parameters.

Theory and Methods:

For the simulation model, finite-time thermodynamics method is used. It is assumed that the working fluid is air+fuel+residual gases and that the specific temperatures vary depending on the temperature. In the simulation, heat transfer, combustion, and irreversibilities are taken into consideration. The volumetric efficiency reduction in the use of LPG in the engine is taken into account. Detailed calculations are made for both gasoline and LPG by using the dimensions of a general-purpose gasoline engine as a reference and by varying the compression ratio, stroke/bore ratio and equivalence ratio.

Results:

In the case where the volumetric efficiency for the same compression ratio, equivalence ratio, and stroke/bore ratio is 0.92, the power density of LPG is higher than that of gasoline. However, assuming that the volumetric efficiency of LPG decreased by 10%, the power density decreased by 12%. As LPG has a fuel advantage compared to gasoline, it has been seen that although the specific fuel consumption of LPG in the same conditions is higher than that of gasoline, the specific fuel cost is lower than that of gasoline.

Conclusion:

As a result of this study, if the spark-ignition engine is operated with LPG or gasoline, a comprehensive simulation model has been developed in which performance analysis can be performed depending on compression ratio, equivalence ratio, and stroke/bore ratio. Thanks to the dimensionless or specific output parameters obtained using the simulation model, engines with different characteristics can be compared. The results are particularly interesting for engine designers.



Yakıt olarak benzin ve LPG kullanılan buji ateşlemeli bir motorun simülasyonu ve performans analizi

Emre Arabacı*^{ID}

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Emin Gülmez Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Taşıtlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, 15300, Bucak-Burdur, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Farklı yakıtlar için sonlu zaman termodinamiği metodu
- Buji ateşlemeli motorların sanki-gerçekçi simülasyonu
- Benzin ve LPG kullanımında motor performansı değişimi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 08.05.2019
Kabul: 20.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.561583

Anahtar Kelimeler:

LPG-benzin karşılaştırması,
performans analizi,
buji ateşlemeli motor,
motor simülasyonu,
Otto çevrimi

ÖZET

Bu çalışmada sonlu zaman termodinamiği metodu kullanılarak Otto çevrimli motorlar için simülasyon modeli oluşturulmuştur. Modelde, tersinmezliklerin, ısı, yanma ve sürtünme kayıplarının olduğu, özgül ısılardan sıcaklığa bağlı değiştiği, çevrim başlangıç sıcaklığının artık gaz sıcaklığına bağlı olarak değiştiği, çalışma maddesinin yakıt-hava-artık gaz karışımından oluştuğu kabul edilmiştir. Sıkıştırma oranı, eşdeğerlik oranı ve strok/çap oranının motor performansına etkisi incelenmiştir. Performans analizi için ısı verim, özgül yakıt tüketimi, özgül yakıt maliyeti ve güç yoğunluğu kullanılmıştır. Motor ısı balansı için performans kaybı faktörleri kullanılmıştır. Modelde, tek silindireli buji ateşlemeli bir motorun özellikleri referans olarak kullanılmıştır. Yapılan sayısal çalışma neticesinde, LPG kullanımında hacimsel verimin %10 azaldığı kabul edildiğinde güç yoğunluğunun %12 azaldığı görülmüştür. LPG'nin özgül yakıt tüketimi benzine göre yüksek olmasına rağmen LPG/benzin fiyat oranı nedeniyle LPG'nin özgül yakıt maliyeti benzine göre oldukça düşük olmaktadır. Sıkıştırma oranının artmasıyla ve strok/çap oranının azalmasıyla birlikte performans kayıpları azalmaktadır. Ayrıca eşdeğerlik oranı 1'den büyük olduğunda performans kayıpları artmaktadır. LPG'nin performans düşüklüğü özellikle hacimsel verimin artırılması veya sıkıştırma oranının artırılmasıyla bertaraf edilebileceği görülmektedir. LPG/benzin fiyat oranı 0,54 olduğunda LPG ile çalışan motorun benzin ile çalışmasına kıyasla %24 daha ekonomik olduğu belirlenmiştir. LPG/benzin fiyat oranı 0,67 olduğunda ise LPG'nin ekonomik avantajının olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada motor tasarımcıları için önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Simulation and performance analysis of a spark ignition engine using gasoline and LPG as fuel

H I G H L I G H T S

- Finite time thermodynamics method for different fuels
- Quasi-realistic simulation of spark ignition engines
- Engine performance change in gasoline and LPG use

Article Info

Research Article
Received: 08.05.2019
Accepted: 20.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.561583

Keywords:

LPG-gasoline comparison,
performance analysis,
spark ignition engine,
engine simulation,
Otto-cycle

ABSTRACT

In this study, using the finite-time thermodynamics method, a simulation model has been created for Otto-cycle engines. In the model, it has been assumed that there are irreversibilities, heat, combustion, and friction losses, and also that the specific heat changes depending on the temperature, the cycle initial temperature changes depending on the residual gas temperature, and the working fluid is composed of the fuel-air-residual gas mixture. The effects of compression ratio, equivalence ratio, and stroke/bore ratio on engine performance were examined. Thermal efficiency, specific fuel consumption, specific fuel cost, and power density are used for performance analysis. Performance loss factors were used for engine heat balance. The characteristics of a single-cylinder spark-ignition engine have been used as a reference in the model. As a result of the numerical study, it was observed that when the volumetric efficiency decreased by 10% in LPG use, the power density decreased by 12%. Although the specific fuel consumption of LPG is higher than gasoline, the specific fuel cost of LPG is considerably lower than gasoline due to the LPG/gasoline price ratio. The loss of performance decrease as the compression ratio increases and the stroke/bore ratio decreases. Also, performance losses increase when the equivalence ratio is greater than 1. It is seen that LPG performance can be eliminated by increasing the volumetric efficiency or increasing the compression ratio. When the LPG/gasoline price ratio is 0.54, it is determined that the engine running on LPG is 24% more economical compared to working with gasoline. When the LPG/gasoline price ratio is 0.67, it has been observed that LPG has no economic advantage. Significant results have been obtained especially for engine designers.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: earabaci@mehmetakif.edu.tr / Tel: +90 546 274 6595

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Buji ateşlemeli motorlar otomobillerde, küçük tarım makinelerinde ve düşük kapasiteli jeneratörlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve bu motorlarda benzinin yanı sıra sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) kullanımı sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle petrol fiyatlarındaki artış nedeniyle, gelişmekte olan ülkelerdeki otomobillerde benzin yerine LPG kullanımı tercih edilmektedir. 2018 Türkiye İstatistik Kurumu (TUIK) verilerine göre Türkiye’de yaklaşık 12 milyon otomobil bulunmakta ve bu otomobillerin %24,9’u benzin, %36,8’i dizel ve %37,9’u ise LPG yakıtlı olarak tescil edilmiş durumdadır [1]. Buji ateşlemeli motorlar (benzin-LPG, benzin-etanol ve yalnızca LPG gibi istisnaları olmakla birlikte) genel olarak yalnızca benzin ile çalışacak şekilde üretilmektedir. Benzin ile çalışan bu motorlar, dönüşüm kitleri sayesinde sıvı veya buhar fazındaki LPG ile çalışacak hale getirilmektedir. Özellikle buhar fazında LPG kullanılan motorlarda hacimsel verimin düşmesi nedeniyle performans kayıpları yaşanmaktadır [2]. Benzin gibi sıvı yakıtlar gizli buharlaşma ısısı nedeniyle buharlaşma esnasında ortamda soğutma etkisi oluşturmakta ve bu nedenle motora giren yakıt hava karışımının yoğunluğu artmakta ve dolayısıyla hacimsel verim de artmaktadır. LPG gibi ortam sıcaklığında buhar fazında olan yakıtlar, soğutma etkisinin yanında düşük yoğunluklarından dolayı sıvı yakıtta göre daha fazla hacim kaplamaktadırlar ve sonuçta hacimsel verimde azalmaya neden olmaktadır [2, 3]. Bu dezavantaj sıvı LPG sistemleri ile büyük ölçüde bertaraf edilebilmektedir. Günümüzde LPG dönüşümü sonrasında motorun hem benzin hem de LPG ile çalışabilmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle LPG dönüşümü esnasında motorun yapısal ve/veya yazılımsal karakteristik özelliklerinin değiştirilmesi genellikle tercih edilmez. Bunun yerine LPG sisteminin benzin sisteminden bağımsız olarak yönetilmesi tercih edilmektedir.

Literatürde yakıt olarak LPG kullanımının motor performansına etkilerinin incelendiği birçok deneysel ve teorik çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, LPG kullanım oranı [2, 4], hacimsel verim [5], strok oranı [3], sıkıştırma oranı [3, 6], supap sistemi karakteristiği [7], eşdeğerlik oranı [8], motor hızı [9] gibi parametrelerin motor performansına olan etkileri incelenmiştir. Motor performans testlerinde belirli bir parametrenin etkisi detaylı olarak incelenebilmektedir. Bununla birlikte motorlar, günümüzde çeşitli bilgisayar programları yardımıyla detaylı olarak modellenmektedir [10-12]. Bunlar çoğu zaman gerçeğe çok yakın modellerdir olmasına rağmen, çeşitli tasarım parametrelerinin motor performansını üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi için oldukça kullanışsız ve karmaşıktır. Bu karmaşık modeller yerine klasik termodinamikte yer alan teorik çevrimler için modern termodinamiğin bir konusu olan sonlu zaman termodinamiği metodunun kullanımı son yıllarda özellikle tasarım parametrelerinin motor performansına olan etkilerinin incelenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir [13, 14]. Sonlu zaman termodinamiği metodu günümüzdeki gerçek motor çevrimlerinin teorik çevrimler

üzerinde ısı transferi, tersinmezlikler, sürtünme, yanma, gibi kayıpların da dikkate alındığı sanki-gerçekçi modellerinin oluşturulmasında etkili olarak kullanılmaktadır [14, 15]. Sonlu zaman termodinamiği metodu ile strok uzunluğu [16-18], strok/çap oranı [19], sürtünme kaybı [17, 20], sıkıştırma oranı [17, 21, 22], artık gaz oranı [22, 23], yanma verimi [24] gibi birçok tasarım parametresinin motor performansına etkileri detaylı bir şekilde incelenebilmektedir. Klasik termodinamikteki teorik çevrimlerde çalışma maddesinin hava olduğu kabul edilmektedir. Sonlu zaman termodinamiği metodunda ise çalışma maddesi yalnızca hava [25, 26] olabileceği gibi, hava-yakıt karışımı [27, 28] veya hava-yakıt-artık gaz karışımı [29] olarak da tanımlanabilmektedir. Çevrim çalışma maddesinin özgül ısısı klasik termodinamikte sabit olarak kabul edilirken, sonlu zaman termodinamiği metodunda ise çalışma maddesinin özgül ısısı sabit [23, 29] veya sıcaklığa bağlı lineer [24, 25] veya polinom [30] olarak değişken olabilmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalarda çevrim kayıplarının da dikkate alındığı bir model oluşturulup, motor tasarım veya parametresinin etkilerinin incelenmesi ve optimizasyonu sonlu zaman termodinamiği metodu kullanılarak yapılmaktadır. Ayrıca literatürdeki bu çalışmalarda oluşturulan modeller yakıt türünden bağımsızdır. Motorlarda farklı yakıtların kullanımının motor performansına olan etkisinin sonlu zaman termodinamiği metodu kullanılarak modellenmesi çok yaygın bir kullanım olmamakla birlikte, bu tür çalışmalara uygun olmayacağı yönünde herhangi bir bilgi de bulunmamaktadır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak hem benzin hem de LPG ile çalışan bir motorda sıkıştırma oranı, strok/çap oranı ve eşdeğerlik oranı değişiminin motor performansına olan etkisinin incelenebilmesi için sonlu zaman termodinamiği metodunun kullanıldığı bir simülasyon modeli detaylı olarak sunulmuş ve tek silindirdirli buji ateşlemeli bir motorun teknik özellikleri ve boyutları referans alınarak, oluşturulan simülasyon modeli sayesinde kapsamlı bir sayısal çalışma yapılmış ve her iki yakıt (benzin ve LPG) için elde edilen sanki-gerçekçi sonuçlar kullanılarak karşılaştırma grafikleri elde edilmiştir. Buradaki temel amaç, aynı çalışma şartları için kullanılan iki farklı yakıtın performans etkisinin teorik olarak incelenmesi ve avantajlı çalışma koşullarının belirlenmesidir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak özgül ısının sıcaklığa bağlı logaritmik bir fonksiyona göre değiştiği kabul edilmiştir. Bununla birlikte simülasyon çalışmasında LPG’nin hacimsel verime etkisi de hesaplamalara dahil edilmiştir.

2. TEORİK MODEL (THEORETICAL MODEL)

2.1. Simülasyon Koşulları (Simulation Conditions)

Bu çalışmada sonlu zaman termodinamiği metodu kullanılarak referans olarak seçilen buji ateşlemeli bir motorun performans parametrelerinin incelenebilmesi için Otto çevriminin kullanıldığı kapsamlı bir simülasyon modeli

oluşturulmuştur. Bu model sayesinde aynı şartlar için benzin ve LPG kullanımının motor performans parametrelerine etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi amaçlanmıştır. Tablo 1’de simülasyonda kullanılan giriş ve çıkış parametreleri sunulmuştur.

Simülasyon için günümüzde jeneratörlerden tarım makinelerine kadar çok yaygın olarak kullanılan, genel amaçlı bir motorun yapısal özellikleri referans olarak tercih edilmiştir. Benzinli, hava soğutmalı, doğal emişli, tek silindirli, dört zamanlı olan bu motorun yapısal özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur [31]. Simülasyonda kullanılan çevresel ve tasarımsal diğer parametreler ise Tablo 3’teki gibidir.

Tablo 2. Referans motorun bazı özellikleri [31]
(Some specifications of the reference engine)

Özellik	Birim	Değer
Strok/Çap (λ)	mm/mm	0,75
Sıkıştırma oranı (ϵ)	-	8,2:1
Strok hacmi (v_d)	L	0,27
Özgül yakıt tüketimi (b_e)	g/kWh	308,72
Maksimum güç (3600 min ⁻¹)	kW	6,70

Tablo 3’te benzin için η_{vol} değeri 0,92 olarak kabul edilmiştir ve LPG için 0,92 ve 0,83 ($\approx 0,92 \times 0,9$) değerleri kullanılmıştır. Bu çalışmada hem benzin hem de LPG’nin yakıt olarak kullanımında belirli tasarım parametrelerinin motor performansı üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi amaçlanmıştır. Bunun için Tablo 4’te gösterilen parametreler simülasyon için değişken giriş parametresi olarak belirlenmiştir.

2.2. Sıcaklığa Bağlı Değişken Özgül Isı Modeli
(Temperature-dependent Variable Specific Heat Model)

Klasik termodinamikte, Otto çevrimi için çalışma akışkanı, ideal hava olarak kabul edilmektedir [35]. Bununla birlikte bu ideal havanın özgül ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişmediği (sabit kaldığı) kabul edilmektedir. Sonlu zaman termodinamiği metodunda çalışma akışkanının özgül ısısı sabit kabul edilebildiği gibi sıcaklığa bağlı değişken olarak

lineer veya polinom bir fonksiyonla ifade edilebilmektedir [24, 25, 30]. Literatürdeki özgül ısının sıcaklığa bağlı değişken olduğu çalışmalara bakıldığında yaygın olarak çalışma akışkanının ideal hava olarak kullanıldığı görülmektedir [25, 26]. Bununla birlikte çalışma akışkanının hava-yakıt veya hava-yakıt-artık gaz olduğu çalışmalarda ise özgül ısılar genellikle sabit olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada ise çalışma akışkanının hava-yakıt-artık gaz karışımı ve özgül ısının ise Eş. 1’deki gibi logaritmik bir fonksiyona göre sıcaklığa bağlı değişken olduğu kabul edilmiştir. Özgül ısılar için kullanılan bu logaritmik fonksiyon, lineer fonksiyona göre doğruluğunun daha yüksek ve polinom fonksiyonuna göre kullanımının daha basit olması nedeniyle tercih edilmiştir.

Tablo 3. Çevresel, tasarımsal ve ekonomik kabuller [16, 22, 29-39] (Enviromental, design and, economic assumptions)

Özellik	Birim	Değer
Motor hızı (N)	min ⁻¹	3600
Ortam basıncı (P_0)	kPa	100
Ortam sıcaklığı (T_0)	K	300
Silindir duvar sıcaklığı (T_w)	K	360
Sürtünme katsayısı (μ)	Ns/m	12,9
Motor hacimsel verimi (η_{vol})	%	92 ve 83
İzentropik verimler (η_c ve η_e)	%	95
Benzin fiyat (95 oktan) (τ_f)	\$/L	1,25
LPG fiyat (mix LPG) (τ_f)	\$/L	0,67
Benzin özgül kütlesi (ρ_f)	g/L	830
LPG özgül kütlesi (ρ_f)	g/L	560
Benzin alt ısı değeri (H_u)	kJ/kg	44430
LPG alt ısı değeri (H_u)	kJ/kg	45660
Benzin için stokiyometrik hava/yakıt oranı (x_{AFS})	-	15,053
LPG için stokiyometrik hava/yakıt oranı (x_{AFS})	-	15,438
Artık gaz kesri (ψ)	%	10

$$c_{vi} = a_i + b_i \ln T \tag{1}$$

$$c_{pi} = c_{vi} + R_i = (a_i + R_i) + b_i \ln T \tag{2}$$

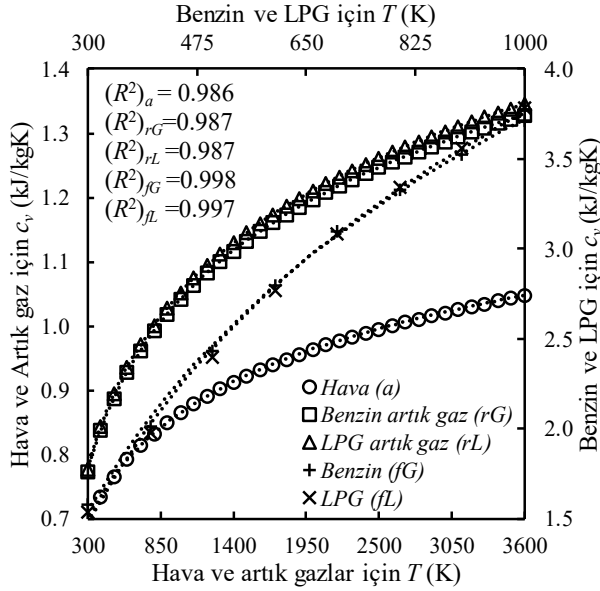
Tablo 1. Simülasyonda kullanılan giriş ve çıkış parametreleri (Input and output parameters used in simulation)

Giriş Parametreleri		Çıkış Parametreleri	
Sabit	Değişken	Hesaplanan	Karşılaştırma
Strok hacmi (v_d)	Yakıt türü	Sürtünme kaybı (P_μ)	Güç yoğunluğu (d_{P_e})
Ortam koşulları (P_0, T_0)	(Benzin-LPG)	Kritik nokta sıcaklıkları (T_i)	Özgül yakıt maliyeti (c_e)
Sürtünme katsayısı (μ)	Artık gaz kesri (ψ)	Yakıt tüketimi (\dot{m}_{fi})	Isıl verim (η_{th})
Yakıt fiyatları (τ_{fi})	Sıkıştırma oranı (ϵ)	Yanma verimi (η_{com})	Özgül yakıt tüketimi (b_e)
Hacimsel verim (η_{vol})	Eşdeğerlik oranı (ϕ)	Isı transferi katsayısı (h_{ht})	
Motor hızı (N)	Strok-çap oranı (λ)	Isı transferi kaybı (\dot{Q}_{ht})	
Gaz sabitleri (R_i)		Sisteme giren ısı (\dot{Q}_{in})	
Yakıt alt ısı değeri (H_u)		Sistemden çıkan ısı (\dot{Q}_{out})	
Silindir duvar sıcaklığı (T_w)		Efektif güç (P_e)	
Özgül ısı katsayıları (a_i ve b_i)			
İzentropik verimler (η_c ve η_e)			

Tablo 4. Değişken giriş parametreleri (Variable input parameters)

Özellik	Birim	Değer aralığı
Strok-çap oranı (λ)	-	0,5→1,25
Sıkıştırma oranı (ε)	-	6,2→12,2
Eşdeğerlik oranı (ϕ)	-	0,8→1,2

Buradaki a_i ve b_i katsayılarının belirlenmesi için çalışma akışkanını oluşturan hava, yakıt ve artık gaz için termodinamik tablolardan [13, 34-36, 40] sabit hacimdeki özgül ısıların sıcaklığa bağlı değişimlerinin grafikleri Şekil 1'deki gibi elde edilmiş ve Eş 1'deki fonksiyona uygun olarak logaritmik eğilim çizgileri oluşturulmuştur. Havanın 0,21 O_2 + 0,79 N_2 , benzin yakıtının C_8H_{18} , LPG yakıtının $C_{3,7}H_{9,4}$ (%70 bütan (C_4H_{10}) ve %30 propan (C_3H_8)), artık gazın ise stokiyometrik olarak yakılmış yakıtın tam yanma ürünlerinden ($CO_2 + H_2O + N_2$ karışımı) oluştuğu varsayılmıştır.


Şekil 1. Çalışma akışkanları için sabit hacimdeki özgül ısıların sıcaklığa bağlı değişimi (Temperature-dependent variation of specific heats at constant volume for working fluids)

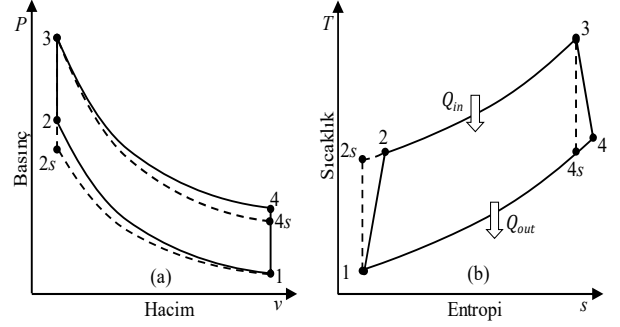
Şekil 1'de elde edilen logaritmik eğrilerin, termodinamik tablolardan elde edilen verilerle çok çok büyük benzerlik gösterdiği ($R^2 \approx 1$) görülmektedir. Buna göre çalışma akışkanları için Eş. 1'de kullanılacak olan a_i ve b_i katsayıları Tablo 5'teki gibi olmaktadır.

Tablo 5. Özgül ısılar için katsayılar (Coefficients for the specific heats)

i	Akışkan	a_i	b_i	R_i
fG	Benzin	-8,7859	1,8106	0,0729
fL	LPG	-9,3157	1,8925	0,1570
rG	Artık gaz, benzin	-0,5006	0,2234	0,3066
rL	Artık gaz, LPG	-0,5240	0,2283	0,3090
a	Hava	-0,1183	0,1424	0,2891

2.3. Sonlu Zaman Termodinamiği (Finite Time Thermodynamics)

Şekil 2'de Otto çevrimi için Pv ve Ts diyagramları görülmektedir. Buradaki "s" indisi tersinir çevrimdeki tersinir süreçler için kullanılmaktadır. 1-2-3-4 noktaları ise sonlu zaman termodinamiği metodunda kullanılan tersinmez Otto çevriminin ifade etmektedir.


Şekil 2. Otto çevriminin (a) Pv ve (b) Ts diyagramları [30] ((a) Pv and (b) Ts diagrams of the Otto cycle)

Çalışma akışkanının hava, yakıt ve artık gazdan oluşan bir karışım olarak tanımlanmıştır (Eş. 3) [29]. Artık gaz kesri (ψ) artık gaz kütlelerinin (m_r) toplam karışım kütlelerine (m_{mix}) oranı (Eş. 4) [15, 23, 29] ve eşdeğerlik oranı (ϕ) stokiyometrik hava-yakıt oranının (x_{AFS}) gerçek hava-yakıt oranına (m_a/m_f) oranı (Eş. 5) [41] olarak ifade edilmektedir.

$$m_{mix} = m_f + m_a + m_r = \frac{m_f}{\phi} \left(\frac{\phi + x_{AFS}}{1 - \psi} \right) \quad (3)$$

$$\psi = \frac{m_r}{m_{mix}} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{x_{AFS}}{m_a/m_f} \quad (5)$$

Performans hesaplamaları için bir çevrimde kullanılan yakıt kütleleri m_f temel bir parametredir. Buna göre m_f Eş. 6'daki gibi belirlenebilmektedir [32].

$$m_f = \frac{m_a \phi}{x_{AFS}} = \frac{\phi P_0 v d^3 \eta_{vol}}{x_{AFS} T_0 R a} \quad (6)$$

Sonlu zaman termodinamiği metodunda çevrimin belirli bir sürede tamamlandığı kabul edildiği için çalışma akışkanı zamana bağlı olarak ifade edilebilmektedir. Dört zamanlı motorlarda çevrim için motorun iki tur dönmesi gerekmektedir. Buna göre herhangi bir i çalışma akışkanının (m_i) motor hızına göre (N) zamana bağlı ifadesi (\dot{m}_i) Eş. 7'deki gibi olmaktadır [41, 42].

$$\dot{m}_i = \frac{m_i N}{120} \quad (7)$$

c_{vmix} 'in belirlenebilmesi için gerekli olan a_{mix} ve b_{mix} katsayıları sırasıyla Eş. 8 ve Eş. 9'daki gibi belirlenmektedir. R_{mix} için ise Eş. 10 kullanılmaktadır.

$$a_{mix} = (1 - \psi) \frac{a_f \phi + a_a x_{AFS}}{\phi + x_{AFS}} + \psi a_r \quad (8)$$

$$b_{mix} = (1 - \psi) \frac{b_f \phi + b_a x_{AFS}}{\phi + x_{AFS}} + \psi b_r \quad (9)$$

$$R_{mix} = (1 - \psi) \frac{R_f \phi + R_a x_{AFS}}{\phi + x_{AFS}} + \psi R_r \quad (10)$$

Efektif güç (P_e) Eş. 11'deki gibi ifade edilmektedir [30, 37].

$$P_e = P_i - P_\mu = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - P_\mu \quad (11)$$

Şekil 2'de gösterilen 2-3 noktaları arasında ısı girişi (\dot{Q}_{in}) gerçekleşmektedir ve Eş. 12'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{mix} \int_{T_2}^{T_3} c_{vmix} dT = \frac{\dot{m}_f}{\phi} \left(\frac{\phi + x_{AFS}}{1 - \psi} \right) b_{mix} \left[(T_3 \ln T_3 - T_2 \ln T_2) - (T_3 - T_2) \left(1 - \frac{a_{mix}}{b_{mix}} \right) \right] \quad (12)$$

Burada T_2 sıkıştırma sonu sıcaklığıdır ve hesaplanabilen bir değerdir. Yalnızca Eş. 11 kullanılarak T_3 ve dolayısıyla \dot{Q}_{in} hesaplanamaz. T_3 'ün hesaplanabilmesi için ya \dot{Q}_{in} ya da T_3/T_2 değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle \dot{Q}_{in} Eş. 13'deki gibi yakıt enerjisi ve ısı kaybına bağlı olarak tekrar ifade edilmiştir. Böylelikle Eş. 12 ve Eş. 13 beraber çözümlenerek T_3 belirlenebilmektedir [23, 41].

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_f - \dot{Q}_{ht} \quad (13)$$

Burada birim zamandaki yakıt enerjisi'nin (\dot{Q}_f) belirlenmesi için Eş. 14 kullanılmaktadır [15, 23].

$$\dot{Q}_f = \eta_{com} \dot{m}_f H_u \quad (14)$$

Yanma verimi (η_{com}) ϕ 'nin bir fonksiyonu olarak Eş. 15'teki gibi tanımlanabilir [20, 22, 41].

$$\eta_{com} = -1,44738 + \frac{4,18581}{\phi} - \frac{1,86876}{\phi^2} \quad (15)$$

Silindir duvarından çevreye olan birim zamandaki ısı kaybı (\dot{Q}_{ht}) Newton'un soğutma yasasına göre Eş. 16 ile hesaplanabilir [27, 43, 44].

$$\dot{Q}_{ht} = h_{ht} A_{ht} (T_m - T_w) = h_{ht} A_{ht} \left(\frac{T_2 + T_3}{2} - T_w \right) \quad (16)$$

Isı transferinin gerçekleştiği alan (A_{ht}) silindir iç yüzeyinin alanı olarak kabul edilmiştir ve Eş. 17'deki gibi hesaplanmaktadır [15].

$$A_{ht} = \pi D \left[\frac{\varepsilon L}{\varepsilon - 1} + \frac{D}{2} \right] = \pi \left(\frac{4v_d}{\pi \lambda} \right)^{2/3} \left[\frac{\varepsilon \lambda}{(\varepsilon - 1)} + 0,5 \right] \quad (17)$$

Strok/çap oranı (λ) Eş. 18'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\lambda = \frac{L}{D} = \frac{4v_d}{\pi D^3} \approx 0,8862 \frac{L^{1,5}}{v_d^{0,5}} \quad (18)$$

Isı transferi katsayısı (h_{ht}) için Hohenberg korelasyonu kullanılmıştır ve Eş. 19'daki gibi ifade edilmektedir [45].

$$h_{ht} = 130 \left(\frac{\varepsilon v_d}{\varepsilon - 1} \right)^{-0,06} P_0^{0,8} T_0^{-0,4} (s_p + 1,4)^{0,8} \quad (19)$$

Burada s_p ortalama piston hızıdır ve Eş. 20'deki gibi ifade edilmektedir.

$$s_p = \frac{LN}{30} = \frac{D\lambda N}{30} = \frac{N}{15} \left[\frac{\lambda^2 v_d}{2\pi} \right]^{1/3} \quad (20)$$

Şekil 2'de gösterilen 4-1 noktaları arasında ısı çıkışı (\dot{Q}_{out}) gerçekleşmektedir ve Eş. 21'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{mix} \int_{T_4}^{T_1} c_{vmix} dT = \frac{\dot{m}_f}{\phi} \left(\frac{\phi + x_{AFS}}{1 - \psi} \right) b_{mix} \left[(T_4 \ln T_4 - T_1 \ln T_1) - (T_4 - T_1) \left(1 - \frac{a_{mix}}{b_{mix}} \right) \right] \quad (21)$$

Burada T_4 genişleme sonu sıcaklığıdır ve hesaplanabilen bir değerdir. T_1 ise literatürde genellikle çevre sıcaklığı (T_0) olarak kabul edilmektedir. T_0 sıcaklığında sisteme giren yakıt ve hava T_0 'dan daha yüksek bir T_r ($\approx (T_4 + T_0)/3$) sıcaklığına sahip artık gazla karışmaktadır. Bu çalışmada artık gaz miktarı değişken olduğundan dolayı artık gazın çevrim başlangıç sıcaklığına etkisinin de incelenebilmesi için T_1 'in hesaplanmasında kullanılmak üzere Eş. 22 türetilmiştir [15].

$$T_1 = \frac{\psi R_r T_r + \left(\frac{1 - \psi}{\phi + x_{AFS}} \right) (\phi R_f + x_{AFS} R_a) T_0}{R_{mix}} \quad (22)$$

Sürtünmeden kaynaklanan kayıp güç (P_μ), sürtünme katsayısı ve piston hızının bir fonksiyonudur ve Eş. 23'teki gibi ifade edilmektedir [30, 37].

$$P_\mu = \mu (s_p)^2 \quad (23)$$

1-2s ve 3-4s noktaları arasında gerçekleşen süreçler izentropik sıkıştırma ve genişleme süreçleridir. Herhangi bir i - j noktaları arasında gerçekleşen sıkıştırma ve genişleme süreci genel olarak Eş. 24'teki gibi ifade edilmektedir [13, 14, 35]

$$\int_i^j ds = \int_i^j c_v \frac{dT}{T} + \int_i^j R \frac{dV}{V} \quad (24)$$

İzentropik süreç için entropi değişimi söz konusu olmadığından dolayı Eş. 24'te eşitliğin sol tarafı sıfıra eşittir. Buna göre 1-2s noktaları arasında gerçekleşen izentropik sıkıştırma süreci için Eş. 25 ve Eş. 26 elde edilmektedir.

$$\int_{T_1}^{T_{2s}} \left(\frac{a_{mix} + b_{mix} \ln(T)}{T} \right) dT = -R_{mix} \int_{V_1}^{V_{2s}} \frac{dV}{V} \quad (25)$$

$$\ln \frac{T_{2s}}{T_1} (a_{mix} + b_{mix} \ln(T_{2s} T_1)) = R_{mix} \ln \varepsilon \quad (26)$$

Benzer şekilde Eş. 24, 3-4s noktaları arasında geçen izentropik genişleme süreci için düzenlendiğinde Eş. 27 ve Eş. 28 elde edilmektedir.

$$\int_{T_3}^{T_{4s}} \left(\frac{a_{mix} + b_{mix} \ln(T)}{T} \right) dT = -R_{mix} \int_{V_3}^{V_{4s}} \frac{dV}{V} \quad (27)$$

$$\ln \frac{T_{4s}}{T_3} (a_{mix} + b_{mix} \ln(T_{4s} T_3)) = -R_{mix} \ln \varepsilon \quad (28)$$

T_{2s} ve T_{4s} değerlerinin belirlenebilmesi için Eş. 26 ve Eş. 28 tekrar düzenlenerek Eş. 29 ve Eş. 30 elde edilmiştir.

$$T_{2s} = \exp \left[\frac{-1}{b_{mix}} \left(a_{mix} - \sqrt{b_{mix} \left(\frac{(a_{vmix})^2 + b_{mix} (\ln T_1)^2 + 2a_{mix} \ln T_1 + 2R_{mix} \ln \varepsilon}{2} \right)} \right) \right] \quad (29)$$

$$T_{4s} = \exp \left[\frac{-1}{b_{mix}} \left(a_{mix} - \sqrt{b_{mix} \left(\frac{(a_{vmix})^2 + b_{mix} (\ln T_3)^2 + 2a_{mix} \ln T_3 - 2R_{mix} \ln \varepsilon}{2} \right)} \right) \right] \quad (30)$$

Burada T_{2s} ve T_{4s} sırasıyla izentropik sıkıştırma ve izentropik genişleme şartlarında elde edilen sıcaklıklardır. Bu tür süreçlerde izentropik verim %100 olmaktadır. Süreçlerde tersinmezlikler gerçekleştiğinde izentropik verim %100'den daha düşük olmaktadır. Buna göre tersinmez sıkıştırma ve tersinmez genişleme süreçleri için izentropik verimler sırasıyla Eş. 31 ve Eş. 32'de ifade edilmekte ve bu eşitlikler kullanılarak T_2 ve T_4 değerleri belirlenebilmektedir [23, 25, 30].

$$\eta_c = \frac{W_{1 \rightarrow 2s}}{W_{1 \rightarrow 2}} = \frac{\int_1^{2s} c_{vmix} dT}{\int_1^2 c_{vmix} dT} \cong \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (31)$$

$$\eta_e = \frac{W_{3 \rightarrow 4}}{W_{3 \rightarrow 4s}} = \frac{\int_3^4 c_{vmix} dT}{\int_3^{4s} c_{vmix} dT} \cong \frac{T_4 - T_3}{T_{4s} - T_3} \quad (32)$$

2.4. Performans Analizi Modelleri (Performance Analysis Models)

Detaylı olarak sunulan simülasyon modeli sayesinde Otto çevrimli bir motor sonlu zaman termodinamiği metodu kullanılarak çevrimdeki kritik nokta sıcaklıkları, efektif güç, ısı transferi kaybı, sürtünme kaybı, yakıt enerjisi, giren enerji, çıkan enerji ve yakıt tüketimi gibi çevrim ve motorla ilgili birçok bilgiye ulaşmak mümkün olmaktadır. Performans analizi için ise aşağıdaki alt modeller kullanılmıştır.

2.4.1. Temel performans parametreleri (Basic performance parameters)

Performans karşılaştırması ve optimizasyonunda kullanılmak üzere, bu çalışma için ısı verim (η_{th}), özgül yakıt tüketimi (b_e), güç yoğunluğu (d_{Pe}), ve özgül yakıt

maliyeti (c_e) temel performans parametresi olarak Eş. 33-Eş. 36'daki gibi ifade edilmiştir [34, 36, 41].

$$\eta_{th} = \frac{P_e}{\dot{Q}_f} \quad (33)$$

$$b_e = \frac{(3,6 \times 10^6) \dot{m}_f}{P_e} \quad (34)$$

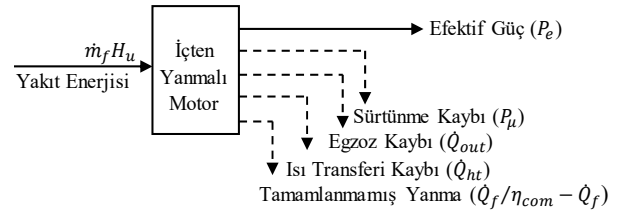
$$d_{Pe} = \frac{P_e}{v_t} = \frac{P_e (\varepsilon - 1)}{\varepsilon v_d} \quad (35)$$

$$c_e = \frac{b_e \cdot \tau_{fi}}{\rho_f} \quad (36)$$

Burada d_{Pe} ve η_{th} 'nin yüksek, b_e ve c_e 'nin ise düşük olması istenmektedir.

2.4.2. Isı balansı modeli (Heat balance model)

İçten yanmalı motorlarda yakıt enerjisinin efektif güce dönüşmesi sürecindeki kayıpların detaylı olarak incelenmesi için kullanılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. İçten yanmalı bir motor için ısı balansı
(Heat balance for an internal combustion engine)

Yakıt enerjisinin efektif güce dönüşmeyen kısmı, performans kaybı olarak ifade edilmektedir. Oluşturulan simülasyon modeline göre performans kayıpları sürtünme (F_μ), egzoz (F_{ex}), ısı transferi (F_{ht}) ve tamamlanmamış yanma (F_{inc}) performans kaybı faktörlerinden meydana gelmektedir. Bu performans kaybı faktörleri Eş. 37-Eş. 40'daki gibi ifade edilmektedir [17, 41].

$$F_{ex} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}_f H_u} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_f / \eta_{com}} \quad (37)$$

$$F_\mu = \frac{P_\mu}{\dot{m}_f H_u} = \frac{P_\mu}{\dot{Q}_f / \eta_{com}} \quad (38)$$

$$F_{ht} = \frac{\dot{Q}_{ht}}{\dot{m}_f H_u} = \frac{\dot{Q}_{ht}}{\dot{Q}_f / \eta_{com}} \quad (39)$$

$$F_{inc} = 1 - \frac{\dot{Q}_f}{\dot{m}_f H_u} = (1 - \eta_{com}) \quad (40)$$

Performans kaybı dışında kalan efektif güç ise performans faktörü olarak Eş. 41'deki gibi ifade edilmektedir.

$$F_{Pe} = \frac{\dot{m}_f H_u - (F_{ex} + F_\mu + F_{ht} + F_{inc})}{\dot{m}_f H_u} = \frac{P_e}{\dot{m}_f H_u} = \frac{P_e}{\dot{Q}_f / \eta_{com}} = \eta_{th} \eta_{com} \quad (41)$$

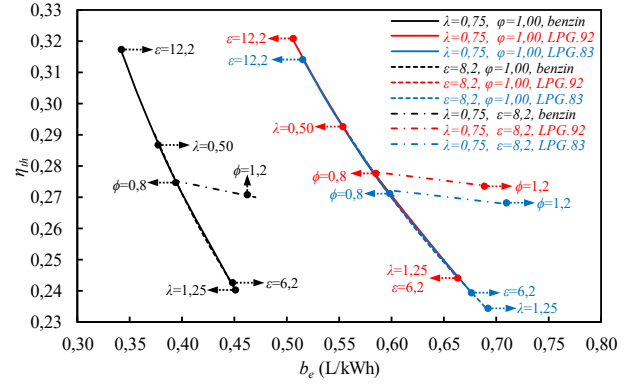
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada ε , λ ve ϕ 'nin motor performansına olan etkilerinin incelenmesi için detaylı bir simülasyon modeli oluşturulmuş ve bu model yardımıyla yakıt olarak benzin ve LPG kullanımı durumunda motor performansı değişimi için ayrı ayrı hesaplamalar yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

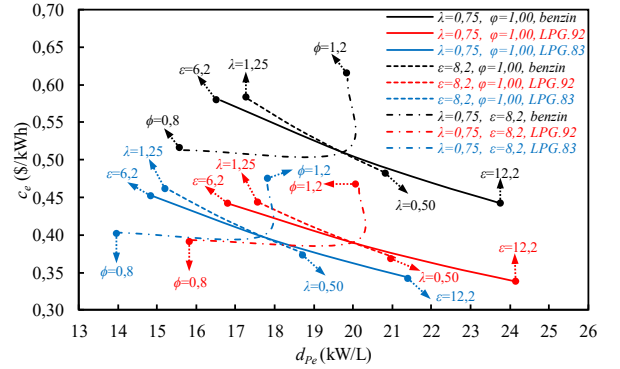
3.1. Temel Performans Parametrelerinin Değişimi (Change of Basic Performance Parameters)

Temel performans parametrelerinin incelenmesi için ε , λ ve ϕ 'nin değişimine bağlı olarak $\eta_{th}-b_e$ (Şekil 4) ve c_e-d_{pe} (Şekil 5) grafikleri elde edilmiştir. η_{th} ve d_{pe} 'nin yüksek b_e ve c_e 'nin ise düşük olması istenir. Bununla birlikte ε ve λ motorun yapısal parametresidir ve ϕ ise yanmayı etkileyen bir parametredir. Şekil 4'te λ 'nın azalması ve ε 'nın artması durumunda, literatürde yer alan daha önceki çalışmalara da uygun olarak [16-19], beklendiği gibi η_{th} artmakta ve b_e azalmaktadır. $\phi > 1$ olduğu durumda η_{th} azalmakta ve b_e artmaktadır. Benzin ve LPG için η_{th} değerleri birbirine çok yakın olmasına rağmen LPG kullanımındaki b_e her zaman benzin kullanımındaki b_e 'ye kıyasla yüksek olmaktadır. Burada b_e 'nin hacimsel olarak (L/kWh) hesaplanmasının nedeni hem benzin hem de LPG'nin piyasada hacimsel olarak satılmasından dolayıdır. Motor benzin ile çalıştırıldığında $\eta_{vol} = 0,92$ olarak kabul edilmiştir. LPG ile çalıştırıldığında η_{vol} değerinin yaklaşık %10 azalarak 0,83 olduğu kabul edilmiştir. LPG ile çalışan motor için $\eta_{vol} = 0,92$ (LPG.92) ve $\eta_{vol} = 0,83$ (LPG.83) verileri karşılaştırma için kullanılmıştır. LPG.83 ile LPG.92 verileri karşılaştırıldığında beklendiği gibi LPG.93'ün daha yüksek η_{th} değerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 5'te $\phi > 1$ olduğu durumda d_{pe} çok fazla etkilenmezken gereksiz olarak c_e 'nin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca $\phi < 1$ olduğu durumda c_e 'de çok fazla bir değişim olmamasına rağmen d_{pe} 'deki azalma ise göz ardı edilemeyecek kadar fazla olmaktadır. ε 'nin artması ve λ 'nın azalması durumunda c_e azalmakta ve d_{pe} artmaktadır. Ancak ε 'nin artırılması yakıtın oktan sayısı ile ilgili bir durumdur. LPG'nin oktan sayısının benzine kıyasla yaklaşık %10-15 daha fazla olduğu bilinmektedir [46]. Bu durumda LPG yakıtı ε 'nin artırılması için daha uygun bir yakıt olduğu görülmektedir. Benzin ve LPG'nin d_{pe} eğilimleri birbiri ile benzerlik gösterse de c_e bakımından LPG'nin benzine kıyasla daha avantajlı olduğu görülmektedir. Ancak LPG.92 ile LPG.83 karşılaştırıldığında η_{vol} 'ün d_{pe} üzerindeki etkisi net olarak görülebilmektedir. Bu durumda d_{pe} 'nin değeri η_{vol} 'ün etkisi ile yaklaşık %12 azalmaktadır. η_{vol} 'ün c_e üzerindeki etkisi yok denecek kadar azdır. Hesaplamalarda LPG/benzin fiyat oranı günümüz şartları için ortalama bir değer olarak yaklaşık 0,54 olarak kabul edilmiştir. Bu durumda yapılan hesaplamalara göre motorun LPG ile çalıştırılması durumunda, benzine kıyasla yaklaşık %24 daha ucuza çalıştığı görülmüştür. Ancak LPG/benzin fiyat oranının 0,67'ye çıktığı durumda, başka bir ifade ile benzin fiyatı

sabit iken LPG fiyatının %24 arttığı durumda LPG'nin fiyat avantajı ortadan kalkacağı görülmektedir.



Şekil 4. ε , λ ve ϕ 'ye bağlı olarak η_{th} ve b_e 'nin değişimi
(Change of η_{th} and b_e depending on ε , λ and ϕ)



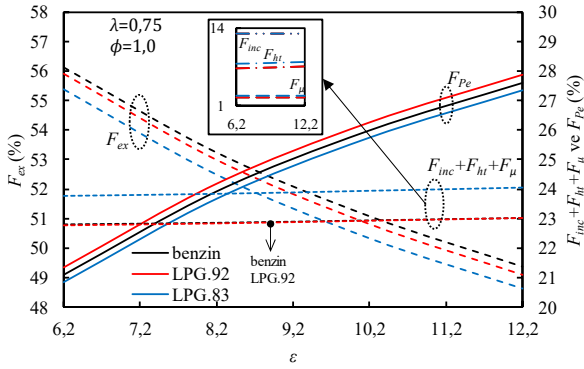
Şekil 5. ε , λ ve ϕ 'ye bağlı olarak c_e ve d_{pe} 'nin değişimi
(Change of c_e and d_{pe} depending on ε , λ and ϕ)

Şekil 4 ve Şekil 5 beraber değerlendirildiğinde LPG'nin fiyat avantajı ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte d_{pe} 'nin yüksek olması için ϕ 'nin yaklaşık 1 değerinde olmasının büyük avantaj sağladığı görülmektedir. ϕ 'nin biraz 1'den büyük bir değerde olmasıyla η_{th} 'nin azalması ve c_e 'nin artması ile birlikte d_{pe} 'nin az da olsa artırılmasının mümkün olduğu görülmektedir. Ancak LPG kullanımında η_{vol} 'ün olumsuz etkisinden dolayı performans bakımından benzinin avantajı da göz ardı edilmemelidir.

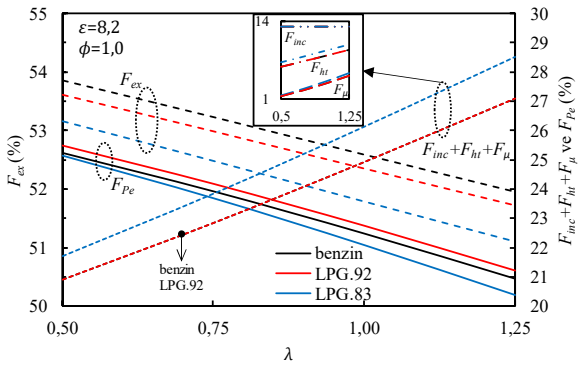
3.2. Performans ve Performans Kaybı Faktörlerinin Değişimi (Change Of Performance and Performance Loss Factors)

Performans ve performans kaybı faktörlerinin ε 'a bağlı (Şekil 6), λ 'ya bağlı (Şekil 7) ve ϕ 'ye bağlı (Şekil 8) değişimi incelenmiştir. Şekil 6'da λ ve ϕ 'nin sabit olduğu durum için, ε arttıkça F_{pe} 'nin arttığı, F_{ex} 'in azaldığı $F_{inc} + F_{ht} + F_{\mu}$ 'nün neredeyse hiç değişmediği görülmektedir. Bununla birlikte LPG kullanıldığında F_{pe} değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. LPG kullanımında η_{vol} 'ün azalması ile birlikte F_{pe} ve F_{ex} azalmış $F_{inc} + F_{ht} + F_{\mu}$ ise artmıştır. Şekil 7'de ε ve ϕ 'nin sabit olduğu durum için, λ arttıkça F_{pe} 'nin ve F_{ex} 'in azaldığı, $F_{inc} + F_{ht} + F_{\mu}$ 'nin arttığı

görülmektedir. Bu durum daha önceki çalışmalarda [33, 39, 44] sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte LPG.92 için F_{Pe} değerinin benzine kıyasla daha yüksek LPG.83 için ise daha düşük olduğu görülmektedir. $F_{inc} + F_{ht} + F_{\mu}$ 'nin yükselmesinin nedeni λ 'nın artışına bağlı olarak F_{ht} ve F_{μ} 'nün artmasından kaynaklandığı görülmektedir. Şekil 8'de ε ve λ 'nin sabit olduğu durum için, ϕ arttıkça F_{Pe} 'nin ve F_{ex} 'in önce artıp sonra azaldığı, azalığı, $F_{inc} + F_{ht} + F_{\mu}$ 'nin önce azalıp sonra arttığı görülmektedir. $F_{inc} + F_{ht} + F_{\mu}$ değişimine asıl etki eden F_{inc} 'teki değişim olduğu görülmektedir. $\phi \leq 1$ olduğu durumda F_{Pe} ve F_{ex} bakımından daha avantajlı olduğu görülmektedir.



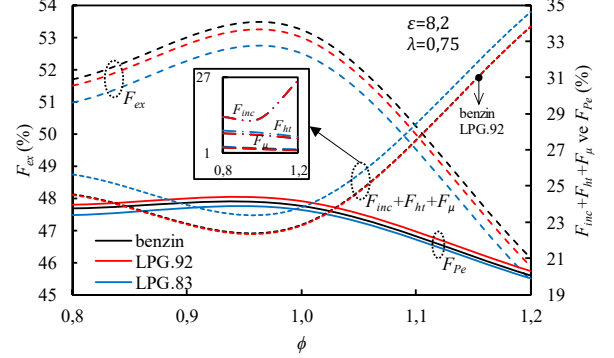
Şekil 6. Performans kaybı faktörlerinin ε 'a bağlı değişimi (ε -dependent change of performance loss factors)



Şekil 7. Performans kaybı faktörlerinin λ 'ya bağlı değişimi (λ -dependent change of performance loss factors)

Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 beraber değerlendirildiğinde en büyük performans kaybı egzozdan kaynaklanmaktadır. F_{Pe} 'nin yüksek olması için ε 'nin yüksek, λ 'nın düşük ϕ 'nin ise $\phi \leq 1$ olması gerekmektedir. ε 'un artması ile birlikte F_{Pe} 'nin artmasının temel nedeni F_{ex} 'in azalmasıdır. λ arttığında da F_{ex} azalmasına rağmen F_{ex} ile birlikte F_{Pe} 'nin de azaldığı görülmektedir. λ arttığında A_{ht} 'nin artmasından dolayı F_{ht} ve s_p arttığından dolayı F_{μ} artmaktadır. Bu nedenle her ne kadar λ arttığında F_{ex} azalsa da F_{Pe} 'nin artırılması için λ azaltılması gerekmektedir. ϕ tamamen yanma ile ilgili bir parametredir ve oluşturulan simülasyon

modelinde η_{com} ϕ ile değişmektedir. Her ne kadar $\phi > 1$ olduğunda F_{ex} azalsa da F_{inc} 'in artmasından dolayı F_{Pe} de artmaktadır. Ayrıca LPG için η_{vol} azaldığında motor performansı belirgin bir şekilde azalmaktadır.



Şekil 8. Performans kaybı faktörlerinin ϕ 'ye bağlı değişimi (ϕ -dependent change of performance loss factors)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Buji ateşlemeli motorlarda ε , λ ve ϕ 'nin motor performansına etkilerinin incelenmesi için sonlu zaman termodinamiği metodu kullanılarak kapsamlı bir simülasyon modeli oluşturulmuş ve bu model kullanılarak tek silindirli buji ateşlemeli bir motorun özelliklerine göre ε , λ ve ϕ 'nin motor performansına etkileri incelenmiştir. Oluşturulan model hem benzin hem de LPG için uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için öncelikle ε , λ ve ϕ 'nin değişiminin η_{th} , b_e , c_e ve d_{Pe} üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha sonra motor performans kaybı faktörleri incelenmiştir. LPG kullanımında motor performansına asıl etki eden parametrenin η_{vol} olduğu görülmüştür. η_{vol} değerinin düşük olması c_e üzerinde kaydedeğer bir etkisi olmamasına rağmen d_{Pe} 'yi olumsuz etkilediği görülmüştür. c_e bakımından değerlendirildiğinde LPG'nin benzine kıyasla avantajlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte yakıt karakteristiğine göre LPG kullanımında ε 'un artırılmasının daha mümkün olduğu görülmektedir. Ayrıca ε 'un artması ile birlikte η_{vol} 'ün düşüklüğüne rağmen LPG kullanımında hem benzin kullanımına yakın motor performansı elde edilebileceği hem de maliyet bakımından daha uygun olacağı görülmektedir. Benzin ve LPG için aynı η_{vol} değerinde LPG'nin performansı benzin kullanımına göre daha yüksek olduğu ancak LPG için η_{vol} 'ün azaldığı durumda LPG performansının benzine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Yapılan bu çalışmada N , ψ , T_w , μ gibi parametreler sabit olarak kabul edilmiş ve simülasyon bu şartlara göre kullanılmıştır. Bu parametreler değişken olarak kabul edilerek motor performansına etkisi incelenebilir. Bununla birlikte entropi üretimi bu simülasyon modeline dahil edilerek ikinci yasa analizi yapılabilir. Sonuç olarak detaylı olarak sunulan simülasyon modeli ile elde edilen sonuçların, özellikle motor tasarımcıları için pratik olarak kullanılabilir nitelikte olduğu görülmektedir. Ayrıca bu

çalışmadaki sonuçlar her ne kadar tek silindirli bir motor boyutlarına göre elde edilmiş olsa da, bu sonuçlar boyutsuz veya özgül olarak sunulduğundan dolayı rahatlıkla başka boyuttaki motorlar için karşılaştırma yapılabilecek niteliktedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Turkish Statistical Institute, Number of road motor vehicles by kind of fuel used, http://tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=1582. Yayın tarihi: Mart 2019, Erişim tarihi: Mayıs 5, 2019.
2. Pourkhesalian, A.M., Shamekhi, A. H., Salimi, F., Alternative fuel and gasoline in an SI engine: A comparative study of performance and emissions characteristics, *Fuel*, 89 (5), 1056-1063, 2010.
3. Ozcan, H., and Yamin, J. A., Performance and emission characteristics of LPG powered four stroke SI engine under variable stroke length and compression ratio. *Energy Conversion and Management*, 49 (5), 1193-1201, 2008.
4. Gümüş M., The effect of lpg using ratio on performance and emission characteristics in a spark ignition engine with dual fuel injection, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24 (2), 265-273, 2009.
5. Gumus, M., Effects of volumetric efficiency on the performance and emissions characteristics of a dual fueled (gasoline and LPG) spark ignition engine, *Fuel Processing Technology*, 92 (10), 1862-1867, 2011.
6. Yousufuddin, S., Mehdi, S.N., Performance and emission characteristics of LPG-fuelled variable compression ratio SI engine, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32 (1), 7-12, 2008.
7. Çınar, C., Şahin, F., Can, Ö., Uyumaz, A., A comparison of performance and exhaust emissions with different valve lift profiles between gasoline and LPG fuels in a SI engine. *Applied Thermal Engineering*, 107, 1261-1268, 2016.
8. Bayraktar, H., Durgun, O., Investigating the effects of LPG on spark ignition engine combustion and performance, *Energy Conversion and Management*, 46 (13-14), 2317-2333, 2005.
9. Masi, M., Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fuelled with LPG (liquefied petroleum gas), *Energy*, 41 (1), 252-260, 2012.
10. Caton, J. A., An introduction to thermodynamic cycle simulations for internal combustion engines. John Wiley & Sons, UK, 2015.
11. Yılmaz E., Polat S., Solmaz H., Aksoy F., Çınar C., Thermodynamic comparison of crank-drive and rhombic-drive mechanisms for a single cylinder spark ignition engine, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 595-606, 2020.
12. Yontar A., Doğu Y., Investigation of ignition advance effects for CNG usage in a sequential dual ignition gasoline engine by using in-cylinder combustion cfd analysis, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 1087-1100, 2019.
13. Winterbone, D., and Turan, A., *Advanced thermodynamics for engineers*. Butterworth-Heinemann, UK, 2015.
14. Kaushik, S.C., Tyagi, S. K., & Kumar, P., *Finite time thermodynamics of power and refrigeration cycles*. Springer International Publishing, India, 2017.
15. Arabacı, E, A simple approach for comparing performance of gasoline general-purpose engines at maximum power, *European Journal of Science and Technology*, 15, 269-279, 2019.
16. Ebrahimi, R., Performance analysis of an irreversible Miller cycle with considerations of relative air-fuel ratio and stroke length, *Applied Mathematical Modelling*, 36 (9), 4073-4079, 2012.
17. Gonca, G., and Sahin, B., The influences of the engine design and operating parameters on the performance of a turbocharged and steam injected diesel engine running with the Miller cycle, *Applied Mathematical Modelling*, 40 (5-6), 3764-3782, 2016.
18. Dobrucali, E., The effects of the engine design and running parameters on the performance of a Otto-Miller Cycle engine, *Energy*, 103, 119-126, 2016.
19. Gonca, G., Sahin, B., Ust, Y., Performance maps for an air-standard irreversible Dual-Miller cycle (DMC) with late inlet valve closing (LIVC) version, *Energy*, 54, 285-290, 2013.
20. Ebrahimi, R., Effects of mean piston speed, equivalence ratio and cylinder wall temperature on performance of an Atkinson engine, *Mathematical and Computer Modelling*, 53 (5-6), 1289-1297, 2011.
21. Ebrahimi, R., Dehkordi, N. S., Effects of design and operating parameters on entropy generation of a dual cycle, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133 (3), 1609-1616, 2018.
22. Ebrahimi, R., Sherafati, M., Thermodynamic simulation of performance of a dual cycle with stroke length and volumetric efficiency, *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 111 (1), 951-957, 2013.
23. Özdemir, A. O., Kılıç, B., Arabacı, E., Orman, R. Ç., Effect of mean piston speed and residual gas fraction on performance of a four-stroke irreversible Otto cycle engine, *Scientific Journal of Mehmet Akif Ersoy University*, 1 (1), 6-12, 2018.
24. Wu, Z., Chen, L., Ge, Y., Sun, F., Thermodynamic optimization for an air-standard irreversible Dual-Miller cycle with linearly variable specific heat ratio of working fluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 46-57, 2018.
25. Ge, Y., Chen, L., Qin, X., Xie, Z., Exergy-based ecological performance of an irreversible Otto cycle with temperature-linear-relation variable specific heat of working fluid, *The European Physical Journal Plus*, 132 (5), 209, 2017.
26. Ge, Y., Chen, L., Sun, F., Wu, C., Effects of heat transfer and friction on the performance of an irreversible air-

- standard Miller cycle, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32 (8), 1045-1056, 2005.
27. Gonca, G., Performance Analysis of an Atkinson Cycle Engine under Effective Power and Effective Power Density Conditions, *Acta Physica Polonica, A.*, 132 (4), 1306-1313, 2017.
 28. Ebrahimi, R., Second law analysis on an air-standard Miller engine. *Acta Physica Polonica A*, 129 (6), 1079-1082, 2016.
 29. Ebrahimi, R., Thermodynamic Modeling of an Atkinson Cycle with respect to Relative Air-Fuel Ratio, Fuel Mass Flow Rate and Residual Gases, *Acta Physica Polonica, A.*, 124 (1), 29-34, 2013.
 30. Ge, Y., Chen, L., Qin, X., Effect of specific heat variations on irreversible Otto cycle performance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, 403-409, 2018.
 31. Honda Motor Europe, Technical Specifications for Honda GX270, http://www.honda-engines-eu.com/documents/10912/15992/TS_GX270, Erişim tarihi: Mayıs 5, 2019.
 32. Ebrahimi, R., Hoseinpour, M., Performance analysis of irreversible Miller cycle under variable compression ratio, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 27 (3), 542-548, 2013.
 33. Ebrahimi, R., Thermodynamic simulation of performance of an irreversible Otto cycle with engine speed and variable specific heat ratio of working fluid, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (3), 2091-2096, 2014.
 34. Ferguson, C. R., Kirkpatrick, A. T., *Internal combustion engines: applied thermosciences*, John Wiley & Sons, USA, 2015.
 35. Çengel, Y.A., Boles, M.A., Kanoglu, M., *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw-Hill, USA, 2019.
 36. Heywood, J.B., *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, USA, 1988.
 37. Ebrahimi, R., Effect of Volume Ratio of Heat Rejection Process on Performance of an Atkinson Cycle, *Acta Physica Polonica A*, 133 (1), 201-205, 2018.
 38. Autotraveler, Fuel prices in Europe, <https://autotraveler.ru/en/spravka/fuel-price-in-europe.html#.XNFez44zY2w>, Erişim tarihi: Mayıs 5, 2019.
 39. Gonca, G., Comparative performance analyses of irreversible OMCE (Otto Miller cycle engine)-DiMCE (Diesel miller cycle engine)-DMCE (Dual Miller cycle engine), *Energy*, 109, 152-159, 2016.
 40. Chase Jr, M.W., Curnutt, J.L., Downey Jr, J. R., McDonald, R. A., Syverud, A.N., Valenzuela, E.A., JANAF thermochemical tables, 1982 supplement, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 11 (3), 695-940, 1982.
 41. Gonca, G., Hocaoglu, M.F., Performance Analysis and Simulation of a Diesel-Miller Cycle (DiMC) Engine, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-14, 2019.
 42. Gonca, G., Thermodynamic analysis and performance maps for the irreversible Dual-Atkinson cycle engine (DACE) with considerations of temperature-dependent specific heats, heat transfer and friction losses, *Energy Conversion and Management*, 111, 205-216, 2016.
 43. Gonca, G., Dobrucali, E., Theoretical and experimental study on the performance of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel blends, *Renewable Energy*, 93, 658-666, 2016.
 44. Gonca, G., Effects of engine design and operating parameters on the performance of a spark ignition (SI) engine with steam injection method (SIM), *Applied Mathematical Modelling*, 44, 655-675, 2017.
 45. Hohenberg, G.F., Advanced approaches for heat transfer calculations, SAE Technical paper No: 790825, 1979.
 46. Morganti, K.J., Foong, T.M., Brear, M.J., da Silva, G., Yang, Y., Dryer, F.L. The research and motor octane numbers of liquefied petroleum gas (LPG). *Fuel*, 108, 797-811, 2013.



Experimental analysis of Meta-Heuristic algorithms for moving customer vehicle routing problem

Ukbe Usame Uçar^{1*}, Selçuk Kürşat İşleyen², Hadi Gökçen²

¹Department of Industrial Engineering, Fırat University, Elazığ, 23000, Turkey

²Department of Industrial Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- The time unit is a continuous value and the target number changes continuously at any time “t”
- The behaviour of the UAVs when there is no target in the operation area has been included in the route plan
- Using ideal number of vehicles in fleet.

Keywords:

- Moving Customer Vehicle Routing Problem
- Simulated Annealing
- Pareto Optimization
- Genetic Algorithm
- NSGA-II

Article Info:

Research Article
Received: 22.08.2019
Accepted: 23.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.609418

Acknowledgement:

This work is supported by the TUBITAK-BİDEB 2211 PhD Scholarship Program.

Correspondence:

Author: Ukbe Usame Uçar
e-mail: uuucar@firat.edu.tr
phone: +90 424 237 0000 / 5624

Graphical/Tabular Abstract

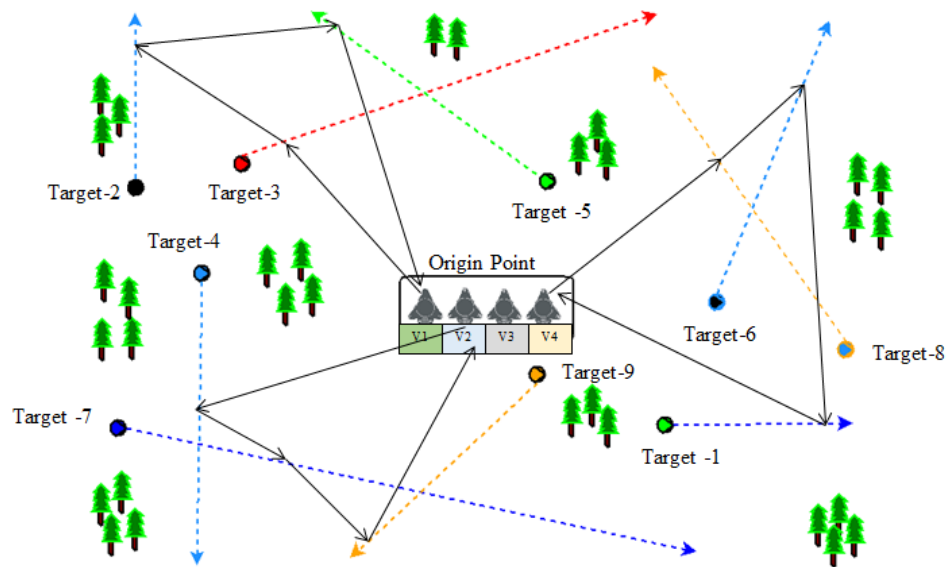


Figure A. Moving Customer Vehicle Routing Problem

Purpose: In this study, Heterogeneous Fleet-Moving Customer Vehicle Routing Problem (MC-VRP) with Time Windows under constraint of vehicle capacity (endurance) has been aimed to be solved considering the minimum operation time and cost.

Theory and Methods:

In order to solve the problem, heuristic algorithms (ÇARA, RASA) were developed and metaheuristic algorithms (Genetic Algorithm, NSGA-II and Simulated Annealing) were used.

Results:

According to the results of experimental analysis, it has been found that Genetic Algorithm performs better than other algorithms. It has been determined that the Simulated Annealing Algorithm has difficulty in the simultaneous minimization of two objectives and the solution time of NSGA-II is high. ÇARA has produced suitable solutions in all scenarios in very short solution times. While RASA has found suitable solutions for small and medium-sized problems, large-scale problems have not been able to produce appropriate solutions within reasonable solution times.

Conclusion:

MC-VRP has been successfully solved within the acceptable solution times for the relevant purposes, taking into account the specified constraints. As a result of the analysis, it was determined that population based algorithms produced better results than single solution based algorithms and constructive heuristics. It is anticipated that the proposed methods can be applied to Dynamic VRP, Dynamic TSP, MTTSP and can be used successfully in Fleet Routing, Maritime Surveillance Operations, Logistics and Traffic Control.



Hareketli müşterili araç rotalama problemi için Meta-Sezgisel algoritmaların deneysel analizi

Ukbe Usame Uçar^{1*}, Selçuk Kürşat İşleyen², Hadi Gökçen²

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 23000 Merkez, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Zaman birimi sürekli bir değer ve hedef sayısı herhangi bir "t" anında sürekli değişmekte.
- Operasyon alanında hedef bulunmadığı durum için İHA davranışının rota planına dahil edilmesi.
- Filo içerisindeki araçların ideal sayıda kullanımı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 22.08.2019
Kabul: 23.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.609418

Anahtar Kelimeler:

Hareketli müşterili araç rotalama problemi, tavlama benzetimi, pareto optimizasyonu, genetik algoritma, NSGA-II

ÖZET

Silahlı İnsansız Hava Araçları, birçok ülkenin ulusal güvenliğini sağlamak adına askeri operasyonlarda yoğun bir şekilde kullandıkları yapay zekâya dayalı savunma sistemleridir. Bu sistemler sayesinde operasyon alanındaki hareketli ve hareketsiz hedefler, zorlu coğrafik koşullar altında pilot kullanılmaksızın kumanda merkezi yardımıyla imha edilebilmektedir. İnsansız hava aracı filosu tarafından, seyir süresi, mühimmat kapasitesi, yakıt maliyeti ve zaman penceresi kısıtlamaları dikkate alınarak sistemdeki hareketli hedeflerin başarılı bir şekilde imha edilmesi gereksinimi, Hareketli Müşterili Araç Rotalama Problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada Heterojen Filolu-Zaman Pencere-Kapasite Kısıtlı Hareketli Müşterili Araç Rotalama Probleminin, minimum görev süresi ve görev maliyeti amaçları doğrultusunda çözülmesi amaçlanmıştır. Problemin çözümü için sezgisel algoritmalar (ÇARA, RASA) geliştirilmiş ve metasezgisel algoritmalar (Genetik Algoritma, NSGA-II ve Tavlama Benzetimi Algoritması) kullanılmıştır. Önerilen algoritmaların etkinliği vurucu sayısının 5-10, hedef sayısının 10-35 arasında değiştiği 30 farklı deney seti üzerinde test edilmiştir. Algoritmalar için uygun parametre setinin belirlenmesinde Taguchi yönteminden yararlanılmıştır. Analiz sonucunda Genetik Algoritmanın diğer algoritmalara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Experimental analysis of Meta-Heuristic algorithms for moving customer vehicle routing problem

H I G H L I G H T S

- The time unit is a continuous value and the target number changes continuously at any time "t"
- The behaviour of the UAVs when there is no target in the operation area has been included in the route plan
- Using ideal number of vehicles in fleet

Article Info

Research Article
Received: 22.08.2019
Accepted: 23.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.609418

Keywords:

Moving customer vehicle routing problem, simulated annealing, pareto optimization, genetic algorithm, NSGA-II

ABSTRACT

Unmanned Combat Aerial Vehicles are defense systems based on artificial intelligence which is intensively used by many countries to provide national security on military operations. By means of these systems, moving or non-moving threat factors in the operation field could be destroyed under harsh and challenging geographical conditions without requiring a pilot with the help of a control center. In fleet operations, the necessity of destroying moving targets successfully under constraints of the endurance, munition capacity, time window and fuel cost of unmanned combat aerial vehicles brings out the moving customer-vehicle routing problem. In this study, Heterogeneous Fleet-Moving Customer Vehicle Routing Problem with Time Windows under constraint of vehicle capacity (endurance) has been aimed to be solved considering the minimum operation time and cost. In order to solve the problem, heuristic algorithms (ÇARA, RASA) were developed and metaheuristic algorithms (Genetic Algorithm, NSGA-II and Simulated Annealing) were used. The effectiveness of the proposed algorithms was tested on 30 different experimental sets with the number of pursuers ranging from 5-10 and the number of targets ranging from 10-35. Taguchi method was used to determine the appropriate parameter set for the algorithms. As a result of the analysis, it has been found that Genetic Algorithm produces much better results than other algorithms.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: uuucar@firat.edu.tr, isleyens@gazi.edu.tr, hgokcen@gazi.edu.tr / Tel: +90 424 237 0000 / 5624 460

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz dünyasında yaşanan teknolojik gelişmeler ile birlikte yapay zekâ ve robotik sistemler birçok sektörde yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. İnsansız hava araçları ve droneler bu sistemlerin başında gelmekte, kullanım alanları ile birçok görevde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Arama kurtarma faaliyetleri, askeri operasyonlar, gözetleme faaliyetleri ve ulaşım aktiviteleri bu araçların kullanıldığı alanlardan bazılarıdır. İnsansız hava araçları (İHA) ve dronelerin minimum görev zamanı ya da görev maliyeti ile rotalanması problemi ise büyük bir önem arz etmektedir. Bu çalışmada, müşterilerin ya da düğümlerin hareket ettiği bir sistemde, filo halinde hareket eden insansız hava araçlarının zaman penceresi ve yakıt kapasite kısıtları altında etkin bir şekilde rotalanması gereksinimden ortaya çıkan Hareketli Müşterili Araç Rotalama Problemi (HM-ARP), minimum görev süresi ve görev maliyetleri amaçları doğrultusunda çözülmeye çalışılmıştır. Literatürde problemle ilgili çalışma sayısı oldukça az olmakta, problemin temelleri Dinamik Araç Rotalama Problemi (D-ARP) ve Hareketli Hedefli Gezgin Satıcı Problemine (HHGSP) dayanmaktadır.

Psaraftis [1] tarafından 1988 yılında tanımlanan Dinamik ARP, müşteri talepleri [2-6], seyahat zamanı [7-10] ya da sistemdeki müşteri sayısının artması-azalması [11-13] gibi problem parametrelerinin zaman içerisinde değiştiği durumlar için önerilen bir problem türüdür [14]. İnsansız hava araçları ve drone gibi filo halinde görev gerçekleştiren robotik sistemlerin rotalanması da sıklıkla Dinamik ARP'nin konusu olmakta ve ele alınan problemlerin çözümünde tam sayılı programlama, sezgisel ve metasezgisel algoritmalarından yararlanılmaktadır [15-22].

HM-ARP önerilirken dikkate alınan bir diğer problem türü HHGSP problemidir. 1988 yılında Helvig vd., literatüre önerdiği HHGSP, deniz gözetleme operasyonları, askeri operasyonlar ve hareketli nesnelerin izlenmesi faaliyetleri başta olmak üzere birçok alanda yoğun bir şekilde uygulanmaktadır [23]. Problemden, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ operasyon alanındaki hareketli hedeflerin ya da düğümlerin kümesini oluşturmakta, s_i hedeflerinin her biri, önceden tanımlanmış ve zaman içerisinde değişmeyen v_i hıza sahip olmakta ve p_i başlangıç koordinatlarından harekete başlamaktadır. Buna ek olarak, sistemdeki vurucuları yakalayacak bir adet vurucu ya da gezgin satıcı bulunmakta ve bu vurucunun hızının ($v > |v_i|$) tüm hedeflerin hızından daha fazla olduğu varsayılmaktadır. Problemdenki temel amaç, başlangıç noktasından harekete başlayan vurucunun ya da gezgin satıcının, sistem içerisindeki tüm hedefleri yakalayıp tekrardan başlangıç noktasına döneceği en hızlı tur rotasını belirlemektir [23]. Problem ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Helvig vd., HHGSP'yi vurucunun tek bir düzlemde hareket etmesi, vurucunun her bir hedefi imha ettikten sonra orijine dönmesi ve operasyon alanında birden fazla vurucunun bulunması durumları açısından incelemiş ve bu versiyonlar için çözüm yöntemleri

geliştirmişlerdir [23]. Fügenschuh vd., birden fazla vurucunun olduğu HHGSP'nin çözümü için tamsayılı programlamaya dayalı bir matematiksel model önermişler ve ilgili modelde zaman biriminin kesikli olduğunu ifade etmişlerdir [24]. Stieber vd., birden fazla hedefin ve silahın bulunduğu silah-hedef atama problemini, zaman biriminin kesikli olarak kabul edildiği bir matematiksel model yardımıyla çözmüş ve enerji verimliliğini amaç fonksiyonu içerisinde dikkate almışlardır [25]. Stieber ve Fügenschuh, Zaman Pencere-HHGSP'yi minimum seyahat turu amacı doğrultusunda çözmek için zaman biriminin kesikli ve sürekli olarak dikkate alındığı iki farklı çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir [26]. Jiang vd., HHGSP'nin çözümünde genetik algoritmadan yararlanmış ve algoritmanın daha etkin olabilmesi için çeşitli çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile çözümü iyileştirecek bakım onarım mekanizmalarını kullanmışlardır [27]. Jindal vd., tek vuruculu HHGSP'yi, vurucunun iki adet hedefi etkisiz hale getirdikten sonra başlangıç noktasına dönmesi gerektiği varsayımı altında incelemiş ve problemin çözümü için hedeflere öncelik puanı verilmesine dayalı sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir [28]. Englot vd., çok sayıda hedefin insansız hava aracı tarafından etkisiz hale getirilmesi problemi için iki farklı sezgisel yöntem önermişlerdir. Test çalışması sonucunda, açgözlü olmayan sezgisellerin hareketi hızlı olan sistemlerde, ajan tabanlı Lin-Kernighan Sezgiselinin (LKH) hareketi yavaş olan sistemlerde daha başarılı sonuçlar ürettiğini tespit etmişlerdir [29]. Jindal vd., HHGSP'yi vurucunun yeniden ikmal yapması gerektiği durum açısından incelemiş ve hedeflerin orijine yönelme durumlarına göre iki farklı sezgisel yöntem geliştirmişlerdir [30]. Khosravi vd., operasyon alanında farklı engellerin bulunduğu ödül toplama problemini, hedef yörüngelerinin bilinmediği varsayımı altında incelemiş ve problemi çözmek için sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir [31]. Zhou vd., düğümlere ait koordinatların zaman içerisinde Gauss Dağılımına göre değiştiği Dinamik GSP'yi, Dinamik Inver-Over Evrimsel Algoritma ile çözmüş ve uygulama çalışması sonuçlarına göre algoritmanın optimal sonuçlara ulaştığını tespit etmişlerdir [32]. Choubey, sabit bir hız ve açı ile sistem içerisinde hareket eden hedeflerin, tek bir vurucu tarafından etkisiz hale getirilmesi problemi için genetik algoritma dayalı bir çözüm metodolojisi geliştirmişlerdir [33]. Lee vd., Bağışıklık Sistemine Dayalı Karınca Kolonisi Optimizasyonu metodolojisini kullanarak beklenen tahribatın minimize edilmesi amacı doğrultusunda silah-hedef atama problemini çözmeye çalışmışlardır [34]. Pushkarini ve Bullo, birim çember çapında bir görev alanı içerisinde Poisson Dağılımına göre rastgele konumlandırılmış hareketli hedeflerin ilgili alan içerisinde imhası için üç farklı sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [35]. Knapp ve Rothe, hareketli hedeflerin lazer silahı ile imha edilmeye çalışıldığı silah-hedef atama problemi için simülasyon algoritmasına dayalı bir çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir [36]. Bu çalışmalara ek olarak, HHGSP [37-57], Riskli GSP [58], Dinamik ARP [59-70], Dinamik Atama ve Rotalama Problemi [71], Takım Oryantiring Problemi [72, 73], Kaçma-Kovalama Problemi [74] ile Stokastik ve

Dinamik ARP[75] içerisinde konu ile ilgili çalışmalar bulunabilmektedir.

Bu çalışmada, sistemdeki hedeflerin hareket ettiği, zaman pencereli, kapasite kısıtlı, heterojen filolu ve çok amaçlı HM-ARP dikkate alınmıştır. Problemin en önemli uygulama alanlarından birini, silahlı insansız hava araçlarının filo halinde rotalanması problemi oluşturmaktadır. Bu problemde, ulusal güvenliği sağlamak için çok kısa çözüm süreleri içerisinde etkin rota planlarının oluşturulması gerekmektedir. “n” vuruculu, “r” hedefli bir sistemde ilgili kısıtlamalar altında $(n^r) * (r!)$ çözüm bulunmakta, “n” ve “r” sayısı arttıkça problemin çözümü zorlaşmaktadır. Buna ek olarak, rota planları oluşturulurken minimum göre süresi ve görev maliyetleri amaçları dikkate alınmakta, bu amaçların eş zamanlı minimizasyonu için akıllı çözüm stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada belirtilen problemin çözümü için üç metasezgisel (NSGA-II, Genetik Algoritma ve Tavlama Benzetimi) ve iki sezgisel algoritma (RASA, ÇARA) geliştirilmiş, algoritmaların etkinliği farklı problem setleri üzerinde test edilmiştir. Çalışma gerek ele alınan problem gerekse de önerilen çözüm stratejileri açısından literatürde ilk olma özelliği taşımaktadır. Literatürde zaman penceresi ve araç kapasite kısıtları altında, zamanın sürekli olarak dikkate alındığı, hedef sayısının ve konumlarının zaman içerisinde sürekli değiştiği, çok amaçlı-heterojen filolu HM-ARP ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Buna ek olarak HM-ARP, Dinamik ARP ve HHGSP literatüründe ilk kez insansız hava araçlarının sistemde hedef bulunmadığı durumdaki davranışı, problemin çözümü esnasında dikkate alınmakta ve rota planına eklenmektedir. Çalışma, önerilen çözüm metodolojileri açısından da literatürde ilk olma özelliği taşımaktadır. Literatürde HM-ARP ve HHGSP'nin çok amaçlı optimizasyonu için önerilen herhangi bir çözüm yaklaşımı bulunmamaktadır. Buna ek olarak önerilen yaklaşımların jenerik yapıya sahip olması, birçok kısıdı içerisinde barındırması ve probleme kısa sürelerde etkin çözümler üretmesi nedeniyle dinamik gerçek hayat optimizasyon problemlerinde (deniz gözetleme operasyonları, İHA'lar ile yapılan arama-kurtarma-gözetleme problemleri, güvenlik kameralarının rotalanması, robotik sistemlerin çizelgelenmesi, denizyolu ve karayolu trafiğinin yönlendirilmesi, vb..) etkili bir şekilde kullanılabilmesi öngörülmektedir. Ayrıca, Çok Vuruculu, Çok Amaçlı, Zaman Pencereli ve Kapasite Kısıtlı HHGSP de tek çözüme dayalı ve popülasyona dayalı çözüm yöntemlerinin karşılaştırıldığı ilk çalışma olması nedeniyle de literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde probleme ilişkin bilgiler verilmekte, üçüncü bölümde problemin çözümünde kullanılan metodolojiler takdim edilmektedir. Dördüncü bölümde, problemlerdeki veri setlerine ilişkin bilgiler verilmekte ve Taguchi yöntemi kullanılarak algoritmalara ilişkin parametre değerleri belirlenmektedir. Beşinci bölümde uygulama çalışması gerçekleştirilmekte ve elde edilen sonuçlar analiz edilmektedir. Son olarak altıncı bölümde ise çalışmaya ilişkin genel değerlendirmeler yapılmakta ve gelecek çalışmalara ilişkin öngörülerde bulunmaktadır.

2. HAREKETLİ MÜŞTERİLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ (MOVING CUSTOMER VEHICLE ROUTING PROBLEM)

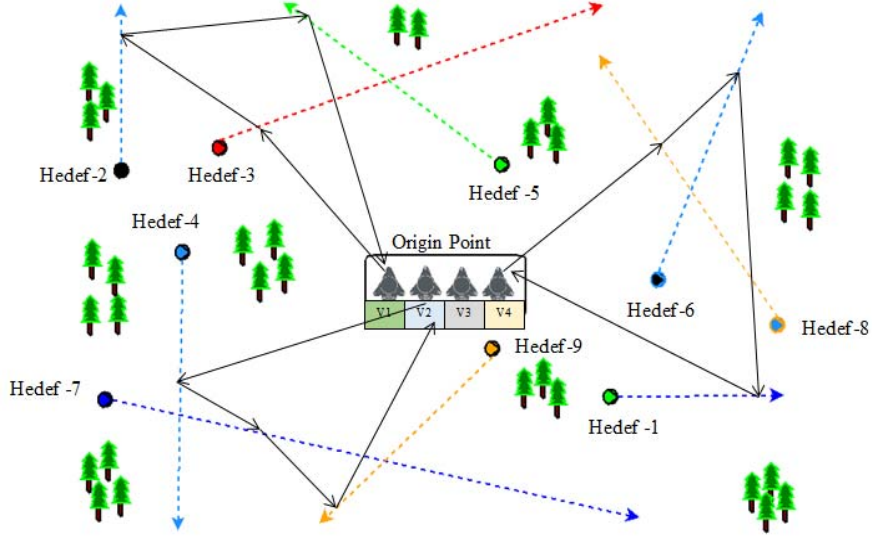
HM-ARP temel olarak şu şekilde tanımlanmaktadır. $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ hedeflerin(müşterilerin) kümesi olmak üzere, her bir s_i hedefi, sabit bir r_i hızına, $[b_i, n_i]$ zaman penceresine, c_i hedefi etkisiz hale getirmek için gerekli mühimmat sayısına ve p_i başlangıç pozisyonuna sahip olmaktadır. Vurucular kümesi $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ setinden oluşmak üzere, her bir vurucu sabit bir k_i hızına, y_i başlangıç pozisyonuna, f_i uçuş/yakıt/mühimmat kapasitesine, a_i başlangıç maliyetine ve h_i uçuş maliyetine sahip olmaktadır. Ayrıca tüm vurucuların, hedeflerden fazla hızı ($k_i > |r_i|$) sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu koşullar altında vurucuların ilgili kapasite kısıdını aşmadan, orijinden başlayıp, tüm hedefleri imha edip tekrar orijine döneceği, minimum görev sürelili ve görev maliyetli rotanın bulunması problemi HM-ARP olarak ifade edilmektedir. Problemin görsel gösterimi Şekil 1'de belirtilmektedir.

Şekil 1'deki problemde, operasyon alanında dört adet vurucu ve dokuz adet hedef bulunmaktadır. Vurucular farklı hızlara, farklı havada kalma sürelerine (uçuş kapasitesine) ve farklı görev maliyetlerine (başlangıç maliyeti + uçuş süresi*uçuş maliyeti) sahip olmaktadır.

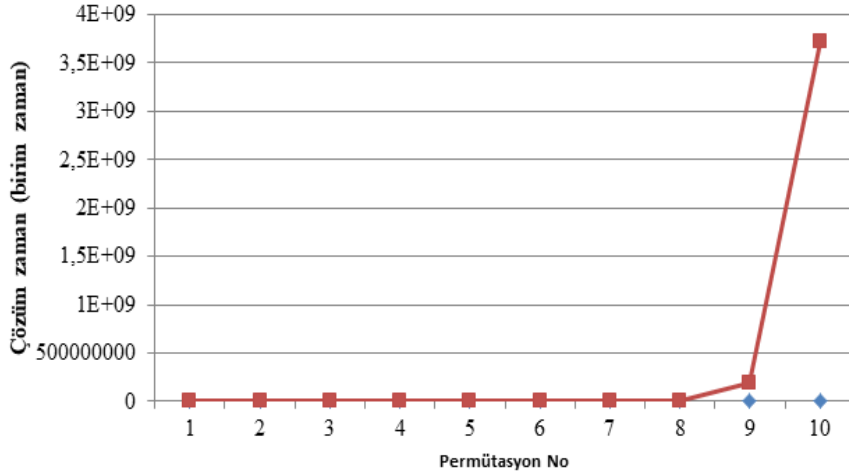
Temel amaç, kapasite ve zaman penceresi kısıtları altında toplam görev süresi ve görev maliyetini minimize edecek şekilde problemi çözmektir. Belirtilen amaçların sağlanması ile operasyonda daha az sayıda aracın kullanılacağı öngörülmektedir. Fazla sayıda İHA kullanılması bakım maliyetlerini artırmakta, bölgedeki düşman hedeflerini uyandırmakta ve İHA kullanım ömrünü azaltmaktadır. Bu nedenden dolayı operasyonlarda az sayıda İHA kullanılması istenmektedir [16]. Şekil 1'deki tur rotasına göre dört vurucudan üçü kullanılmakta, Vurucu 1(V1), “0-Hedef 3-Hedef 2-Hedef 5-0” sırasıyla, Vurucu 2(V2) “0-Hedef 4-Hedef 7-Hedef 9-0” sırasıyla ve Vurucu 4(V4), “0-Hedef 8-Hedef 6-Hedef 1-0” sırasıyla hedefleri imha etmektedir.

HM-ARP, operasyon alanında çok sayıda vurucu bulunması, bunlara ilişkin yakıt/mühimmat kapasitelerinin tanımlanması, herhangi bir hedef için birden fazla mühimmata ihtiyaç duyulması ve minimum sayıda araç ile ilgili görevi gerçekleştirilmesi nedeniyle HHGSP'den ayrılmaktadır. Buna ek olarak sistem içerisinde hedeflerin//müşterilerin belirli bir hız ve açı ile hareket etmesi nedeniyle de Dinamik-ARP den ayrılmaktadır.

Hem Gezgin Satıcı Probleminin hem de Araç Rotalama Probleminin NP-Hard sınıfında yer alması nedeniyle, HM-ARP'nin de NP-Hard bir problem olduğu öngörülmektedir. “n” adet vurucu ve “r” adet hedefin bulunduğu bir problemde çözüm sayısı $(n^r) * (r!)$ dir. Vurucu ve hedef sayısı arttığı zaman çözüm sayısı ve süreside artmaktadır. Örneğin 2 vuruculu bir sistem için hedef sayısı arttıkça problemdeki çözüm sayısı ve birim çözüm süresindeki artış Tablo 1 ve Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Hareketli müşterili araç rotalama problemi (Moving customer vehicle routing problem)



Şekil 2. HM-ARP için çözüm süresindeki artış (The increase in solution time for the MC-VRP)

Tablo 1. HM-ARP için çözüm sayısı
(Number of solutions for MC-VRP)

Permütasyon Sıra No	Vurucu Sayısı	Hedef Sayısı	Çözüm sayısı
1	2	1	2
2	2	2	8
3	2	3	48
4	2	4	384
5	2	5	3840
6	2	6	46.080
7	2	7	645.120
8	2	8	10.321.920
9	2	9	185.794.560
10	2	10	3.715.891.200

Problemdede hedefler herhangi bir “t” zamanında anlık olarak belirebilmekte, vurucu bir hedefi imha ettikten sonra bir sonraki hedef sisteme girmemişse, vurucunun havada belirli bir t süre beklemesi gerekmektedir. İnsansız Hava Araçları havada sabit kalamayan ve sürekli hareket etmesi gereken hava araçlarıdır. Bu nedenden dolayı sistemde hedef bulunmadığı durumda İHA’nın davranışının rota planına dâhil edilmesi gerekmektedir. Mevcut çalışmalarda bu durum göz ardı edilmekte ve İHA başlangıç noktasına giderek turu sonlandırmaktadır. Bu durum fazla İHA kullanımına neden olmakta ve maliyetleri artırmaktadır.

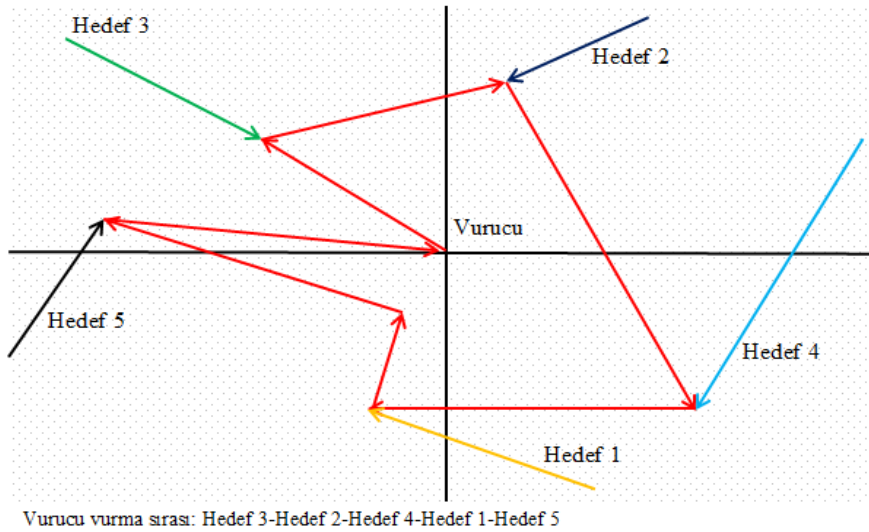
Makalede belirtilen problemin üstesinden gelmek için sistemde hedef bulunmadığı zaman vurucu orijine doğru yönlendirilmekte ve hedef sistemde belirdiği an vurucu rotasını değiştirip ilgili hedefi imha ettikten sonra rotasını

yeniden planlamaktadır. Bu işlem vurucu kapasitesi yetersiz olana ya da sistemde hedef kalmayana kadar devam etmektedir. İlgili yöntemin adımları Şekil 3'de gösterilmektedir. Gerçek hayat problemlerinde uzman kişiler, hedeflere ilişkin bilgilerin belirlenmesinde, İnsansız Hava Araçlarından, Mobese ve Güvenlik Kameralarından, telefon vb. iletişim araçları ile istihbarat ya da güvenlik elemanlarından yararlanıldığını ifade etmişlerdir [55].

Literatürde belirtilen probleme en yakın çalışma Groba vd., yaptıkları çalışmadır [76]. Bu çalışmada, Hint okyanusundaki balıkçı gemileri tarafından balık toplama cihazlarının minimum seyahat amacı doğrultusunda toplanması problemi ele alınmıştır. Problemden balıkçı gemileri de balık toplama cihazları da hareket etmektedir. Fakat bu çalışma bazı nedenlerden dolayı Groba vd., yaptıkları çalışmadan ayrılmaktadır. Groba vd., çalışmasında zamanı kesikli olarak ele alınmışken, bu çalışmada zaman sürekli olarak dikkate alınmıştır. Groba vd., çalışmasında hareket eden hedefler (balık toplama cihazları ya da düğümler) için herhangi bir zaman penceresi kısıdı söz konusu değilken, bu çalışmada her bir hedef belirli bir zaman penceresine sahip olmaktadır. Groba vd., çalışmasında sistemdeki hedef ya da düğüm sayısı zaman içerisinde değişmezken, bu çalışmada herhangi bir t anında sistemdeki düğüm sayısı değişebilmektedir. Groba vd., çalışmasında gemilere ya da gezici araçlara ait herhangi bir kapasite kısıdı dikkate alınmamışken, bu çalışmada her bir SİHA için kapasite kısıdı tanımlanmış ve bu kısıtlama altında rotalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Groba vd., çalışmasında gezici araçların tamamı kullanılmışken, bu çalışmada hız ve maliyet özellikleri dikkate alınarak filodaki araçlardan uygun olanları seçilmiş, fazla sayıda araç kullanılmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Groba vd., çalışmasında maliyet ile ilgili herhangi bir amaç dikkate alınmamışken, bu çalışmada hem görev süresi hem de görev maliyeti amaçları dikkate alınmış ve eş zamanlı minimize edilmeye

çalışılmıştır. HM-ARP için çok sayıda amaç ve kısıtlama bulunabilmekte, bu çalışmada incelenen problem için tanımlanan varsayımlar ve kısıtlamalar aşağıda belirtilmektedir.

- Herhangi bir vurucu, tüm hedeflerden daha fazla hızla hareket etmelidir.
- Herhangi bir vurucu, ilgili rotasındaki hedefleri imha ettikten sonra başlangıç noktasına dönmeli ve tüm hedefler imha edilmelidir.
- Vurucular ve hedefler, (x,y) koordinat düzleminin dört ayrı bölgesi üzerinde farklı hızlarda ve doğrultularda hareket edebilirler.
- Vurucular ve hedefler sistem içerisinde sabit bir hızla hareket etmektedir.
- Vurucular farklı hızlara, açılara ve görev maliyetlerine sahip olabilirler.
- Hedeflerin açıları zaman içerisinde değişmemektedir.
- Hedefler tanımlanmış giriş ve çıkış zamanları içerisinde sistem üzerinde hareket edebilmektedir.
- Vurucuların uçuş zamanı kapasitesinin sınırlı olduğu, mühimmat kapasitesinin ise sınırsız olduğu varsayılmaktadır.
- Her bir hedefi imha etmek için 1 adet mühimmata ihtiyaç duyulmaktadır.
- Vurucuların $t=0$ anında, hedeflerin ise ilgili zaman aralığında sistemde hazır bulunduğu ve bunlara ait hız, konum ve açıların (vurucu açısı hariç) bilindiği varsayılmaktadır.
- Çalışma içerisinde hedef hızlarının 30 km/sa ile 400 km/sa arasında, vurucu hızının (401, 700) km/sa arasında, hedef ve vurucu açıların 0 ile 360 derece arasında son olarak da hedeflerin başlangıç konumlarının (± 400 km, ± 400 km) koordinatları arasında olabileceği varsayılmaktadır.
- Amaç, minimum görev zamanlı ve görev maliyetli turu bulmaktır.



Şekil 3. HM-ARP için sistemde hedef bulunmadığı durumda vurucunun sergilediği davranış
(The behaviour of the UAVs when there is no target in the operation area)

Bölüm 3 içerisinde, yukarıda belirtilen varsayımlar doğrultusunda HM-ARP çözmek için önerilen çözüm yaklaşımları ifade edilmekte, bölüm 4 de ise önerilen algoritma farklı veri setleri üzerinde test edilerek etkinliği belirlenmeye çalışılmaktadır.

3. ÇÖZÜM METODOLOJİSİ (SOLUTION METHODOLOGY)

HM-ARP'nin dinamik bir yapıya sahip olması, problem içerisindeki parametrelerin ve sistemdeki hedef sayısının anlık olarak sürekli değişmesi ve konum bilgilerinin her bir hedef imha edildikten sonra yeniden hesaplanması gereksinimi nedeniyle problemin matematiksel modelleme yaklaşımlarıyla çözülmesi oldukça zor olmaktadır. Yapılan literatür taramasında, zamanın kesikli olarak ele alındığı, hedef ve vurucu sayısının az olduğu problemler için geliştirmiş matematiksel modeller bulunmakta fakat bu modeller zamanın sürekli olduğu gerçek hayat problemlerinde uygulanamamaktadır. Ayrıca geliştirilen modellerde vurucu ve hedef sayısı arttıkça kabul edilebilir çözüm zamanları içerisinde çözümler elde edilememektedir. Bu nedenden dolayı literatürdeki çalışmalarda ilgili problem türlerini çözmek için probleme özgü sezgiseller ya da meta-sezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ilgili problem için minimum görev süresi ve görev maliyeti amaçları doğrultusunda optimal tur rotası, sezgisel ve metasezgisel algoritmalarla belirlenmeye çalışılmıştır. Makalede kullanılan algoritmalarla ilişkin bilgiler aşağıdaki bölümlerde ifade edilmiştir.

3.1. Çok Hedefli-Çok Vuruculu Rotalama Algoritması (Multi Target – Multi Pursuer Routing Algorithm)

Çok Hedefli-Çok Vuruculu Rotalama Algoritması (ÇARA), HM-ARP için geliştirilen ve literatürde ilk kez kullanılan bir çözüm kurucu sezgisel algoritmadır. Algoritmada hedefler

için sisteme giriş zamanlarına ve sistemden ayrılış zamanlarına göre bir öncelik sırası oluşturulmakta ve vurucular bu sıraya göre kendi uçuş kapasitelerini dikkate alarak sistemdeki hedeflerin tamamını imha etmeye çalışmaktadır. Algoritmaya ilişkin bilgiler, Tablo 2. içerisinde gösterilmektedir.

3.2. Rassal Hedef İmha Algoritması (Random Target Destruction Algorithm)

Rassal Hedef İmha Algoritmasında (RASA), her bir iterasyonda vurucu ve hedefler için rassal olarak bir görev sırası belirlenir. Hedefler ilgili rassal sıraya göre vurucular tarafından imha edilir. Sistemde bir vurucu, kapasitesi yetene kadar hedefleri imha etmeye devam eder. Kapasitesinin yetmediği durumda ise o vurucu için tur sonlanır ve sıradaki vurucu, bir sonraki hedefi imha etmek için harekete geçer. Sistemdeki tüm hedefler imha edilinceye kadar bu işlem devam eder. Algoritma N iterasyona ulaşınca sonlanır ve en iyi amaç değerleri çıktı olarak kullanıcıya sunulur.

3.3. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)

Holland tarafından geliştirilen Genetik Algoritma[77], çözüm popülasyonunun evrimsel sürecinin simüle edildiği, farklı alanlarda yaygın bir şekilde kullanılan meta-sezgisel bir çözüm metodolojisidir [78]. Bu metodolojide farklı sayıda çözümden oluşan bir başlangıç popülasyonundan hareketle iteratif adımlarla ilerleyerek ve çeşitli çözüm mekanizmaları kullanarak optimal çözüme ulaşılmaya çalışılmaktadır. Yöntem içerisinde çözümü etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Çözümün gösterimi, yeni yığın seçilmesi, çaprazlama ve mutasyon operatörleri bu parametrelerden bazılarıdır. Aşağıdaki bölümlerde bu çalışmada kullanılan çözüm algoritması ve belirtilen parametrelerin özellikleri tanımlanmaktadır.

Tablo 2. Çok Hedefli-Çok Vuruculu Akıllı rotalama algoritması
(Multi Target–Multi Pursuer routing algorithm)

$N = \text{vurucu sayısı}, P\{i\} = \{1, \dots, N\}$ vurucuların kümesi
 $M = \text{hedef sayısı}, Q\{r\} = r\{1, \dots, M\}$ hedeflerin kümesi, $G\{r\}$ hedef giriş zamanı, $C\{r\}$ hedef çıkış zamanı
 $K\{i\} = i. \text{vurucunun kapasitesi}, D\{i\} = i. \text{vurucunun orijine dönme zamanı}$
 $Y\{r\} = \text{hedef imha etme sırası ve } Y\{r\} = Q\{r\}, T\{r\} = r. \text{hedefin imha edilme zamanı}$

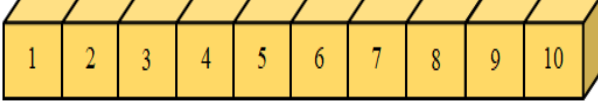
for $r \leftarrow 1$ to $M - 1$
 for $j \leftarrow r + 1$ to M
 if $G\{j\} < G\{r\}$ then $Y\{j\} \leftrightarrow Y\{r\}$
 else if $G\{j\} = G\{r\}$ and $C\{j\} < C\{r\}$ then $Y\{j\} \leftrightarrow Y\{r\}$

for $r \leftarrow 1$ to M and $i \leftarrow 1$
 if $Y\{r\}$ hedefi operasyon alanına girmişse
 if $T\{r\} < K\{i\}$ and $T\{r\} < C\{r\}$ and $D\{i\} < K\{i\}$ then $Y\{r\}$ hedefini $P\{i\}$ vurucusu tarafında imha et.
 Sistemdeki hedeflerin ve vurucunun bilgilerini güncelle, $r = r + 1$
 else $i = i + 1$ and $r = r - 1$
 else if $Y\{r\}$ hedefi operasyon alanına girmemişse $P\{i\}$ vurucusunu orijine yönlendir
 $\{r\}$ hedefi sisteme girdiği an, $P\{i\}$ vurucusunu hedefe yönlendir, konum ve zaman bilgilerini güncelle
 if $T\{r\} < K\{i\}$ and $T\{r\} < C\{r\}$ and $D\{i\} < K\{i\}$ then $Y\{r\}$ hedefini $P\{i\}$ vurucusu tarafında imha et.
 Sistemdeki hedeflerin ve vurucunun bilgilerini güncelle, $r = r + 1$
 else $i = i + 1$ and $r = r - 1$
 else $i = i + 1$ and $r = r - 1$

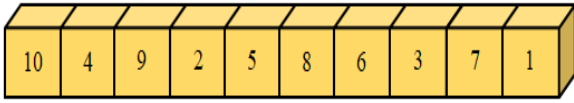
Vurucu ve hedeflere ilişkin tur bilgilerini raporta

3.3.1. Çözüm gösterimi (Solution representation)

Genetik Algoritma'da problem türüne göre çözüm gösterimi çeşitlilik gösterebilmektedir. Bu çalışmada kullanılması düşünülen çözüm gösterimi ve kromozom yapısı Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. HM-ARP için 10 hedefli bir kromozom
(A chromosome structure for MC-VRP with 10 targets)



Şekil 5. 10 hedefli bir kromozom için örnek tur sırası
(Sample tour order relating a chromosome with 10 targets)

Şekil 4'e göre ele aldığımız problemde her bir kromozom 10 adet genden oluşmaktadır. Buna göre her bir gen, vurulması gereken bir hedeftir ve bir vurucu tarafından vurulması gerekmektedir. Şekil 5'de belirtilen bilgiler doğrultusunda tek bir vurucuya ait görev sırası gösterilmektedir. Şekil 5'deki kromozoma göre hedefler 0-10-4-9-2-5-8-6-3-7-1-0 sırasında vurulmuştur. Bu tek vuruculu bir problem için böyledir. Vurucu sayısı iki olduğunda Şekil 5'deki kromozom şu şekilde yorumlanmaktadır. Birinci vurucu 0-10-4-9-2-5-0, ikinci vurucu ise 0-8-6-3-7-1-0 rotası ile hedefleri vurmaktadır. Vurucu sayısı arttıkça ilgili kromozom eşit parçaları bölünmeye çalışılmakta ve her bir vurucu için görev süresi ve maliyeti ayrı olarak hesaplanmaktadır. Toplam görev süresi ve görev maliyeti ise uygunluk fonksiyonunu oluşturulmaktadır. Amaç gen sayısının az olduğu tek satırlı bir gösterim üzerinden sistemi yorumlamaktadır. Üç vuruculu ve on hedefli bir sistem için kromozom yapısı Şekil 6'da sunulmaktadır. Şekil 6'daki kromozoma göre; vurucu 1 için görev rotası = 0-10-4-9-2-0, vurucu 2 için görev rotası = 0-5-8-6-0 ve vurucu 3 için görev rotası = 0-3-7-1-0'dır.

3.3.2. Başlangıç popülasyonunun üretilmesi (Generation of the initial population)

Bu çalışmada başlangıç popülasyonu rassal olarak belirlenmiş ve yeni yığın seçimi bu popülasyondan hareketle tespit edilmiştir.

3.3.3. Yeni yığın seçim mekanizması (New population selection mechanism)

Yığın seçim mekanizması olarak turnuva mekanizması kullanılmaktadır. Turnuva mekanizması genetik arama algoritması içerisindeki kromozom ailesini belirlemek için kullanılmaktadır [76]. Bu mekanizmaya göre, n kromozomlu bir popülasyonda her bir kromozom için rassal olarak

seçilmiş m kromozom turnuvaya sokulmakta ve en iyi birey, yeni yığının ilgili kromozomuna aktarılmaktadır.

3.3.4. Çaprazlama (Crossover)

Çaprazlama işlemi, farklı kromozom aileleri üretmek ve çözüm uzayında aramayı farklı noktalara yönlendirerek yerel optimuma takılmayı engellemek için kullanılmaktadır. Çaprazlama işlemi için literatürde çeşitli yöntemler bulunmakta, bu çalışmada ilgili işlem için PMX (Partially Mapping Crossover) operatörü kullanılmaktadır. Bu operatörde kromozom içerisindeki rassal olarak n adet gen seçilmekte ve bu genler diğer kromozomun genleri ile yer değiştirilerek yeni bireyler oluşturulmaktadır.

3.3.5. Mutasyon (Mutation)

Mutasyon operatörü, çözüm uzayında yoğunlaşma (intensification) yapmak amacıyla kromozomda var olan genlerin belirli bir kabul olasılığına göre bir ya da birkaçında değişiklik yapılmasını sağlayan operatördür. Genel olarak çalışmalarda ikili yer değiştirme, tersine çevirme ya da araya ekleme yöntemiyle bireylerde değişiklik yapılmaktadır. Bu çalışmada ikili yer değişme ile mutasyon işlemi gerçekleştirilmektedir.

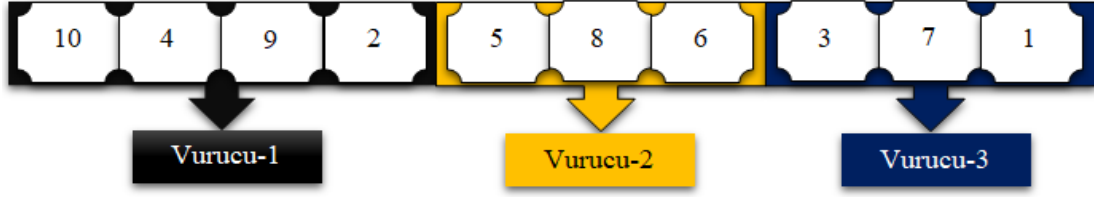
3.3.6. Uygunluk fonksiyonu (Fitness function)

Uygunluk fonksiyonu, genetik algoritma içerisindeki kromozomların ya da bireylerin problem için iyi veya uygun bir çözüm olup olmadığını belirleyen fonksiyondur [79]. Bu çalışmada uygunluk fonksiyonu içerisinde toplam görev süresi ve görev maliyeti eş zamanlı olarak minimize edilmeye çalışılmaktadır. Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda geliştirilen Genetik Algoritma, Tablo 3'de gösterilmektedir.

3.4. NSGA-II Algoritmasına Dayalı Çözüm Yaklaşımı (NSGA-II Algorithm Based Solution Approach)

Çok Amaçlı Optimizasyon Problemleri NP-Zor özelliğe sahip olmakta, bu nedenden dolayı herhangi bir problem için tüm bastırılmamış çözümler ya da baskın noktalar enumerasyon (bireleme) yöntemi kullanılarak elde edilebilmektedir [80].

Ancak tüm bastırılmamış çözümlerin bulunması zor olacağından ve oldukça zaman alacağından, belirli bir kalite ya da performans düzeyinde tüm bastırılmamış çözümler kümesine en yakın bir alt çözümler kümesinin oluşturulması Çok Amaçlı Optimizasyon Problemleri için büyük bir öneme sahiptir [81]. Bu çalışmada, diğer çözüm metodolojilerine kıyasla bağımsız amaçlardan oluşan problemlerde çok amaçlı optimizasyonu etkin bir şekilde yapabilmesi nedeniyle Çok Amaçlı Genetik Algoritma metodolojilerinden NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) yöntemi kullanılmıştır. Deb vd. 2002 yılında geliştirdiği NSGA-II Algoritması, NSGA algoritmasının sahip olduğu hesaplama karmaşıklığı, popülasyon sayısının büyük olduğu durumlarda sergilediği hesaplama gücü ve elitizm stratejisinin eksikliği problemlerini gidermek için önerilmiştir.



Şekil 6. 3 vuruculu - 10 hedefli bir kromozom sistemi (A chromosome structure with 3 pursuers -10 targets)

Tablo 3. HM-ARP için önerilen Genetik Algoritma (Genetic Algorithm proposed for the MC-VRP)

Adım 1. Başla, $t = 0$, $vurucusayısı = 1$, $degisimsay = 0$; $artismiktari = \text{belirli iterasyonsayısı}$;
 $S_{best} \leftarrow 0$, $f(S_{best}) = \text{Max. value}$

Adım 2. P_t başlangıç yığını oluştur ve $f(P_t)$ yi hesapla.
 If zaman penceresi ve kapasite kısıtları sağlandıysa then
 If $f(S_{best}) > f(P_t)$ then $f(S_{best}) \leftarrow f(P_t)$ ve $S_{best} \leftarrow P_t$

Adım3. While not {durdurma zamanı} do
 $t = t + 1$ yap ve P_{t-1} den belirtilen yığın seçim mekanizmasına göre P_t yi seç ve $f(P_t)$ yi hesapla
 If ilgili yığında herhangi bir kromozom için zaman penceresi ve kapasite kısıtları sağlandıysa then
 If $f(S_{best}) > f(P_t)$ then $f(S_{best}) \leftarrow f(P_t)$ ve $S_{best} \leftarrow P_t$
 else
 $degisimsay = degisimsay + 1$

Seçilen yeni yığına çağrızlama mekanizmasını uygula ve $f(P_t)$ yi hesapla.
 If ilgili yığında herhangi bir kromozom için zaman penceresi ve kapasite kısıtları sağlandıysa then
 If $f(S_{best}) > f(P_t)$ then $f(S_{best}) \leftarrow f(P_t)$ ve $S_{best} \leftarrow P_t$
 else
 $degisimsay = degisimsay + 1$

Seçilen yeni yığına mutasyon mekanizmasını uygula ve $f(P_t)$ yi hesapla.
 If ilgili yığında herhangi bir kromozom için zaman penceresi ve kapasite kısıtları sağlandıysa then
 If $f(S_{best}) > f(P_t)$ then $f(S_{best}) \leftarrow f(P_t)$ ve $S_{best} \leftarrow P_t$
 else
 $degisimsay = degisimsay + 1$

If $degisimsay < vurucusayısı * artismiktari$
 $vurucusayısı = vurucusayısı + 1$

If $degisimsay < vurucusayısı * artismiktari$
 $vurucuların \text{başlangıç sırasını degistir ve vurucu sayısı} = 0$ yap.

Adım 4. Minimum araç sayısı ve görev maliyetli tur rotası ve vuruş bilgilerini raporla.
Adım 5. Bitiş

NSGA-II algoritması genetik algoritma bazlı çalışmakta, algoritma Hızlı Baskın Olmayan Sıralama Yaklaşımı (Fast Non-dominated Sorting), Yığılma Uzaklığı Sıralaması (Crowding Distance) ve Ana Döngü olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlere ilişkin bilgiler aşağıda belirtilmektedir [82].

3.4.1. Hızlı baskın olmayan sıralama yaklaşımı (Fast non-dominated sorting approach)

Hızlı Baskın Olmayan Sıralama Yaklaşımı, popülasyonda baskın olan ya da çözümü domine eden bireylerin belirlenmesi için kullanılır. Bu bağlamda, popülasyon içerisindeki bireylerin amaç fonksiyonu değerleri her bir amaç için birbirleri ile karşılaştırılarak baskın olan bireylerin ya da çözümlerin belirlenmesi amaçlanmaktadır [82].

3.4.2. Yığılma uzaklığı sıralaması (Crowding distance assignment)

Yığılma uzaklığı sıralamasında, her bir cephedeki bastırılmamış çözümler kümesindeki bireyler, yığılma

uzaklığı değerlerine göre kendi aralarında sıralanır. İlgili çözümün sırası, çevresindeki çözümlerin ya da bireylerin yakınlığına göre belirlenir [78, 79, 80]. Bu yöntemde, bir popülasyondaki herhangi bir bireyin yığılma uzaklığını tespit etmek için her bir amaç bazında bu çözümün(i) çevresindeki iki bireyin ortalama uzaklığı hesaplanır. Bu uzaklığa göre ilgili cephedeki çözümler her bir amaç fonksiyonu için artan derecede sıralanır. Her bir amaç fonksiyonu için uçlardaki çözümlere sonsuz uzaklık (minimum ve maksimum) değerleri atanır. Uç çözümlerin arasında kalan çözümler için uzaklık değeri, iki komşu bireyin amaç fonksiyon değerlerine ait mutlak normalize edilmiş fark bulunarak hesaplanır. İlgili hesaplama adımları diğer amaç fonksiyonları için tekrarlanır. Her bir amaç için elde edilen bireysel uzaklık değerlerinin toplanması ile toplam yığılma uzaklığı değeri belirlenir [81, 83, 84].

Hesaplanan yığılma uzaklığı değerleri, yoğunluk karşılaştırma operatörünün kullanılmasıyla herhangi iki çözüm arasından ideal olanın belirlenmesi için kullanılır.

3.4.3. Ana döngü (Main loop)

Hızlı baskın olmayan sıralama yaklaşımı ve Yiğilma Uzaklığı Sıralaması adımlarını da içerisinde barındıran NSGA-II Algoritmasına dayalı çözüm yaklaşımına ait ana döngü Şekil 7’de gösterilmektedir. Bu algoritmada, Genetik Algoritmada olduğu gibi belirli bir iterasyon boyunca çözümde iyileşme olmazsa ya da uygun çözüm bulunamazsa vurucu sayısı bir artırılmaktadır. Eğer maksimum vurucu sayısına ulaşılmış ve belirli bir iterasyon boyunca iyileşme olmamışsa bu durumda vurucu sırası değiştirilmekte ve vurucu sayısı bir yapılarak problem tekrardan çözülmektedir. Bu sayede çözüm uzayında daha fazla alan taranmakta ve yerel optimuma takılma engellenerek daha kaliteli çözümlere ulaşılması amaçlanmaktadır.

3.5. Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing)

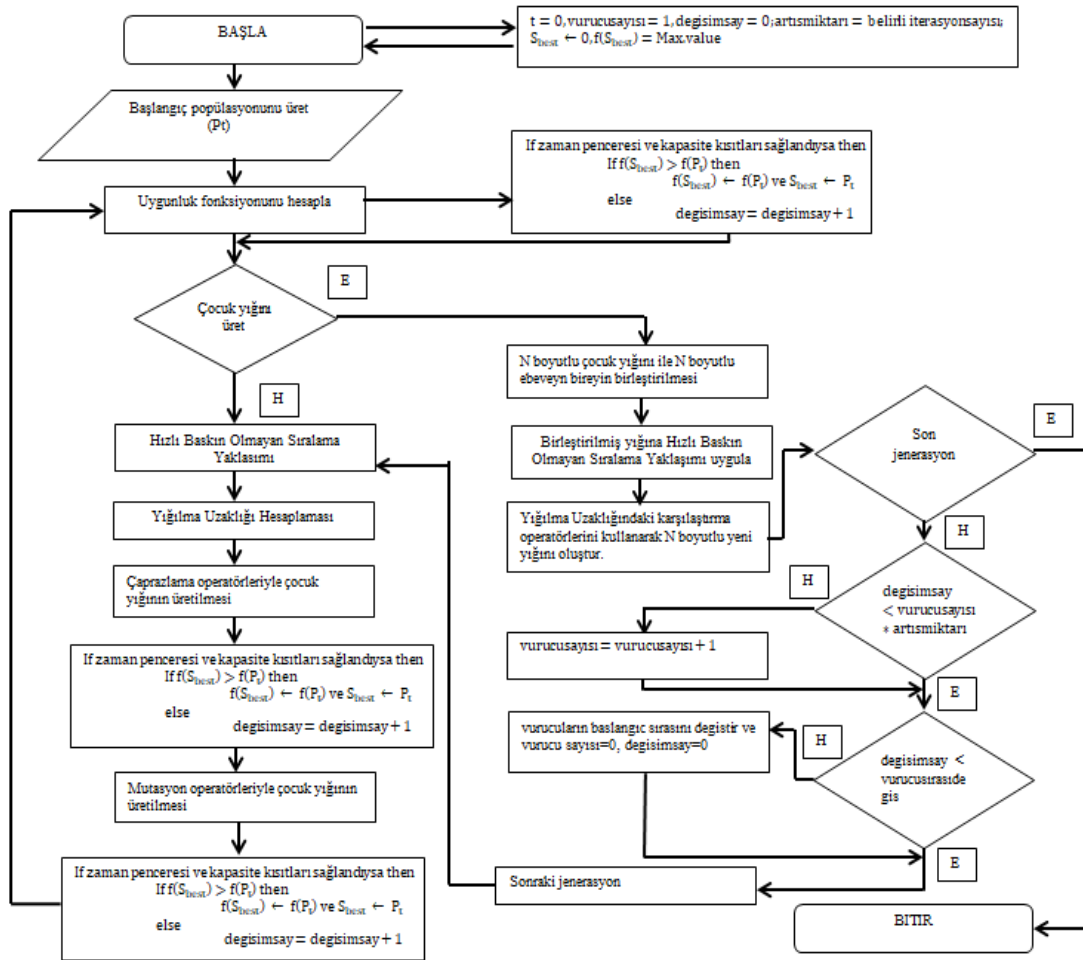
Tavlama Benzetimi, katıların fiziksel tavlama sürecinden hareketle, 1983 yılında, Kirckpatrick vd. tarafından geliştirilmiş, stokastik bir arama yöntemidir. Algoritma iteratif olarak ilerlemekte ve çözüm kalitesini artırmak için çeşitli hareket mekanizmaları kullanılmaktadır. Çözüm

kalitesini artıran hareketler sonraki adımda başlangıç çözümü olarak kabul edilirken, çözüm de iyileştirme yapmayan hareketler yerel optimale takılmamak için belirli bir yüzde ile kabul edilmektedir. Kötü çözümün kabul olasılığında ise Boltzmann olasılık faktörü ($P = e^{(-\Delta/T)}$) kullanılmaktadır. [85] Tavlama Benzetimi Algoritması, büyük boyutlu problemin çözümünde, bilgiyi kullanması ve aramayı iyi yapması nedeniyle, sıklıkla başvurulan bir çözüm yöntemi olmaktadır. [86, 87, 57]. Tavlama benzetimi algoritması uygulanırken verilmesi gereken bazı kararlar vardır. Bunlar çözümün kalitesine ve çözüm hızına etki eden kararlardır. Bu çalışmada, algoritma içerisindeki parametreler için ideal değerlerin belirlenmesinde Taguchi metodu kullanılmakta ve ilgili analiz çalışması bölüm 4.2 içerisinde ifade edilmektedir.

4. UYGULAMA ÇALIŞMASI (APPLICATION STUDY)

4.1. Problem Tasarımı (Problem Design)

Bu makalede ele alınan problem ile ilgili literatürde herhangi bir çalışma bulunmadığından dolayı önerilen algoritmaların etkinliğini test etmek için vurucu ve hedef sayısının



Şekil 7. NSGA-II Algoritmasına dayalı çözüm yaklaşımı (NSGA-II algorithm based solution approach)

değişiklik gösterdiği 30 farklı problem geliştirilmiştir. Problemler vurucu ve hedef sayısına göre gruplandırılmıştır. Bu gruplar: Tip-1(5 vurucu, 10 hedefli), Tip-2(6 vurucu, 15 hedefli), Tip-3(7 vurucu, 20 hedefli), Tip-4(8 vurucu, 25 hedefli), Tip-5(9 vurucu, 30 hedefli), Tip-6(10 vurucu, 35 hedefli). Bu gruplandırma sayesinde vurucu ve hedef sayısı arttıkça algoritmaların verdiği tepkinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.2. Parametre Konfigürasyonu (Parameter Configuration)

Parametre konfigürasyonu algoritmanın etkinliği açısından büyük bir öneme sahiptir. Tavlama Benzetimi, NSGA-II ve Genetik Algoritmada çözümün hızına ve kalitesine etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Klasik deneysel tasarım metotları çok karmaşıktır ve uygulamada çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Buna ek olarak, parametre sayısı arttıkça uygun parametre setini elde etmek için çok sayıda deney yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, uygun parametre setini belirlemek için Taguchi metodu kullanılmıştır. Literatürde parametre optimizasyonu için Taguchi metodunun kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Bu metotta, küçük sayıda denemelerle parametre uzayının tamamının taranması için özel tasarlanmış ortogonal diziler kullanılmaktadır. Bu diziler sayesinde, daha az deneme yaparak daha uygun parametre setleri elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada önerilen NSGA-II algoritması ve Genetik Algoritmada yedi parametre vardır: “popülasyondaki birey sayısı (P.B.S)”, “çaprazlama oranı (Ç.O)”, “mutasyon oranı M.O.”, “çaprazlamada yer değişecek eleman sayısı (Ç.Y.S)”, “turnuvada karşılaştırılacak eleman sayısı (T.K.S)”, “durdurma kriterinde kullanılan “toplam iterasyon sayısı(T.İ.S)”, vurucu sayısını kaç iterasyon sonra

artırılacağını belirleyen “Vurucu Sayısı Artış Miktarı (V.S.M)” dır. Bu parametreler için uygun değerlerin belirlenmesi için parametre ayarlaması yapılması gerekmektedir. Bu değerlerden “T.K.S”, popülasyon boyutuna bağlı olmakta ve bu değer popülasyondaki birey sayısının %60 olarak belirlenmektedir. Buna ek olarak, geliştirilen tavlama benzetimi algoritmasında beş parametre bulunmaktadır: durdurma kriteri (D.K.), soğutma oranı (α), her bir sıcaklıktaki iterasyon sayısı (N), başlangıç sıcaklığı (T0) ve son sıcaklık (Tf). Bu parametreler arasından N parametresi yani her bir sıcaklıkta aranacak komşu sayısı deterministik olarak belirlenmektedir. D.K. ise algoritmaların aynı çözüm zamanları cinsinden değerlendirilmesi için Genetik Algoritmaya ilişkin elde edilen çözüm zamanlarından hareketle belirlenmiştir. Komşuluk değişim mekanizması olarak ise swap ve insert yöntemleri kullanılmakta, her bir iterasyonda aranacak komşu sayı, swap ve insert mekanizması ile elde edilecek olası tüm çözümlerin sayısı kadar olmaktadır. Diğer dört parametre için parametre ayarlaması yapılması gerekmektedir. Tavlama Benzetimi, GA ve NSGA-II için konfigürasyonlarda kullanılan parametreler ve bunların seviyeleri Tablo 4’de gösterilmektedir.

Taguchi metodunda denemelerin sayısı, parametre sayısı ve seviyesine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışmada, Taguchi metodunun kullanılmasında Minitab 17.0 programından yararlanılmış, Minitab 17.0 programına göre, 6 parametre ve her bir parametrenin 3 seviyeye sahip olduğu deney seti için 27 deney yapılması ve L27 ortogonal diziliminin kullanılması gerektiği önerilmiştir. Bu nedenden dolayı parametre optimizasyonu için her bir problem tipindeki senaryolarda L27 dizisine göre 27 adet deneme yapılarak ideal parametre seti belirlenmiştir. Tavlama

Tablo 4. Konfigürasyonda kullanılan parametreler ve seviyeleri (Parameters and levels used in the configuration)

Problem Tipi	Level	Genetik Algoritma ve NSGA-II						Tavlama Benzetimi Algoritması				
		A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E
		P.B.S	Ç.O	M.O.	Ç.Y.S	T.İ.S	V.S.M	T0	Tf	S.C.	α	V.S.M.
Tip 1	1	10	0,80	0,01	3	4000	400	100	0,5	25	0,85	400
	2	20	0,90	0,05	6	6000	600	200	0,75	25	0,9	600
	3	30	0,99	0,1	9	8000	800	300	1	25	0,95	800
Tip 2	1	10	0,80	0,01	6	4000	400	100	0,5	1,5	0,85	400
	2	20	0,90	0,05	9	6000	600	200	0,75	1,5	0,9	600
	3	30	0,99	0,1	12	8000	800	300	1	1,5	0,95	800
Tip 3	1	40	0,80	0,01	9	6000	600	200	0,5	2,5	0,85	600
	2	50	0,90	0,05	12	8000	800	300	0,75	2,5	0,9	800
	3	60	0,99	0,1	15	10000	1000	400	1	2,5	0,95	1000
Tip 4	1	40	0,80	0,01	12	6000	600	200	0,5	4	0,85	600
	2	50	0,90	0,05	15	8000	800	300	0,75	4	0,9	800
	3	60	0,99	0,1	18	10000	1000	400	1	4	0,95	1000
Tip 5	1	70	0,80	0,01	15	8000	800	300	0,5	12	0,85	800
	2	80	0,90	0,05	18	10000	1000	400	0,75	12	0,9	1000
	3	90	0,99	0,1	21	12000	1200	500	1	12	0,95	1200
Tip 6	1	70	0,80	0,01	18	8000	800	300	0,5	19	0,85	800
	2	80	0,90	0,05	21	10000	1000	400	0,75	19	0,90	1000
	3	90	0,99	0,1	24	12000	1200	500	1	19	0,95	1200

Benzetimi Algoritmasında ise 4 adet parametre bulunduğundan dolayı L9 ortogonal dizilimi kullanılmış ve her bir problem için 9 farklı deney yapılarak uygun parametre seti tespit edilmiştir. Bu makaledeki tüm deney çalışmaları 4 GB RAM'li ve Intel(R) Core(TM) i5-6200@ 2.3 GHz işlemcili bilgisayarlarda C# programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Analiz çalışması sonucunda her bir problem için elde edilen değerler normalize edilmiş ve ideal parametre seti, ilgili problem boyutu içerisinde her bir parametre seti için ortalama değerlerin alınmasıyla elde edilmiştir. Taguchi metodunda, deneysel verilerin analizi için en önemli kriter signal/noise(S/N) oranıdır. Hem maksimizasyon hem de minimizasyon problemleri için bu oranı maksimize eden parametre değerleri ideal parametre setini oluşturmaktadır. Bu değerler dikkate alınarak TB, GA ve NSGA-II için ideal parametre değerleri Tablo 5 ve 6'de gösterilmektedir.

Tablo 5. Tavlama Benzetimi için parametre değerleri (Parameter values for Simulated Annealing)

Problem Tipi	T0	Tf	α	V.SM.
Tip 1	300	0,75	0,9	600
Tip 2	200	1	0,9	600
Tip 3	400	1	0,9	800
Tip 4	200	0,75	0,9	800
Tip 5	500	0,5	0,95	800
Tip 6	400	0,75	0,95	800

Tablo 6. NSGA-II ve GA için parametre değerleri (Parameter values for NSGA-II and GA)

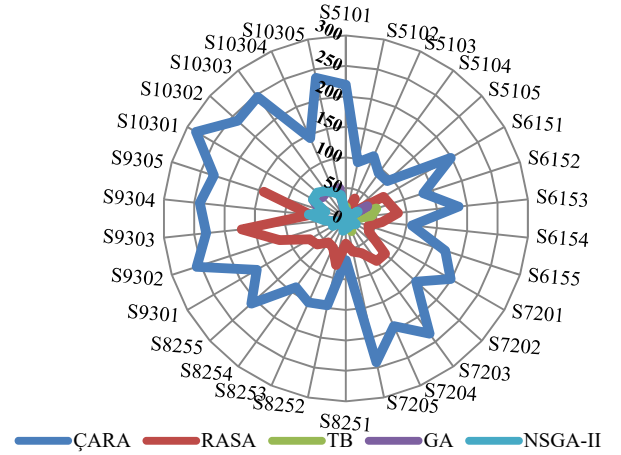
Problem Tipi	A	B	C	D	E	F
Tip 1	20	0,9	0,1	9	6000	400
Tip 2	30	0,9	0,05	6	8000	800
Tip 3	40	0,8	0,05	9	10000	600
Tip 4	50	0,9	0,05	15	8000	1000
Tip 5	90	0,9	0,1	15	10000	800
Tip 6	90	0,9	0,1	18	12000	800

4.3. Deneysel Analiz Çalışması (Experimental Analysis Study)

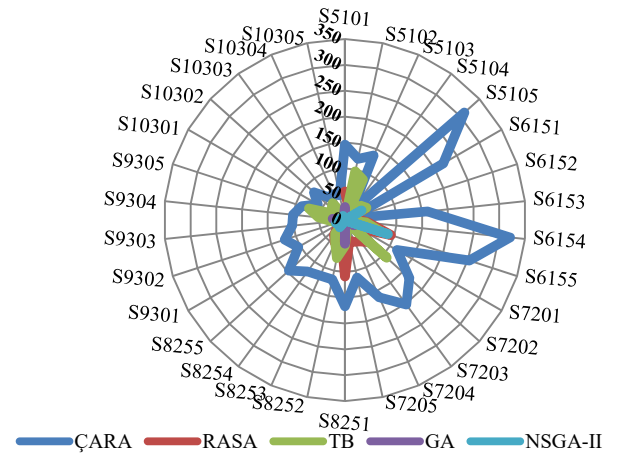
Makalede önerilen algoritmalar her bir senaryo için 10 kez çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 8-10'da verilmiştir. Şekil 8 ve 9'daki sonuçlardan Amaç-1 için en iyi algoritmanın Tavlama Benzetimi, Amaç-2 için ise en iyi Algoritmaların NSGA-II ve GA olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, Şekil 10'daki çözüm süreleri incelendiği zaman, NSGA-II Algoritmasının çözüm zamanının diğer algoritmalara kıyasla daha yüksek olduğu, RASA algoritmasının problemi oldukça kısa sürelerde çözdüğü, diğer algoritmaların ise benzer performanslar sergilediği tespit edilmiştir.

Bu sonuçların istatistiksel açıdan analiz edilmesinde ve algoritmaların performanslarının değerlendirilmesinde Friedman Anova Testi kullanılmıştır. Verilerin normal dağılmaması, grup sayısının üç ya da daha fazla olması ve tüm grup/koşullarda aynı deneklerin kullanılması nedeniyle

bu testin kullanılmasına karar verilmiştir. SPSS programında yapılan Friedman Anova Testi sonucunda algoritmaların performansları arasında anlamlı bir farklılık olduğu belirlenmiştir. Analiz sonuçlarından TB, GA ve NSGA-II algoritmaların ortalamaları birbirine yakın olduğu, TB algoritmasının diğer algoritmalarından daha düşük ortalamalara sahip olduğu ve sıralamaların ortalamasına bakıldığında GA'nın daha iyi olduğunu gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Algoritmaların, amaç-1(zaman) için bilinen en iyi değerden sapma miktarları (%) (Deviations of algorithms from best known value for goal-1 (time) (%))



Şekil 9. Algoritmaların, amaç-2 (maliyet) için bilinen en iyi değerden sapma miktarları (%) (Deviations of algorithms from best known value for goal-2 (cost) (%))

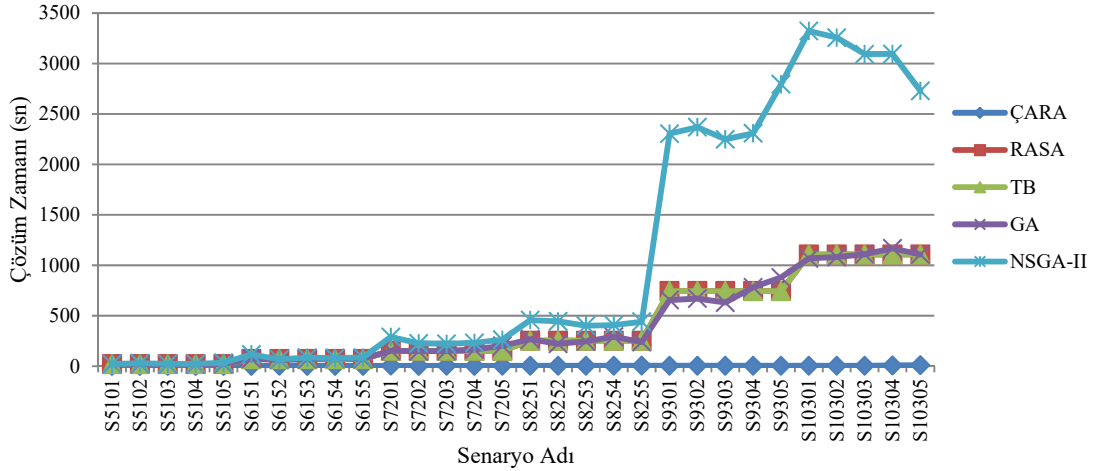
Anlamlı farklılığın neden kaynaklandığının belirlenmesi ve sezgisellerin ikili karşılaştırılması yapmak için ise post hoc testlerinden Wilcoxon testinden yararlanılmıştır. Wilcoxon Signed Ranked Test, aynı veri kaynağından elde edilen iki ölçüm sonuçları arasında anlamlı bir farklılığın olup olmadığının belirlenmesinde kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Eğer veri sayısı az, veri dağılım ölçüleri t-testinin koşullarını sağlamıyor ya da veriler sıralama ölçeğinde ise bu durumlarda ihtiyaç duyulmaktadır. SPSS programında Wilcoxon yöntemi ile yapılan ikili karşılaştırmalara göre elde edilen sonuçlar Tablo 7'de gösterilmektedir. Tablo

7'deki sonuçlara baktığımızda, TB algoritmasının diğer algoritmalarından daha iyi olduğu, TB algoritması ile diğer algoritmalar arasında anlamlı bir farklılık bulunduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak GA ile NSGA-II arasında anlamlı bir farklılığın bulunmadığı belirlenmiştir.

Amaç 2(Görev Maliyeti) açısından sonuçlar yukarıda belirtilen istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilmiş ve algoritmaların performansları belirlenmeye çalışılmıştır. Grupların ortalamaları arasında anlamlı bir farklılığın olup olmadığını belirlemede Friedman Anova Testinden yararlanılmış, test sonuçlarına göre, GA'nın diğer

algoritmalarından daha iyi olduğu, NSGA-II ile GA sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Anlamlı farklılığın neden kaynaklandığının belirlenmek ve algoritmaların ikili karşılaştırılması yapmak için post hoc testlerinden Wilcoxon testi kullanılmış ve sonuçlar Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8'deki sonuçlardan, GA'nın diğer algoritmalarından daha iyi olduğu belirlenmiş ve NSGA-II ile aralarında anlamlı bir farklılık bulunmadığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak hem GA hem de NSGA-II'nin, TB'den daha iyi olduğu tablodaki sonuçlardan anlaşılmıştır.



Şekil 10. Çözüm zamanı performansı (Solution-time performance (second))

Tablo 7. Amaç-1 için Wilcoxon Signed Ranked Test analiz sonuçları (Wilcoxon Signed Rank Test analysis results for goal-1)

Sezgisel-1	Sezgisel-2	Sezgisel1>Sezgisel2	Sezgisel2>Sezgisel1	Sezgisel1=Sezgisel2	Asymp.Sig.
ÇARA	RASA	25	5	0	0,00
ÇARA	TB	30	0	0	0,00
ÇARA	GA	30	0	0	0,00
ÇARA	NSGA-II	30	0	0	0,00
RASA	TB	29	1	0	0,00
RASA	GA	30	0	0	0,00
RASA	NSGA-II	29	1	0	0,00
TB	GA	11	18	1	0,013
TB	NSGA-II	10	19	1	0,04
GA	NSGA-II	9	18	3	0,171

Tablo 8. Amaç-2 için Wilcoxon Signed Ranked Test analiz sonuçları (Wilcoxon Signed Rank Test analysis results for goal-2)

Sezgisel-1	Sezgisel-2	Sezgisel1>Sezgisel2	Sezgisel2>Sezgisel1	Sezgisel1=Sezgisel2	Asymp.Sig.
ÇARA	RASA	25	5	0	0,057
ÇARA	TB	30	0	0	0,00
ÇARA	GA	30	0	0	0,00
ÇARA	NSGA-II	30	0	0	0,00
RASA	TB	21	9	0	0,045
RASA	GA	29	1	0	0,00
RASA	NSGA-II	28	2	0	0,00
TB	GA	24	5	1	0,00
TB	NSGA-II	24	5	1	0,00
GA	NSGA-II	12	16	2	0,219

Tablolardan ve istatistiksel analiz sonuçlarından hareketle, GA'nın hem zaman hem de maliyet amaçları için daha kısa çözüm zamanı içerisinde daha iyi çözümler üretmesi nedeniyle en etkili algoritma olduğu, bu algoritmayı ise NSGA-II ve TB algoritmalarının takip ettiği belirlenmiştir. NSGA-II'nin çözümü zamanının yüksek olması ve TB'nin amaç-2 de daha etkili çözümler üretmemesi, algoritmaların zayıf yönlerini göstermektedir. Geliştirilen çözüm kurucu sezgisel algoritmalar ÇARA'nın tüm senaryolarda oldukça kısa sürelerde başarılı çözümler ürettiği, RASA'nın ise vurucu sayısının 10, hedef sayısının 35 olduğu problemlerde belirtilen zaman aralığı içerisinde uygun çözümler üretmediği tablolardaki sonuçlardan anlaşılmaktadır. Buna ek olarak, tüm algoritmalar ortalamaların en iyi değerden sapma miktarlarının %10'un altında olduğu belirlenmiştir. Bu durum, algoritmaların robust olduğunu ve farklı problem setleri üzerinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Çok Amaçlı-Heterojen Filolu-Zaman Pencereli-Kapasite Kısıtlı Hareketli Müşterili Araç Rotalama Problemi ele alınmıştır. Problemin çözümünde GA, NSGA-II, Tavlama Benzetimi, ÇARA ve RASA olmak üzere 5 farklı algoritma kullanılmış ve algoritmaların etkinliği istatistiksel açıdan analiz edilmiştir. Analiz sayesinde popülasyon tabanlı algoritmaların, tek bir çözüme dayalı algoritmaların ve çözüm kurucu sezgisel algoritmaların HM-ARP ve HHGSP üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Analiz sonucunda, Genetik Algoritmanın diğer algoritmalarla kıyasla, zaman ve maliyet amaçlarının eş zamanlı minimizasyonunu daha başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği belirlenmiştir. NSGA-II algoritmasının, Genetik Algoritma ile benzer sonuçlar ürettiği tespit edilmiş, çözüm zamanı açısından Genetik Algoritmanın daha avantajlı olduğu analiz sonuçlarından anlaşılmıştır. Tavlama Benzetimi algoritmasının Amaç-1 açısından oldukça başarılı bir performans sergilemiş, her iki amacın eş zamanlı minimizasyonunda ise performansının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak çözüm kurucu sezgisel algoritmalar, hedef ve vurucu sayısı düşük iken oldukça başarılı çözümler üretmiş, hedef ve vurucu sayısı arttıkça ise çözüm kalitesinde düşüş olduğu belirlenmiştir. Analiz sonuçları, yığın tabanlı çözümlerin Çok Amaçlı-Heterojen Filolu HM-ARP ve MTTSP de, tek tabanlı çözümlerden daha iyi sonuçlar ürettiğini, çözüm kurucu sezgisellerin ise en zayıf algoritmalar olduğunu göstermiştir.

Makale, ele alınan problem ve geliştirilen algoritmalar açısından literatürde ilk olma özelliği taşımaktadır. Önerilen algoritmalar HM-ARP gibi dinamik yapı ve büyük sayıda çözüm içeren problem tiplerini, kabul edilebilir çözüm zamanları içerisinde başarılı bir şekilde çözmüştür. Önerilen algoritmaların jenerik bir yapıya sahip olması ve robustluğunun güçlü olması nedeniyle HM-ARP ve HHGSP ye ek olarak, Dinamik Araç Rotalama Problemi, İnsansız Hava Aracı Rotalama Problemi, Dinamik Gezgin Satıcı

Problemi ve Robotik Sistemlerin Çizelgenmesi Problemleri gibi problem türlerinde de etkili bir şekilde kullanılabileceği öngörülmektedir.

Makalede dikkate alınan problem, literatürde ilk kez incelenen bir problem türü olmakta ve problemin genel versiyonu ile ilgili literatürde sınırlı çalışma bulunmaktadır. Gelecek çalışmalarda önerilen yöntemlerin geliştirilmesi ve farklı sezgisel ya da metasezgisel algoritmaların kullanılması ile daha iyi çözümlerin üretileceği öngörülmektedir. Buna ek olarak, problemin matematiksel modelleme gibi kesin çözüm yöntemleri ile çözümü zor olmakta, gelecek çalışmalarda bu durumu dikkate alan çalışmalara yönelmesi beklenmektedir. HM-ARP ve HHGSP gelişmekte olan problem türleridir. Gelecek çalışmalarda araştırmacılar, bu problemleri Lojistik, Trafik Yönlendirme ve Savunma Sistemlerine ait uygulama alanları ilişkilendirebilir ve bu alanlara yönelik çözüm yöntemleri geliştirebilirler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Psaraftis, H.N., Dynamic vehicle routing: status and prospects, *Annals Of Operations Research*, 61 (1), 143-164, 1995.
2. Bertsimas, D.J., Van Ryzin, G., A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the Euclidean plane, *Operations Research*, 39 (4), 601-615, 1991.
3. Bertsimas, D.J., Van Ryzin, G., Stochastic and dynamic vehicle routing in the Euclidean plane with multiple capacitated vehicles, *Operations Research*, 4 (1), 60-76, 1993.
4. Liao, T.Y., On-line vehicle routing problems for carbon emissions reduction, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017.
5. Haghani, A., Jung, S., A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times, *Computers & operations research*, 32 (11), 2959-2986, 2005.
6. Novoa, C., Storer, R., An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands, *European Journal of Operational Research*, 196 (2), 509-515, 2009.
7. Haghani, A., Jung, S., A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times, *Computers & operations research*, 3 (11), 2959-2986, 2005.
8. Potvin, J. Y., Xu, Y., Benyahia, I., Vehicle routing and scheduling with dynamic travel times, *Computers & Operations Research*, 33 (4), 1129-1137, 2006.
9. Van Woensel, T., Kerbache, L., Peremans, H., Vandaele, N., Vehicle routing with dynamic travel times: A queueing approach, *European Journal of Operational Research*, 186 (3), 990-1007, 2008.
10. Taniguchi, E., Shimamoto, H., Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12 (3-4), 235-250, 2004.
11. Ning, T., Guo, C., Chen, R., A novel method for dynamic vehicle routing problem, *The Open Cybernetics & Systemics Journal*, 9 (1), 2015.

12. Chen, S., Chen, R., Gao, J., A Monarch Butterfly Optimization for the Dynamic Vehicle Routing Problem, *Algorithms*, 10 (3), 107, 2017.
13. Kilby, P., Prosser, P., Shaw, P., Dynamic VRPs: A study of scenarios, University of Strathclyde Technical Report, 1-11, 1998.
14. Ritzinger, U., Puchinger, J., Hartl, R. F. A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems, *International Journal of Production Research*, 54 (1), 215-231, 2016.
15. Ries, J., Ishizaka, A., A Multi-Criteria Support System for Dynamic Aerial Vehicle Routing Problems, In *Communications, Computing and Control Applications (CCCA)*, 2012 2nd International Conference on. IEEE, December, 1-4, 2012.
16. Karakaya, M. En Az Sayıda İnsansız Hava Aracı Kullanarak Sabit Hedeflerin Gözetlenmesinin Planlanması. <https://docplayer.biz.tr/4654060-En-az-sayida-insansiz-hava-araci-kullanarak-sabit-hedeflerin-gozetlenmesinin-planlanmasi.html>, Erişim tarihi Ağustos 9, 2019.
17. Innocenti, M., Pollini, L., Turra, D., A fuzzy approach to the guidance of unmanned air vehicles tracking moving targets. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16 (6), 1125-1137, 2008.
18. Morris, S., Frew, E. W., Jones, H., Cooperative tracking of moving targets by teams of autonomous unmanned air vehicles, *MLB CO MOUNTAIN VIEW CA*, 2005.
19. Ramirez-Atencia, C., Bello-Orgaz, G., R-Moreno, M. D., Camacho, D., Solving complex multi-UAV mission planning problems using multi-objective genetic algorithms, *Soft Computing*, 21 (17), 4883-4900, 2017.
20. Savuran, H., & Karakaya, M., Efficient route planning for an unmanned air vehicle deployed on a moving carrier, *Soft Computing*, 20 (7), 2905-2920, 2016.
21. Shima, T., Schumacher, C., Assignment of Cooperating UAVs to Simultaneous Tasks using Genetic Algorithms, In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 5829, August 2005.
22. Kim, J., Morrison, J. R., On the concerted design and scheduling of multiple resources for persistent UAV operations, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74 (1-2), 479-498, 2014.
23. Helvig, C. S., Robins, G., & Zelikovsky, A., Moving-target TSP and related problems, In *European Symposium on Algorithms*, Springer Berlin Heidelberg, 453-464, August 1998.
24. Fügenschuh, A., Knapp, M., Rothe, H., The multiple traveling salesmen problem with moving targets. *Helmut-Schmidt-Univ., Professur für Angewandte Mathematik*, 2014.
25. Stieber, A., Fügenschuh, A., Epp, M., Knapp, M., & Rothe, H., The multiple traveling salesmen problem with moving targets, *Optimization Letters*, 9 (8), 1569-1583, 2015.
26. Stieber, A., Fügenschuh, A., Variants in Modeling Time Aspects for the Multiple Traveling Salesmen Problem with Moving Targets, 2016.
27. Jiang, Q., Sarker, R., Abbass, H., Tracking moving targets and the non-stationary traveling salesman problem, *Complexity International*, 11 (2005), 171-179, 2005.
28. Jindal, P., Kumar, A., Multiple Target Intercepting Traveling Salesman Problem, *International Journal of Computer Science and Technology*, 2 (2), 327-331, 2011.
29. Englot, B., Sahai, T., Cohen, I., Efficient Tracking and Pursuit of Moving Targets by Heuristic Solution of the Traveling Salesman Problem, In *Decision and Control (CDC)*, 2013 IEEE 52nd Annual Conference on. IEEE, 3433-3438, December 2013.
30. Jindal, P., Kumar, A., Kumar, S., Dynamic version of Traveling Salesman Problem, *International Journal of Computer Applications* 0975-8887, 19 (1), 2011.
31. Khosravi, M., Aghdam, A. G., Cooperative Receding Horizon Control for Multi-Target Interception in Uncertain Environments, In *Decision and Control (CDC)*, 2014 IEEE 53rd Annual Conference on. IEEE, 4497-4502, December 2014.
32. Zhou, A., Kang, L., Yan, Z. Solving Dynamic TSP with Evolutionary Approach in Real Time, In *Evolutionary Computation*, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on, IEEE, 2, 951-957, December 2003.
33. Choubey, N. S., Moving Target Travelling Salesman Problem using genetic algorithm, *International Journal of Computer Applications*, 70 (2), 2013.
34. Lee, Z. J., Lee, C. Y., Su, S. F., An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon-target assignment problem *Applied Soft Computing*, 2 (1), 39-47, 2002.
35. Agharkar, P., Bullo, F., Vehicle routing algorithms to intercept escaping targets. In *American Control Conference (ACC)*, 2014, IEEE, 952-957, June 2014.
36. Knapp, M., Rothe, H., Concept for simulating engagement strategies for C-RAM systems using laser weapons. *Proceedings of the DMMS*, 2012.
37. Hammar, M., Nilsson, B. J., Approximation results for kinetic variants of TSP, In *International Colloquium on Automata, Languages, and Programming*. Springer Berlin Heidelberg, 392-401, July 1999.
38. Bengt, J., Approximation Results for Kinetic Variants of TSP, *Discrete & Computational Geometry*, 4 (27), 2002.
39. Bourjolly, J. M., Gurtuna, O., Lyngvi, A., On-orbit servicing: a time-dependent, moving-target traveling salesman problem, *International Transactions in Operational Research*, 13 (5), 461-481, 2006.
40. Blough, O. P., Farrington, T. K., Hudson, J., Trojan Asteroid Mission Design: Target Selection And Sequencing Optimization, 2016.
41. Mei, G., Ran, X., Fang, D., & Zhang, C., Improved Satellite Scheduling Algorithm for Moving Target, In *Proceedings of the fourth International Conference on Information Science and Cloud Computing (ISCC2015)*, Guangzhou, China. Online at <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=264>, id. 58, 18-19 December, 2015.

42. Groba, C., Sartal, A., Vázquez, X. H., Solving the dynamic traveling salesman problem using a genetic algorithm with trajectory prediction: An application to fish aggregating devices, *Computers & Operations Research*, 56, 22-32, 2015.
43. Mercer, G., Barry, S. I., Marlow, D. O., Kilby, P., Investigating the effect of detection and classification range and aircraft dynamics on a, *ANZIAM Journal*, 49, 475-492, 2008.
44. Kilby, P., Tobin, P., Luscombe, R., Barry, S. I., Hickson, R., The maritime surveillance problem, 2007.
45. Marlow, D. O., Kilby, P., & Mercer, G. N., The Travelling Salesman Problem in Maritime Surveillance–Techniques, Algorithms and Analysis, In *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation*, 684-690, December 2007.
46. Fang, F., Jiang, A. X., Tambe, M., Protecting moving targets with multiple mobile resources, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 48, 583-634, 2013.
47. Cross, M., Marlow, D., Looker, J. Application of the non-stationary travelling salesman problem to maritime Surveillance, *Proceedings of MISG*, 1-4, 2007.
48. Shuttleworth, R., Golden, B. L., Smith, S., Wasil, E., Advances in meter reading: Heuristic solution of the close enough traveling salesman problem over a street network, In *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, Springer US, 487-501, 2008.
49. Del Bimbo, A., & Pernici, F., Distant targets identification as an on-line dynamic vehicle routing problem using an active-zooming camera. In *Visual Surveillance and Performance Evaluation of Tracking and Surveillance*, 2005. 2nd Joint IEEE International Workshop on. IEEE, 97-104, October 2005.
50. Bimbo, A.D., Pernici, F., Saccades Planning with Kinetic TSP for Distant Targets Identification, In *Imaging for Crime Detection and Prevention*, 2005. ICDP 2005. The IEE International Symposium on. IET, 145-149, June 2005.
51. Ilavarasi, K., Joseph, K.S., Variants of travelling salesman problem: A survey. In *Information Communication and Embedded Systems (ICICES)*, 2014 International Conference on. IEEE, 1-7, February 2004.
52. Asahiro, Y., Horiyama, T., Makino, K., Ono, H., Sakuma, T., Yamashita, M., How to collect balls moving in the Euclidean plane, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 91, 229-245, 2004.
53. Asahiro, Y., Miyano, E., Shimoirisa, S., Grasp and delivery for moving objects on broken lines, *Theory of Computing Systems*, 42 (3), 289-305, 2008.
54. Chalasani, P., Motwani, R., Rao, A. N. I. L., Algorithms for robot grasp and delivery, In *2nd International Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics*, July 1996.
55. Uçar, U., İşleyen, S., A New Solution Approach for UAV Routing Problem with Moving Target – Heterogeneous Fleet. *Journal of Polytechnic*, DOI: 10.2339/politeknik.466393
56. Uçar, U.Ü., İşleyen, S.K., A solution approach based on simulated annealing for the destruction of moving targets in time window by air operations, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS) 19-22 October 2017.
57. İşleyen, S. K., Uçar, U., Balo, F., A New Solution Approach for Maritime Surveillance Operation: The Case of Aegean Sea, *Mathematical Problems in Engineering*. 2019, 1-16, 2019.
58. Papadakos, N., Tzallas-Regas, G., Rustem, B., Thoms, J., Risky traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 212 (1), 69-73, 2011.
59. Bullo, F., Frazzoli, E., Pavone, M., Savla, K., & Smith, S. L., Dynamic Vehicle Routing for Robotic Systems. *Proceedings of the IEEE*, 99 (9), 1482-1504, 2011.
60. Ries, J., & Ishizaka, A., A multi-criteria support system for dynamic aerial vehicle routing problems. In *Communications, Computing and Control Applications (CCCA)*, 2012 2nd International Conference on. IEEE, 1-4, December 2012.
61. Enright, J., Frazzoli, E., Savla, K., & Bullo, F., On multiple UAV routing with stochastic targets: Performance bounds and algorithms. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 5830, August 2005.
62. Karakaya, M., A local optimization technique for assigning new targets to the planned routes of unmanned aerial vehicles, *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2 (2), 2014.
63. Ercan, C., & Gencer, C., Dinamik insansız hava sistemleri rota planlaması literatür araştırması ve insansız hava araçları çalışma alanları, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (2), 104-111, 2013.
64. Psaraftis, H. N., Wen, M., Kontovas, C. A., Dynamic vehicle routing problems: Three decades and counting, *Networks*, 67 (1), 3-31, 2016.
65. Murray, C. C., Karwan, M. H., An extensible modeling framework for dynamic reassignment and rerouting in cooperative airborne operations, *Naval Research Logistics (NRL)*, 57 (7), 634-652, 2010.
66. O'Rourke, K. P., Dynamic unmanned aerial vehicle (UAV) routing with a Java-encoded reactive tabu search metaheuristic (No. AFIT/GOA/ENS/99M-06). *Air Force Inst Of Tech Wright-Pattersonafb Oh School Of Engineering*, 1999.
67. Küçükaydın H., Column generation based matheuristics for a vehicle routing problem with time Windows and variable start time, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2061-2078, 2019.
68. Aydoğdu B., Özyörük B., Mathematical model and heuristic approach for solving dynamic vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Random iterative local search variable neighborhood descent search, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 563-580, 2020.

69. Can Atasagun G, Karaoğlan İ., A mathematical model for the time dependent vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 1743-1756, 2019.
70. Kıvanç Ö.C., Mungan T.E., Atila B, Tosun G., An integrated approach to development of unmanned ground vehicle: design, analysis, implementation and suggestions, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 1957-1974, 2019.
71. Murray, C. C., Dynamic reassignment and rerouting in cooperative airborne operations, State University of New York at Buffalo, 2010.
72. Mufalli, F., Batta, R., Nagi, R., Simultaneous sensor selection and routing of unmanned aerial vehicles for complex mission plans, Computers & Operations Research, 39 (11), 2787-2799, 2012.
73. Scioletti, M. S., A heuristic algorithm for optimized routing of unmanned aerial systems for the interdiction of improvised explosive devices (Doctoral dissertation, Monterey, California. Naval Postgraduate School), 2008.
74. Vidal, R., Rashid, S., Sharp, C., Shakernia, O., Kim, J., & Sastry, S., Pursuit-evasion games with unmanned ground and aerial vehicles. In Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on, IEEE, 3, 2948-2955, 2001.
75. Pavone, M., Bisnik, N., Frazzoli, E., Isler, V., A stochastic and dynamic vehicle routing problem with time windows and customer impatience. Mobile Networks and Applications, 14 (3), 350, 2009.
76. Groba, C., Sartal, A., Vázquez, X. H., Integrating forecasting in metaheuristic methods to solve dynamic routing problems: Evidence from the logistic processes of tuna vessels, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 76, 55-66, 2018.
77. Holland, J. H., Adaption in natural and artificial systems. An Introductory Analysis with Application to Biology, Control and Artificial Intelligence, 1975.
78. Şahin, M., Kellegöz, T., An efficient grouping genetic algorithm for U-shaped assembly line balancing problems with maximizing production rate, Memetic Computing, 9 (3), 213-229, 2017.
79. Gözütok S., Özdemir O.N., Refinement of hydraulic calibration for water supply networks with genetic algorithms, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 19 (2), 125-130, 2004.
80. Temiz İ., Erol S., Multiobjective genetic algorithm for fuzzy flowshop scheduling problem, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22 (4), 855-862, 2007.
81. Lokman, B., Çok amaçlı tamsayı programlama problemleri için temsili çözüm üreten yaklaşımların ve kalite ölçülerinin incelenmesi, Journal of Industrial Engineering (Turkish Chamber of Mechanical Engineers), 28 (1), 2017.
82. Durmaz, E. D., Çok amaçlı tek sıra tesis düzenleme probleminin çözümü için NSGA II ve hedef programlama yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
83. Sağ, T., Çok kriterli optimizasyon için genetik algoritma yaklaşımları, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018).
84. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. A. M. T., A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6 (2), 182-197, 2002.
85. Mafarja, M. M., Mirjalili, S., Hybrid Whale Optimization Algorithm with simulated annealing for feature selection, Neurocomputing, 2017.
86. Ingber, L., Simulated annealing: Practice versus theory, Mathematical and Computer Modelling, 18 (11), 29-57, 1993.
87. Talbi, El-Ghazali, Metaheuristics: From Design to Implementation. John Wiley & Sons, 2009.



Comparison of older and novel arrangements of Ankara Celal Bayar Boulevard in terms of roadway noise

Zuhal Özçetin^{1*}, Füsün Demirel²

¹Architectural of Department, Uşak University, Uşak, 64000, Turkey

²Architectural of Department, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- Environmental noise control
- Traffic noise in Celal Bayar Boulevard
- Highway noise

Keywords:

- Noise
- Traffic
- Highway
- Celal Bayar Boulevard
- Ankara

Graphical/Tabular Abstract

It is known that the utilization of underpasses on the roads is significantly advantageous in urban roadway noise control. However, as a result of the measurements made on the Celal Bayar Boulevard recently, it has been determined that the environmental noise level around the road is above the limit values for both periods when the measurements were made (2016 and 2017), and for the points where the measurements were made.

Mayıs 2016 Mevcut durum ölçüm sonuçları [Leq]	Noktalar	Gündüz (dBA)	Akşam (dBA)	Gece (dBA)	L _{max} (dBA)
	9.nokta		75,5	77,2	74,9	81,7
10.nokta		73,8	77,8	75,0	81,7
Mayıs 2017 Mevcut durum ölçüm sonuçları [Leq]	Noktalar	Gündüz (dBA)	Akşam (dBA)	Gece (dBA)	L _{max} (dBA)
	9.nokta		71,6	70,4	68,3	75,5
10.nokta		73,0	75,3	73,1	79,8

Figure A. Baseline measurement results before underpass (2016) and after underpass (2017) – Leq

Article Info:

Research Article
Received: 07.12.2019
Accepted: 23.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.656548

Acknowledgement:

We would like to thank Ankara Metropolitan Municipality, Health Affairs Department, Health Services Branch Directorate Noise Control Chief and employees for their technical support during this study.

Correspondence:

Author: Zuhal Özçetin
e-mail:
zuhalozcetin@gmail.com
phone: +90 537 639 5333

Purpose: To create a noise pollution-free environment, it is substantial to take the necessary measures even at the stage of city planning and urban engineering with the aim of keeping the noise away from the buildings and their surroundings or controlling the generated noise. In order to take these measures, the noise status and sources should be determined by appropriate measurement methods, and the noise should be controlled in the light of the information obtained by them. In this context, we aimed with this study to compare roadway noise in the older and novel arrangements of Celal Bayar Boulevard which is one of the busiest streets of Ankara.

Theory and Methods:

Celal Bayar Boulevard is divided into six zones in terms of susceptibility to noise generation in line with the Environmental Noise Assessment and Management Regulation (ENAMR). In the study conducted by Özçetin and Demirel, environmental noise was measured in the determined zones, at 16 points in total, on days which the traffic density is accepted similar, during the time periods specified in the ENAMR (day, evening, night hours), on April 2015, November 2015 and May 2016. Our research is designed to be a continuation of this study. Our measurements were made at two points (9th and 10th points) in Zone 3, which is a sensitive educational facility zone within the campus of the Gazi University Faculty of Engineering and Architecture and in accordance with the ENAMR and quality standards (TS ISO 1996-2). These measurements were made on May 17, 2016 before the road rearrangement, ie the construction of the underpass, and on May 16, 2017 after the construction of the underpass. Five-minute long measurements were made each hour. The measurements were classified into day, evening, and night (Leq) periods. It was planned in advance to make measurements on weekdays, considering that the traffic density is higher on working days. Besides, the measurements were carried out on 17 May 2016 Tuesday and 16 May 2017 Tuesday which are similar dates, with the aim of providing similar traffic densities thus achieving standardization of confounding factors. Zone 3 covers the area from Yükseliş Street (main entrance of Gazi University Engineering Faculty of Architecture) to Toros Street at the end of Maltepe Bazaar. In the selection of the 9th and 10th points to make measurements, the proximity to the campus of Gazi University Faculty of Engineering and Architecture and the presence of the Presidential Symphony Orchestra building were taken into account.

Results:

It is observed that the day, evening, and night measurements we made in May 2016 before the underpass was built on Celal Bayar Boulevard were above 70 dBA, and the day, evening, and night measurements we made in May 2017 after the underpass was built were over 65 dBA. It is seen that these values exceed the daytime <65 dBA limit specified in the ÇGDYY / ENAMR. Thus, it has been determined as a result of the measurements that the environmental noise level on the Celal Bayar Boulevard is above the limit values specified in the legislation at both time periods.

Conclusion:

In this regard, the installment of artificial barriers (glass noise barriers) in the area where the study is carried out can be suggested in order to reduce the roadway noise levels below the desired limit values.



Ankara Celal Bayar Bulvarı'nın karayolu gürültüsü açısından eski ve yeni düzenlemesinin karşılaştırılması

Zuhal Özçetin^{1*}, Füsün Demirel²

¹Uşak Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 64000, Uşak, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Çevresel Gürültü Kontrolü
- Celal Bayar Bulvarı'nda trafik gürültüsü
- Karayolu Gürültüsü

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.12.2019

Kabul: 23.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.656548

Anahtar Kelimeler:

Gürültü,
trafik, karayolu,
Celal Bayar bulvarı,
Ankara

ÖZET

Gürültü, insan sağlığını fizyolojik ve psikolojik olarak etkilediği gibi, iş ve eğitim yaşamında da performansı olumsuz etkilemektedir. Gürültünün insan sağlığı üzerindeki etkisi, sağlık sorunları ve davranış bozuklukları meydana getirdiği bilinmektedir. Gürültü problemi tüm dünyada mevzuat kapsamına alınarak, önemli denetimler getirilmiştir. Bu kapsamda çalışmada; Ankara'nın en işlek caddelerinden biri olan Celal Bayar Bulvarı'nın alan ölçümleri aracılığı ile eski ve yeni düzenlemesi arasındaki fark ortaya konularak, trafik gürültüsünün analizi yapılmıştır. Seçilen örnek çalışma alanında; 2016 yılına kadar alt geçit olmadan kullanım mevcut olup, 2017 yılında trafik, alt geçit aracılığı ile düzenlenmiştir. Araştırmada; her iki zaman periyodunun belirli aralıklarında, mevzuatlara uygun olarak çevresel gürültü ölçümleri ($L_{gündüz}$, $L_{akşam}$, L_{gece}) yapılarak, araç sayımları gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler ile hesaplamaları (L_{gag} –gündüz,akşam-gece ses basınç seviyesi-) yapılmıştır. Bu bağlamda, karayolunun alt geçit uygulama öncesi (Mayıs 2016) ve sonrası (Mayıs 2017) mevcut durumu, çevresel gürültü ölçümleri bağlamında değerlendirilerek, analiz edilmiştir. Celal Bayar Bulvarı üzerindeki mevcut durum değerlendirilmesi ile iki noktada (9. ve 10. noktalar) yapılan ölçüm analizleri ışığında; karayolu çevresel gürültü düzeyinin, alt geçit çalışması öncesinde elde edilen sonuçlara göre; azaldığı görülmekle birlikte, her iki zaman diliminde de (2016 ve 2017) gürültü düzeyinin sınır değerlerin üzerinde olduğu tespit edilmiş ve bu bağlamda öneriler geliştirilmiştir.

Comparison of older and novel arrangements of Ankara Celal Bayar Boulevard in terms of roadway noise

HIGHLIGHTS

- Environmental noise control
- Traffic noise in Celal Bayar Boulevard
- Highway noise

Article Info

Research Article

Received: 07.12.2019

Accepted: 23.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.656548

Keywords:

Noise,
traffic, highway,
Celal Bayar boulevard,
Ankara

ABSTRACT

Noise affects human health from different perspectives (physiological, physical and psychological) and affects performance negatively in work and education. It is known that noise affects human health, health problems and behavioral disorders. For this reason, noise, which has significant effects on human health, has been subject to various studies for many years and various studies have been carried out to determine and control the effects of people on this problem. The noise problem is covered by the legislation all over the world. Important audits have been introduced in various countries. Despite these efforts, it is known that in most countries, the noise problem cannot be solved, the sources of noise are increasing and spreading over areas, and the noise levels and the negative effects are increasing. In this context; The difference between the older and novel arrangement of the Celal Bayar Boulevard, which is the busiest street in Ankara, has been analyzed and the traffic noise has been analyzed. In the selected study area; Until 2016, there was use without underpass and in the light of new regulations (in 2017), environmental noise measurements ($L_{gündüz}$, $L_{akşam}$, L_{gece}) were carried out at certain times in accordance with the legislation, vehicle counts were performed and the data and calculations (L_{gag}) were made. In this context, the current state of the road noise before and after the subway application (May 2016) and after (May 2017) (equivalent continuous sound pressure level- L_{eq}); and analyzed. In the light of the current situation assessment on Celal Bayar Boulevard, measurement analyzes made at two points (points 9 and 10); according to the results obtained before the underpass study; Although the noise was reduced, the noise level was found to be above the limit values in both time periods (2016 and 2017).

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: zuhalozcetin@gmail.com, fusundgk@gazi.edu.tr / Tel: +90 537 639 5333

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İşitsel açıdan konforlu bir çevre oluşturmak için, istenmeyen ses olarak kabul edilen gürültünün, tasarım aşamasında yapıdan ve çevresinden uzaklaştırılması ya da denetim altına alınması gerekmektedir. Bu sebeple öncelikle gürültü koşulları; ölçüm yöntemi ile belirlenerek, gürültü kontrol altına alınmalıdır [1-3]. Gürültüye hassas alanlarda yeni uygulamalar yapmak, işlev ya da yol güzergâhını

değiştirmek gürültünün azalmasına veya artmasına sebep olabilir. Yapılan bu tür değişikliklerin alandaki performansı belirlemek ve başka uygulamalarda ele almak, konfor koşullarını iyileştirmek için önemlidir.

Karayolu ve demiryolu trafiğine yönelik olarak yapılan bu çalışma için literatür araştırması, özet olarak, Tablo 1’de sunulmuştur. Bu kapsamda çalışmada; Ankara’nın en işlek caddelerinden biri durumundaki; demiryolu, karayolu ulaşım

Tablo 1. Literatürde yapılan çalışmalar (Studies in the literature)

Yazar/Yazarlar, Yılı, Yayın adı	Kullanılan Yöntem
B.Selimoğlu, 1994, Ülkemiz otoyollarında çevre düzenleme ilkelerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma [4]	Araştırma yöntemi
M.E. Aydın, N. Ateş, 1997, Konya’da trafik gürültüsü ve bazı öneriler [5]	Ölçüm yöntemi
B. Kotzen, C. English, 1999, Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual desing [6]	Örnekler üzerinden araştırma yöntemi
M. Gürpınar, 2001, Çevresel ulaşım gürültüsünün trafik planlaması yönünden incelenmesi [7]	(CNM) Community Noise Model simülasyon programı ile kavşaklarda modelleme çalışması
R. Toprak, 2001, Raylı ulaşım sistemlerinde oluşan gürültünün ölçülmesi ve modellenmesi [3]	Ölçüm ve RNM (Railway Noise Model) simülasyon programı ile modelleme
R. F. Özeç, 2001, Atatürk havalimanının neden olduğu çevresel gürültünün modellenmesi ve kontrolü [8]	INM simülasyon programı ile modelleme
N. Yüğrük Akdağ, 2003, Kent planlamada gürültü haritalarının önemi: Barbaros Bulvarı çevresi örneği [9]	Soundplan simülasyon programı ile gürültü haritası oluşturma
N. Aktürk, R.Toprak, E. Asiloğulları, 2003, Hızlı raylı ulaşım sistem kaynaklı çevresel gürültü [10]	Ölçüm ve hesaplama yöntemi
N. Aktürk, O. Akdemir, İ. Üzkurt, 2003, Trafik ışık sürelerinin neden olduğu çevresel taşıt gürültüsü [11]	Community Noise Model (CNM) programı kullanılarak modelleme ve hesaplama
M. Özen, 2003, Karayolu kaynaklı çevresel trafik gürültüsünün modellenmesi ve gürültü tahminleri [12]	Tipik bir kavşağın ölçümlerinin yapılarak, (CNM) Community Noise Model simülasyon programı ile modelleme
P. Pamanikabuda, M. Tansatchab, 2003, Geographical information system for traffic noise analysis and forecasting with the appearance of barriers [13]	Hesaplama, tahmin ve simülasyon yöntemi
A. Calixto, F. B. Diniz, P. H.T. Zannin, 2003, The statistical modeling of road traffic noise in an urban setting [14]	Ölçüm ve matematiksel modelleme yöntemi
J. Ramis, J. Alba, D. Garcia, F.Hernandez, 2003, Noise effects of reducing traffic flow through a Spanish city [15]	Ölçüm yöntemi
İ. Üzkurt, 2004, Ulaşım gürültüsünün çevresel etkileri [16]	Gürültü ölçümü ve (CNM) Community Noise Model simülasyon programı ile modelleme
E. İşler, N. Yüğrük Akdağ, 2004, Gürültünün denetlenmesinde engellerin etkinliği: Bağdat caddesi örneği [17]	Engellere yönelik ölçüm ve Soundplan simülasyon programı ile modelleme
T. Ishizuka, K. Fujiwara, 2004, Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions [18]	Hesaplama yöntemi
A. Ripoll, 2005, State of the art of noise mapping in Europe [19]	Simülasyon programı verileri ile gürültü haritalama örnekleri
Ş. Dursun, C. Özdemir, H.Karabörk, S. Koçak, 2006, Noise pollution and map of Konya city in Turkey [20]	Ölçüm ve hesaplama yöntemi
M.McCallum-Clark, R.H. Incite (Christchurch), M. Hunt, 2006, Transportation and noise: land use planning options for a quieter New Zealand [21]	Araştırma yöntemi
İ. Öztürk, 2006, Trafik gürültüsünü azaltmak için kullanılan kaplama ve yüzey tabakaları üzerine bir araştırma [22]	Ölçüm ve simülasyon (Cadna) yöntemi
M. Hankard, J. Cerjan, J. Leasure, 2006, Evaluation of the fhwa traffic noise Model (TNM) for highway traffic noise prediction in the state of Colorado [23]	Ölçüm ve modelleme yöntemi
Dieter Langer, 2007, Mapping of road traffic noise in Adana [24]	Soundplan simülasyon programı ile gürültü haritası oluşturma
Gerd Wiechers, 2007, Mapping of road traffic noise in İzmir, Turkey [25]	Soundplan simülasyon programı ile gürültü haritası oluşturma
M. Çalış, 2007, Karayolu gürültüsü ve gürültü perdelerinin ekonomik analizi [26]	Hesaplama yöntemi
M. Aşçıgil Dinçer, 2009, Karayolu gürültü haritalarının hazırlanması: İstanbul zircirlikuyu-maslak ulaşım hattı örneği [27]	Soundplan simülasyon programı ile gürültü haritası oluşturma
H. Ertoran, 2009, Gürültü haritalamada Türkiye’deki mevcut durum [1]	5 pilot bölgede yapılan çalışmalar
M. N. İlgürel, 2009, Sanayi yapılarının tasarımında gürültünün bir ölçüt olarak değerlendirilmesi için bir yöntem geliştirilmesi [28]	Odeon simülasyon programı ile modelleme
K.Lam, P.Chan, T.Chan, W.Au, W.Hui, 2009, Annoyance response to mixed transportation noise in Hong Kong [29]	Ölçüm ve anket yöntemi
V. O’Malley, E.King, L. Kenny, C. Dilworth, 2009, Assessing methodologies for calculating road traffic noise levels in Ireland–Converting CRTN indicators to the EU indicators (Lden, Lnight) [30]	Ölçüm ve hesaplama yöntemi

Tablo 1. (devam) Literatürde yapılan çalışmalar ((continue) Studies in the literature)

Yazar/Yazarlar, Yılı, Yayının adı	Kullanılan Yöntem
P.Pamanikabud, M.Tansatcha, 2009, Geoinformatic Prediction of Motorway Noise on Buildings in 3D GIS [31]	Hesaplama ve simülasyon yöntemi
K. Paunović, B. Jakovljević, G. Belojević, 2009, Predictors of noise annoyance in noisy and quiet urban streets [32]	Ölçüm yöntemi
E. Murphy, E.A. King, H.J. Rice, 2009, Estimating human exposure to transport noise in central Dublin, Ireland [33]	GIS, Harmonoise hesaplama metodu ve ölçüm yöntemi
H.Y. T.Phan, T.Yano, T. Sato, T.Nishimura, 2010, Characteristics of road traffic noise in Hanoi and Ho Chi Minh City, Vietnam [34]	Ölçüm, video kayıt ve hesaplama yöntemi
E. Bakırcı, M. Çalışkan, 2011, Karayolundan yayılan çevresel gürültünün haritalanması ve binaların dış cephesine etkisinin belirlenmesi[2]	IMMI programı ile gürültü haritalama ve cephe analizi
T. Bıçakçı, 2011, Trafikten kaynaklanan çevresel gürültü haritaları ve Çukurova Üniversitesi kampüsü örneği [35]	Soundplan simülasyon programı ile gürültü haritalama
S.S. Özer, N. Yüçruk Akdağ, 2011, Bölge ve kent planlamada gürültünün tasarım ölçütü olarak değerlendirilmesinin önemi-İstanbul'dan örnekler [36]	Ölçme ve Soundplan simülasyon programı ile gürültü haritalama
J.P. Clairbois, 2011, Road and rail barriers: from physics to implementation of effective and sustainable devices [37]	Gürültü bariyeri tasarımı
J.H. Ko, S. II Chang, B. C. Lee, 2011, Noise impact assessment by utilizing noise map and GIS: A case study in the city of Chungju, Republic of Korea [38]	Ölçüm ve Soundplan simülasyon programı modellemesi
P. Mioduszewski, J. A. Ejsmont, J. Grabowski, D.Karpinski, 2011, Noise map validation by continuous noise monitoring [39]	Ölçüm ve CadnaA simülasyon programı modellemesi
U. Berardi, E. Cirillo and F.Martellotta, 2011, Interference effects in field measurements of airborne sound insulation of building facades [40]	Ölçüm ve hesaplama yöntemi
M. Çalış, F. Yonar, 2011, Trafik gürültüsünü azaltmak için kullanılan kaplama ve yüzey tabakaları üzerine bir araştırma [41]	Deney ve araştırma yöntemi
T. Öztürk, Z. Öztürk, M. Çalış, 2012, A case study on acoustic performance and construction costs of noise barriers [42]	Ölçüm ve hesaplama yöntemi
M. Barclay, J.Kang, S. Sharples, 2012, Combining noise mapping and ventilation performance for non-domestic buildings in an urban area [43]	CadnaA simülasyon programı ile modelleme
A. Badino, M. Aşçıgil Dinçer vd., 2012, Applicability of road traffic dose-effect relations to Turkish urban context [44]	Soundplan programı ile gürültü haritalama ve anket çalışması ile doz-etki araştırması
D. A. Naish, A. C.C. Tan, F. N. Demirbilek, 2012, Estimating health related costs and savings from balcony acoustic design for road traffic noise [45]	Modelleme ve ölçüm yöntemi
S. Kurra, L. Dal, 2012, Sound insulation design by using noise maps [46]	Ölçüm ve CadnaA simülasyon programı ile modelleme
O. S. Olayinka, 2012, Noise map: Tool for abating noise pollution in urban areas [47]	Mevcut durum ölçümleri
A. Ramirez, E. Domínguez, 2013, Modeling urban traffic noise with stochastic and deterministic traffic models [48]	Ölçüm, hesaplama ve simülasyon yöntemi
P. H. T. Zannin, V. L. Gama vd., 2013, Noise mapping of an educational environment [49]	Ölçüm ve Soundplan simülasyon programı ile modelleme
A. Dintrans, M. Prendez, 2013, A method of assessing measures to reduce road traffic noise: A case study in Santiago, Chile [50]	Ölçüm ve simülasyon programı ile modelleme
K.Vogiatzis, N.Remy, 2014, From environmental noise abatement to soundscape creation through strategic noise mapping in medium urban agglomerations in South Europe [51]	Ölçüm ve CadnaA simülasyon programı ile modelleme
G. Licitra, E.Ascari, 2014, Gden: An indicator for European noise maps comparison and to support action plans [52]	Hesaplama yöntemi
F.D'Alessandro, S. Schiavoni, 2015, A review and comparative analysis of European priority indices for noise action plans [53]	Hesaplama ve Soundplan simülasyon programı ile modelleme
M. Cai, J. Zou, L. Xie vd., 2015, Road traffic noise mapping in Guangzhou using GIS and GPS [54]	Simülasyon programı ile modelleme ve hesaplama yöntemi
M.Aşçıgil Dincer, S. Yılmaz, 2015, Modelling road traffic noise annoyance by listening tests [55]	Soundplan simülasyon programı ile modelleme, anketler, dinleme testleri
G.Zambon, F. Angelini, R.Benocci, A. Bisceglie, 2015, DYNAMAP: a new approach to real-time noise mapping [56]	Modelleme yöntemi
D. M.Gonzalez, J. M. B.Morillas, G.R. Gozalo, 2015, The influence of microphone location on the results of urban noise measurements [57]	Ölçüm ve hesaplama yöntemi
E.Ascari, G.Licitra, T. Luca, M.Cerchiai, 2015, Low frequency noise impact from road traffic according to different noise prediction methods [58]	Ölçüm ve 2008 2000 NORD simülasyon programı modellemesi
P. E. K. Fiedler, P.H.T. Zannin, 2015, Evaluation of noise pollution in urban traffic hubs-Noise maps and measurements [59]	Ölçüm ve Predictor simülasyon programı ile modelleme
G. Licitra, L. Fredianelli, D. Petri, M. A. Vigotti, 2016, Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas [60]	Anket, ölçüm ve simülasyon yöntemi
G. R. Gozalo, J.M.B. Morillas vd., 2016, Study on the relation between urban planning and noise level [61]	Ölçüm ve hesaplama yöntemi

akları ile destekli, eğitim (Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakülteleri Binası, Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Binası, Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Dekanlık ve Morfoloji Binası), sağlık (Ankara Yüksek İhtisas Hastanesi Binası, Hacettepe Üniversitesi

Hastanesi Binası), kültür yapıları, alışveriş merkezleri, iş merkezleri, spor alanları, park alanları ve konut bölgelerinin bulunduğu Celal Bayar Bulvarı'nda eski hali ve yeni hali olmak üzere iki farklı mevcut durum değerlendirmesi yapılmıştır.

Yapılan çalışma önceki araştırmalarla kıyaslandığında; karayolu ve demiryolunun bir arada bulunması, çalışma alanı içerisinde eğitim, sağlık, kültür yapıları, alışveriş merkezi, iş merkezi, spor, park ve konut alanlarının yer alması açısından diğer çalışmalardan ayrılarak, özgünleşmektedir.

3. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

3.1. Çalışma Alanının Özellikleri (Characteristics of the Study Area)

Celal Bayar Bulvarı, Ankara Yüksek Hızlı Tren Garı, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi gibi binaların yer aldığı, başkent Ankara'nın en işlek caddelerinden biri konumundadır. Ayrıca Ankara'nın kuzey-güney ve doğu-batı doğrultularında en önemli trafik aksı olan Atatürk Bulvarı ile Gazi Mustafa Kemal Bulvarı'nı ulaşım konusunda destekler durumdadır (Şekil 1).

Tablo 2. Celal Bayar Bulvarı'nın kullanım işlevlerine göre değerlendirilmesi (Evaluation of Celal Bayar Boulevard according to its usage functions) [66]

Bölgeler	Bölge işlevi	Hassasiyet
Bölge 1	Spor tesisleri	III
	Terminaller	III
Bölge 2	İdari tesisler	II
	Eğitim tesisleri	II
Bölge 3	Ticari tesisler	III
	Kültürel tesisler	I
Bölge 4	İdari tesisler	II
	Konutlar	II
Bölge 5	Sağlık tesisleri	I
	Dinlenme alanları (Park)	-
	Eğitim tesisleri	II
Bölge 6	Sağlık tesisleri	I
	Ticari tesisler	III
Bölge 6	Dinlenme alanları (Park)	-

Bu çalışmada, öncelikle Celal Bayar Bulvarı, Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği

(ÇGDYY)'ne göre; gürültüye hassaslık derecelerine göre 6 bölgeye ayrılmıştır (Tablo 2 ve Şekil 2). Özçetin ve Demirel çalışmalarında; belirlenen bölgelerde; hafta içi araç yoğunluğunun aynı olarak kabul edildiği günlerde, toplamda 16 noktada, Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nde belirtildiği zaman dilimlerinde (gündüz, akşam, gece saatlerinde) Nisan 2015, Kasım 2015, Mayıs 2016 tarihlerinde çevresel gürültü ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir [66]. Bu çalışmanın devamı niteliğinde; Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi'nin içerisinde yer alan, eğitim tesisleri hassasiyetli bölge konumundaki, Bölge 3 içerisinde yer alan 2 noktada (9. ve 10. noktalar) ÇGDYY ve standartlara (TS ISO 1996-2) uygun olarak, yenileme öncesi 17 Mayıs 2016 ve yenileme sonrası (alt geçit uygulamasından sonra) 16 Mayıs 2017'de, birer saatte bir, 5'er dakikalık gündüz, akşam, gece (L_{eq}) ölçümleri yapılmıştır. Yoğunluğun iş günlerinde olduğu düşünüldüğünde, hafta içi yapılması öngörülen ölçümler, yoğunlukta dikkate alındığında benzerlik ve diğer günlerle yakın olması açısından 17 Mayıs 2016 ve 16 Mayıs 2017 Salı günleri ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bölge 3, Yükseliş sokaktan (Gazi Üniversitesi Müh. Mimarlık Fakültesi ana girişi), Maltepe pazarının bitimindeki Toros sokağa kadar olan bölgeyi kapsamaktadır. 9. ve 10. noktaların seçiminde, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi yerleşkesine yakınlık, Cumhurbaşkanlığı Senfoni Orkestrası binasının yer alması önemli olmuştur.

Kısa süreli ortalama almalarda, hava şartları sağlanmıyorsa, ses yayılma yolundaki havadan kaynaklanan değişimlerin ortalamalarını almak için en az 10 dakika ölçme yapılmalıdır. Hava şartları koşulu sağlanıyorsa 5 dakika genellikle yeterlidir [63].

$$\frac{h_s + h_r}{r} \geq 0,1$$

Burada;

h_s : kaynağın yüksekliği,



Şekil 1. Celal Bayar Bulvarı (Google Earth) (Celal Bayar Boulevard)

hr : alıcının yüksekliği,
r : kaynak ile alıcı arasındaki mesafedir.

Hava şartları koşulunun sağlanmasından dolayı, her saat 5 dakika boyunca yapılmış olan ölçümler sırasında araç sayımı yapılmış, ölçümün bitmesi ile araç sayımı da bitirilmiştir. Araç sayımları ön ve arka şeritte seyir halinde bulunan, yönetmelikte [63] belirtildiği üzere hafif (< 3500 kg) ve ağır araç (> 3500 kg) kategorisine göre gerçekleştirilmiştir. Gündüz ölçümleri 08.00-19.00, akşam ölçümleri 19.00-23.00 saatleri arasında her saat, gece ölçümleri daha önce yapılmış olan (Nisan 2015, Kasım 2015, Mayıs 2016 tarihlerinde) ölçümlerdeki deneyime göre, yoğunluğun giderek azalmasından dolayı 23.00-02.00 saatleri arasında yarım saatte bir yapılmıştır. Celal Bayar Bulvarı Ankara'nın en işlek caddesi konumundan ve iş çıkışı olması sebebiyle gündüz ölçümleri 18.00-19.00 saatleri arasında iki ölçüm alınarak, araç sayımı yapılmış ve çizelgede belirtilmiştir. Gündüz, akşam, gece yapılan ölçümler ışığında L_{gag} (gündüz-akşam-gece ses basınç seviyesi) değerleri hesaplanmış ve bu doğrultuda sonuçlar analiz edilmiştir. Ardından, alt geçit uygulaması öncesi ve sonrasında olmak üzere iki ölçüm sonuçları karşılaştırılarak, Celal Bayar Bulvarı'nın gürültü analizi çalışması gerçekleştirilmiştir.

3.2. Celal Bayar Bulvarı Üzerinde Çevresel Gürültü Düzeyi Ölçümleri

(Environmental Noise Measurements on Celal Bayar Boulevard)

Ölçümler; TS ISO 1996-2: Mart 2009, TS9315 ISO 1996-1 [63,64] ve TS ISO 362-1 [65] standartlarına uygun olarak Rion NA-28 ses seviyesi ölçer ile gerçekleştirilmiştir. Ses seviyesi ölçer, ölçümlere başlamadan önce kalibre edilmiştir. Standart ve yönetmeliklerde belirtildiği üzere, hava şartlarının uygunluğundan dolayı Celal Bayar Bulvarı üzerinde (gündüz: 08.00-19.00, akşam: 19.00-23.00, gece: 23.00-02.00 saatleri arasında) her saatte 5'er dakika süre ile 1'er kez gündüz-akşam-gece eşdeğer sürekli ses basınç seviyesi (L_{eq}) ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sırasında araç sayımı yapılmıştır. Ölçümlerde; mikrofona mesafesi zeminden 1,5 m yükseklikte, karayoluna çevrilmiş ve yolun orta aksından 7,5 m uzaklıkta konumlandırılmıştır (Şekil 4).

Çevresel Gürültü Düzeyi Ölçümleri-1 (Mayıs 2016)

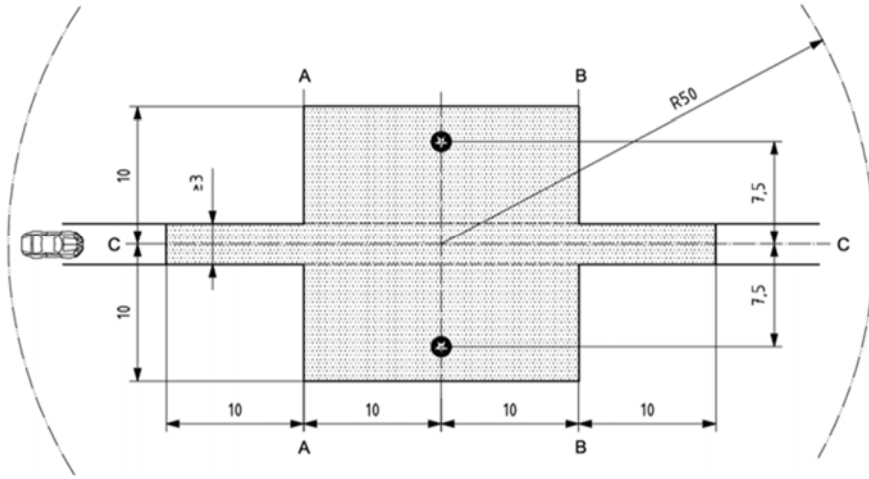
17 Mayıs 2016 Salı günü, gürültüye hassas alanlar dikkate alınarak, Bölge 3'te yer alan 2 noktada (9. ve 10. noktalar) gündüz-akşam-gece ölçümleri her saatte bir 5 dakikalık ölçümler şeklinde yapılmıştır (Şekil 3, Tablo 3, Tablo 4, Tablo 5, Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7).



Şekil 2. Celal Bayar Bulvarı üzerinde yer alan bölgeleme ve ölçüm noktaları çalışması (Zoning and measurement points study on Celal Bayar Boulevard)



Şekil 3. Celal Bayar Bulvarı'ndan fotoğraflar (Photos from Celal Bayar Boulevard)



Şekil 4. TS ISO 362-1 [65]

Tablo 3. Celal Bayar Bulvarı üzerinde Mayıs 2016 tarihinde yapılan ölçümler sırasındaki araç sayımları –Gündüz (saatlik)
(Vehicle counts during the measurements made on Celal Bayar Boulevard in May 2016 - Daytime (hourly))

GÜNDÜZ (saatlik) 17 Mayıs 2016		Ön şerit			Sıcaklık ve Rüzgâr	Arka şerit			L _{eq} (dBA)	Gürültü notları
Zaman dilimi	Nokta	Hafif araç sayısı (<3500 kg)	Ağır araç sayısı (>3500 kg)	Ağır araç oranı		Hafif araç sayısı (<3500 kg)	Ağır araç sayısı (>3500 kg)	Ağır araç oranı		
08.00	9	3084	360	10	-	2652	876	25	78,9	Tren geçişi
09.00	10	2988	648	18	-	2664	456	15	77,6	
09.00	9	3156	660	17	-	2976	432	13	75,5	
10.00	10	3516	372	10	-	2220	432	16	74,2	
10.00	9	2640	300	10	22.8°C	1836	420	19	77,1	Temizlik aracı geçişi
11.00	10	3300	300	8	25.2°C	2100	348	14	74,3	
11.00	9	1956	192	9	25.7°C	2088	396	16	73,2	
12.00	10	1896	216	10	26.4°C	2172	300	12	73,2	
12.00	9	2148	192	8	25.4°C	2004	444	18	77,0	
13.00	10	1956	144	7	2.3 m/sn 26.8°C	2184	360	14	73,5	
13:00	9	2184	168	7	26.8°C	2712	360	12	77,3	
14:00	10	2508	204	8	-	2616	420	14	72,8	Tren geçişi
14:00	9	2340	276	11	-	2544	360	12	78,4	
15:00	10	1980	240	11	27.5°C	2508	348	12	73,1	
16:00	9	2340	336	13	26.8°C	2976	384	11	74,7	
17:00	10	2568	372	13	26.6°C	3420	708	17	73,0	
17:00	9	2652	324	11	27.7°C	3084	444	13	75,3	
18:00	10	2460	372	13	-	2940	336	10	72,3	
18:00	9	2316	348	13	25.8°C	3228	504	14	74,0	
17:00										Kara tren geçişi 10 sn geçiş sürecinde 2 dBA değişim
18:00	10	2376	132	5	-	3000	504	14	76,7	
*18:00	9	2412	396	14	-	2544	420	14	73,5	
19:00	10	2700	348	11	-	2928	468	14	72,9	
*18:00	9	2088	324	13	24.0°C	3120	408	12	71,3	
19:00	10	2580	264	9	25.1°C	2796	696	20	72,3	

*İş saati çıkışı olduğundan dolayı 18.00-19.00 saatleri arasında 2 ölçüm gerçekleştirilmiş ve araç sayımı yapılmıştır.

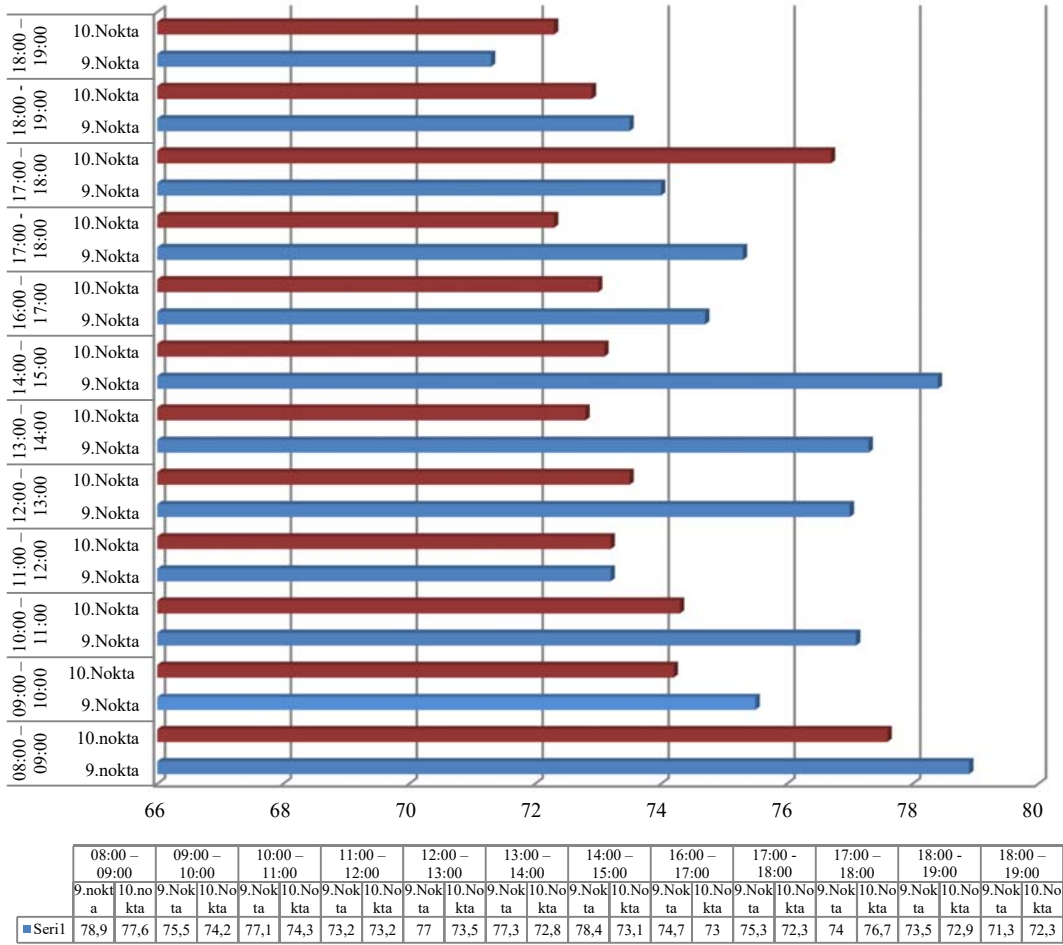
Tablo 4. Celal Bayar Bulvarı üzerinde Mayıs 2016 tarihinde yapılan ölçümler sırasındaki araç sayımları –Akşam (saatlik)
(Vehicle counts during the measurements made on Celal Bayar Boulevard in May 2016 - Evening (hourly))

AKŞAM (saatlik) 17 Mayıs 2016		Ön şerit			Sıcaklık ve Rüzgâr	Arka şerit			L _{eq} (dBA)	Gürültü notları
Zaman dilimi	Nokta	Hafif araç sayısı (< 3500 kg)	Ağır araç sayısı (> 3500 kg)	Ağır araç oranı		Hafif araç sayısı (< 3500 kg)	Ağır araç sayısı (> 3500 kg)	Ağır araç oranı		
19:00	9	1560	156	9	20.3°C 2.2 m/sn	1812	240	12	76,7	
20:00	10	1764	144	8	-	1824	276	13	79,4	2 kez siren çalan tren etkili
20:00	9	1704	144	8	18.9°C 2.0 m/sn	1620	216	12	78,0	
21:00	10	1764	156	8	19.1°C 1.9 m/sn	1524	336	18	77,3	1 adet fren yapan, 1 adet ray sesi etkili tren
21:00	9	1224	84	6	-	1092	84	7	77,5	
22:00	10	1200	48	4	19.2°C	1272	72	5	78,1	
22:00	9	924	84	8	16.5°C	1188	144	11	76,5	Ray sesi etkili tren
23:00	10	936	60	6	17.1°C	1068	132	11	76,3	

Tablo 5. Celal Bayar Bulvarı üzerinde Mayıs 2016 tarihinde yapılan ölçümler sırasındaki araç sayımları –Gece (saatlik)
(Vehicle counts during the measurements made on Celal Bayar Boulevard in May 2016 - Night (hourly))

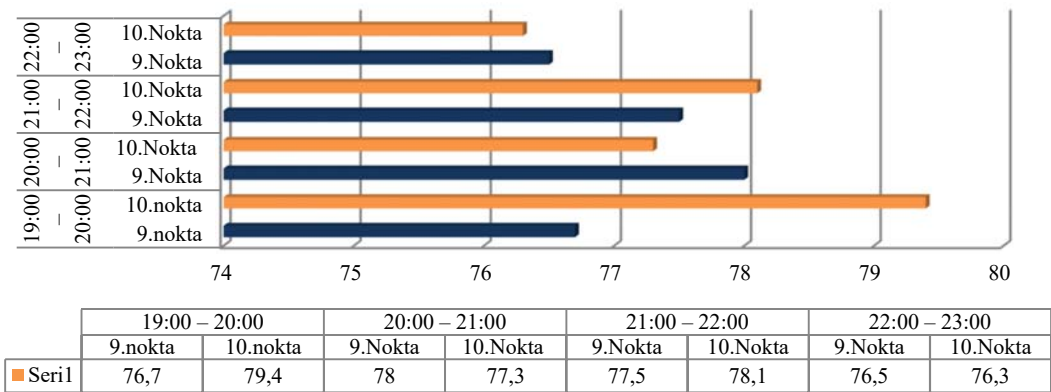
GECE (saatlik) 17 Mayıs 2016		Ön şerit			Sıcaklık ve Rüzgâr	Arka şerit			L _{eq} (dBA)	Gürültü notları
Zaman dilimi	Nokta	Hafif araç sayısı (< 3500 kg)	Ağır araç sayısı (> 3500 kg)	Ağır araç oranı		Hafif araç sayısı (< 3500 kg)	Ağır araç sayısı (> 3500 kg)	Ağır araç oranı		
23:00	9	708	36	5	-	840	60	7	75,8	
23:30	10	720	24	3	17°C	936	36	4	76,2	
23:30	9	684	12	2	16.2°C	780	36	4	76,1	
00:00	10	660	36	5	-	588	24	4	75,7	
00:00	9	720	24	3	16.4°C	516	24	4	76,2	2 kez tren geçişi- etkisiz
00:30	10	576	24	4	-	516	24	4	75,1	
00:30	9	612	24	4	-	444	0	0	74,5	1 kez tren geçti
01:00	10	720	60	8	15.5°C	696	12	2	76,9	Hızları fazla olan 2 kamyon geçişi
01:00	9	504	12	2	15.0°C	648	36	4	73,4	
01:30	10	432	72	14	-	516	0	0	74,1	
01:30	9	408	36	8	14.8°C	588	0	0	73,1	
02:00	10	444	36	8	14.5°C 1.2 m/sn	324	36	7	72,1	

L_{eq} - Gündüz



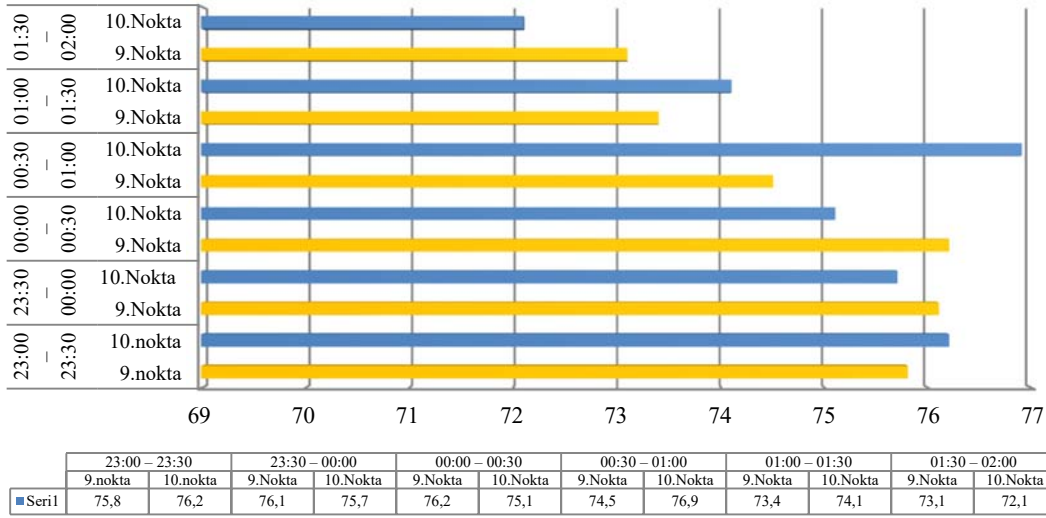
Şekil 5. Celal Bayar Bulvarı üzerinde Mayıs 2016 tarihinde yapılan ölçüm sonuçları-Gündüz (Measurement results made on Celal Bayar Boulevard in May 2016 – Daytime)

L_{eq} - Akşam



Şekil 6. Celal Bayar Bulvarı üzerinde Mayıs 2016 tarihinde yapılan ölçüm sonuçları-Akşam (Measurement results made on Celal Bayar Boulevard in May 2016-Evening)

Leq- Gece



Şekil 7. Celal Bayar Bulvarı üzerinde Mayıs 2016 tarihinde yapılan ölçüm sonuçları-Gece (Measurement results made on Celal Bayar Boulevard in May 2016-Night)

Tablo 6. Celal Bayar Bulvarı üzerinde yapılan ölçüm analizleri-Gündüz (saatlik) (Measurement analysis on Celal Bayar Boulevard - Daytime (hourly))

GÜNDÜZ (saatlik) 16 Mayıs 2017		Ön şerit			Sıcaklık ve Rüzgâr	Arka şerit			L _{eq} (dBA)	Gürültü notları
Zaman dilimi	Nokta	Hafif araç sayısı (<3500 kg)	Ağır araç sayısı (>3500 kg)	Ağır araç oranı		Hafif araç sayısı (<3500 kg)	Ağır araç sayısı (>3500 kg)	Ağır araç oranı		
08.00 09.00	9	504	108	18	-	348	252	42	71,2	
	10	2940	468	14	-	2544	624	20	73,4	
09.00 10.00	9	636	48	7	21.3°C 1.5 m/sn	264	300	53	70,4	
	10	2196	180	8	-	1872	516	22	72,1	
10.00 11.00	9	360	156	30	22.6°C 1.5 m/sn	216	300	58	71,9	
	10	2076	252	11	-	2448	360	13	72,4	
11.00 12.00	9	228	108	32	-	48	312	87	70,0	
	10	1620	228	12	-	1872	468	20	72,7	3 kez iş makinesi çalıştı
12.00 13.00	9	204	108	35	23.8°C 1.4 m/sn	156	228	59	68,5	
	10	1776	228	11	-	1584	468	23	72,4	2 kez iş makinesi çalıştı
13:00 14:00	9	300	84	22	-	228	300	57	70,5	1 kez iş makinesi çalıştı
	10	1860	240	11	-	1944	348	15	72,0	1 kez iş makinesi çalıştı
14:00 15:00	9	372	108	23	-	204	180	47	70,8	
	10	2112	264	11	-	1824	492	21	73,5	1 kez iş makinesi çalıştı
16:00 17:00	9	396	132	25	-	204	192	48	69,7	
	10	2232	288	11	-	2448	576	19	74,1	
17:00 18:00	9	372	96	21	26.1°C 1.0 m/sn	180	216	55	69,2	
	10	2064	420	17	-	2376	624	21	73,7	2 kez iş makinesi çalıştı
17:00 18:00	9	444	60	12	-	132	264	67	69,4	
	10	2328	420	15	-	2064	564	21	72,5	
*18:00 19:00	9	420	108	20	-	216	252	54	71,4	
	10	2076	444	18	22.3°C	2268	408	15	75,1	1 kez iş makinesi çalıştı
*18:00 19:00	9	300	72	19	19.8°C 1.8 m/sn	108	156	59	70,8	1 kez iş makinesi çalıştı
	10	2652	336	11	-	1992	504	20	72,6	

* İş saati çıkışı olduğundan dolayı 18.00-19.00 saatleri arasında 2 ölçüm gerçekleştirilmiş ve araç sayımı yapılmıştır.

Çevresel Gürültü Düzeyi Ölçümleri-2 (Mayıs 2017) 16 Mayıs 2017 Salı günü, gürültüye hassas alanlar dikkate alınarak, Bölge 3'te yer alan 2 noktada (9. ve 10. noktalar) gündüz-akşam-gece ölçümleri her saatte bir 5 dakikalık ölçümler şeklinde yapılmıştır (Şekil 3, Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8, Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10). Ölçümler sırasındaki araç sayımlarının karşılaştırılması Yapılan ölçümler

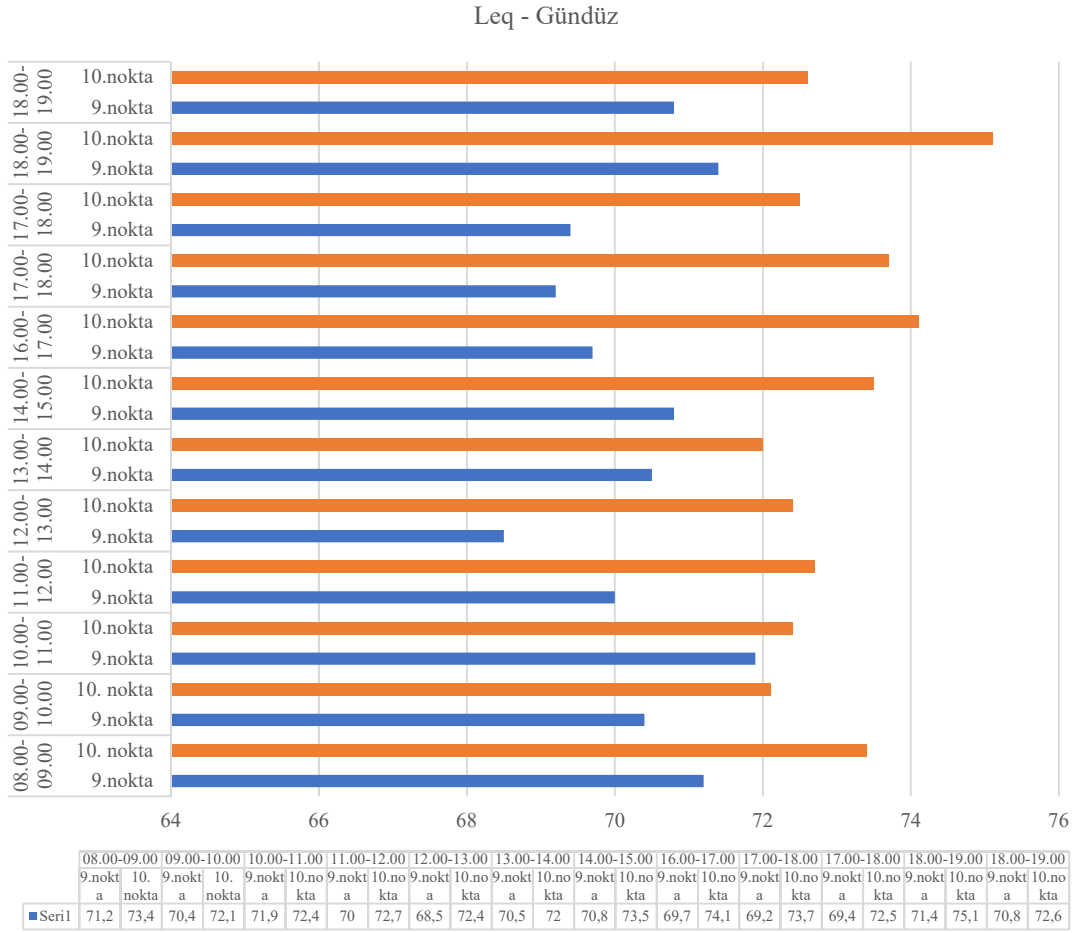
sırasında gerçekleştirilen araç sayım sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 9 ve Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13'de verilmiştir. Ölçümlerin karşılaştırması Alt geçit öncesi (Mayıs 2016) ve alt geçit sonrası (Mayıs 2017) yapılan mevcut durum ölçümlerinin sonuçları tablo 10, ölçüm farkları tablo 11'de, karşılaştırma grafikleri ise Şekil 14, Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17'de verilmiştir.

Tablo 7. Celal Bayar Bulvarı üzerinde yapılan ölçüm analizleri–Akşam (saatlik)
(Measurement analysis on Celal Bayar Boulevard - Evening (hourly))

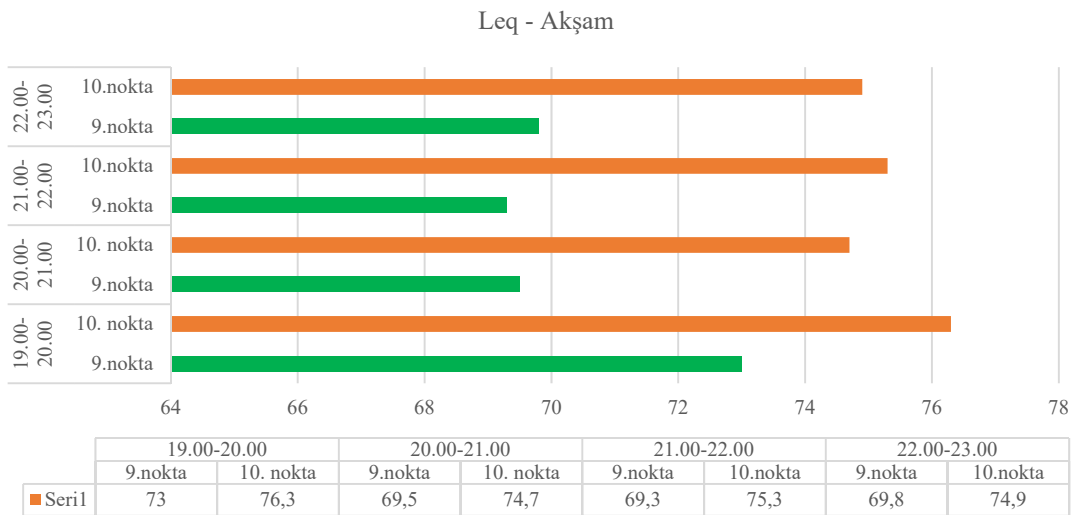
AKŞAM (saatlik) 16 Mayıs 2017		Ön şerit			Sıcaklık ve Rüzgar	Arka şerit			L _{eq} (dBA)	Gürültü notları
Zaman dilimi	Nokta	Hafif araç sayısı (<3500 kg)	Ağır araç sayısı (>3500 kg)	Ağır araç oranı		Hafif araç sayısı (<3500 kg)	Ağır araç sayısı (>3500 kg)	Ağır araç oranı		
19:00	9	312	60	16	-	156	192	55	73,0	1 kez iş makinesi çalıştı
20:00	10	1908	180	9	-	1824	456	20	76,3	
20:00	9	108	48	31	18.4°C	108	192	64	69,5	1 kez iş makinesi çalıştı
21:00	10	1452	96	6	-	1476	264	15	74,7	
21:00	9	84	12	13	-	108	168	61	69,3	
22:00	10	1092	96	8	-	1188	216	15	75,3	
22:00	9	108	36	25	17.4°C	48	48	50	69,8	
23:00	10	1104	108	9	-	972	120	11	74,9	

Tablo 8. Celal Bayar Bulvarı üzerinde yapılan ölçüm analizleri-Gece (saatlik)
(Measurement analysis on Celal Bayar Boulevard - Night (hourly))

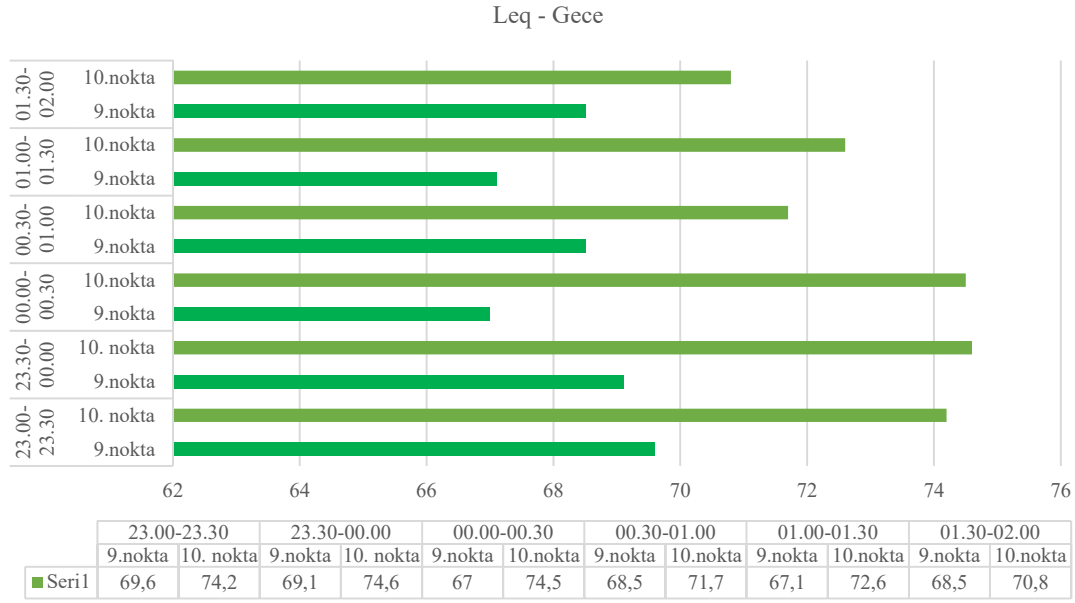
GECE (saatlik) 16 Mayıs 2017		Ön şerit			Sıcaklık ve Rüzgar	Arka şerit			L _{eq} (dBA)	Gürültü notları
Zaman dilimi	Nokta	Hafif araç sayısı (<3500 kg)	Ağır araç sayısı (>3500 kg)	Ağır araç oranı		Hafif araç sayısı (<3500 kg)	Ağır araç sayısı (>3500 kg)	Ağır araç oranı		
23:00	9	96	24	20	-	12	12	50	69,6	1 kez iş makinesi çalıştı
23:30	10	780	96	11	16.9°C	1020	72	7	74,2	
23:30	9	96	0	0	16.4°C	60	12	17	69,1	
00:00	10	612	48	7	-	696	60	8	74,6	
00:00	9	36	0	0	14.9°C	0	0	0	67,0	
00:30	10	528	72	12	1.2 m/sn	852	96	10	74,5	
00:30	9	48	0	0	14.6°C	12	0	0	68,5	
01:00	10	444	36	8	-	396	0	0	71,7	
01:00	9	36	0	0	-	24	0	0	67,1	
01:30	10	468	12	3	-	456	12	3	72,6	
01:30	9	48	0	0	-	0	0	0	68,5	
02:00	10	300	24	7	-	396	0	0	70,8	



Şekil 8. Celal Bayar Bulvarı üzerinde Mayıs 2017 tarihinde yapılan ölçüm sonuçları-Gündüz
(Measurement results made on Celal Bayar Boulevard in May 2017-Daytime)



Şekil 9. Celal Bayar Bulvarı üzerinde Mayıs 2017 tarihinde yapılan ölçüm sonuçları-Akşam
(Measurement results made on Celal Bayar Boulevard in May 2017-Evening)

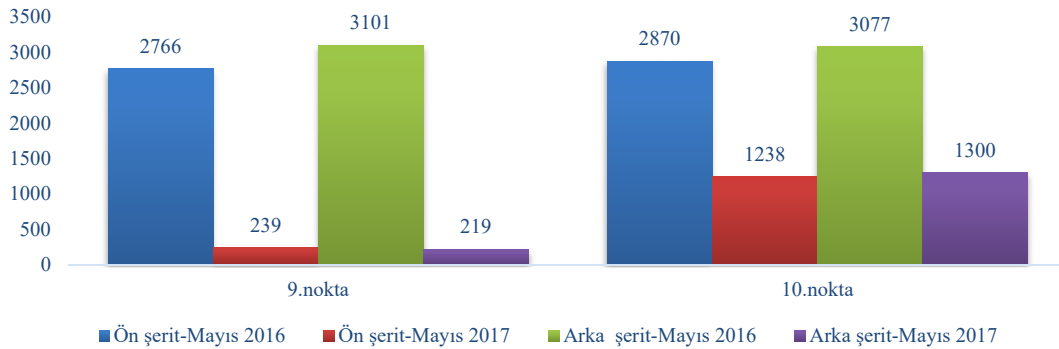


Şekil 10. Celal Bayar Bulvarı üzerinde Mayıs 2017 tarihinde yapılan ölçüm sonuçları-Gece
(Measurement results made on Celal Bayar Boulevard in May 2017-Night)

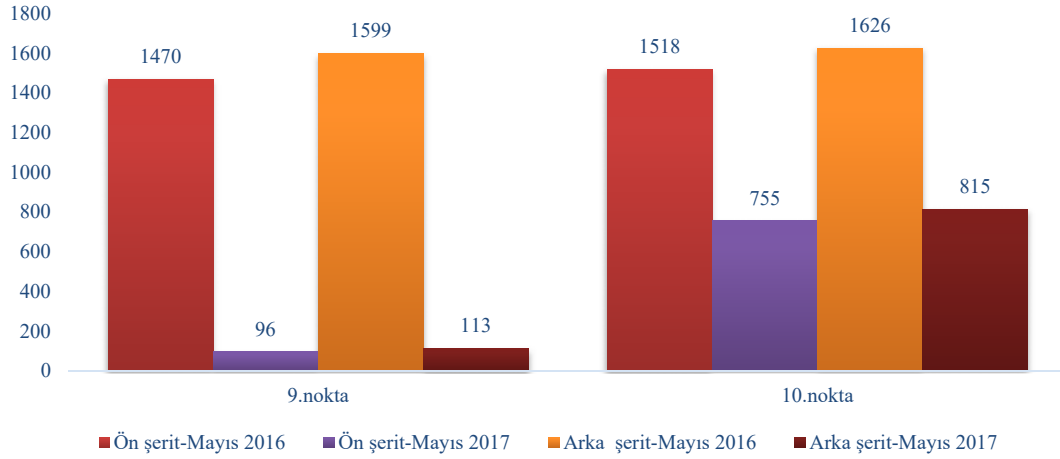
Tablo 9. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) yapılan ölçüm sırasındaki araç sayım değerleri
(Vehicle counting values during the measurement before underpass (2016) and after underpass (2017))

Mayıs 2016 (saatlik)	Ort Toplam Araç Sayısı				Ort Toplam Ağır Araç Oranı			
	Ön şerit		Arka şerit		Ön şerit		Arka şerit	
	9. nokta	10. nokta	9. nokta	10. nokta	9. nokta	10. nokta	9. nokta	10. nokta
Gündüz ort	2766	2870	3101	3077	11	10	15	14
Akşam ort	1470	1518	1599	1626	8	7	11	12
Gece ort	630	634	662	618	4	7	3	4

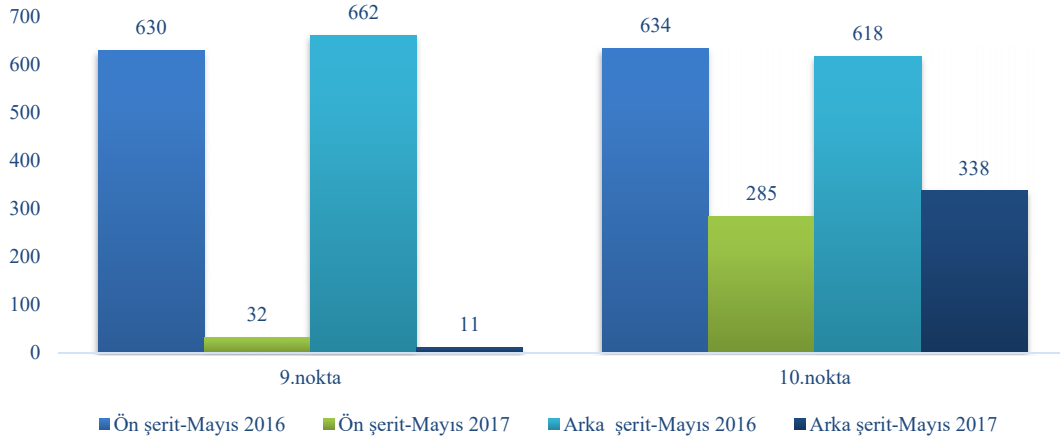
Mayıs 2017 (saatlik)	Ort Toplam Araç Sayısı				Ort Toplam Ağır Araç Oranı			
	Ön şerit		Arka şerit		Ön şerit		Arka şerit	
	9. nokta	10. nokta	9. nokta	10. nokta	9. nokta	10. nokta	9. nokta	10. nokta
Gündüz ort	239	1238	219	1300	22	13	57	19
Akşam ort	96	755	113	815	21	8	58	15
Gece ort	32	285	11	338	3	8	11	5



Şekil 11. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) yapılan gündüz araç sayım karşılaştırması
(Vehicle count comparison at daytime before underpass (2016) and after underpass (2017))



Şekil 12. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) yapılan *akşam* araç sayım karşılaştırması (Vehicle count comparison at evening before underpass (2016) and after underpass (2017))



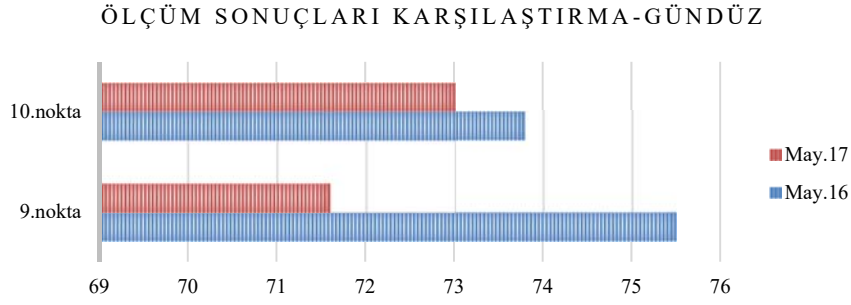
Şekil 13. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) yapılan *gece* araç sayım karşılaştırması (Vehicle count comparison at night before underpass (2016) and after underpass (2017))

Tablo 10. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) mevcut durum ölçüm sonuçları - L_{eq} (Baseline measurement results before underpass (2016) and after underpass (2017) - L_{eq})

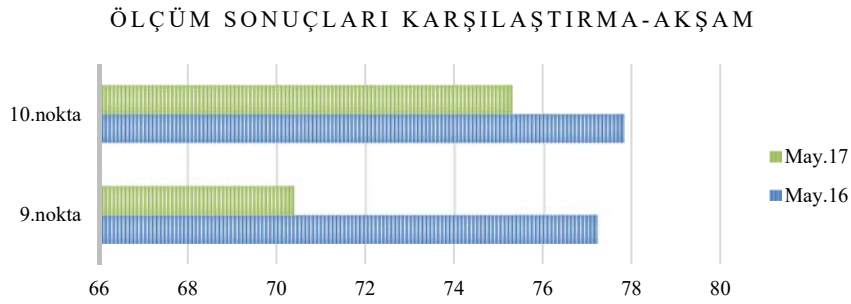
Mayıs 2016	Noktalar	Gündüz (dBA)	Akşam (dBA)	Gece (dBA)	L_{gag} (dBA)
Mevcut durum ölçüm sonuçları [Leq]	9.nokta	75,5	77,2	74,9	81,7
	10.nokta	73,8	77,8	75,0	81,7
Mayıs 2017	Noktalar	Gündüz (dBA)	Akşam (dBA)	Gece (dBA)	L_{gag} (dBA)
Mevcut durum ölçüm sonuçları [Leq]	9.nokta	71,6	70,4	68,3	75,5
	10.nokta	73,0	75,3	73,1	79,8

Tablo 11. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) yapılan ölçüm sonuçları farkları - L_{eq} (Differences in measurement results before underpass (2016) and after underpass (2017) - L_{eq})

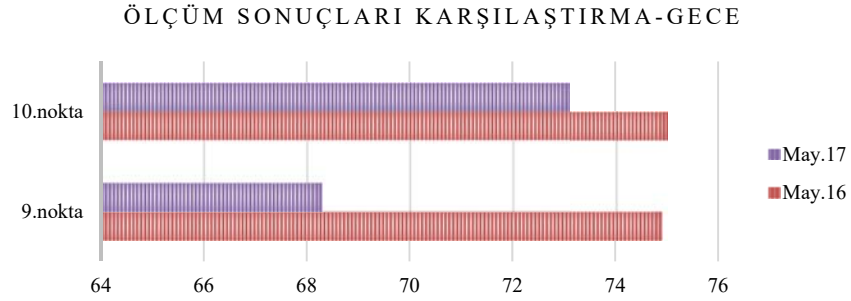
Farklar	Noktalar	Gündüz (dBA)	Akşam (dBA)	Gece (dBA)	L_{gag} (dBA)
	9.nokta	3,9	6,8	6,6	6,2
	10.nokta	0,8	2,5	1,9	1,9



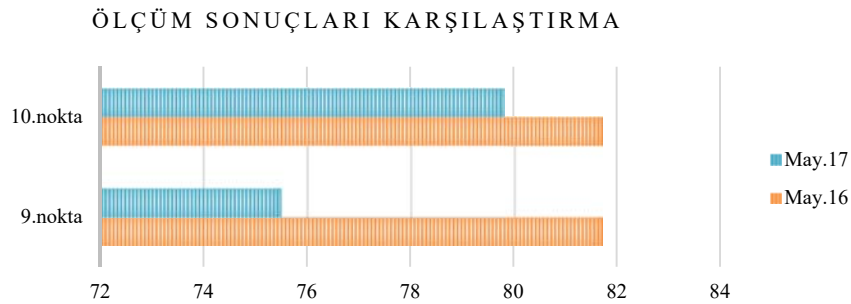
Şekil 14. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) yapılan *gündüz* ölçüm sonuçları karşılaştırması
(Comparison of daytime measurement results before underpass (2016) and after underpass (2017))



Şekil 15. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) yapılan *akşam* ölçüm sonuçları karşılaştırması
(Comparison of evening measurement results before underpass (2016) and after underpass (2017))



Şekil 16. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) yapılan *gece* ölçüm sonuçları karşılaştırması
(Comparison of night measurement results before underpass (2016) and after underpass (2017))



Şekil 17. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) L_{gag} hesaplama sonuçları karşılaştırması
(Comparison of L_{gag} calculation results before underpass (2016) and after underpass (2017))

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışmada; Celal Bayar Bulvarı'nın mevcut durum alan ölçümleri aracılığı ile eski ve yeni düzenlemesi arasındaki fark ortaya konularak, trafik gürültüsünün analizi yapılmıştır. Belirtilen çalışma alanında; 2016 yılına kadar alt geçit olmadan kullanım mevcuttur. Yapılan yeni düzenlemeler ışığında (2017 yılında), belirli zamanlarda, mevzuatlara uygun olarak çevresel gürültü ölçümleri ($L_{gündüz}$, $L_{akşam}$, L_{gece}) yapılmış, araç sayımları gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler ile hesaplamalar (L_{gag}) yapılmıştır. Bu bağlamda, karayolunun alt geçit uygulama öncesi (Mayıs 2016) ve sonrası (Mayıs 2017) yapılan mevcut durum çevresel gürültü ölçümleri bağlamında (eşdeğer sürekli ses basınç seviyesi- L_{eq}); değerlendirilerek analiz edilmiştir. Bölgeleme çalışması ile 6 bölgeye ayrılan çalışma alanı içindeki Bölge 3 içerisinde; kültürel tesislerin yer alması (hassasiyet I) nedeni ile Mayıs 2016 ve Mayıs 2017 tarihlerinde 2 noktada yapılan (9. ve 10. noktalar) tekrar ve karşılaştırma ölçümleri bu bölgedeki noktalar için değerlendirilmiştir.

Tablo 12. Mayıs 2016 gündüz ölçüm sonuçlarına göre (According to the daytime measurement results of May 2016)

Konum	En düşük	En yüksek	Sınır değer
9. nokta	$L_{eq} = 71,3$ dBA	$L_{eq} = 78,9$ dBA	65 dBA
10. nokta	$L_{eq} = 72,3$ dBA	$L_{eq} = 77,6$ dBA	65 dBA

Tablo 13. Mayıs 2016 akşam ölçüm sonuçlarına göre (According to the evening measurement results of May 2016)

Konum	En düşük	En yüksek	Sınır değer
9. nokta	$L_{eq} = 76,5$ dBA	$L_{eq} = 78,0$ dBA	60 dBA
10. nokta	$L_{eq} = 76,3$ dBA	$L_{eq} = 79,4$ dBA	60 dBA

Tablo 14. Mayıs 2016 gece ölçüm sonuçlarına göre (According to the night measurement results of May 2016)

Konum	En düşük	En yüksek	Sınır değer
9. nokta	$L_{eq} = 73,1$ dBA	$L_{eq} = 76,2$ dBA	55 dBA
10. nokta	$L_{eq} = 72,1$ dBA	$L_{eq} = 76,9$ dBA	55 dBA

Celal Bayar Bulvarı'nın Mayıs 2016 yılında, alt geçit uygulaması yapılmadan önce gündüz, akşam ve gece ölçümlerinin 70 dBA'nın üzerinde olduğu, ÇGDYY'de belirtilen $L_{gündüz} < 65$ dBA değerini aştığı tespit edilmiştir.

Tablo 15. Mayıs 2017 gündüz ölçüm sonuçlarına göre (According to the daytime measurement results of May 2017)

Konum	En düşük	En yüksek	Sınır değer
9. nokta	$L_{eq} = 68,5$ dBA	$L_{eq} = 71,9$ dBA	65 dBA
10. nokta	$L_{eq} = 72,0$ dBA	$L_{eq} = 75,1$ dBA	65 dBA

Tablo 18. Alt geçit öncesi (2016) ve alt geçit sonrası (2017) araç sayıları farkları (Differences in vehicle numbers before underpass (2016) and after underpass (2017))

	Toplam Araç Sayısı					
	Mayıs 2016		Mayıs 2017		Farklar	
	9. nokta	10. nokta	9. nokta	10. nokta	9. nokta	10. nokta
Gündüz	5636	5947	458	2538	5178	3409
Akşam	3069	3144	209	1570	2860	1574
Gece	1292	1252	43	623	1249	629

Tablo 16. Mayıs 2017 akşam ölçüm sonuçlarına göre (According to the evening measurement results of May 2017)

Konum	En düşük	En yüksek	Sınır değer
9. nokta	$L_{eq} = 69,3$ dBA	$L_{eq} = 73,0$ dBA	60 dBA
10. nokta	$L_{eq} = 74,7$ dBA	$L_{eq} = 76,3$ dBA	60 dBA

Tablo 17. Mayıs 2017 gece ölçüm sonuçlarına göre (According to the night measurement results of May 2017)

Konum	En düşük	En yüksek	Sınır değer
9. nokta	$L_{eq} = 67,0$ dBA	$L_{eq} = 69,6$ dBA	55 dBA
10. nokta	$L_{eq} = 70,8$ dBA	$L_{eq} = 74,6$ dBA	55 dBA

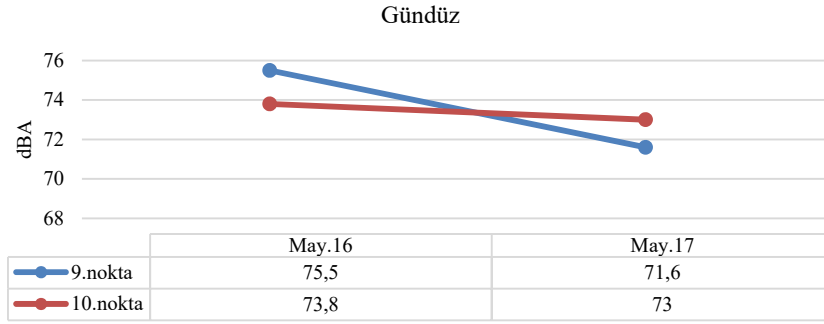
Celal Bayar Bulvarı'nın Mayıs 2017 yılında, alt geçit uygulaması yapıldıktan sonra gündüz, akşam ve gece ölçümlerinin 65 dBA'nın üzerinde olduğu, ÇGDYY'de belirtilen $L_{gündüz} < 65$ dBA değerini aştığı tespit edilmiştir.

Yapılan ölçümler sonucunda Celal Bayar Bulvarı üzerinde karayolu çevresel gürültü düzeyinin, sınır değerlerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Çalışma alanı içerisinde yer alan karayolu trafik gürültüsünün demiryolu trafik gürültüsüne baskın olduğu da belirlenmiştir. Özellikle gece saatlerinde ve trenlerin özelliklerine göre (siren çalma, fren yapma vb.), eşdeğer sürekli ses basınç seviyesinde etkililik olabilmektedir.

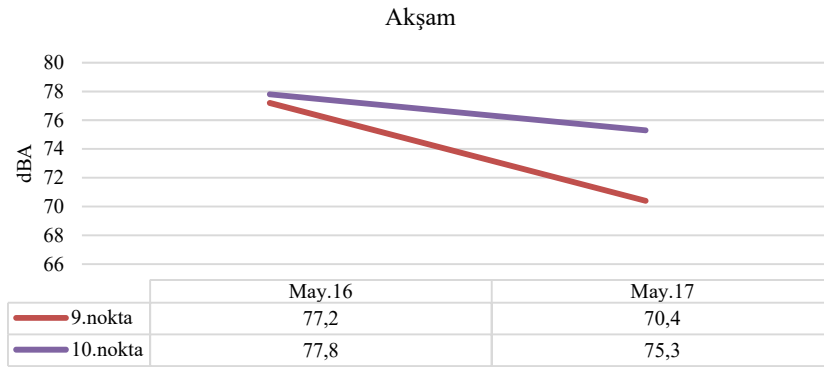
Mayıs 2016 ölçümleri sırasında yapılan sözlü görüşmeler sonucunda; Celal Bayar Bulvarı kullanıcılarının karayolu trafik gürültüsünün çok farkında olmadıkları anlaşılmıştır. Görüşmeler sırasında gürültüden kaynaklanan anlayamama ve anlaşılma (konuşmanın anlaşılabilirliği) durumundan sonra, farkındalık derecelerinin arttığı gözlenmiştir. Karayolu üzerinde yaya kaldırım güzergâhında devam eden yolculuklar sırasında, konuşmanın anlaşılabilirliği oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde telefon görüşmesi yapabilmek imkânsız durumdaydı. Fakat Mayıs 2017 ölçümleri sırasında konuşmanın anlaşılabilirliğinin fark edilir düzeyde arttığı belirlenmiştir.

9. noktadaki eşdeğer sürekli ses seviyesinin 10. noktaya göre alt geçit yapıldıktan sonra azaldığı gözlenmiştir. Bu durum 10. noktanın alt geçitten sonra olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

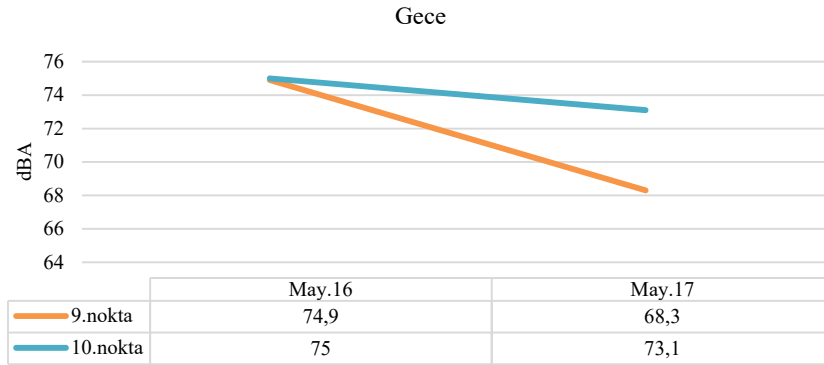
Tablo 18'e bakıldığında; alt geçit öncesinde ve sonrasındaki elde edilen verilerde, araç sayısı farklarının oldukça düştüğü belirlenmiştir. 9. noktadaki farklar, 10. noktadaki farklara göre daha fazladır. Bu fark 9. noktanın alt geçit hizasında kalmasından kaynaklanmaktadır. Sözü edilen farklar gündüzden, akşam ve geceye doğru azalmaktadır.



Şekil 18. Mayıs 2016 ve Mayıs 2017 tarihlerindeki ölçüm sonuçları karşılaştırması (Gündüz) - L_{eq}
(Comparison of measurement results for May 2016 and May 2017 (Day) – L_{eq})



Şekil 19. Mayıs 2016 ve Mayıs 2017 tarihlerindeki ölçüm sonuçları karşılaştırması (Akşam) - L_{eq}
(Comparison of measurement results for May 2016 and May 2017 (Evening) – L_{eq})



Şekil 20. Mayıs 2016 ve Mayıs 2017 tarihlerindeki ölçüm sonuçları karşılaştırması (Gece) - L_{eq}
(Comparison of measurement results for May 2016 and May 2017 (Night) – L_{eq})

2016 ve 2017 yılı ölçüm sonuçlarına göre; gündüz 10. noktada neredeyse fark yokken (fark 0,3 dBA), 9. noktada 4 dBA'lık fark oluşmuştur. Akşam ve gece ölçümlerinde, 10. noktada yaklaşık 2 dBA'lık fark varken, 9. noktada 6-7 dBA'lık fark olduğu belirlenmiştir.

Gündüz, akşam ve gece grafiklerinde görüldüğü gibi; 9. noktanın eşdeğer sürekli ses basınç seviyesi eğrisinin düşey yönde bir azalma sağladığı, 10. noktanın genelde yatayda

kaldığı ve azalmanın 9. noktaya göre az olduğu görülmektedir. Bu durum 10. noktanın alt geçitten sonra olmasından kaynaklanmaktadır. 10. nokta alt geçitten 9. noktaya göre daha az etkilenmiştir.

İki ayrı zamanda yapılan ölçümler sonucundaki *farklar*;

- 9. nokta için gündüz; 3,9 dBA, akşam; 6,8 dBA, gece; 6,6 dBA, L_{gag} ; 6,2 dBA,

- 10. nokta için gündüz; 0,8 dBA, akşam; 2,5 dBA, gece; 1,9 dBA, L_{gag} ; 1,9 dBA

olarak belirlenmiştir.

Bu durum, alt geçit kullanımının belirgin olarak, gürültü kontrolü açısından avantaj oluşturduğunu göstermektedir. Ancak, yapılan mevcut durum ölçümleri sonucunda, her iki zaman diliminde de (2016 ve 2017) Celal Bayar Bulvarı üzerinde karayolu çevresel gürültü düzeyinin, ölçüm yapılan noktalar için, sınır değerlerin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda çalışmaya söz konusu olan bölgede, karayolu çevresel gürültü düzeyinin, istenen sınır değerlere çekilebilmesi için yapay bariyer yapımı (cam gürültü bariyerleri) önerilebilir. Fakat maliyet ve estetik açıdan tercih edilmeyeceği düşünülen yapay bariyer uygulamasına karşı, mali kaygının olmayacağı, daha yeşil ve sağlıklı bir çevre tasarımına yönelik olarak düşünülen; büyük, güçlü, sert yapıya sahip, yaprakları birbirini örtecek şekilde, sık yapraklı ve dal dokusu olan, uzun, sık dallanan ve her zaman yeşil olan doğal bariyerlerin (gürültüyü absorbe edecek bitki ve ağaç dikiminin fazlaştırılması) yapılması önerilmektedir. Bunun yanında bitkisel materyal ile gürültü bariyerinin birlikte kullanımına yönelik çalışmalar ışığında uygulamaların simülasyon programı üzerinden yapılabileceği de öngörülmektedir.

Ölçümler sırasında iş makinesi geçişlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum eşdeğer sürekli ses basınç seviyesini etkilemektedir. İş makinesi çalışma durumlarının belirlenen saatler içerisinde yapılması, Celal Bayar Bulvarı güzergâhına uygun yeni yol önerileri getirilerek, araç yoğunluğunu azaltmakta gürültü seviyesinde azalmayı sağlayabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma sırasında teknik desteğini esirgemeyen Ankara Büyükşehir Belediyesi'ne, Sağlık İşleri Daire Başkanlığı, Sağlık Hizmetleri Şube Müdürlüğü Gürültü Kontrol Şefliği ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ertorun, H., Gürültü Haritalamada Türkiye'deki Mevcut Durum, 9.Ulusal Akustik Kongresi, Ankara, 11-19, 2011.
2. Bakırcı, E., Çalışkan, M., Karayolundan Yayılan Çevresel Gürültünün Haritalanması ve Binaların Dış Cephesine Etkisinin Belirlenmesi, 9. Ulusal Akustik Kongresi, 182-190, 2011.
3. Toprak, R., Raylı Ulaşım Sistemlerinde Oluşan Gürültünün Ölçülmesi ve Modellenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2001.
4. Selimoğlu, B., Ülkemiz otoyollarında çevre düzenleme ilkelerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1994.

5. Aydın, M.E., Ateş, N., Konya'da trafik gürültüsü ve bazı öneriler. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3 (3), 447-456, 1997.
6. Kotzen, B., English, C., Environmental noise barriers: A guide to their acoustic and visual desing, New York: E&FN Spon, 1999.
7. Gürpınar, M., Çevresel ulaşım gürültüsünün trafik planlaması yönünden İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001.
8. Özenç, R.F., Atatürk havalimanının neden olduğu çevresel gürültünün modellenmesi ve kontrolü. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001.
9. Yüğrük Akdağ, N., Kent planlamada gürültü haritalarının önemi: Barbaros Bulvarı çevresi örneği. Mimarlık, 312, 2003.
10. Aktürk N., Toprak R., Asiloğulları E., Environmental noise caused by high speed rail transportation system, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 18 (3), 15-25, 2003.
11. Aktürk N., Akdemir O., Üzkurt İ., Environmental vehicle noise caused by traffic light times, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 18 (1), 71-87, 2003.
12. Özen, M., Karayolu kaynaklı çevresel trafik gürültüsünün modellenmesi ve gürültü tahminleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
13. Pamanikabud P., Tansatcha M., Geographical information system for traffic noise analysis and forecasting with the appearance of barriers. Environmental Modelling & Software, 18, 959-973, 2003.
14. Calixto, A., Diniz, F.B., Zannin, P.H.T., The statistical modeling of road traffic noise in an urban setting. Cities, 20 (1), 23-29, 2003.
15. Ramis, J., Alba, J., Garcia, D., Hernandez, F., Noise effects of reducing traffic flow through a Spanish city. Applied Acoustics, 64, 343-364, 2003.
16. Üzkurt, İ., Ulaşım gürültüsünün çevresel etkileri. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004.
17. İşler, E., Yüğrük, Akdağ, N., Gürültünün denetlenmesinde engellerin etkinliği: Bağdat caddesi örneği. 7. Ulusal Akustik Kongresi, 72-80, 2004.
18. Ishizuka T., Fujiwara K., Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions. Applied Acoustics, 65, 125-141, 2004.
19. Ripoll, A., State of the art of noise mapping in Europe, european topic centre terrestrial environment, Internal Report. Barcelona-Spain.,1-65, 2005.
20. Dursun, Ş., Özdemir, C., Karabörk, H., Koçak, S., Noise pollution and map of Konya city in Turkey. Journal of International Environmental Application & Science, 1 (1-2), 63-72, 2006.
21. McCallum-Clark, M., Incite, R.H., Hunt, M., Transportation and noise: land use planning options for

- a quieter New Zealand. Land Transport New Zealand Research Report 299. New Zealand. 1-148, 2006.
22. Öztürk, İ., Çevresel gürültüsü analizleri ve İstanbul'da seçilen bir pilot bölgede gürültü haritasının elde edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
 23. Hankard, M., Cerjan, J., Leasure, J., Evaluation of the fhwa traffic noise model (tnm) for highway traffic noise prediction in the state of Colorado. Colorado Department of Transportation Research Branch. Colorado.CDOT-2005-21, 2006.
 24. Langer, D. Mapping of road traffic noise in Adana, Internoise 2007 Congress, 223, 2007.
 25. Wiechers, G. Mapping of road traffic noise in İzmir, Turkey. Internoise 2007 Congress, 224, 2007.
 26. Çalış, M., Karayolu gürültüsü ve gürültü perdelerinin ekonomik analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
 27. Aşçıgil Dinçer, M., Karayolu gürültü haritalarının hazırlanması: İstanbul zircirlikuyu-maslak ulaşım hattı örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
 28. İlgürel, M.N., Sanayi yapılarının tasarımında gürültünün bir ölçüt olarak değerlendirilmesi için bir yöntem geliştirilmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
 29. Lam, K.C., Chan, P.K., Chan, T.C., Au, W.H., Hui, W.C., Annoyance response to mixed transportation noise in Hong Kong. Applied Acoustics, 70, 1-10, 2009.
 30. O'Malley, V., King, E., Kenny, L., Dilworth, C., Assessing methodologies for calculating road traffic noise levels in Ireland—Converting CRTN indicators to the EU indicators (Lden, Lnight). Applied Acoustics, 70, 284-296, 2009.
 31. Pamanikabud P., Tansatcha M., Geoinformatic prediction of motorway noise on buildings in 3D GIS, Transportation Research Part D, 14,367–372, 2009.
 32. Paunovic, K., Jakovljevic, B., Belojevic, G., Predictors of noise annoyance in Noisy and quiet urban streets. Science of the Total Environment, 407, 3707–3711, 2009.
 33. Murphy, E., King, E.A., Rice, H.J., Estimating human exposure to transport noise in central Dublin, Ireland. Environment International, 35, 298–302, 2009.
 34. Phan, H.Y.T., Yano, T., Sato, T., Nishimura, T., Characteristics of road traffic noise in Hanoi and Ho Chi Minh City, Vietnam. Applied Acoustics, 71, 479–485, 2010.
 35. Bıçakçı, T., Trafikten kaynaklanan çevresel gürültü haritaları ve Çukurova Üniversitesi kampüsü örneği. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2011.
 36. Özer, S.S., Yüğrük Akdağ, N., Bölge ve kent planlamada gürültünün tasarım ölçütü olarak değerlendirilmesinin önemi-İstanbul'dan örnekler. 9. Ulusal Akustik Kongresi, Ankara, 20-29, 2011.
 37. Clairbois, J.P., Road and rail barriers: from physics to implementation of effective and sustainable devices. 9. Ulusal Akustik Kongresi, Ankara, 1-10, 2011.
 38. Ko, J.H., Chang, S.I., Lee, B.C., Noise impact assessment by utilizing noise map and GIS: A case study in the city of Chungju, Republic of Korea. Applied Acoustics, 72, 544-550, 2011.
 39. Mioduszewski, P., Ejsmont, J.A., Grabowski, J., Karpinski, D., Noise map validation by continuous noise monitoring. Applied Acoustics, 72, 582-589, 2011.
 40. Berardi, U., Cirillo, E., Martellotta, F., Interference effects in field measurements of airborne sound insulation of building facades. Noise Control Engineering Journal, 59 (2), 2011.
 41. Çalış, M., Yonar, F., Trafik gürültüsünü azaltmak için kullanılan kaplama ve yüzey tabakaları üzerine bir araştırma. 9. Ulusal Akustik Kongresi, Ankara, 30-38, 2011.
 42. Öztürk, T., Öztürk, Z., Çalış, M., A case study on acoustic performance and construction costs of noise barriers. Scientific Research and Essays, 7 (50), 4213-4229, 2012.
 43. Barclay, M., Kang, J., Sharples, S., Combining noise mapping and ventilation performance for non-domestic buildings in an urban area. Building and Environment, 52, 68-76, 2012.
 44. Badino, A., Ascigil Dincer, M., Schenone, C., Yılmaz, S., Applicability of road traffic dose-effect relations to Turkish urban context. Internoise 2012 Congress, 804, 2012.
 45. Naish, D.A., Tan, A.C.C., Demirbilek, F.N., Estimating health related costs and savings from balcony acoustic design for road traffic noise. Applied Acoustics, 73, 497-507, 2012.
 46. Kurra, S., Dal, L., Sound insulation design by using noise maps. Building and Environment, 49, 291-303, 2012.
 47. Olayinka, O.S., Noise map: tool for abating noise pollution in urban areas, Open Access Scientific Reports, Nigeria., 1 (3), 1-7, 2012.
 48. Ramírez, A., Domínguez, E., Modeling urban traffic noise with stochastic and deterministic traffic models. Applied Acoustics, 74, 614–621, 2013.
 49. Zannin, P.H.T., Gama, L.V., Cunha, M.L., Damiani, M.B. vd., Noise mapping of an educational environment. Canadian Acoustics, 40 (1), 27, 2013.
 50. Dintrans, A., Prendez, M., A method of assessing measures to reduce road traffic noise: a case study in Santiago, Chile. Applied Acoustics, 74, 1486–1491, 2013.
 51. Vogiatzis, K., Remy, N., From environmental noise abatement to soundscape creation through strategic noise mapping in medium urban agglomerations in South Europe. Science of the Total Environment, 482-483, 420-431, 2014.
 52. Licitra, G., Ascari, E., Gden: An indicator for European noise maps comparison and to support action plans. Science of the Total Environment, 482-483, 411–419, 2014.
 53. D'Alessandro, F., Schiavoni, S., A review and comparative analysis of European priority indices for

- noise action plans. *Science of the Total Environment*, 518–519, 290–301, 2015.
54. Cai, M., Zou, J., Xie, J., Ma, X., Road traffic noise mapping in Guangzhou using GIS and GPS. *Applied Acoustics*, 87, 94-102, 2015.
 55. Aşçıgil Dinçer, M., Yılmaz, S., Modelling road traffic noise annoyance by listening tests. *İstanbul Teknik Üniversitesi A/Z dergisi*, 12 (3), 285-306, 2015.
 56. Zambon, G., Angelini, F., Benocci, R., Bisceglie, A., Dynamap: a new approach to real-time noise mapping. *EuroNoise 2015 Congress*, 1-6, 2015.
 57. Gonzalez, D.M., Morillas, J.M.B., Gozalo, G.R., The influence of microphone location on the results of urban noise measurements. *Applied Acoustics*, 90, 64-73, 2015.
 58. Ascari, E., Licitra, G., Luca, T., Cerchiai, M., Low frequency noise impact from road traffic according to different noise prediction methods. *Science of the Total Environment*, 505, 658-669, 2015.
 59. Fiedler, P.E.K., Zannin, P.H.T., Evaluation of noise pollution in urban traffic Hubs - Noise maps and measurements. *Environmental Impact Assessment Review*, 51, 1-9, 2015.
 60. Licitra, G., Fredianelli, L., Petri, D., Vigotti, M.A., Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas. *Science of The Total Environment*, 568, 1315–1325, 2016.
 61. Gozalo, G.R., Morillas, J.M.B., vd., Study on the relation between urban planning and noise level. *Applied Acoustics*, 111, 143–147, 2016.
 62. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete, Sayı: 30082, 2017.
 63. Türk Standartları Enstitüsü, TS ISO 1996-2, Akustik – Çevre Gürültüsünün Tanımı, Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi – Bölüm 2: Çevre Gürültü Seviyelerinin Tayini, 2009.
 64. Türk Standartları Enstitüsü, TS 9315 ISO 1996-1, Akustik – Çevre Gürültüsünün Tanımı, Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi – Bölüm 1: Temel Büyüklükler ve Değerlendirme İşlemleri, 2005.
 65. Türk Standartları Enstitüsü, TS ISO 362-2, Hızlanan Karayolu Taşıtları Tarafından Yayılan Gürültünün Ölçülmesi – Mühendislik Metodu – Bölüm 2: L Kategorisi, 2010.
 66. Özçetin, Z., Demirel, F., Trafik Kaynaklı Gürültünün Analizi, Çevresel Etkilerinin Araştırılması, Lambert Academic Publishing, 2017.



Execution technique and material characteristics of ceiling and wall paintings of an Ottoman period mansion in İzmir

Kerem Şerifaki*^{ID}, Başak İpekoğlu^{ID}

Department of Architectural Restoration, İzmir Institute of Technology, İzmir, 35430, Türkiye

Highlights:

- 19th century oil based wall paintings
- Materials of historic wall paints
- Pigment characterization

Keywords:

- Oil based wall paintings
- pigment
- vermilion red
- ultramarine blue
- emerald green

Article Info:

Research Article
Received: 18.02.2020
Accepted: 23.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.690320

Acknowledgement:

The authors thank the researchers of the İzmir Institute of Technology, Center for Materials Research for XRD and SEM-EDS analyses.

Correspondence:

Author: Kerem Şerifaki
e-mail: keremserifaki@iyte.edu.tr
phone: +90 232 750 7029

Graphical/Tabular Abstract

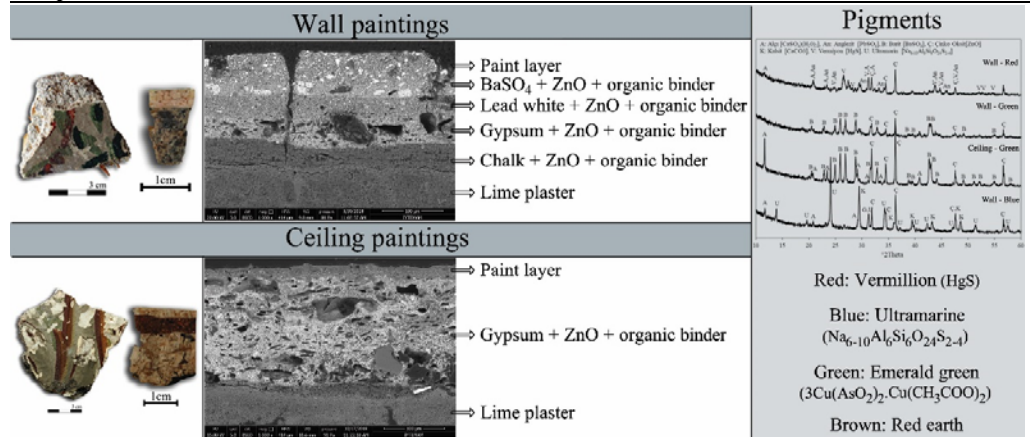


Figure A. Stratigraphy of ceiling and wall paintings and mineralogical composition of pigments

Purpose: The aim of this study was the determination of execution technique and materials characteristics of wall paintings of an almost disappearing cultural asset by documenting the authentic execution technique and material characteristics of the ornaments and provide data for the restoration work of the building.

Theory and Methods:

Analyses of the study were conducted on the samples that were taken from the building before the devastating fire. Microstructural characteristics, mineralogical and chemical compositions of plasters, priming layer, binding material and paints that were used in wall paintings have been determined by using optical microscopy, infrared spectroscopy (FTIR), X-Ray diffraction analysis (XRD) and scanning electron microscopy (SEM equipped with EDS).

Results:

Yahya Hayati Paşa Mansion in Bayraklı, which was built by Architect Andon Gavano in 1873, is one of the outstanding examples of 19th century İzmir mansions. The building was heavily damaged due to devastating fire in 2010 and floors, ceilings and the roof of the building were completely destroyed. The study revealed that the paintings of Yahya Hayati Paşa Mansion were executed on lime plasters by using oil painting technique. Four preparatory layers on wall paintings and a single priming layer on ceiling paintings were determined by SEM and optical microscopy analyses. Organic binder, chalk, gypsum, zinc oxide, lead white and barium white were the ingredients determined in preparatory layers. Pigments of the paintings, in which brown, green, red and blue colors were dominantly used, were determined by SEM, XRD and FTIR analyses. Pigments used in paintings were determined as vermilion (HgS) for red, ultramarine ($\text{Na}_{6-10}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_{2-4}$) for blue, emerald green ($3\text{Cu}(\text{AsO}_2)_2 \cdot \text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) for green and red ochre ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Clay minerals}$) for reddish brown. Beside these main pigments the use of barium white (BaSO_4) as an extender in green paints and anglesite (PbSO_4) as an alteration product of red lead (Pb_3O_4) in red paints were determined.

Conclusion:

The study documents the characteristics of painted decorations of a late Ottoman mansion by determining the stratigraphy, painting technique and pigments that make up the color palette and reveals the similarities with contemporaries in Europe.



İzmir’de bir Osmanlı dönemi konağının tavan ve duvar resimlerinin yapım tekniği ve malzeme özellikleri

Kerem Şerifaki*^{ID}, Başak İpekoğlu^{ID}

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mimarlık Fakültesi, Mimari Restorasyon Bölümü, Urla, İzmir, 35430, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- 19. yüzyıl yağlı boya duvar resimleri
- Tarihi duvar resimlerinde ve duvar boyalarında özgün malzeme kullanımı
- Pigment karakterizasyonu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 18.02.2020

Kabul: 23.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.690320

Anahtar Kelimeler:

Yağlı boya duvar resmi,
pigment,
vermilyon kırmızısı,
ultramarin mavi,
zürmüt yeşili

ÖZET

Kültür varlıklarımızın en hassas bileşenlerinden olan duvar resimlerinin korunmasında, resimlerin özgün malzeme özellikleri ve yapım tekniğinin belirlenmesi önemli aşamalardan biridir. Bu çalışma kapsamında İzmir Bayraklı’da yer alan Yahya Hayati Paşa Konağı’nın duvar ve tavan resimlerinin yapım tekniği ve malzeme özellikleri 2010 yılında yapıya ağır hasar veren yangın öncesinde alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen analizler ile belirlenmiştir. Duvar resimlerinin sıva ve astar tabakalarının, boyayı oluşturan bağlayıcı malzeme ile pigmentlerin mikro-yapısal özellikleri, mineralojik ve kimyasal kompozisyonları; optik mikroskop, kızılötesi spektroskopisi, X ışınları kırınım cihazı (XRD) ve EDS üniteli taramalı elektron mikroskobu kullanılarak tespit edilmiştir. Çalışma, resimlerin kireç sıva üzerinde yer alan organik bağlayıcı ve çeşitli beyaz pigmentlerden oluşan hazırlık tabakaları üzerinde yağlı boya tekniği ile uygulandığını göstermiştir. Resimlerin yapımında bitkisel yağın rengini beyazlatmak amacıyla çinko oksit (ZnO), kurşun beyazı (PbCO₃) ve baryum beyazı (BaSO₄) kullanıldığı belirlenmiştir. Resimlerin yapımında kırmızı için vermilyon (HgS), mavi için ultramarin (Na₆₋₁₀Al₆Si₆O₂₄S₂₋₄), yeşil için zürmüt yeşili (3Cu(AsO₂)₂.Cu(CH₃COO)₂) ve kahverengi için kırmızı okra (Fe₂O₃, kil mineralleri) kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu ana pigmentler dışında, dolgu malzemesi olarak kullanılan baryum beyazı (BaSO₄) ve kurşun kırmızısı pigmentinin (Pb₃O₄) bozulma ürünlerinden biri olan anglezit (PbSO₄) tespit edilmiştir. Çalışma, yanarak yok olmuş bir kültür varlığının süslemelerinin yapım tekniği ve malzeme özelliklerinin belgelenmesi ile yapının onarımı aşamasına veri oluşturacaktır.

Execution technique and material characteristics of ceiling and wall paintings of an Ottoman period mansion in İzmir

H I G H L I G H T S

- 19th century oil based wall paintings
- Material usage in historical wall paintings and wall paints
- Pigment characterization

Article Info

Research Article

Received:18.02.2020

Accepted: 23.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.690320

Keywords:

Oil based wall painting,
pigment,
vermillion red,
ultramarine blue,
emerald green

ABSTRACT

Determination of the authentic execution technique and material characteristics of wall paintings, which are the most vulnerable components of cultural assets, is one of the basic stages for their conservation. In this study, execution technique and material characteristics of wall and ceiling paintings of Yahya Hayati Paşa Konak in İzmir, Bayraklı were determined on the samples taken from the building before the devastating fire that heavily damaged the building in 2010. Microstructural characteristics, mineralogical and chemical compositions of plasters, priming layers, binding material and pigments that were used in wall paintings have been determined by using optical microscopy, infrared spectroscopy (FTIR), X-Ray diffraction analysis (XRD) and scanning electron microscopy (SEM equipped with EDS). The study revealed that the paintings of Yahya Hayati Paşa Mansion were made using oil painting technique on preparatory layers composed of organic binder and various white pigments which were applied on lime plaster. ZnO and lead white and barium white were used for bleaching the drying oil. Pigments used in the paintings were determined as vermilion (HgS) for red, ultramarine (Na₆₋₁₀Al₆Si₆O₂₄S₂₋₄) for blue, emerald green (3Cu(AsO₂)₂.Cu(CH₃COO)₂) for green and red ochre (Fe₂O₃+Clay minerals) for reddish brown. Beside these main pigments the use of barium white (BaSO₄) as an extender in green paints and anglesite (PbSO₄) as an alteration product of red lead (Pb₃O₄) in red paints were determined. This study will provide data for the restoration work of an almost disappearing cultural asset by documenting the authentic execution technique and material characteristics of the ornaments.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: keremserifaki@iyte.edu.tr, basakipekoglu@iyte.edu.tr / Tel: +90 232 750 7029

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

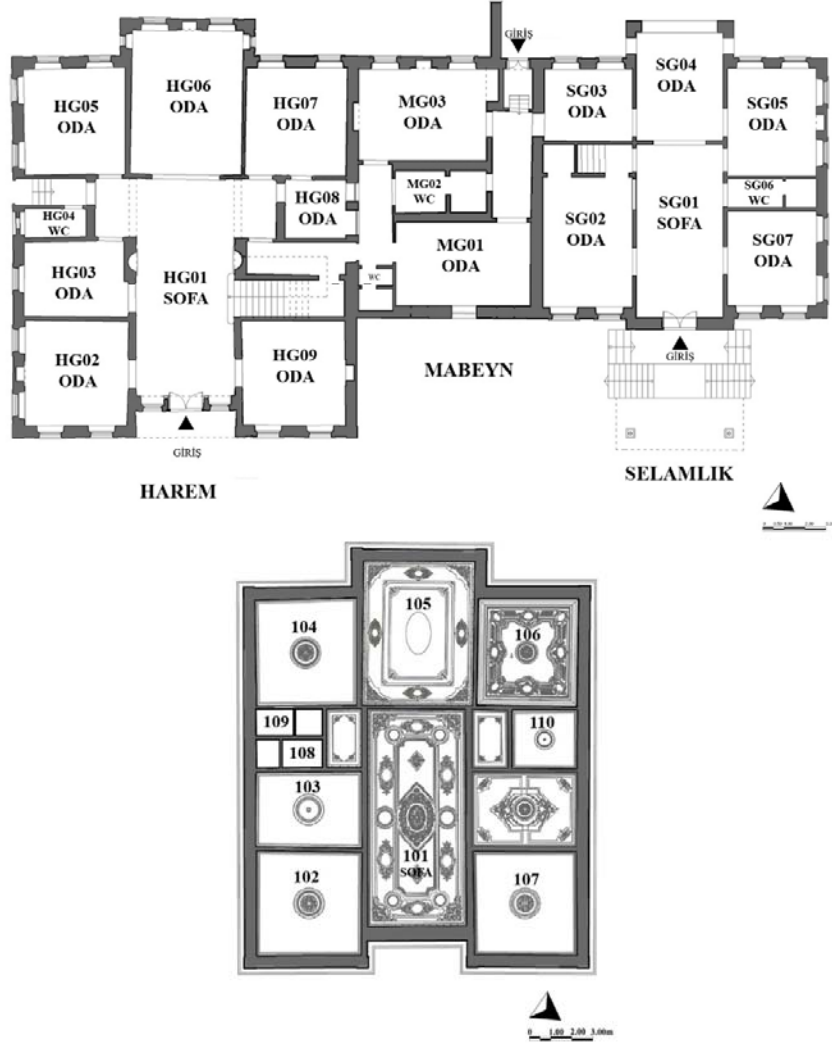
Uygulandıkları dönemin sosyal yaşamının sanatsal bir yansıması olan duvar resimleri sanatsal, estetik ve belge değerleri ile buldukları yerlerde korunması gerekli kültür varlıklarıdır. Mağara resimlerinden günümüze kadar olan süreçte dönemlerin estetik kaygıları, sosyal yaşamı ve dini inanışları hakkında bilgi kaynağı olan duvar resimleri, çeşitli toplumlar arasındaki sanatsal, ticari ve teknik etkileşimleri göstermeleri açısından da önemlidir. Batılılaşma etkisi ile 18. ve 19. yüzyıllarda Osmanlı mimarisi süsleme anlayışında önemli değişiklikler yaşanmıştır [1]. Geometrik ve bitkisel desenlerden oluşan geleneksel kalemî süslemeler yerini batılı anlamda natüremort, manzara tasvirleri ve bina tasvirlerini içeren duvar resimlerine bırakmaya başlamıştır [2]. 18. yüzyılın ikinci yarısında yaygınlaşmaya başlayan duvar resimlerinin gelişimi 19. yüzyılda da devam etmiştir [3]. Osmanlı mimarisinde duvar resimleri 18. ve 19. yüzyılda İstanbul'da olduğu gibi, imparatorluğun sınırları içinde kalan diğer bölgelerde; Anadolu, Balkanlar, Ege adaları ve Mısır, Suriye, Filistin gibi eyaletlerdeki konutların süsleme programında yaygın olarak yer almıştır [4]. Büyük bölümünü manzara tasvirleri, tek yapı tasvirleri, gemi tasvirleri, natüremort resimler, sembolik resimler ve insan ve hayvan figürlü tasvirlerin [5] oluşturduğu duvar resimlerine konutlar dışında cami ve şadırvan [5] gibi anıtsal yapıların süsleme programında ve Kütahya Büyük Bedesteninde olduğu gibi bazı yapıların geç dönem süslemeleri arasında yer verilmiştir. Duvar resimlerinin yapımında başlangıçta geleneksel kalemî tekniğine benzer olarak doğal toprak pigmentler, su ya da zamk ile karıştırılarak kullanılmıştır [4]. 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren kuru sıva ya da ahşap üzerine yağlı boya tekniği kullanılmaya başlamıştır. Bu dönemde ahşap ve sıva üzerine boyama tekniği dışında duvar ve tavan yüzeylerine gerilmiş bez ve muşamba üzerine uygulanmış resimler de görülür [3]. Ayrıca 19. yüzyılda konutların iç mekanlarında baskı tekniği ile yapılan monokrom veya çok renkli süslemeler ve duvar kağıdı uygulamaları da kullanılmıştır.

Duvar resimleri, organik ve inorganik pigmentlerin mimari yüzeylere bağlayıcı bir malzeme aracılığı ile sabitlenmesi ile elde edilirler. Pigmentlerin yüzey üzerinde sabitlenmesi için bağlayıcı malzeme olarak kuruyabilen bitkisel yağların (ceviz yağı, afyon yağı ve bezir yağı) kullanıldığı resim tekniği, yağlı boya tekniği olarak isimlendirilmektedir. Bitkisel yağların duvar resmi yapımında bağlayıcı malzeme olarak kullanımına ilişkin kaynaklar 10. yüzyıla dayanmaktadır [6]. 15. yüzyıla gelindiğinde yarattığı şeffaflık etkisi nedeniyle bitkisel yağların resim yapımında kullanımı artış göstermiştir [7]. 19. yüzyılda Avrupa'da yapılan duvar resimlerinin büyük çoğunluğunun *tempera* ya da yağlı boya tekniğinde üretildiği bilinmektedir [6]. Yağlı boya duvar resim tekniğinde öncelikle sıva yüzeyi birkaç kat kaynar yağ ile işlenir [8]. Yeterli doygunluğa ulaşan yüzey üzerine çeşitli hazırlık tabakaları [yüzey (*ground*) ve astar (*priming*)] uygulanarak boyamaya hazır hale getirilir [9]. Hazırlık tabakalarının yapımında bitkisel yağ ve yağın

kurumasını hızlandırıp beyaz renk veren üstübeç (kurşun bileşikleri) veya beyaz çinko oksit karışımı kullanılmıştır. Hazırlık tabakalarında kullanılan diğer bir madde ise alçıdır. Genellikle alçı ile hayvansal tutkalların karıştırılması ile elde edilen bu hazırlık tabakası *gesso* olarak isimlendirilmektedir [10]. Yağlı boya yapımında yaygın olarak kullanılan beyaz pigmentler kurşun beyazı (hidrosülfür, $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$), baryum sülfat ($BaSO_4$), çinko beyazı (ZnO) ve titanyum beyazıdır (TiO). Farklı kapaticılık özelliklerine sahip olan bu pigmentler, hem hazırlık tabakalarının yapımında hem de resmin yapımında tercih edilmişlerdir. Kurşun beyazı sentetik olarak üretilen en eski pigmentlerden biridir [11]. Roma döneminden beri kullanılan kurşun beyazı, 19. yüzyılda çinko beyazının üretilmesine kadar geçen süreçte kullanılan en yaygın beyaz pigment olmuştur [11]. Sadece resim yapımında değil aynı zamanda duvar boyası yapımında da kullanılan kurşun beyazı, tarihi kaynaklarda "*nakkaş sancısı*" olarak belirtilen kurşun zehirlenmesine neden olduğu anlaşıldığı için yerini alternatiflerine bırakmıştır [8]. Çinko beyazı, yağlı boyada temiz beyaz bir renk vermesi, süspansiyon özelliği ve ultraviyole ışınlarını soğurma özelliği [12] ve aynı zamanda sağlığa olumsuz etkisi olmadığı için kurşun beyazının yerini almıştır [13]. Çinko beyazı ilk olarak 18. yüzyılın sonlarına doğru üretilmiş, sulu boya resimlerde 19. yüzyılın ikinci çeyreğinden sonra kullanılmıştır [14]. 1845 yılından sonra yağlı boyadaki kuruma sorunlarının giderilmesi ve kapaticılık özelliğinin geliştirilmesi ile yaygın olarak kullanılmıştır [12]. Baryum beyazı ($BaSO_4$) ya da yaygın ismiyle "*blanc fixe*" 19. yüzyılın başlarından itibaren sentetik olarak üretilmiştir [15]. Düşük kapaticılığa sahip olması ve tepkimeye girmeyen bir pigment olması nedeniyle dolgu maddesi olarak ve diğer pigmentlerle karıştırılarak kullanılmıştır [14]. 20. yüzyılın başında titanyum beyazı (TiO) sentetik olarak üretilmeye başlamasıyla birlikte diğer beyaz pigmentlerin yerini almıştır [16]. 19. yüzyılın son çeyreğinde hazır yağlı boyaların piyasaya çıkmasından önce, boya kullanılmadan hemen önce sahada ve az miktarda hazırlanmaktaydı. Geleneksel yağlı boya, üstübeç veya çinko beyazının yağ ile ezilmesi sonucunda elde edilen beyaz boyaya arzu edilen renkteki toz boyaların karıştırılması ile elde edilmekteydi [8]. Osmanlı İmparatorluğu'nda yağlı boya yapımında kullanılan temel bitkisel yağ beziryağıdır [8]. Bezir yağı, doğal olarak kuruyabilme özelliğine sahip bir yağ olmakla birlikte çeşitli işlemlerden geçirilerek akışkanlık ve kuruma özelliği geliştirilebilir. Bu amaçla yağlı boya hazırlanırken bezir yağına uçucu bir madde olan çam reçinesi katıldığı bilinmektedir [17]. Yağa kaynatılmış bezir yağı katılması da kuruma hızını arttıran bir işlemdir [8]. Yağlı boyalarda beyaz renk dışında yaygın olarak kullanılan pigmentlerden bazıları, sarı okra, Napoli sarısı, ombra, vermilyon (zincifre), kırmızı okra, bakır asetat, malakit, kobalt mavisi, kobalt oksit camı, azurit, ultramarin olarak sıralanabilir [7]. Bir kısmı antik dönemden beri kullanıldığı bilinen bu inorganik pigmentler hem doğal mineral olarak kullanılmış hem de 18. ve 19. yüzyıllarda Avrupa'da kimya sektöründe meydana gelen gelişmeler sonucu sentetik olarak üretilmeye başlanmıştır.

Bu dönemde üretilen ve hem sanat eserlerinde hem duvar boyalarında ve duvar kağıtlarında kullanılan pigmentlerin bir kısmının zehirli olduğu zaman içinde anlaşılmış ve kullanımları kısıtlandırılmıştır. Örneğin bakır ve arsenik içeren *Scheele* yeşili ($CuHAsO_3$) ve zümrüt yeşili (Paris yeşili, $3Cu(AsO_2)_2.Cu(CH_3COO)_2$) çekici ve parlak renkleriyle Avrupa'da 19. yüzyıl boyunca kumaş, duvar kağıdı ve duvar boyalarının üretiminde kullanılmış ve kullanıcıların zehirlenmelerine neden olmuştur [18]. Daha önce belirtildiği gibi yüzyıllar boyunca temel beyaz pigment olarak kullanılan kurşun beyazı da kurşun zehirlenmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda, tarihi yapıların boyalarında gerçekleştirilecek analizler, malzeme özelliklerinin belgelenmesi ve müdahale kararlarının oluşturulması için gerekli olduğu kadar, koruma çalışmalarında görev alacak kişilerin bu pigmentlere maruz kalması sonucu oluşabilecek risklerin önüne geçilmesinde de yararlı olacaktır. Önemli bir ticaret kenti konumundaki İzmir 19. yüzyılda Avrupalı tüccarlar ve imparatorluk içinde yaşayan Rum, Ermeni ve Yahudiler gibi azınlıklar için bir çekim merkezi olarak

oldukça kozmopolit bir nüfusa sahipti [19]. Demografik yapısındaki bu kozmopolitlik kentin yaşamına ve mimarisine yansımıştır. Bu bağlamda duvar resimleri farklı etnik gruplara ait yapılarda, özellikle İkiçeşmelik Kapani Konağı, İkiçeşmelik Şeker Paşa Konağı, Bornova Edwards Köşkü, Karşıyaka Penetti Köşkü gibi birçok konutun süsleme programında yer almaya başlamıştır [19]. Konutlar dışında çeşitli dini yapılarda ve ticaret yapılarında da duvar resimli bezemeler gözlenmektedir [19]. Bu çalışmada; İzmir, Yahya Hayati Paşa Konağı'nda yer alan ve günümüze ulaşamamış bir grup duvar resminin malzeme özellikleri ve boyama tekniği belirlenmiştir. İzmir Bayraklı'da bulunan Yahya Hayati Paşa Konağı, mimari özellikleri ve görkemli duvar ve tavan süslemeleri ile 19. yüzyıl İzmir konutlarının en önemli örneklerinden birisidir. İnşaat başlangıç tarihi olarak 1863, 1868 ve 1873 yılları olarak üç farklı tarih belirtilen ve Mimar Andon Gavano tarafından inşa edildiği bilinen [20] Konağın ana yapısı, deniz kenarında geniş bir bahçe içinde konumlanan tek katlı selamlık ve mabeyn bölümleri ve iki katlı harem bölümünden oluşmaktadır (Şekil 1) [21]. Ana



Şekil 1. Konağın zemin kat planı [21] ve harem bölümü birinci kat tavan planı (restitüsyon) [23]
(Ground floor plan of the mansion and the ceiling plan (restitution) of the first floor of harem section)

yapının iki yanında ahır ve mutfak, kiler, hamam mekanlarından oluşan müstemilatlar yer almaktadır [22]. Yapının harem ve selamlık bölümünün duvar ve tavanları bordürlerle çevrelenmiş, elips ya da daire şeklinde madalyonlara yerleştirilmiş natürmort, pastoral ve bina tasvirleri içeren manzara betimlemeleri ile bezelidir. Selamlık bölümünün sofası ve sofanın güneybatı ve güneydoğusundaki odalar tavan resimleri ile bezenmiştir. Bu resimler 2004 yılında meydana gelen bir yangın sonucunda yok olmuştur. Harem bölümündeki tavan resimleri, sofada ve sofanın batısında ve güneybatısında yer alan odalarda yer almaktadır (Şekil 1). Bu resimler de 2010 yılında meydana gelen bir yangın sonucunda yok olmuştur. T planlı sofanın ana dikdörtgeninde elips şeklinde alçı süslemenin etrafında bordürler ile çerçevelenmiş dairesel madalyonların içinde çiçek düzenlemeleri resmedilmiştir. Dairesel madalyonların arasında ise bitkisel motifler ile çerçevelenmiş oval madalyonların içinde mimari tasvirli manzara resimleri yer almaktadır (Şekil 2) [23]. Merkezde yer alan alçı göbeğin kuzeydoğu ve güneybatı yönlerinde kahverengi dörtlü ejder motifleri bulunur [24]. Sofaya T şeklini veren köşelerdeki ikincil dikdörtgen bölümlerin duvar ve tavan birleşiminde profilli silme yer alır. Bu bölümlerin tavanları, boya ile oluşturulmuş, köşeleri bitkisel motifler ile zenginleştirilmiş sade bir çerçeve ile bezelidir. Sofanın güneybatısında ortada yer alan odanın tavanı büyük ölçüde hasarlıdır. Kalan izlerden ve eski fotoğraflardan bu mekanda da merkezde alçı kabartma göbek bulunduğu, göbeğin etrafındaki kahverengi bir çerçevenin köşelerinde çiçek desenli alçı kabartma

süslemeler ve çerçevenin kenar ortalarında dört adet oval madalyon içinde yer alan çiçek düzenlemelerinin yer aldığı bilinmektedir [23]. Sofanın batısında yer alan odada orta sofaya benzer şekilde madalyonların içine yerleştirilmiş çiçek düzenlemeleri ve hayali manzara resmedilmiştir. Harem bölümünde bazı mekanların duvarları da resimlerle bezelidir. Birinci katta sofada çizgiler ve bitkisel motiflerle oluşturulmuş bordürler, batıda yer alan odada ve merdiven kovanında baskı tekniği ile üretilmiş desenler yer almaktadır.

Bu çalışma, Yahya Hayati Paşa Konağı'nın yanarak yok olmuş tavan ve duvar süslemelerini oluşturan resimlerin yapım tekniği ve malzeme özelliklerinin belgelenmesini ve yapının onarım aşamasına veri oluşturmayı amaçlamaktadır. Çalışma 19. yüzyıl Osmanlı konutları süsleme programında yaygın olarak yer alan duvar ve tavan resimlerinin teknolojisinin anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

2. YÖNTEM (METHOD)

Çalışma kapsamında üzerinde çalışılan örnekler, yangın öncesinde 2009 yılında yapıdan toplanmıştır. Örnekler resimlere zarar vermemek amacıyla kendiliğinden yerinden ayrılmış ve konumu belirlenebilen parçalardan seçilmiştir. Çalışma kapsamında analizler harem bölümünün birinci katında sofa mekanının tavanında yer alan resimlerden ve batıda yer alan oda ile merdiven kovanı duvarlarındaki baskı tekniği ile uygulanmış resimlerden alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Yahya Hayati Paşa Konağı harem bölümü birinci kat sofasında yer alan tavan resimleri
(Ceiling paintings of the first floor sofa of the harem section of Yahya Hayati Paşa Mansion)

Duvar resimlerini oluşturan tabakaları belirlemek amacıyla örnekler soğuk reçine (Streurs Epofix) ile vakum altında kalıplanmış ve hassas kesme cihazı (Buehler) ile kesildikten sonra parlatılmış, hazırlanan dikey kesitler üstten aydınlatmalı Nikon Eclipse E400 model Polarize Işık Mikroskobu ve Quanta 250 FEG model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Sıva tabakalarının, bağlayıcı malzemenin ve boya tabakasının mineralojik yapıları PerkinElmer Spectrum BX model Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Philips X-Pert Pro X Işınları Kırınım (XRD) cihazı ile belirlenmiştir. FTIR analizleri için boya örnekleri yüzeyden bisturi yardımı ile kazandıktan sonra agat havanda saf KBr ile karıştırılmış ve yüksek basınç altında (10 ton/cm^2) disk haline getirilmiştir. Spektral analizler orta dalga boylu kızılötesi bölgesinde ($4000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$ aralıkta), 4 cm^{-1} çözünürlükte ve absorbans modunda gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri toz haline getirilmiş boya örnekleri üzerinde $\text{CuK}\alpha$ ışını kullanılarak $10\text{-}60^\circ 2\theta$ arasında, saniyede $1,6^\circ$ tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kırınım desenleri *Philips XPert Graphics and Identity* programı ile değerlendirilerek örneklerin mineral fazları tespit edilmiştir. Sıva ve boya tabakalarının kimyasal kompozisyonları ve mikro yapıları parlatılmış kesitler üzerinde, EDS ünitesi Quanta 250 FEG model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

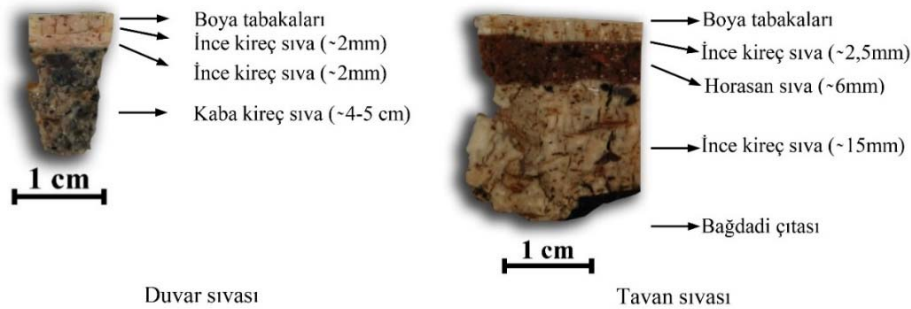
Yahya Hayati Paşa Konağı'nda yer alan resimler birbiri üzerine uygulanmış sıva, hazırlık ve boya tabakalarından oluşmaktadır. Yapının dış duvarları, dış yüzeyde yığma taş, içte ahşap iskelet sisteminin birbiriyle bağlantılı olarak inşa edildiği bileşik yapı sistemini ile, iç duvarları ise moloz taş ve tuğla dolgu ahşap iskelet sistemi ile inşa edilmiştir. Her iki sistemde inşa edilen duvarların yüzeyi 4-5 cm kalınlığında kaba kireç sıva ve iki tabaka halinde uygulanan yaklaşık 2 mm kalınlığında ince kireç sıva ile kaplıdır (Şekil 3). Kaba sıva yapımında kireç, agrega ve kırıntı karışımı, ince sıva yapımında kireç ve kırıntı karışımı kullanılmıştır. Konağın tavanlarından alınan örneklerde üç tabakalı bir sıva uygulandığı belirlenmiştir. Ahşap kirişleme sistemin taşıdığı bağdadi çıtalarının üzerinde sırasıyla yaklaşık 15 mm kalınlığındaki kireç sıva, 6 mm kalınlığında horasan sıva ve

2,5 mm kalınlığında kireç sıva yer almaktadır (Şekil 3). İki kireç sıvanın arasında yer alan horasan sıvanın çatıdan kaynaklanabilecek nem problemine karşı önlem olarak uygulandığı düşünülebilir. Duvarlar üzerinde yer alan resimlerde ince sıva üzerinde yüzeyi resim için uygun hale getirmek amacıyla uygulanan dört adet hazırlık tabakası belirlenmiştir (Şekil 4a). Bu tabakaların kalınlıkları SEM analizleri ile kireç sıvanın hemen üzerinde yer alandan başlayarak sırasıyla yaklaşık olarak $40 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $35 \mu\text{m}$ ve $22 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Resmi oluşturan tabakalar birbirleriyle ve kireç sıva ile oldukça iyi kaynaşmış durumdadır. Tabakalar arasında ayrışma gözlenmemiştir. Tavan yüzeylerine uygulanan resimlerde duvar yüzeylerindeki farklı olarak $180\text{-}200 \mu\text{m}$ kalınlığında tek hazırlık tabakası belirlenmiştir (Şekil 4b). Üzerindeki boya tabakasıyla oldukça iyi kaynaşmış durumda olan bu tabakanın kireç sıva ile olan bağlantısı zayıftır. İki tabaka arasındaki ayrışma, resimlerde kabarma ve kısmi kayıpların meydana gelmesine neden olmuştur.

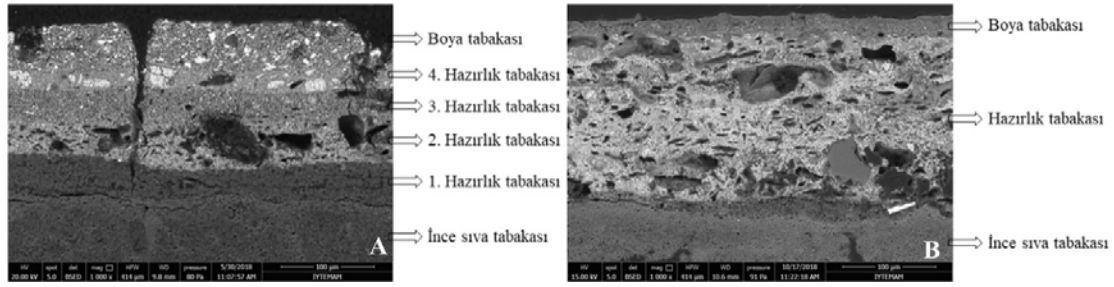
3.1. Hazırlık Tabakalarının Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

(Chemical and Mineralogical Characteristics of Preparatory Layers)

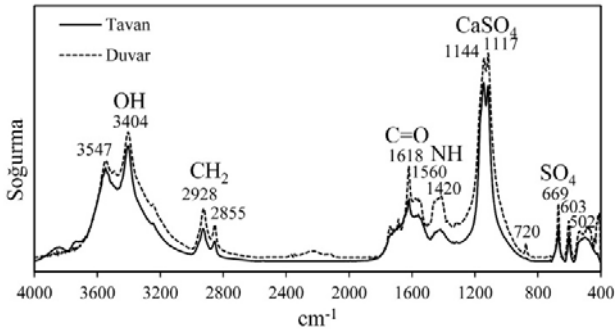
Hazırlık tabakaları incelikleri ve birbirleriyle olan sağlam bağ nedeniyle birbirlerinden ayrılmamış, bu nedenle FTIR ve XRD analizleri yüzeyden bisturi ile kazınarak elde edilen ve tabakaların tümünü içeren toz örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlık tabakalarının FTIR spektrumlarında 2928 ve 2855 cm^{-1} değerlerinde gözlenen karbon hidrojen bağlarının resimlerin yapımında kullanılan bitkisel yağın yağ asitlerinden kaynaklandığı söylenebilir [7]. Spektrumlarda ayrıca, alçı kullanımına işaret eden hidroksil (OH) gerilme bantları ($3547, 3404 \text{ cm}^{-1}$) ile sülfatın (SO_4^{2-}) asimetric gerilme ($1144, 1117 \text{ cm}^{-1}$) ve eğilme ($603, 669 \text{ cm}^{-1}$) bantları ve karbonat (CO_3^{2-}) bantları ($1618, 1420 \text{ cm}^{-1}$) belirlenmiştir [25] (Şekil 5). Tabakaların XRD desenlerinde de FTIR analizlerine paralel olarak duvardan alınan örneklerde çinko oksit (ZnO), alçı ($\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$), hidroserüzit, $\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ve anglezit (PbSO_4), tavadan alınan örneklerde çinko oksit (ZnO) ve alçı ($\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$) tespit edilmiştir (Şekil 6). FTIR ile belirlenen sülfat bağlarının alçı ve anglezit kullanımından, karbonat bağlarının ise hidroserüzit ve çinko oksit kullanımına bağlı oluşan sabunlaşmadan kaynaklandığı söylenebilir [26, 27].



Şekil 3. Resimlerin uygulandığı sıva katmanlarını gösteren kesitler
(Cross sections of the plaster layers of paintings)



Şekil 4. Duvar ve tavan resimlerini oluşturan hazırlık ve boya tabakalarını gösteren elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü (1000x). A: Duvardan alınan örnek, B: Tavandan alınan örnek
(SEM images of the preparatory and paint layers of the paintings (1000x). A: Sample from wall surface, B: Sample from ceiling surface)



Şekil 5. Duvar ve tavan resimlerinin hazırlık tabakalarının fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrumları
(FTIR spectrums of the preparatory layers of wall and ceiling paintings)

Hazırlık tabakalarının kimyasal kompozisyonu parlatılmış kesitler üzerinde SEM-EDS analizleri ile belirlenmiştir. Duvar yüzeylerinde, kireç sıvanın üzerine uygulanan ilk tabakanın kimyasal analizinde temel olarak kalsiyum (CaO) ve çinko (ZnO) belirlenmiştir (Şekil 7a, Tablo 1). Kireç taşının özel bir çeşidi olan tebeşir ve hayvansal zamk karışımının resimlerde yüzey (*ground*) tabakası yapımında kullanıldığı bilinmektedir [14]. SEM analizleri ile belirlenen yüksek orandaki kalsiyum oksit bu tabakanın yapımında kullanılan tebeşirden kaynaklandığını düşündürmektedir. Organik bağlayıcı ve tebeşir karışımından oluşan bir hazırlık tabakası, Yahya Hayati Paşa Konağı ile yakın dönemde inşa edilmiş olan Cunda Adası'ndaki Taksiarhis Kilisesi'nin duvar resimlerinde de tespit edilmiştir [28]. Bu tabakada tespit edilen çinko oksit ise yüzey tabakasını beyazlatmak amacıyla eklenmiş olmalıdır.

İkinci hazırlık tabakasının kimyasal analizinde temel olarak kalsiyum (CaO), kükürt (SO₃) ve çinko (ZnO) belirlenmiştir (Şekil 7b, Tablo 1). XRD ve FTIR analizleri ile bir arada değerlendirildiğinde bu tabakanın organik bağlayıcı, çinko oksit ve alçı karışımı ile üretildiği söylenebilir. *Gesso* olarak isimlendirilen bu tabakanın yağlı boya ile uygulanan panel resimlerinde yaygın olarak kullanılan bir hazırlık tabakası olduğu bilinmektedir [10].

Üçüncü hazırlık tabakasının kimyasal kompozisyonunu temel olarak çinko (ZnO) ve kurşun (PbO) oluşturmaktadır (Şekil 7c, Tablo 1)). Hazırlık tabakaları içinde sadece bu tabakanın kurşun içermesi, XRD analizlerinde tespit edilen

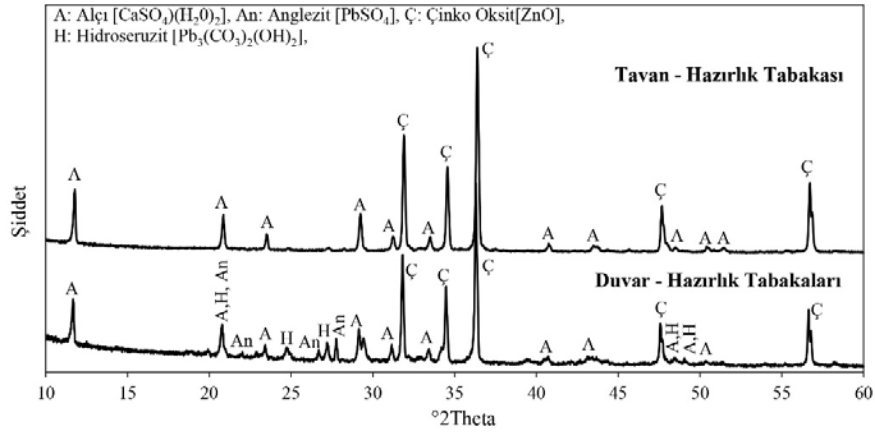
hidroserezitin bu tabakadan kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Kurşun içeren bileşiklerin bitkisel yağların kurumasını hızlandırdığı ve bu nedenle yağlı boya yapımında kullanıldıkları bilinmektedir [29]. Bu bağlamda, üçüncü hazırlık tabakasında kurşun beyazı ve çinko beyazının bitkisel yağ ile karıştırılarak bir arada kullanıldığı söylenebilir.

Dördüncü hazırlık tabakasında diğer tabakalardan farklı olarak homojen bir karışımın içinde yer alan 5-20 µm büyüklüğünde parçacıklar gözlenmiştir (Şekil 7d). Tabakanın SEM analizleri ile belirlenen kimyasal kompozisyonunda bu parçacıkların temel olarak baryum (BaO) ve kükürt (SO₃), tabakanın geriye kalan kısmının ise yüksek oranda çinko (ZnO) içerdiği belirlenmiştir (Tablo 1). Dördüncü hazırlık tabakasının yapımında bitkisel yağ, çinko oksit ve 19. yüzyıl yağlı boyalarında dolgu malzemesi olarak kullanıldığı bilinen ve şeffaflık etkisi yaratan beyaz bir pigment olan baryum sülfat (BaSO₄) kullanılmıştır [14]. Tespit edilen baryum sülfatın iri parçacıklar halinde bulunması nedeniyle doğal barit olduğu söylenebilir [30].

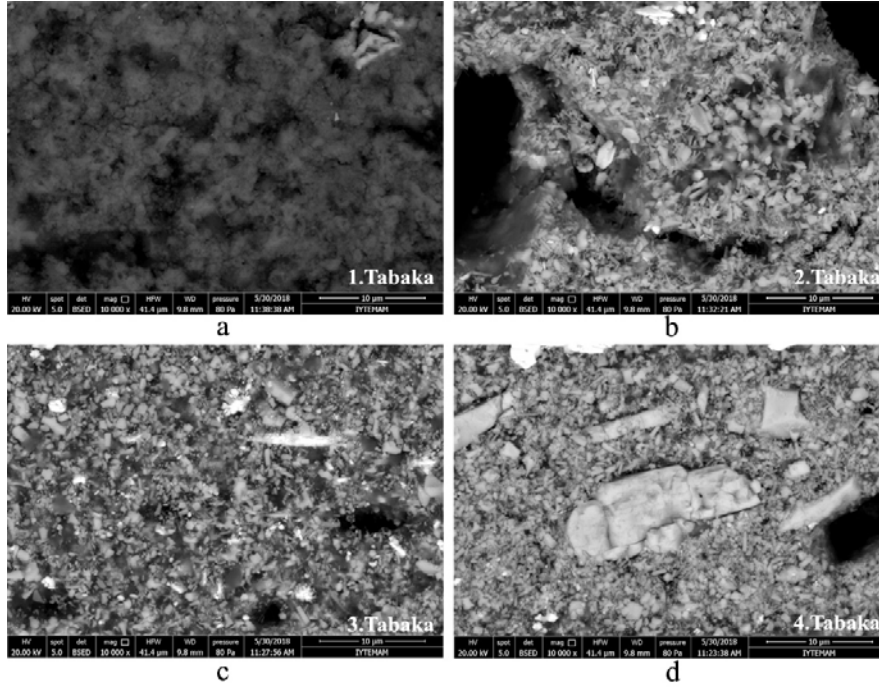
Tavan yüzeylerine uygulanan resimlerin elektron mikroskobu ile gerçekleştirilen kimyasal haritalandırması ile temel olarak CaO, SO₄ ve ZnO içerdiği belirlenmiştir. SEM-EDS, FTIR ve XRD analizleri sonucunda bu tabakanın duvar yüzeylerindeki ikinci hazırlık tabakasıyla benzer şekilde organik bağlayıcı, çinko oksit ve alçıdan oluştuğu söylenebilir (Şekil 5, Şekil 6).

3.2. Boya Tabakalarının Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri (Chemical and Mineralogical Characteristics of Paint Layers)

Duvar ve tavan resimlerinde hazırlık tabakaları üzerinde tek tabaka halinde yer alan boya tabakasının analizleri kırmızı, yeşil, mavi ve kahverengi örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kırmızı boya tabakasının genelini kimyasal analizinde temel olarak çinko (ZnO), cıva (HgO), kurşun (PbO) ve kükürt (SO₃) tespit edilmiştir (Şekil 8). Boya tabakasının içinde tespit edilen parçacıklar yüksek oranda cıva (HgO) ve kükürt (SO₃) içermektedirler. Kırmızı pigmentin mineralojik özelliğini belirlemek amacıyla yapılan FTIR analizleri sonucunda pigment tespit edilememiş, tabakanın XRD desenlerinde temel olarak zincifre (HgS), alçı (CaSO₄(H₂O)₂), anglezit (PbSO₄) ve



Şekil 6. Hazırlık tabakalarının XRD kırınım desenleri (XRD patterns of preparatory layers)



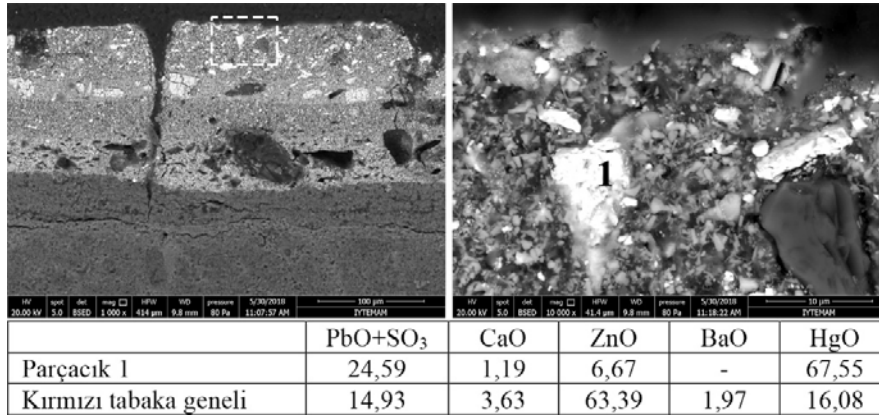
Şekil 7. Duvar resimlerinin hazırlık tabakalarının SEM görüntüleri (10000x) (SEM images of the preparatory layers of wall paintings (10000x))

Tablo 1. Duvar resimlerinin hazırlık tabakalarının kimyasal kompozisyonları (Chemical composition of the preparatory layers of wall paintings)

	MgO	SiO ₂	SO ₃	PbO	BaO	CaO	ZnO	PdO
Birinci tabaka	1,19	0,97	0,97	-	-	84,02	12,85	-
İkinci tabaka	-	-	25,41	-	-	22,71	49,47	2,40
Üçüncü tabaka	-	-	-	12,66	1,07	3,48	82,47	-
Dördüncü tabaka	-	-	5,22	-	6,87	2,49	84,82	-
Dördüncü tabaka içindeki parça	-	-	32,37	-	56,88	1,43	9,31	-

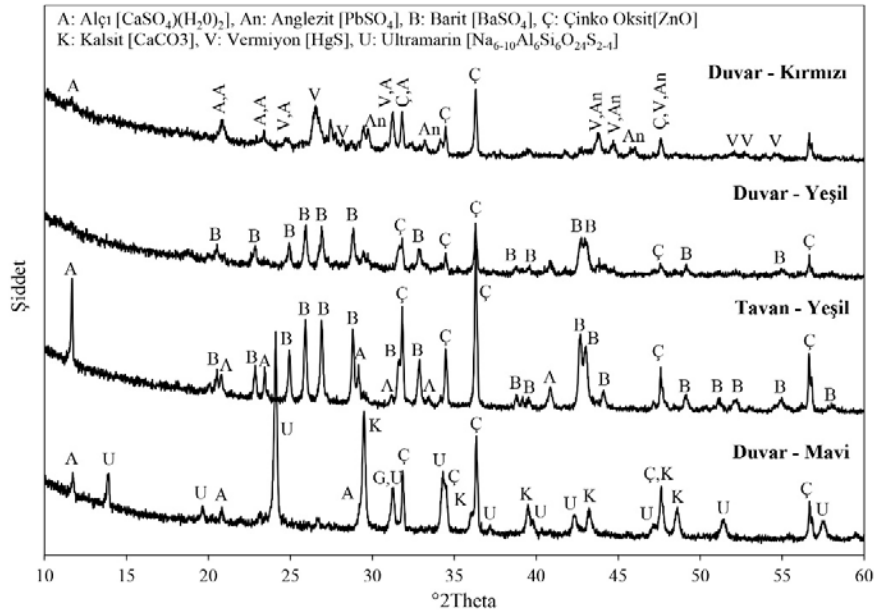
çinko oksit (ZnO) tespit edilmiştir (Şekil 9, Şekil 10). Kimyasal ve mineralojik özellikler bir arada değerlendirildiğinde kırmızı renk veren pigmentin Roma döneminden beri kullanılan kırmızı civa sülfür (HgS) yani

zincifre kırmızısı olduğu söylenebilir. FTIR analizlerinin sonuç vermeme nedeni zincifre kırmızısının MIR (orta dalga boylu kızılötesi) bölgesinde ışınları absorblamayıp saçılmaya neden olmasıdır [31]. Boya tabakasında tespit



Şekil 8. Kırmızı renkli boya tabakasında gözlenen pigment parçacıkları ve kırmızı boyanın SEM-EDS ile belirlenmiş kimyasal kompozisyonu

(Pigment particles on the red paint layer and the chemical composition of the red paint layer and particles determined by SEM-EDS)

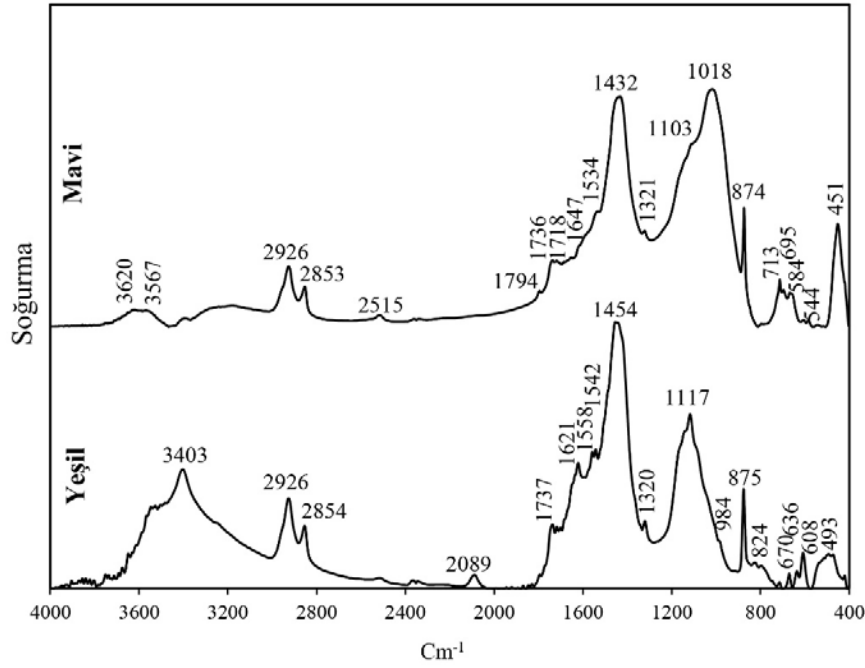


Şekil 9. Boya tabakalarının XRD kırınım desenleri (XRD patterns of paint layers)

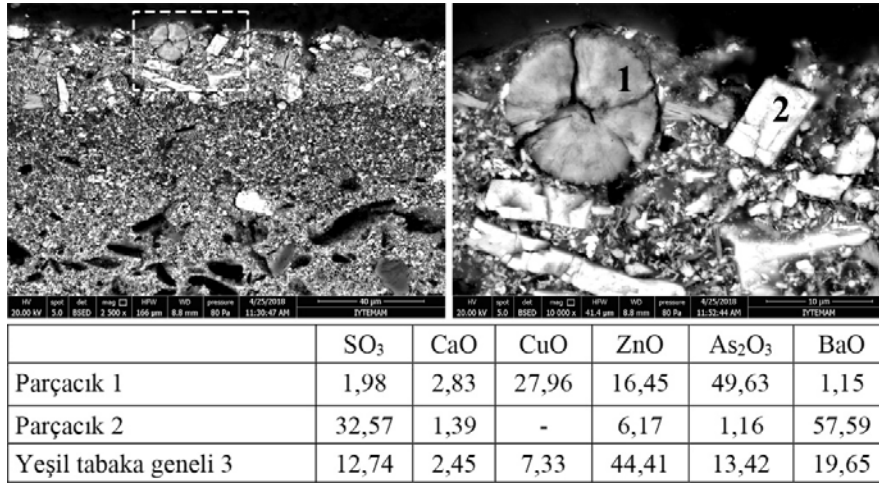
edilen anglezit, yağlı boyaya eklenen beyaz renkli kurutucu bir pigment olabileceği gibi [32], kurşun kırmızısının (Pb₃O₄, minium) atmosferdeki SO₂ gazı ile sülfatlanarak beyazlaşması sonucunda meydana gelmiş bir bozulma ürünü olarak da değerlendirilebilir [33, 34].

Yeşil tabakanın içinde pigment olarak kullanılan iki farklı parçacık belirlenmiştir (Şekil 11). SEM-EDS ile gerçekleştirilen kimyasal analiz sonuçlarına göre bu parçacıklardan ilki temel olarak bakır (CuO) ve arsenikten (As₂O₃), ikincisi baryum (BaO) ve kükürtten (SO₃) oluşmaktadır (Şekil 11). Elde edilen kimyasal kompozisyon sonucunda pigment olarak bakır asetat arsenit (3Cu(AsO₂)₂·Cu(CH₃COO)₂) yani zümrüt yeşili ve baryum sülfat (BaSO₄) kullanıldığı düşünülmüştür. Yeşil boya tabakasının FTIR analizinde temelde organik bağlayıcıdan kaynaklanan bantlar dışında zümrüt yeşili kullanımını işaret

eden karboksilat bağları (1558 cm⁻¹ ve 1454 cm⁻¹) [35] ve As-O bağları (824 cm⁻¹, 636 cm⁻¹) [18] ile baryum sülfattan kaynaklanan (1117 cm⁻¹, 984 cm⁻¹, 636 cm⁻¹ ve 608 cm⁻¹) [25] bantların belirlenmesi bu düşüncüyü doğrulamaktadır (Şekil 10). Duvar yüzeyinden alınan örneğin XRD deseninde temel olarak baryum sülfat (BaSO₄) ve çinko oksit (ZnO), tavan yüzeyinden alınan örneğin XRD deseninde ise baryum sülfat (BaSO₄), çinko oksit (ZnO) ve alçı (CaSO₄(H₂O)₂) tespit edilmiştir (Şekil 9). Tavandan alınan örnekte tespit edilen alçının alttaki hazırlık tabakasından bulaştığı söylenebilir. Zümrüt yeşili 1830 yılında üretilmeye başlayan ve 19.yy'da yağlı boya resimlerde, özellikle izlenimci (empresyonist) ve ard-izlenimci (post-empresyonist) sanatçılar tarafından, yaygın olarak kullanılan ancak günümüzde insan sağlığına zararlı olduğu için kullanılmayan bir pigmenttir [14]. Baryum sülfat ise yağlı boyalarda dolgu malzemesi olarak kullanıldığı bilinen beyaz bir pigmenttir.



Şekil 10. Yeşil ve mavi boya tabakalarının fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrumları (FTIR spectrums of green and blue paint layers)



Şekil 11. Yeşil renkli boya tabakasının SEM görüntüsü (2500x-10000x) ve belirlenen pigment parçacıkları ile yeşil boyanın SEM-EDS ile belirlenmiş kimyasal kompozisyonu (SEM images of green paint layer (2500x-10000x) and chemical composition of pigment particles and green paint determined by SEM-EDS)

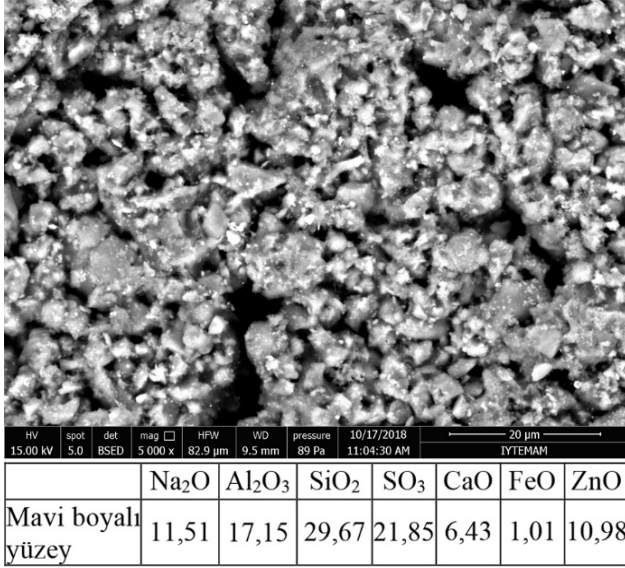
Ekonomik nedenlerle zümrüt yeşili ile karıştırılarak kullanılmıştır [14].

Mavi renkli boyaların kimyasal kompozisyonunda yüksek oranlarda sodyum (Na₂O), alüminyum (Al₂O₃), silisyum (SiO₂) ve kükürt (SO₃) tespit edilmiştir (Şekil 12). Örneğin kimyasal kompozisyonu ve FTIR analizinde 1018 cm⁻¹, 695 cm⁻¹, 658 cm⁻¹ ve 584 cm⁻¹ frekansındaki bantlar pigment olarak ultramarin mavi kullanımını işaret etmektedir [36] (Şekil 10, Şekil 12). Mavi renkli boyanın XRD analiz ile belirlenen mineralojik kompozisyonu, ultramarin (Na₆₋₁₀Al₆Si₆O₂₄S₂₋₄), kalsiyum karbonat (CaCO₃), çinko oksit

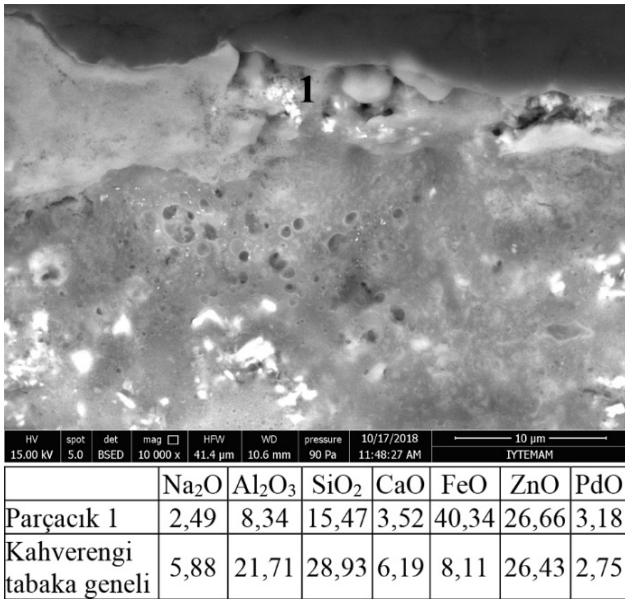
(ZnO) ve alçıdan oluşmaktadır (Şekil 9). Doğal ultramarin olarak bilinen ve yarı kıymetli bir taş olan lapis lazuliden elde edilen pigment, Bizans döneminden itibaren duvar resimlerinin ikonografik olarak önemli kısımlarında tercih edilmiştir. Ultramarin mavi, 1828 yılında suni olarak üretilmesinin ardından duvar ve panel resimlerinde yaygın olarak kullanılmıştır [37, 38].

Tavan resimlerinde kıvılcak kahverengi boyalı örneğin kimyasal analizinde demir (FeO), alüminyum (Al₂O₃) ve silisyum (SiO₂) belirlenmiştir (Şekil 13). Demir oksit hematit kullanımını gösterirken alüminyum ve silisyum oksit kil

minerallerinden kaynaklanmış olabilir. Bu nedenle kızıl kahverengi için hematit içeren kırmızı toprak boya kullanıldığı ileri sürülebilir.



Şekil 12. Mavi boyanın yüzeyinin SEM görüntüsü ve SEM-EDS ile belirlenmiş kimyasal kompozisyonu (SEM image of the surface of blue paint and the chemical composition determined by SEM-EDS)



Şekil 13. Kızıl kahverengi boya tabakasında gözlenen demir oksit parçacıkları ve boyanın SEM-EDS ile belirlenmiş kimyasal kompozisyonu (Iron oxide particles observed on the reddish brown paint layer and chemical composition of paint determined by SEM-EDS)

Yahya Hayati Paşa Konağı'nın tavan ve duvar resimlerinde kullanıldığı belirlenen pigmentlerin 19. yüzyılda yapılan ya da onarılan, geniş bir coğrafyadaki tavan ve duvar resimleriyle büyük benzerlikler gösterdiği söylenebilir [39-41].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yahya Hayati Paşa Konağı'nda yer alan resimler çok tabakalı kireç sıva üzerine yağlı boya tekniği ile uygulanmışlardır. Resimlerde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan kuruyabilen bitkisel yağlar, yağın rengini beyazlatmak için çinko oksit (ZnO) ile karıştırılmıştır. Duvar yüzeylerinde sıva üzerine gelen dördüncü tabakası tespit edilmiştir. Birinci hazırlık tabakası kireç tozu, bitkisel yağ ve çinko oksit (ZnO) karışımından oluşmaktadır. İkinci hazırlık tabakası olan *gesso* tabakası organik bağlayıcının alçı (CaSO₄(H₂O)₂), ve çinko oksit (ZnO) ile karıştırılması ile hazırlanmıştır. Bu tabakanın üzerine gelen üçüncü tabakada bitkisel yağ, çinko oksit (ZnO) ve kurşun beyazı kullanılmıştır. Dördüncü hazırlık tabakasında ise bitkisel yağ, çinko oksit (ZnO) ve baryum sülfat (BaSO₄) kullanıldığı belirlenmiştir. Tavan yüzeylerinde yer alan resimlerde duvardakilerden farklı olarak organik bağlayıcının alçı (CaSO₄(H₂O)₂) ve çinko oksit (ZnO) ile karıştırılması ile hazırlanan tek hazırlık tabakası uygulanmıştır. Resimlerin yapımında kırmızı renk için zincifre (HgS), yeşil renk için zümrüt yeşili - baryum sülfat karışımı, mavi renk için sentetik ultramarin, ve kahverengi için kırmızı toprak boya kullanıldığı belirlenmiştir.

Bakımsızlık ve terk edilmişlik nedeniyle oldukça hasar almasına rağmen yakın geçmişe kadar varlığını koruyan Yahya Hayati Paşa Konağı'nın mekanları, döneminin süsleme anlayışını ifade eden duvar resimleriyle zenginleştirilmiştir. Ancak bu resimler, 2004 ve 2010 yıllarında meydana gelen yangınlarda yok olmuştur. Bu çalışma ile Batı Anadolu'da yaygın olarak gözlenen 19. yüzyıl duvar resimlerinin önemli örneklerinden birinin boyama tekniği ve malzeme özellikleri belgelenmiş ve yapının onarımı aşaması için veri oluşturulmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

SEM-EDS ve XRD analizlerinin gerçekleştirildiği İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezi'nin değerli uzman ve yöneticilerine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Renda, G, Batılılaşma Döneminde Türk Resim Sanatı, 1700-1850, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara, Türkiye, 1977.
2. Kuyulu, İ., Anatolian wall paintings and cultural traditions, Electron. J. Orient. Stud., 3 (2), 1-27, 2000.
3. Renda, G., 19.yy'da Kalemişi Nakış - Duvar Resmi, Tanzimat'tan Cumhuriyet'e Türkiye Ansiklopedisi, İletişim, İstanbul, 6, 1530-1534, 1985.
4. Renda, G., Westernisms in Ottoman Art: Wall Paintings in 19th Century Houses, the Ottoman House (Proceedings of the Amasya Symposium, 24-27 Eylül 1996), Editör: Ireland S., Bechhoefer W., The British Institute of Archaeology, Ankara, 103-109, 1998.

5. Arık, R., *Batılılaşma Dönemi Anadolu Tasvir Sanatı, Kültür ve Turizm Bakanlığı Yayınları*, Ankara, Türkiye, 1988.
6. Mora, P., Mora, L., Philippot, P., *Conservation of Wall Paintings*, Butterworths, London, 1984.
7. Van den Berg, J., *Analytical chemical studies on traditional linseed oil paintings*, Doktora Tezi, University of Amsterdam, Amsterdam, 2002.
8. Celal Esad, *Yapı Malzemesi*, Matbaayı Ahmed İhsan, İstanbul, 1908 (Transkripsiyon F. Tekinmirza).
9. Weyer, A., Roig Picazo, P., Pop, D., Cassar, J., Özköse, A., Vallet, J. M., Srša, I., *EwaGlos-European illustrated glossary of conservation terms for wall paintings and architectural surfaces*, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 17, 2015.
10. Stols-Witlox, M., *Ground, 1400-1900, Conservation of Easel Paintings*, Editör: Hill Stoner, J., Rushfield, R., Routledge, Londra, 161-188, 2012.
11. Gettens, R.J., Kühn, H., Chase, W.T., 3. Lead White, *Stud. Conserv.*, 12 (4), 125-139, 1967.
12. Kühn, H., *Zinc White, Artists' Pigments: A Handbook of Their History and Characteristics*, Editör: Feller, R.L., National Gallery of Art, Washington, A.B.D., 1, 169-186, 1986.
13. Standeven, H.A.L., *Oil-based house paints from 1900 to 1960: An examination of their history and development, with particular reference to ripolin enamels*, *J. Am. Inst. Conserv.*, 52 (3), 127-139, 2013.
14. Eastaugh, N., Walsh, V., Chaplin, T., Siddall, R., *Pigment Compendium: A Dictionary of Historical Pigments*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2004.
15. Feller, R.L., *Barium Sulfate - Natural and Synthetic, Artists' Pigments: A Handbook of Their History and Characteristics Cilt 1*, Editör: Feller, R.L., National Gallery of Art, Washington, A.B.D., 47-64, 1986.
16. Van Driel, B.A., van den Berg, K.J., Gerretzen, J., Dik, J., *The white of the 20th century: an explorative survey into Dutch modern art collections*, *Heritage Sci.*, 6, 16, 2018.
17. Chase, S.B., *Preservation Brief 28: Painting Historic Interiors*, US Department of the Interior, National Park Service, Washington DC, A.B.D., 1992.
18. Fiedler, I. ve Bayard, M.A., *Emerald Green and Scheele's Green, Artists' Pigments: A Handbook of Their History and Characteristics*, Editör: FitzHugh, E.W., National Gallery of Art, Washington, 3, 219-271, 1997.
19. Kuyulu Ersoy, İ., *İzmir'de Yerel ve Levanten Kültürünün Duvar ve Tavan Resimlerine Yansıması*, Prof. Dr. Selçuk Mülayim Armağanı Sanat Tarihi Araştırmaları, Editör: Doğanay A., Lale Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 59-81, 2015.
20. Akçamlı, A., *Bir Zamanlar Bayraklı, Bayraklı Matbaacılık*, İzmir, Türkiye, 1997.
21. İpekoğlu, B., Çizer, Ö., Reyhan, K., *İzmir' de tarihi bir konak - Yahya Paşa Konağı'nın tanıtılması ve koruma sorunlarının değerlendirilmesi*, *Yapı Dergisi*, 263, 81-87, 2003.
22. İpekoğlu, B., Çizer, Ö., Reyhan, K., *Conservation of Yahya Pasha Konak in İzmir, Turkey, Jubilee Scientific Conference 60th Anniversary of the University of Architecture Civil Engineering and Geodesy*, Sofya-Bulgaristan, 2, 5-16, 20-23 Kasım, 2002.
23. Dereci, K., İpekoğlu B., *Evaluation of conservation problems of mural paintings in Yahya Pasha Konak in İzmir, (Yayımlanmamış Rapor)*, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mimari Restorasyon Bölümü, İzmir, 2011.
24. Kuyulu Ersoy, İ., *İzmir, Bayraklı Yahya Hayati Paşa Köşkü: Kül olan resimler*, XVI. Ortaçağ - Türk Dönemi Kazıları ve Sanat Tarihi Araştırmaları Sempozyumu Bildirileri 18-20 Ekim 2012, Editör: Acara Eser, M., Bilget Fataha, E., Koyun, G., Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları, Sivas, 2, 529-545, 2014.
25. Gadsden, J. A., *Infrared Spectra of Minerals and Related Inorganic Compounds*, Butterworths, London, 1975.
26. Artesani, A., Gherardi, F., Nevin, A., Valentini, G., Comelli, D., *A photoluminescence study of the changes induced in the zinc white pigment by formation of zinc complexes*, *Mater.*, 10 (4), 340, 2017.
27. Artesani, A., *Zinc oxide instability in drying oil paint*, *Mater. Chem. Phys.*, 255, 123640, 2020.
28. Şerifaki, K., *Conservation problems of historic wall paintings of Taxiarchis Church in Cunda, Ayvalık, Yüksek Lisans Tezi*, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2005.
29. Tumosa, C.S., Mecklenburg, M.F. *The influence of lead ions on the drying of oils*, *Stud. Conserv.*, 50 (1), 39-47, 2005.
30. Cruz, A.J., Rego, C., *Scientific study of an 18th century Portuguese painting on canvas and their old restoration: problems of date and authenticity of the current image*, *Int. J. Conserv. Sci.*, 5 (4), 479-492, 2014.
31. Van der Weerd, J., Van Loon, A., Boon, J. J., *FTIR studies of the effects of pigments on the aging of oil*, *Stud. Conserv.*, 50 (1), 3-22, 2005.
32. Şerifaki, K., Böke, H., Yalçın, Ş., İpekoğlu, B., *Characterization of materials used in the execution of historic oil paintings by XRD, SEM-EDS, TGA and LIBS analysis*, *Mater. Charact.*, 60 (4), 303-311, 2009.
33. Aze, S., Vallet, J. M., Detalle, V., Grauby, O., Baronnet, A., *Chromatic alterations of red lead pigments in artworks: a review*, *Phase Transitions*, 81 (2-3), 145-154, 2008.
34. Garrappa, S., Kočí, E., Švarcová, S., Bezdička, P., Hradil, D., *Initial stages of metal soaps' formation in model paints: The role of humidity*, *Microchem. J.*, 156, 104842, 2020.
35. Buti, D., Rosi, F., Brunetti, B. G., Miliani, C., *In-situ identification of copper-based green pigments on paintings and manuscripts by reflection FTIR*, *Anal. Bioanal.Chem.*, 405 (8), 2699-2711, 2013.
36. Silva, C.E., Silva, L.P., Edwards, H.G., de Oliveira, L.F.C., *Diffuse reflection FTIR spectral database of dyes and pigments*, *Anal. Bioanal. Chem.*, 386 (7-8), 2183-2191, 2006.

37. Plesters, J., Ultramarine blue, natural and artificial, *Stud. Conserv.*, 11 (2), 62-75, 1966.
38. Gonzalez-Cabrera, M., Arjonilla, P., Domínguez-Vidal, A., Ayora-Cañada, M.J., Natural or synthetic? Simultaneous Raman/luminescence hyperspectral microimaging for the fast distinction of ultramarine pigments, *Dyes Pigm.*, 178, 108349, 2020.
39. Holakoei, P., Karimy, A.H., Nafisi, G., Lammerite as a degradation product of emerald green: scientific studies on a rural Persian wall painting. *Stud. Conserv.*, 63 (7), 391-402. 2018.
40. Petrova, O., Pankin, D., Povolotckaia, A., Borisov, E., Krivul'ko, T., Kurganov, N., Kurochkin, A., Pigment palette study of the XIX century plafond painting by Raman spectroscopy, *J. Cult. Heritage*, 37, 233-237, 2019.
41. Fu, P., Teri, G.L., Li, J., Li, J.X., Li, Y. H., Yang, H., Investigation of ancient architectural painting from the Taidong Tomb in the Western Qing Tombs, Hebei, China. *Coat.*, 10 (7), 688, 2020.



Investigation of bushing dimensions and micro hardness changes in thermal friction drilling process

Cebeli Özek*^{ID}, Muhammet Bal^{ID}

Mechanical Engineering Department, Faculty of Technology, Firat University, Elazığ, 23119, Turkey

Highlights:

- Tool diameter and material thickness has an important effect on friction drilling of brittle and ductile material
- The parameters affecting the bushing wall thickness and bushing height have been determined
- The microstructure and the change of micro-hardness in the bushing structure were investigated

Keywords:

- Friction drilling
- Bushing height
- Bushing wall thickness
- Micro hardness

Graphical/Tabular Abstract

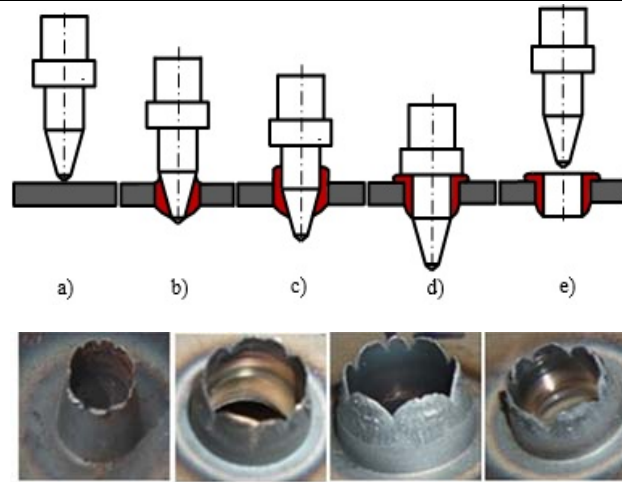


Figure A. Stages of conventional friction drilling process and the resulting bushing pictures

Article Info:

Research Article
Received: 22.04.2019
Accepted: 19.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.556943

Correspondence:

Author: Cebeli Özek
e-mail: cozek@firat.edu.tr
cebeli23@gmail.com
phone: +90 237 0000-40/4378

Purpose: The purpose of friction drilling method (FDM) is to increase the length of the connection for the bushing formed on the wall and the lower part of the hole in the thin-walled sheet.

Theory and Methods:

In the study, A7075-T651 Aluminum alloy and St37 steel plates supplied in 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm and 10 mm thicknesses and 70x500 mm dimensions were used. A total of 20 HSS and 8 WC friction drilling tools were used. The tests were carried out using HSS tool for A7075-T651 alloy with $n=1120$ (rpm) rotation speed, $f=25$ mm/min feed rate and tool taper angle $\theta=36^\circ$, 60 pieces using WC tool for St37 steel material. A total of 132 experiments were conducted by drilling holes. The experiments were carried out on a TYT400 type universal milling machine. The test specimens were rigidly fixed to the milling machine table with bolts and lugs using a clamping mold. In order to prevent the loss of time required for the workpiece temperature to cool down to room temperature, the holes were successively drilled at constant distances with equal spacing of 100 mm from each other.

Results:

Material thickness, tool diameter, shaft length of the drilling tool (l_1) and the heat generated by the friction effect are the main factors affecting the bushing height in FDM. As the material thickness increases, the contact area between the rotating tool and the drilled material increases, so the flow of material in the direction of the tool increases along the shaft length (l_1) of the tool. In ductile materials, a bushing can be obtained that has a cylindrical length suitable for its purpose and increases the length of the connection. But it has been determined that a bushing in the desired shape cannot be obtained in brittle materials.

Conclusion:

It has been determined that tool diameter, material thickness, brittle material and ductile material have an important effect on bushing wall thickness and bushing height.



Termal sürtünmeli delme işleminde oluşan kovan boyutları ve mikro sertlik değişimlerinin araştırılması

Cebeli Özek*^{ID}, Muhammet Bal^{ID}

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Gevrek ve Sünek malzemelerin sürtünmeli delinmesinde takım çapının ve malzeme kalınlığının önemli bir etkisi vardır
- Kovan çeper kalınlığı ve kovan boyu üzerinde etkili olan parametreler belirlenmiştir
- Kovan yapısında mikro yapı ve mikro sertliğin değişimi incelenmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 22.04.2019

Kabul: 19.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.556943

Anahtar Kelimeler:

Sürtünmeli delme,
kovan yüksekliği,
kovan çeper kalınlığı,
mikro sertlik

ÖZET

Sürtünmeli delme, dönen bir takım ile iş parçası-takım ara yüzeyinde sürtünme sonucu oluşan ısının etkisiyle delik delme yöntemidir. Bu yöntemin amacı, ince cidarlı saclarda, deliğin üst kısmında oluşan çeper ve alt kısmında meydana gelen kovan için bağlantı uzunluğunun artırılmasıdır. Çalışma için, otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, t=2-10 mm kalınlıklarında A7075-T651 alaşımı ve St37 çelik saclar seçilmiştir. Deneysel çalışmalar TYT400 freze tezgâhında devir sayısı n=1120 d/d, f=25 mm/dak ilerleme hızında yapılmıştır. Takım koniklik açısı $\theta=36^\circ$, $\text{Ød}=5$, $\text{Ød}=10$, $\text{Ød}=15$, $\text{Ød}=20$ mm çaplarında özel imal edilmiş yüksek hız çeliği (HSS) ve tungsten karbür (WC) takımlar kullanılmıştır. St37 çeliği sünek olduğundan devir sayısı ve ilerleme oranının değişmesiyle kovan biçiminde fazla bir değişme meydana gelmemiştir. A7075-T651 alüminyum alaşımında ise bağlantı uzunluğunun fazla artmadığı ve çatlağın yoğun olduğu taç yaprağı biçiminde kovan yapısı oluşmuştur. Sünek malzemelerde amacına uygun silindirik boyu fazla ve bağlantı uzunluğunu artıran biçimde bir kovan elde edilmiştir. Gevrek malzemelerde istenilen şekilde bir kovan elde edilemediği belirlenmiştir. Takım çapı ve malzeme kalınlığının kovan çeper kalınlığı, kovan yüksekliği ve mikro sertliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlenmiştir.

Investigation of bushing dimensions and micro hardness changes in thermal friction drilling process

H I G H L I G H T S

- Tool diameter and material thickness has an important effect on friction drilling of brittle and ductile material
- The parameters affecting the bushing wall thickness and bushing height have been determined
- The microstructure and the change of micro-hardness in the bushing structure were investigated

Article Info

Research Article

Received: 22.04.2019

Accepted: 19.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.556943

Keywords:

Friction drilling,
bushing height,
bushing wall thickness,
micro hardness

ABSTRACT

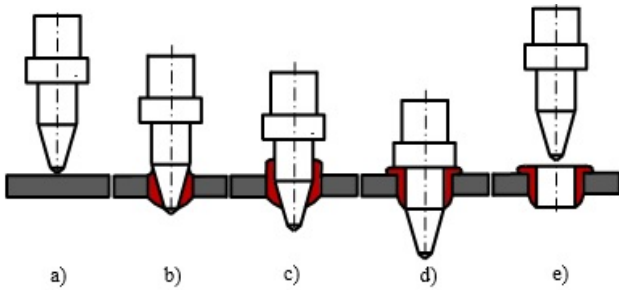
Friction drilling is a hole drilling method with the effect of heat caused by friction on a work piece-tool interface with a rotating tool. The purpose of this method is to increase the length of the connection for the bushing formed on the wall and the lower part of the hole in the thin-walled sheet. For the study, A7075-T651 alloy and St37 steel sheets have been selected with thickness for t=2-10 mm, which are commonly used in the automotive and aerospace industries. Experimental studies were carried out on the TYT400 milling machine at a speed of n=1120 rpm and f=25 mm/min. Specially manufactured high speed steel (HSS) and tungsten carbide (WC) tools were used, the tool profile with conical angle of $\theta=36^\circ$ and the tool profile with diameters for $\text{Ød}=5$, $\text{Ød}=10$, $\text{Ød}=15$, $\text{Ød}=20$ mm. Since St37 steel is ductile, there is not much change in the shape of the bushing with the change of rotational speed and feed rate. On the other hand, A7075-T651 aluminium alloy has a crown-shaped sleeve structure, in which the connection length has increased too much and the crack is dense. In ductile materials, a bushing with a cylindrical length that is suitable for its purpose and increasing the connection length is formed. In the ductile materials, a bushing in the form of excessive cylindrical length and increasing the connection length was obtained. It was determined that a bushing cannot be obtained as desired in brittle materials. It has been observed that the tool diameter and material thickness have a significant effect on the bushing wall thickness, the bushing height and micro hardness.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: cebeli23@gmail.com, mbal023@gmail.com / Tel: +90 237 0000-40/4378

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürtünmeli delme yöntemi (SDY), ince kesitli malzemelerde bağlantı uzunluğunu artırmak amacıyla inşaat, otomotiv, tesisat vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılan önemli bir imalat yöntemidir. Bu yöntemde, devir sayısı, ilerleme hızı, takım geometrisi, takım malzemesi, işlenecek malzemenin kalınlığı ve cinsi gibi parametrelerin işlem üzerinde önemli etkisi vardır. SDY’de takımın dönme ve ilerleme olmak üzere iki farklı hareketi söz konusudur.

Şekil 1’de, sürtünmeli delme yönteminin (SDY) adımları şematik olarak gösterilmiştir. Konik takımın ucu, Şekil 1(a)’da gösterildiği gibi iş parçasına yaklaşır ve nüfuz eder. Takım ile iş parçası arasındaki açılma hız ile oluşturulan aksel kuvvet temas yüzeyinde sürtünme ısısı üretir ve iş parçası malzemesini yumuşatır. Takım, iş parçasına ekstrüzyon yapıldığı için, Şekil 1b’de gösterildiği gibi, başlangıçta yumuşatılmış iş malzemesini yana ve yukarı doğru iter. İş parçası malzemesi viskoz ve yumuşatılmış halde, iş parçasını delebilir. Takım iş parçasına girdiğinde, Şekil 1c’de gösterildiği gibi daha fazla iş parçası malzemesini bir kenara itmek ve takımın silindirik bölümünü kullanarak kovan oluşturmak için aşağı doğru hareket eder. İşlem tamamlandığında, takımın omuzu, Şekil 1d’de gösterildiği gibi, malzeme üzerinde üste ekstrüzyon edilmiş çapakları iş parçasına bastırarak çeper oluşumunu sağlar. Ardından Şekil 1e’de gösterildiği gibi takım geri çekilir ve iş parçası üzerinde çeper ve malzemede kovan oluşturur.



Şekil 1. Geleneksel sürtünmeli delme işleminin aşamaları
(Stages of the traditional frictional drilling process)

Takım, dönme ve ilerleme hareketi ile iş parçasına temas ettikten sonra malzemeye nüfuz etmeye başlar ve iş parçası-takım arasındaki sürtünme sonucu oluşan ısı ile iş parçası yumuşar. Takım ilerleme hareketi doğrultusunda ilerleyerek çevreye belirli miktarda malzeme yığarak, yumuşamış malzemenin dönme etkisi ile çevrede dairesel bir şekil almasını sağlamaktadır. Delinen malzemenin altında ilerleme yönünde oluşan kovan, takım ucunun delinen iş parçasının kalınlığından daha çok iş parçasına dalması ile malzemenin serbest akmasını kolaylaştırarak kovan boyunu artırmaktadır. Akma sırasında takımın ilerleme hareketinin etkisi ile yumuşamış malzeme aşağı doğru akarken çevreye yayılarak malzemenin üst kısmında çeper, alt kısmında ise kovan oluşturur. Oluşan kovan yumuşamış ve aşağı doğru serbest kaldığından malzemenin yapısında çeşitli boşluklar

ve çatlamlar meydana geldiğinden mikro yapı değişir ve yapıdaki boşluklar artmış olur. Çatlak ve boşluklar malzemenin sertliğinin azalmasına sebep olur. Takımın dönme hareketi ve yumuşamış malzeme iş parçasının yüzeyine bastırması ile mikro yapının tane yapısı değişmektedir. Delik yüzeylerine yakın bölgelerde mikro sertlik değeri yüksek, delik yüzeyinden uzaklaştıkça mikro sertlik değeri azalmaktadır.

SDY ile ilgili yapılmış çalışmalarda, bağlantı uzunluğunu artırmak amacıyla kovan yüksekliği, kovanın kesit kalınlığı, oluşan çeper yüksekliği, kovanın ve pulun dış çapı gibi parametreler hakkında yeterli çalışmalar yapılmadığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda genelde malzeme kalınlıkları 1-2 mm ve takım çapları 8 mm’den daha küçük delik çaplarında elde edilen kovanın şekli, çeperin dış çapı ve kovan yüksekliği araştırılmıştır. Değişen malzeme kalınlığı ve delik çapları ile sonuçların nasıl değişeceği hakkında fazla bilgi bilinmemektedir. SDY, otomotiv endüstrisi, havacılık ve uzay mühendisliği, aydınlatma endüstrisi, metal konstrüksiyon, galvaniz kaplama, medikal ve fitness alet ve ekipmanları gibi birçok alanlarda, boru veya sac tipi ince cidarlı iş parçalarının delme işleminde yaygın olarak kullanılan geleneksel olmayan bir delme yöntemidir [1]. Termal sürtünmeli delme ile paslanmaz çelik sacların delinmesinde, sürtünme açıları, sürtünme temas alanı oranı, ilerleme hızı ve iş mili hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada işleme sürecini optimize etmek için Taguchi yöntemi kullanılmışlardır. SDY’de üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Ayrıca, farklı malzemelerin, özellikle de işlenmesi zor malzemelerin sürtünmeli delme işlemi için farklı tasarımlarda takımlar kullanılarak yapılmışlardır [2].

Sürtünmeli delme işleminin amacı ince cidarlı malzemelerde bağlantı uzunluğunu artıracak kovan oluşumunu sağlamaktır. Bağlantı uzunluğunu artıran kovan biçimi olmasına rağmen, bu konuda fazla çalışma yapılmamıştır. Yapılan çalışmada, aynı şartlarda A7075-T651 alüminyum alaşımı ve St37 çeliğinin sürtünmeli delme işleminde takım çapının ve malzeme kalınlığının kovan yüksekliği, kovan çeper kalınlığı, kovan mikro sertliği ve kovan mikro yapısı üzerinde önemli, ancak malzeme kalınlığının takım çapına göre daha az bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Takım çapı ve malzeme kalınlığının artmasına bağlı olarak malzeme yumuşayarak viskoz hale gelmektedir. Takımın ilerleme doğrultusunda akan malzeme miktarı arttığından kovan yüksekliği de artmaktadır. Kovanın taç yaprağı biçiminde meydana gelmesi ve kovanın üzerindeki çatlakların oluşması artan malzeme kalınlığı ve takım çapının artması ile azalmaktadır. Böylece, amacına uygun çatlakların az olduğu ve silindirik biçimde kovanlar elde edilmektedir. St37 çeliği sünek olduğundan dönme hızı ve ilerleme oranının değişmesiyle kovan biçiminde fazla bir değişme meydana gelmemiş, amacına uygun silindirik ve bağlantı uzunluğu artmış şekilde kovan elde edilmiştir. A7075-T651 alüminyum alaşımında ise bağlantı uzunluğunun fazla artmadığı ve çatlakların yoğun olduğu taç

yaprağı biçiminde kovan yapısı oluşmuştur. Sünek malzemelerde amacına uygun silindirik boyu fazla ve bağlantı uzunluğunu artıracak biçimde bir kovan meydana gelmektedir. Gevrek malzemelerde istenilen biçimde bir kovan elde edilemediği belirlenmiştir. SDY'de takım, yumuşamış olan iş parçasından çıkan malzemeyi aşağı doğru iterken kovanın mikro yapısında önemli değişiklikler ve özellikle kovan yapısında boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar kovan yapısında tane boyutlarının küçülmesine, sürtünmeden ve dönen takımın yapmış olduğu baskıdan dolayı tane sınırlarının uzamasına ve taneler arası boşlukların artması ile mikro sertliği etkilemektedir. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak mikro sertlik delik çevresine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede artarken, delik merkezinden uzaklaştıkça esas malzeme sertliğine yakın ve giderek esas malzeme sertliğine ulaşmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERTURE REVIEW)

Miller vd. [3] dik işleme merkezli bir tezgâhta, 2800 d/d dönme hızı ve 254 mm/dak ilerleme oranı şartlarında 1.5 mm cidar kalınlığına sahip içi boş kare profil parçalara sürtünmeli delme yöntemi ile tungsten karbid malzemeden imal edilmiş ve çapı 5.3 mm, uç koniklik açısı 90°, konik yüzey koniklik açısı 36° olan takımları kullanarak delikler işlemişlerdir. İşlem sırasında 9272A Kistler Model Piezoelektrik delme dinamometresi ile işleme anında meydana gelen eksenel ve radyal kuvvetleri ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışmada takım aşınma miktarının minimum olduğunu, meydana gelen aşınmanın özellikle takımın silindirik ve konik yüzeylerin geçiş bölgesinde yoğunlaştığını, işlem boyunca takımın uç kısmının giderek aşınarak sivrileştiğini bu sivrililiğin aşındığını ve itme kuvvetini azalttığını ifade etmişlerdir. Radyal kuvvetin takım aşınması üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını, her bir deliğin işleme süresinin yaklaşık olarak 2, 3 saniye olduğunu, takımın aşınmasında adhezyon, oksidasyon ve abrasyon aşınma mekanizmalarının etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Miller ve Shih [4] sürtünmeli delme işlemi sırasında meydana gelen plastik deformasyon sonucu oluşan ısı miktarını, itme ve radyal kuvvetler ile iş parçasının sıcaklığını 3D-FEM modelleme yöntemiyle ölçmüşlerdir. Sürtünme katsayısının 0,7 olduğu, işlem sırasında iş parçasının sıcaklığının arttığını, parçanın yumuşadığını ve istenilen şekilde bir kovan profilinin oluştuğunu, iş parçası malzemesinden ısı etkisi ile akan malzemenin takımın dönme doğrultusunda aktığını ve kovan boyunca artmış olduğunu tespit etmişlerdir. Miller vd. [5] CNC dik işleme merkezli tezgâhta 9272A Kistler Model Piezoelektrik delme dinamometresini kullanarak, kobalt matrisli tungsten karpit takım ile 1.19 mm kalınlığındaki AISI1020 çelik plakaya sürtünmeli delme yöntemiyle delikler delmişlerdir. Takım ucunun kör olması durumunda delme işlemi için gerekli olan ısı girişinin arttığını, takımın konik bölgesinin işlem boyunca iş parçası ile sürtünmesi sonucunda ısı oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Takımda silindirik bölgenin delik ve kovanın oluşumunu sağladığını, omuz bölgesinin ise iş

parçasının yüzeyine temas ederek delme sonucu çıkan malzemeyi yüzeye bastırarak çeperin oluşmasında etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Chow vd. [6] tungsten karbür malzemeden, konik yüzeyin etrafına 4 adet yaprak yüzey oluşturularak koniklik açıları 30°, 45° ve 60° olan farklı sürtünmeli delme takımları imal etmişlerdir. 2 mm kalınlığındaki AISI304 östenitik paslanmaz çelik malzemeye, 75, 100, 125 mm/dak ilerleme oranları ve 30, 60, 90 m/dak kesme hızı şartlarında sürtünmeli delme yöntemi ile delikler delmişlerdir. Bu şekilde takım ömrünün düştüğünü, ancak oluşan kovanın yüksekliğinin ve yüzey kalitesinin daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Ku vd. [7] paslanmaz çelik plakalara termal sürtünmeli delme işleminde işlemin optimizasyonu için Taguchi yöntemini kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Sürtünme açısının, sürtünme temas alanı oranının ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sürtünme temas alanı oranının en önemli faktör olduğunu belirlemişlerdir. Lee vd. [8] 30x30x2 mm boyutlarında AISI304 östenitik paslanmaz çeliğine kaplanmış TiAlN ve AlCrN ve kaplanmamış tungsten karbür takımlar kullanarak sürtünmeli delme yöntemi ile delikler delmişlerdir. Kaplanmış takımların yüzeyine ısı giriş miktarının kaplanmamış takıma göre daha az olduğunu, çok yüksek dönme hızlarında kaplanmış takımlarda büyük oranlarda aşınmanın meydana geldiğini, kaplanmış takımlardaki kaplama tabakasının aşınmadan çok yağlama etkisi yaptığı sonucuna varmışlardır. Gopal vd. [9] HSS takımlar kullanarak, AA6351 Alüminyum alaşımının sürtünmeli delik delme yöntemi ile delinmesinde, eksenel kuvvet ve momentin tespiti için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Takım koniklik açısının önemli bir parametre olduğunu, bunun hem takımın dönme momentini hem de itme kuvvetini etkilediğini ifade etmişlerdir. Bu işlemin iki kademeli delme ve havşa açma işlemlerinde kolaylıkla kullanılabileceğini, düşük ve orta devir sayılarında AA63351 alaşımının sürtünmeli delinmesinde iyi bir yüzey elde edildiğini tespit etmişlerdir. Pantawane ve Ahuja [10] AISI1015 çelik malzemeye sürtünmeli delik delme yöntemi ile delikler delinerek delme işleminde deliğin kalitesi üzerinde etkili parametreleri belirlemek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Modelde hızın yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermişlerdir. Wei-Liang vd. [11] SUS304 paslanmaz çeliğin termal sürtünmeli delme yöntemi kullanılarak delinmesi için sinterlenmiş karbür takımlar kullanılarak Taguchi yönteminde işlem parametrelerini optimize etmişlerdir. 30x30x2 boyutlarında paslanmaz çelik levhaların sürtünmeli delinmesinde Takımın sürtünme açısı, sürtünme temas alanı oranı, ilerleme hızı ve takım dönme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, ANOVA programı ile yüzey pürüzlülüğü ve kovan yüksekliği için uygun parametreleri tespit etmişlerdir. Sürtünme açısının ve takımın dönme hızının yüzey pürüzlülüğü, kovan yüksekliği ve sürtünme temas alanı oranı üzerinde önemli parametreler olduğunu tespit etmişlerdir. Padma ve Swamy [12] DEFORM (3D) yazılımını kullanarak AISI4340 malzemesinin tungsten karbür takımlar kullanılarak sürtünmeli delinmesinde takım

şeklinin oluşan kovan biçimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Oluşan kovanın şeklinin taç yaprağı şeklinde meydana geldiği ve yüzeyde daha az çatlaklar oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek ilerleme hızlarında ve düşük dönme hızlarında itme kuvvetinin ve momentin gözle görülür şekilde azaldığını tespit etmişlerdir. Yang vd. [13] farklı iş mili hızları ve ilerleme hızları için üç tip Ni bazlı süper alaşımını (Mar-M247, Haynes-230 ve Inconel-718) termal sürtünmeli delme yöntemi ile çeşitli deneyler yapmışlardır. Inconel-718, yüksek akma dayanımına sahip olduğu için en yüksek aşınma, sürtünmeli delme sırasında iş parçasından geçen ısının en az olmasından dolayı kısa kovan yüksekliği ve en kötü yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği, ancak yüksek eksenel kuvvetlerin meydana geldiğini malzemenin mukavemet ve mekanik özelliklerinin en önemli faktör olduğunu ifade etmişlerdir. Haynes-230, en düşük aşınma ve akma dayanımına sahip olduğundan, iş parçasından geçen ısının fazla olmasından dolayı en küçük eksenel kuvvet meydana gelmekte ve en uzun burç boyu ve en iyi yüzey pürüzlülüğünün oluştuğunu göstermişlerdir. Raju ve Swamy [14] DEFORM-3D yazılımı kullanarak, AA6061 malzemesinin sonlu elemanlar modeli ile tungsten karbür takımlar kullanılarak sürtünmeli delme yöntemi ile delinmesinde oluşan gerilmeleri araştırmışlardır. İlerleme hızı ve takım dönme hızları arttığında gerilmelerin azaldığını, ancak dönme hızı 3000 dev/dak'dan 3500 dev/dak'ya artması ile gerilmelerde artmaktadır. 4000 dev/dak'dan daha yüksek devir sayılarında kovanın biçiminde bozulmaların meydana geldiği, çeşitli dönme ve ilerleme hızlarında en etkili gerilmeleri ve uzamaları tespit etmişlerdir. İlerleme oranı ve dönme hızı arttıkça gerilmelerin azaldığı, uzamaların ise arttığı, ancak belli bir dönme hızından sonra uzamanın ilerleme oranına bağlı olarak azaldığını göstermişlerdir. Krasauskas vd. [15] ABAQUS/EXPLICIT sonlu elemanlar analizinde Tungsten karbür takım kullanılarak AISI304 paslanmaz çeliğinin termal sürtünmeli delinmesinde eksenel kuvvet değişiminin etkisini araştırmışlardır. Deneysel ve analiz sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Boopathi vd. [16] alüminyum, pirinç ve paslanmaz çelik malzemelerin sürtünmeli delme işleminde sabit dönme hızı, sabit ilerleme hızında itme kuvvetleri ölçülmüş ve analizleri yapılmıştır. İtme kuvveti, sabit dönme ve ilerleme hızında kademeli bir artış göstermiştir. Yüksek hızlarda daha yüksek ısının oluştuğunu ve deliğin delinmesi için gereken itme kuvvetinin takım hızı arttıkça azaldığını, en düşük itme kuvveti, Alüminyum için 1512 N, pirinç için 1798 N ve en yüksek itme kuvveti ise paslanmaz çelik için 2745 N olarak elde edilmiştir. Sertliğinin deliğin yüzeyine yakın bölgelerde arttığı görülmüştür. Mikro yapıda, alüminyum iş parçasında malzeme transferinin fazla olduğu, pirinç de malzeme transferi daha az miktarda gerçekleşirken, paslanmaz çelikte ise herhangi bir malzeme transferinin gerçekleşmediği görülmüştür. Özek ve Demir [17, 18] yapmış oldukları çalışmalarda 2 mm, 4 mm ve 6 mm kalınlıklardaki A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Delme işleminde 24°, 36° ve 48° koniklik açısına sahip HSS takımlar kullanılarak farklı dönme ve ilerleme hızlarında 8 ve 10 mm çaplarında delikler

delerek malzeme kalınlığına ve delik çapına bağlı olarak oluşan kovan yüksekliğini araştırmışlardır. Malzeme kalınlığının artması ile kovan yüksekliğinin düzenli artmadığını ifade etmişlerdir. En yüksek kovan boyunun, 2400 d/d, 50 mm/min ilerleme hızında, 6 mm kalınlıktaki malzemede 12 mm delik çapındaki takımın elde edildiğini, artan malzeme kalınlığı ile kovan yüksekliğinin azaldığı ve dolayısıyla malzeme kalınlığının Alüminyum malzemede oluşan kovan yüksekliği üzerinde fazla bir etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir. Kaya vd. [19] St12 çeliğinin sürtünmeli delinmesinde yüzey sıcaklığının, itme kuvvetinin ve momentin değişimini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalardan itme kuvveti ve momente bağlı olarak sürtünme açısı, ilerleme hızı ve sürtünme temas alanı oranının arttığını, dönme hızının artması ile itme kuvvetinin ve momentin azaldığını tespit etmişlerdir. Dönme hızının artması ile iş parçası yüzey sıcaklığının arttığı, ilerleme oranı artarken yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği ve ilerleme oranı artarken kovan yüksekliğinde arttığını ifade etmişlerdir. Hynes vd. [20] AA6061-T6 alaşımının sürtünmeli delme yönteminde delinmesinde, termal davranışları sayısal analizler yaparak incelemişler ve ısı akışını sayısal modele uygulayarak sıcaklık dağılımını gözlemlemişlerdir. Sayısal analizlerde AA6061-T6 malzemesinin merkezinde maksimum sıcaklığın oluştuğu ve 332,85°C olduğu gösterilmiştir. Bu sıcaklıkta sac malzemenin viskoplastik hale geldiğini ve kovan yüksekliği üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Bahloul vd. [21] AISI304 paslanmaz çeliğinin Tungsten Karbür takımlar ile sürtünmeli delme yönteminde deneysel ve analitik olarak bulanık mantık tekniğini kullanarak araştırmışlardır. En iyi sonuçların takım çapı 9.2 mm, 30°sürtünme açısında, %50 sürtünme temas alanı oranında, 60 mm/min ilerleme hızında elde edildiğini ifade etmişlerdir. Deneysel ve bulanık mantık ile elde edilen sonuçların kalite özellikleri bakımından birbirleri ile aynı olduğunu vurgulamışlardır. Wu vd. [22] Takımın baskı kuvvetini ve momentini tahmin etmek için sayısal olarak bir sürtünmeli delme modeli geliştirilerek bu modelden elde ettikleri sürtünme katsayısını deneysel çalışmalardan elde edilen sürtünme katsayısı ile karşılaştırmışlardır. Sıcaklık, basınç ve sürtünme katsayısındaki değişimleri dikkate alarak sürtünmeli delme için yeni bir kuvvet modeli geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar ile geliştirilen modelden elde edilen değerlerin uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Demir Z. [23] yaptığı çalışmada, 4 mm kalınlığında A7075-T651 alüminyum alaşımını çapı 8 mm olan HSS ve St37 çeliğini ise çapı 10 mm olan WC takımlar kullanılarak sürtünmeli delme yöntemiyle delerek farklı devir sayısı ve ilerleme hızlarında oluşan kovan hacminin yapısını incelemiştir. Takımların silindirik bölge uzunluğunun, koniklik açısının, dönme hızının ve ilerleme hızının oluşan kovanın hacmi üzerindeki etkisini araştırmış, kovan üst pulunun ve kovana oluşturan malzemenin hacimlerindeki değişimi incelemiştir. Değişen parametreler ile sünek olan St37 çeliğinin kovan hacmi gevrek olan A7075-T651 alaşımının kovan hacmine göre daha az değişiklik gösterdiğini tespit etmiştir. Eliseev vd. [24] AA204 alüminyum malzemenin sürtünmeli delme işleminde mikroyapı değişimlerini incelemişlerdir. Delik kenarlarının hemen yakınında ince taneli ve kararlı ikinci faz

parçacıklarının düşük hacimli parçacıklara sahip olduğunu ve yeniden kristalleşmiş bir malzeme tabakasının meydana geldiğini, yüksek sıcaklık, ısıl dönüşüm ve normal deformasyonun etkisiyle delme işlemi sırasında ikinci faz parçacıklarının çözüldüğünü ifade etmişlerdir. Isıdan etkilenmiş bölgedeki büyük ve uzun tane yapıları arasında bölgesel bir plastik akıştan kaynaklanan yeniden kristalleşmiş çeşitli malzeme tabakalarının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bilgin vd. [25] Farklı özellikteki malzemelerin sürtünmeli delinmesini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar metoduna (FEM) dayanan deform-3D yazılımını kullanmışlardır. Delme sırasında işlem parametrelerine bağlı olarak oluşan moment, eksenel kuvvet ve ısı transfer katsayısını hesaplayan analitik bir model geliştirmişlerdir. Deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen sıcaklık, moment ve eksenel kuvvet sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Moment ve eksenel kuvvet değerleri, iş mili hızının artmasıyla azalırken, iş mili hızının artmasıyla birlikte iş parçasının merkezinde sıcaklık değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Rajesh vd. [26] yaptıkları çalışmada, galvanizli çeliğin termal olarak delinmesinde, burç uzunluğunun mekanizmasını ve oluşumunu deneysel ve Taguchi L27 ortogonal dizisine dayanarak sayısal olarak araştırmışlardır. Deneylerde dönme hızı, takım açısı ve iş parçası kalınlığı gibi önemli işlem parametrelerinin oluşan kovan yüksekliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kovan yüksekliğini deneysel verilere dayanan ileri beslemeli yapay sinir ağı kullanılarak karşılaştırmışlardır. Genetik algoritma (GA) tarafından öngörülen kovan yüksekliği ile deneysel sonuçlardan elde edilen değerler arasında optimum bir benzerlik olduğunu vurgulamışlardır. Bu durumda, GA ile birleştirilen ANN modelinin, galvanizli çeliğin sürtünmeli delme işleminde maksimum kovan yüksekliğinin elde edilmesi için optimum şartları tespit etmede başarıyla uygulanabileceğini göstermişlerdir. Bahloul vd. [27] AISI304 paslanmaz çeliğinin sürtünmeli delme işleminde işlem parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi metodunu ve bulanık mantık kullanmışlardır. Elde edilen deneysel sonuçların istatistiksel sonuçlarla uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. Önerilen deney seviyeleri için koniklik açısı $\beta=45^\circ$, sürtünme yüzey alanı %50, parça kalınlığı $t=1$ mm, ilerleme hızı, 100 mm/min ve dönme hızı, 3500 d/min olduğunu tespit etmişlerdir. İş parçası kalınlığı ve dönme hızının termal sürtünmeli delme işleminde önemli derecede etkili olan işlem parametreleri olduğunu ifade etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

3.1. Deneysel Düzenek ve Deneysel Çalışmalar (Experimental Setup and Experimental Studies)

Bu çalışmada deney malzemesi, ticari olarak piyasadan, 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm ve 10 mm kalınlıklarda ve 70x500 mm boyutlarında temin edilen A7075-T651 Alüminyum alaşımı ve St37 çelik plakalar kullanılmıştır. A7075-T651'in kimyasal bileşimi ise Tablo 1'de, St37'nin kimyasal analizi Tablo 2'de, A7075-T651 ve St37'nin mekanik özellikleri 5000 kN kapasiteli SHIMADZU marka çekme test cihazında 5 mm/dak çekme hızında çekme testine tabi tutularak tespit

edilmiş ve Tablo 3'te verilmiştir. HSS ve WC takımlar, Altek Metal Ticaret A.Ş.'den mekanik özellikleri tespit edilmiş olarak temin edilmişlerdir. Takımların mekanik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 1. A7075-T651 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of A7075-T651)

Element	t= 2-4 mm	t=6-8 mm	t= 10 mm
	% (Analiz sonuçları)	% (Analiz sonuçları)	% (Analiz sonuçları)
Silisyum (Si)	0,08	0,06	0,07
Demir (Fe)	0,28	0,27	0,16
Bakır (Cu)	1,67	1,73	1,4
Mangan (Mn)	0,61	0,21	0,04
Magnezyum (Mg)	2,37	2,51	2,5
Krom (Cr)	0,19	0,18	0,19
Çinko (Zn)	5,76	5,97	5,8
Titanyum (Ti)	0,036	0,05	0,06
Geriye Kalan (Al)	89,004	89,02	89,78

Tablo 2. St37 malzemenin kimyasal bileşimi (Chemical composition of St37)

Element	%	Element	%
Karbon (C)	0,17	Kükürt (S)	0,05
Mangan (Mn)	0,2	Silisyum (Si)	0,4
Fosfor (P)	0,025	Azot (N)	0,009
Geriye kalan (Fe)			99,721

Tablo 3. A7075-T651 ve St37 malzemelerinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of A7075-T651 and St37)

Malzemenin mekanik özellikleri	Malzeme cinsi ve kesit kalınlığı (mm)		
	A7075-T6 (2-4mm)	A7075-T651 (6-8mm)	St37 (10mm)
Akma dayanımı (N/mm ²)	580	605	235
Çekme dayanımı (N/mm ²)	505	550	340
Kayma gerilmesi (N/mm ²)	331		370
(%) Uzama	11,7	10,5	21 26
Elastiklik modülü (kN/mm ²)	71,7		210
Isıl iletkenlik katsayısı (W/m·°K)	130		76
Erime sıcaklığı (°C)	635		1530

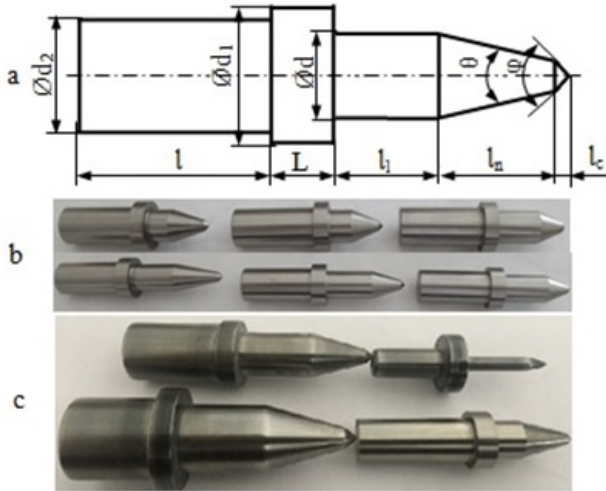
Tablo 4. Kesme takım malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri (Mechanical and physical properties of cutting tools)

Malzemenin mekanik özellikleri	Malzeme cinsi	
	Yüksek hız çeliği (HSS)	Tungsten kurbür (WC)
Maksimum çalışma sıcaklığı (°C)	600	1000
Sertlik değeri	64 HR _C	92 HR _A
Elastik modülü (kN/mm ²)	200	600
Isıl iletkenlik katsayısı (W/m·°K)	21	84
Erime sıcaklığı (°C)	1540	2850

Deney çalışmalarında HSS ve WC kesici takımlar kullanılmıştır. HSS takımlar Referans Makine A.Ş., WC takımlar ise Kaya Ticaret A.Ş. firmaları tarafından ince silindirik taşlama yöntemi ile $R_a=0.05-0.2 \mu\text{m}$ aralığında yüzey pürüzlülüğünde ve $\pm 10\%$ boyut toleranslarında imal edilmişlerdir. Takımların, $\text{Ø}d_2$, $\text{Ø}d_1$, $\text{Ø}d$, l_1 , l_n , l_c , l , L , θ ve L geometrik boyutları Tablo 5’de, kesici takım şekilleri ise Şekil 2’de verilmiştir. Çalışmalarda toplam 20 adet HSS ve 8 adet WC sürtünmeli delme takımı kullanılmıştır.

Tablo 5. Kesici takımların boyutları
(Dimensions of cutting tools)

Takım sıra no:	$\text{Ø}d_2$	$\text{Ø}d_1$	$\text{Ø}d$	l_1	l_n	l_c	l	L	θ	Takım adedi
HSS	1	10	12.55	20	5	0.9	20	5	36°	5
	2	14	16	10	20	1.8	25	5		5
	3	20	22.5	15	20	1.5	25	5		5
	4	24	30	20	20	3.6	30	5	36°	5
	5	10	12.55	20	5	0.9	20	5		2
	6	14	16	10	20	1.8	25	5	2	
WC	7	20	22.5	15	20	1.5	25	5	2	
	8	24	30	20	20	3.6	30	5	2	



Şekil 2. Sürtünmeli delme yönteminde kullanılan takımlar
a) Takım geometrisi b) HSS takımları c) WC takımları.
(Tools used in friction drilling method a. Tool geometry b. High-speed steel (HSS) tools c. Tungsten carbide (WC) tools)

SDY ile $n=1120$ (d/d) dönme hızı, $f=25$ mm/dak ilerleme hızında ve takım koniklik açısı $\theta=36^\circ$ olan A7075-T651 alaşımı HSS takım kullanılarak 72 adet, St37 çelik malzeme ise WC takım kullanılarak 60 adet delik delinerek toplam 132 deney yapılmıştır. Deneyler, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü CNC atölyesindeki TYT400 tipi universal freze tezgâhında yapılmışlardır (Şekil 3a). Çalışmada 70x500 mm boyutlarında hazırlanmış deney numuneleri bağlama kalıbı (Şekil 3b) kullanılarak freze tezgâhı tablasına civata ve papuçlar ile rijit bir şekilde bağlanmış ve iş parçası sıcaklığının oda sıcaklığına soğuması için gerekli zaman kaybını önlemek amacıyla delikler birbirlerinden 100 mm eşit aralıklı sabit mesafelerde ard arda delinmiştir.

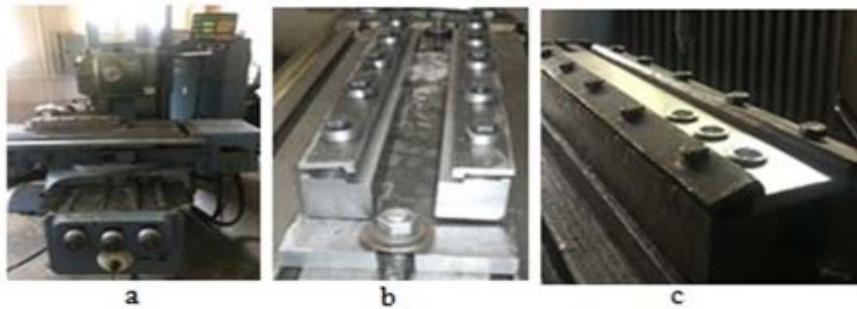
Deneylere önce alüminyum deney numuneleri ile başlanmış, her numuneye dört farklı çapta üçer adet toplam on iki adet delik delinmiştir (Şekil 4). Deneylere sırasıyla 2, 4, 6, 8, 10 mm kalınlıklardaki numunelerle devam edilmiş, deney numuneleri rijit şekilde sabitlendikten sonra delme takımları değiştirilerek yapılmıştır. Alüminyum için HSS kesici takımlar, St37 çeliği için ise WC (Tungstern Karbür) takımlar kullanılmışlardır.

3.2. Kovan Çeper Kalınlığı ve Kovan Yüksekliğinin Ölçülmesi (Measurement Bushing Wall Thickness And Bushing Height)

Şekil 5a’da kovanda çeper kalınlığı, kovan yüksekliği, 5b’de St37 ve 5c’de ise A7075-T651 malzemelerinde elde edilen kovanlar gösterilmektedir. Kovan yüksekliği (h_a) ve kovan çeper kalınlığı (h_c), iş parçasının yüzeyi referans alınarak ve derinlik mikrometresi ile üç farklı noktadan, kovan dış çapları ise 1/100 dijital kumpas ile kovanın iş parçası yüzeyine yakın ve silindirik bölgesinde dört farklı noktadan ölçülmüş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

3.3. Mikro Sertliğin Ölçülmesi (Measurement of Micro Hardness)

Kalınlıkları, $t=2$, $t=4$, $t=6$, $t=8$ ve $t=10$ mm, $n=1120$ d/d’da, $f=25$ mm/min ilerleme hızında ve koniklik açısı $\theta=36^\circ$, $\text{Ø}d=5$, $\text{Ø}d=10$, $\text{Ø}d=15$ ve $\text{Ø}d=20$ mm çaplarında HSS ve WC takımlar kullanılarak delinmiştir. Mikro sertlik ölçümleri ve SEM fotoğraflarının çekimi için numuneler bozulmayacak



Şekil 3. Deney seti a) Kullanılan freze tezgâhı b) Bağlama kalıbı c) Deney numunesi
(Experimental set-up a. Milling machine b. Binding pattern c. Test sample)

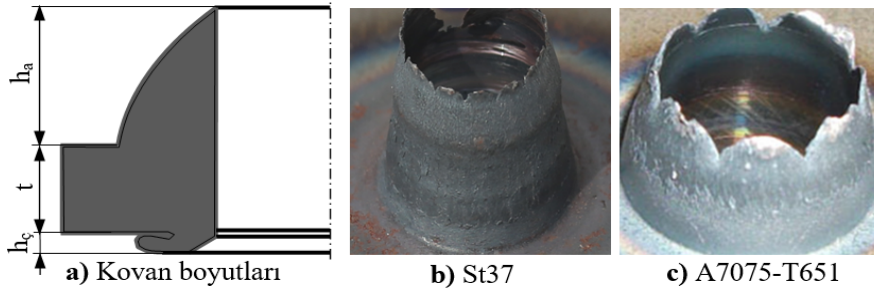
şekilde delik ekseninden iki eşit parça olacak şekilde testere ile kesilmişlerdir. Daha sonra iki eşit parçaya bölünerek elde edilen numuneler tekrar testere ile kesilerek ikiye bölünmüş ve ince diş eğe ile yüzeyleri temizlenmiştir. Temizlenen bu numuneler bakalıte alınıp sırasıyla A400, A600, A800 ve A1200 zımpara ile yüzeyleri zımparalandıktan sonra 1 µm tane boyutlu elmas pasta ve çuha kullanılarak parlatılmışlardır. A7075-T651 alüminyum numuneler, %5 ml HNO₃, %1,5 ml HCl, %1 ml HF, %92,5 ml saf su bileşiminden oluşan ve keller olarak adlandırılan dağlayıcı ile yaklaşık olarak 40s dağlanmış. St37 çelik numuneler ise %10 ml HNO₃ ve %90 ml etil alkol bileşiminden oluşan ve nital olarak adlandırılan dağlayıcı ile yaklaşık olarak 60s dağlandıktan sonra hazır hale getirilmişlerdir.

Mikro sertlik ölçümleri, A7075-T651 alüminyum numuneler, dağlama işleminden sonra düşey ekseninde iş parçası kalınlığının orta çizgisinden, yatay ekseninde ise delik yüzeyinden 100 µm mesafelerde olmak üzere toplam 10 noktadan yapılmıştır. St37 çelik numuneler ise delik yüzeyinden itibaren 100 µm mesafelerde olmak üzere toplam 10 noktadan ölçüm alınarak yapılmıştır (Şekil 6). Delik yüzeyinden itibaren mikro sertlik ölçüm noktaları, sertlik değerinin iş parçası sertlik değerine eşit olduğu ve ısıdan etkilenmiş bölgenin delik yüzeyinden olan uzaklığına göre tespit edilmiştir. A7075-T651 alaşımında mikro sertlik ölçümlerinin 5 noktada, St37 için ise 6 noktada alınması, mikro sertlik değerlerinin esas malzemenin mikro sertlik değerine ulaşma mesafesine göre belirlenmiştir. A7075-

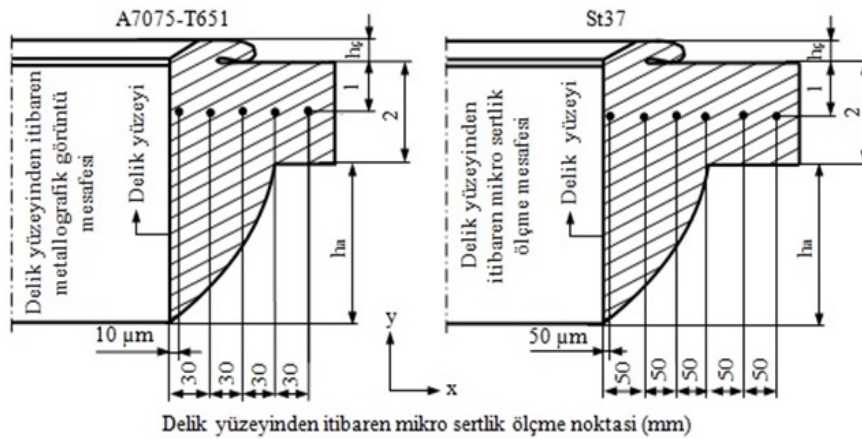
T651 alaşımında mikro sertlik değerine delik yüzeyinden en fazla 130 µm'de St37 çelik malzemede ise en fazla 300 µm mesafede ulaşılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri, Future-Tech FM-700 marka bir mikro sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür. Her bir numunenin mikro yapı (SEM) fotoğrafları, ZEISS EVO MA10 marka taramalı elektron mikroskopunda 5000X büyütmede, termal ve basınç gerilmelerinden dolayı delik yüzeyinde meydana gelen çatlaklar ise 2000X büyütmede çekilmiştir.



Şekil 4. Sürtüneli delme işlemi uygulanmış numuneler **a)** Numunenin alttan görünüşü **b)** Numunenin yandan görünüşü **c)** Numunenin üstten görünüşü
(Samples with friction drilling a. Bottom view of the sample b. Side view of sample c. Top view of the sample)



Şekil 5. Elde edilen kovanlar: kovan yüksekliği ve kovan çeper yüksekliği
(Bushings obtained: Bushing height and Bushing wall height)



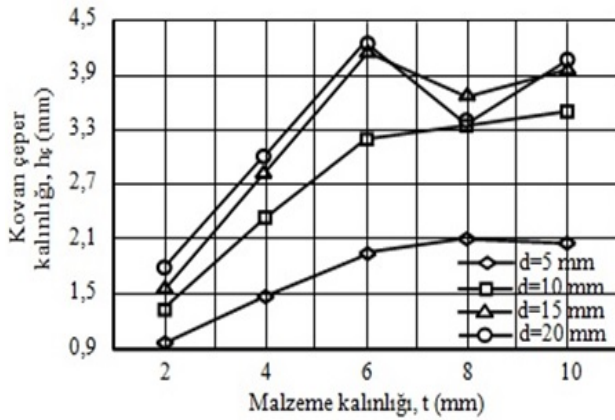
Şekil 6. Mikro sertlik ölçüm yöntemi (Micro hardness measurement method)

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

4.1. Takım Çapının ve Malzeme Kalınlığının Kovan Çeper Kalınlığına (h_c) ve Kovan Yüksekliğine (h_a) Etkisi (The Effect of Tool Diameter and Material Thickness on Bushing Thickness (h_c) and Bushing Height (h_a))

SDY’de kovan çeper kalınlığına (h_c) etki eden en önemli faktör merkezkaç kuvvet etkisi oluşturan takımın dönme hızıdır. Dönme hızı artarken sürtünme ısısının etkisi ile yumuşayan ve akıcı hale gelen malzeme çevreye yayılmaktadır. Böylece delik üstünde pul biçiminde bir çeper oluşmakta, takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak oluşan pulun kalınlığı da artmaktadır. Pul kalınlığının ve kovan boyunun yeterli olması malzeme kalınlığı ve delik çapına bağlı olarak doğrusal bir değişim göstermektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça takım ile delinen malzeme arasındaki temas alanı artmakta, bu da takımın ilerleme yönünde malzeme akışını artırmaktadır. Takımın ilerleme yönünde akan malzeme miktarı oluşan kovan çeper kalınlığına ve kovan yüksekliğine etki etmektedir [5].

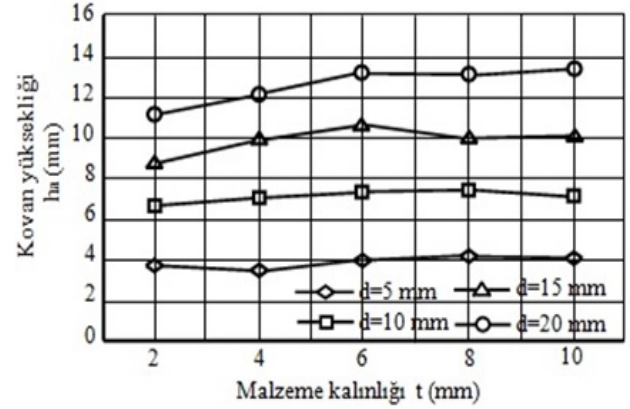
A7075-T651 malzemesi için, HSS takım kullanılarak, takım koniklik açısı $\theta=36^\circ$, ilerleme hızı $f=25$ mm/dak ve dönme hızında $n=1120$ dev/dak’da malzeme kalınlığı ve delik çapına bağlı olarak elde edilen kovan çeper kalınlığının değişimi verilmiştir (Şekil7).



Şekil 7. A7075-T651 için takım çapının kovan çeper kalınlığına etkisi
(Effect of tool diameter on the bushing wall thickness of A7075-T651)

Şekilde görüldüğü gibi malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovan çeper kalınlığının arttığı, $\text{Ø}d=5$ mm ve $\text{Ø}d=10$ mm takım çaplarında malzeme kalınlıklarına bağlı olarak lineer bir artış olduğu görülmektedir. $\text{Ø}d=15$ mm ve $\text{Ø}d=20$ mm takım çaplarında ise $t=6$ mm malzeme kalınlığına kadar düzenli bir artış ve $t=8$ mm de bir azalma, $t=10$ mm ise tekrar bir artış meydana gelmiştir. En büyük kovan çeper kalınlığı $\text{Ø}d=20$ mm takım çapında $t=6$ mm malzeme kalınlığında $h_c=4,25$ mm, en düşük kovan çeper kalınlığı ise $\text{Ø}d=5$ mm takım çapında ve $t=2$ mm malzeme kalınlığında $h_c=0,965$ mm olarak elde edilmiştir. SDY’de kovan yüksekliğine etki eden faktörlerin başında, malzeme kalınlığı, takım çapı, delme takımının şaft uzunluğu (l_1) ve sürtünme etkisi ile

meydana gelen ısıdır. Malzeme kalınlığı arttıkça dönen takım ile delinen malzeme arasındaki temas alanı arttığından takımın ilerleme doğrultusundaki malzeme akışı takımın şaft uzunluğu (l_1) boyunca artmaktadır. Takımın ilerleme yönünde akan malzeme miktarı kovan yüksekliğine etki etmektedir [20]. A7075-T651 alaşımı için takım koniklik açısı $\theta=36^\circ$, ilerleme hızı $f=25$ mm/dak ve $n=1120$ dev/dak dönme hızında malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan yüksekliği değişimi verilmiştir (Şekil 8).



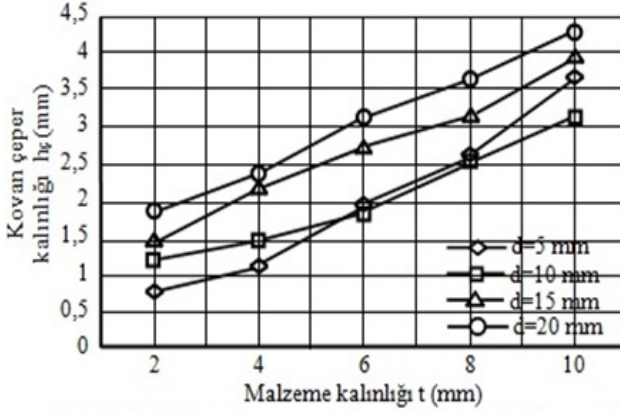
Şekil 8. A7075-T651 için takım çapının kovan yüksekliğine etkisi
(Effect of tool diameter on bushing height for A7075-T651)

Takım çapının artmasına bağlı olarak malzeme temas alanı artacağından malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovan yüksekliği lineer bir şekilde artmaktadır. Malzeme temas alanı arttıkça sürtünme etkisi ile meydana gelen ısı artmakta ve malzeme ısı etkisiyle yeterli derecede yumuşayarak viskoz hale gelmektedir. Takımın ilerleme doğrultusunda akan malzeme miktarı arttığından kovan yüksekliği de artmaktadır [20]. $\text{Ø}d=5$, $\text{Ø}d=10$ mm ve $\text{Ø}d=15$ mm takım çaplarında malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan yüksekliği düzenli bir biçimde artmıştır. En yüksek kovan boyu, $\text{Ø}d=20$ mm takım çapında ve $t=10$ mm malzeme kalınlığında $h_a=13,40$ mm, en düşük kovan boyu ise $\text{Ø}d=5$ mm takım çapında ve $t=4$ mm malzeme kalınlığında $h_a=3,43$ mm olarak elde edilmiştir.

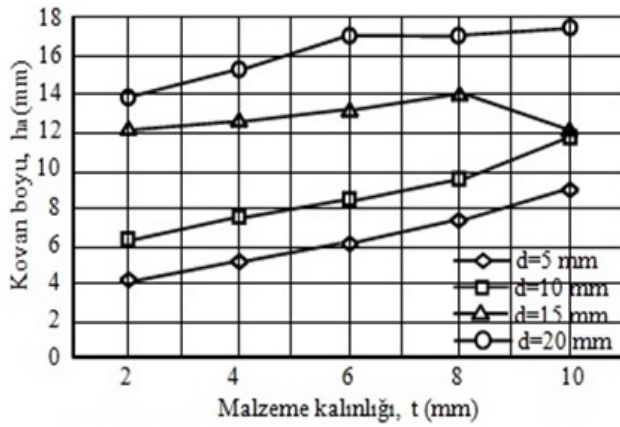
Şekil 9’da, St37 çelik malzemenin sürtünmeli delinmesinde WC takım kullanılarak takım koniklik açısı $\theta=36^\circ$, ilerleme hızı $f=25$ mm/dak ve dönme hızı $n=1120$ dev/dak’da elde edilen kovanın çeper kalınlığının farklı takım çapları için malzeme kalınlığına ve delik çapına bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovanın çeper kalınlığı da artmaktadır. En yüksek kovan çeper kalınlığı $\text{Ø}d=20$ mm çapındaki takım ile $t=10$ mm malzeme kalınlığında $h_c=4,25$ mm, en düşük kovan çeper kalınlığı ise $\text{Ø}d=5$ mm çapındaki konik takım ile $t=2$ mm malzeme kalınlığında $h_c=0,75$ mm olarak ölçülmüştür. Yapılan deneylerden görüldüğü gibi takım çapı ve malzeme kalınlığının oluşan kovan çeper kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 10’da, takım koniklik açısı $\theta=36^\circ$, ilerleme hızı 25 mm/dak ve dönme hızı $n=1120$

dev/dak'da WC takım kullanılarak St37 çelik malzemesinin sürtünmeli delinmesinde elde edilen kovan boyu için takım çapının malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan yüksekliği (h_a) üzerindeki etkisinin değişimi verilmiştir.



Şekil 9. St37 için takım çapının kovan çeper kalınlığına etkisi (Effect of tool diameter on the bushing wall thickness of St37)



Şekil 10. St37 için takım çapının kovan boyuna etkisi (Effect of tool diameter on bushing height for St37)

SDY'de malzeme kalınlığı arttıkça dönen takım ile delinen malzeme arasındaki temas alanı arttığından takımın ilerleme doğrultusundaki malzeme akışı artmakta ve takımın h_1 uzunluğu boyunca daha fazla malzemenin yığılmasını sağlamaktadır. Yığılan malzeme takımın ilerleme doğrultusunda delik boyunca kovan boyunun artmasına etki etmektedir. Artan malzeme kalınlığına bağlı olarak takım çapı arttıkça kovan boyunun (h_a) arttığı görülmüştür. Malzeme kalınlığı ve takım çapının artması ile temas alanının artması nedeniyle delik içerisinde takım boyunca akan malzeme miktarı artmaktadır [21, 27]. Küçük takım çaplarında, seçilen malzeme kalınlığının elde edilen kovan boyuna fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan boyunun artırılması isteniyorsa takım çapının büyük seçilmesi önemlidir. Malzeme kalınlığı sabit alındığında artan konik takım çapı ile kovan boyu orantılı bir şekilde artmaktadır. Belli değerlerde seçilen malzeme kalınlığı ve takım çapının kovanın boyuna etkisi belirli değerler için sınırlı olmaktadır.

Takım çapının ve malzeme kalınlığının artması ile kovan boyu doğrusal bir şekilde artmaktadır. En yüksek kovan boyu, $\text{Ø}d=20$ mm takım çapında, $t=10$ mm malzeme kalınlığında ve $h_a=15,30$ mm, en düşük kovan boyu ise $\text{Ø}d=5$ mm takım çapında, $t=2$ mm malzeme kalınlığında ve $h_a=4,16$ mm olarak elde edilmiştir.

Şekil 11'de, A7075-T651 ve St37 malzemelerinde, takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen bazı kovan resimleri verilmiştir. Şekil 11a'da A7075-T651 malzemenin SDY'de delme deneyleri sonucu takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan resimleri verilmiştir. Kovanın taç yaprağı biçiminde meydana gelme olasılığı ve kovanın üzerindeki çatlakların oluşması artan malzeme kalınlığı ve takım çapının artması ile azalmaktadır. Malzeme kalınlığının ve takım çapının artması ile sürtünme sonucu meydana gelen ısının etkisiyle malzeme yumuşayarak viskoz hale geldiğinden takım itme yönünde kovan boyunu artırmaktadır. Böylece, amacına uygun çatlakların az olduğu ve silindirik biçimde kovanlar elde edilmiştir.



Şekil 11. Takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan resimleri

(Bushing pictures obtained depending on tool diameter and material thickness)

Şekil 11b'de St37 çelik için SDY'de delinmesi ile takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan resimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi aynı kalınlıktaki malzeme için artan takım çapına bağlı olarak istenilen şekilde bir kovan biçiminin elde edildiği, belli bir kalınlık ve takım çapından sonra yırtılma ve taç yaprağı şeklindeki istenmeyen şekil bozukluğunda kovanların elde edildiği görülmektedir. Belli takım çapından sonra bozulmaların ve çatlakların artarak meydana geldiği, dolayısıyla takım çapının kovan yapısı üzerinde olumsuz bir etki yaptığı tespit edilmiştir.

4.2. Takım Çapının ve Malzeme Kalınlığının Mikro Yapıya Etkisi

(Effect of Tool Diameter and Material Thickness on Microstructure)

SDY'de oluşan kovan yumuşamış ve aşağı doğru serbest kaldığından malzemenin mikro yapısında çeşitli boşluklar ve

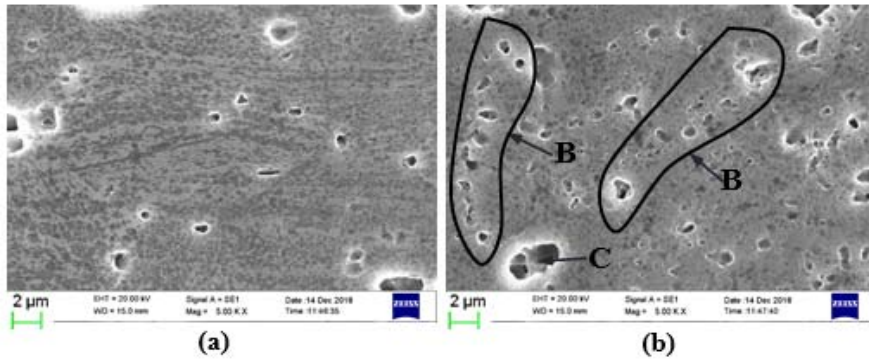
çatlaklar meydana geldiğinden mikro yapı değişir ve yapıdaki boşluklar artmış olur. Çatlak ve boşluklar malzemenin sertliğinin azalmasına sebep olur. Takımın dönme hareketi ve yumuşamış malzemeyi iş parçasının yüzeyine bastırması ile mikro yapının tane yapısı değişmektedir. Delik yüzeylerine yakın bölgelerde mikro sertlik değerleri yüksek, delik yüzeyinden uzaklaştıkça sertlik değeri azalmaktadır [26].

Şekil 12’de takım çapı $\text{Ød}=10$ mm ve iş parçası kalınlığı $t=2$ mm olan A7075-T651 için hem ana malzemenin mikro yapı fotoğrafını hem de işlem sonrası oluşan kovanın mikro yapı (SEM) fotoğraflarını göstermektedir. Şekil 12a’da ana malzeme için tane büyüklüğü ve tane sınırı ile malzeme içerisinde bulunan boşlukların mikro yapı görüntüsü, Şekil 12b’de ise işlem sonrası oluşan kovanın görüntüsünde (SEM), tane yapısının ve oluşan boşlukların ve sıvıların mikro yapı değişiminin fotoğrafları verilmiştir.

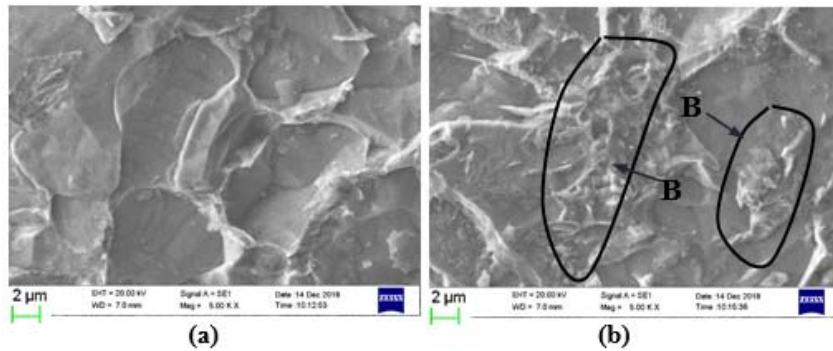
İş malzemesinin takıma yapışması ve takımdan yeniden kopması mikro yapıdan görülmektedir. Alüminyumun takım yüzeyine yapışma eğilimi fazla olduğundan malzemenin bir kısmı iş parçasından kopmuştur. Takımın yapıştırma enerjisi iş malzemesinin yapışma enerjisinden daha fazla olduğundan oluşturulan büyük basınç ve yüksek sıcaklık, iş parçası malzemesinin takıma yapışmasına neden olur. Mikro yapıdan, delik kenarlarına yakın yüzeylerde deformasyonun fazla olduğu net olarak görülmektedir (Şekil 12b, C noktası).

Şekilde görüldüğü gibi deformasyon sertleşmesi sonucu tane yapısının küçüldüğü, ince taneli ve takımın ilerlemesi sonucu akan malzemenin delik kenarlarına sıvanması ile ortaya çıkan bir yapı oluşmaktadır (Şekil 12b’de B yüzeyleri). Dönen takım iş parçasından çıkan malzemeyi aşağı doğru iterken iş parçasının mikro yapısında önemli değişiklikler meydana gelmektedir. İş parçasını oluşturan tane boyutlarının küçülmesi, sürtünmeden ve dönen takımın yapmış olduğu baskıdan dolayı tane sınırlarının değişmesi ve uzaması, taneler arası boşlukların artmasına sebep olur. Özellikle kovan yapısında dönen takımın etkisinden dolayı mikro yapıda önemli miktarda boşluklar meydana gelmektedir.

Şekil 13’de takım çapı $\text{Ød}=15$ mm ve iş parçası kalınlığı $t=10$ mm olan St37 için ana malzemenin mikro yapı fotoğrafını ve işlem sonrası oluşan kovanın mikro yapısının fotoğraflarını (SEM) göstermektedir. Şekil 13a’da, $\text{Ød}=15$ mm ve $t=10$ mm kalınlığında St37 için esas malzemenin tane yapısı ve tane sınırı boşluklarını, Şekil 13b’de ise takım çapı $\text{Ød}=15$ mm olan WC takım ile sürtünmeli delinmesi sonucunda oluşan kovanın SEM görüntüsü verilmiştir. SDY’de takım yumuşamış olan iş parçasından çıkan malzemeyi aşağı doğru iterken kovanın mikro yapısında önemli etkiler ve özellikle kovan yapısında boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar kovanı oluşturan tane boyutlarının küçülmesi, sürtünmeden ve dönen takımın yapmış olduğu baskıdan dolayı tane sınırlarının uzaması ve



Şekil 12. A7075-T651 için SEM görüntüsü a) Ana malzemesinin SEM görüntüsü b) Kovan SEM görüntüsü (SEM image for A7075-T651 a. SEM image of the main material b. SEM image of the bushing)



Şekil 13. St37 için SEM görüntüsü a) Ana malzemesinin SEM görüntüsü b) Kovan SEM görüntüsü (SEM image for St37 a. SEM image of the main material b. SEM image of the bushing)

taneler arası boşlukların artması olarak düşünülmekte ve mikro sertliği etkilemektedir [24, 26]. Şekilde görüldüğü gibi sürtünmeli delme sırasında ısıl değişimler sonucu malzemede meydana gelen deformasyon serleşmesi sonucu tane yapısının küçüldüğü ve dönen takımın ilerlemesi ile akan malzemenin delik kenarlarına sıvanması ile oluşan bir yapı meydana gelmiştir.

St37 çeliğin mikro yapısında önemli bir aşınma, hasar veya plastik deformasyon olmadığı söylenebilir. Takımın dönme hızından kaynaklanan ince çizgiler (Şekil 13b, B alanı) ve bununla birlikte, sürtünmeli delme işleminde yer alan yüksek sıcaklıklar nedeniyle küçük ve gözenekli yapılar görülmektedir. Alüminyum da olduğu gibi, St37 malzemesi için doğrudan mikro yapıyı tespit etmek kolay değildir. Yüzey dokusunun, takımın dönme yönüne göre mikro yapıda soldan sağa doğru kaydığını göstermektedir. Mikro yapıda, St37 çeliğinin takıma daha az yapıştığı, SDY’de St37 çeliği A7075-T651 alaşımından çok daha az sıvama yapmaktadır. Bu yüzden, St37 çeliğinin SDY’de delinmesi A7075-T651 alaşımına göre daha uygun olmaktadır.

Mikro yapı görüntülerinde, A7075-T651 alaşımında yüksek oranda yapışmanın ve dolayısıyla malzeme transferinin fazla, St37 çeliğinde ise çok daha az sıvama olduğundan malzeme transferinin az olduğu sonucuna varılmıştır.

4.3. Takım Çapının ve Malzeme Kalınlığının Mikro Sertlik Değişimine Etkisi

(Effect of Tool Diameter and Material Thickness on Micro Hardness Change)

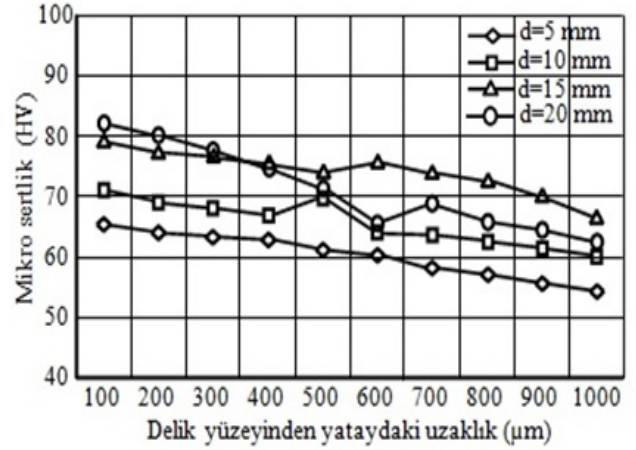
SDY’de yumuşayan malzeme takımın ilerleme yönünde serbest bir şekilde takım ile birlikte ilerleyerek malzemenin akmasını sağlamaktadır. Akma işlemi serbest bir şekilde olduğu için malzemenin mikro yapısında taneler arası boşluklar meydana gelmektedir. Malzeme içerisinde boşluklu mikro yapı, malzemenin mikro sertliğini etkilemektedir [24-26].

A7075-T651 malzemesinin HSS takım kullanılarak, $t=8$ mm, $\theta=36^\circ$, $n=1120$ d/min ve $f=25$ mm/min ilerleme hızında SDY ile delinmesinde, Şekil 14’de delik yüzeyinden yatay, Şekil 15’de ise düşey doğrultuda 100’er μ m mesafelerde elde edilen mikro sertlik değişimleri verilmiştir.

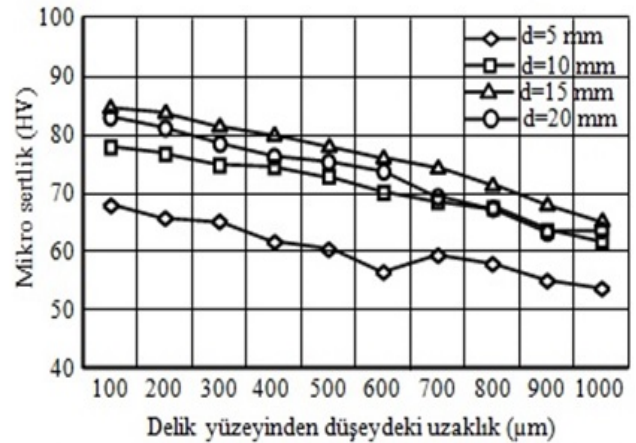
Mikro sertlik değerleri yatayda delik yüzeyinden uzaklaştıkça düşmüştür. En yüksek mikro sertlik değeri 100 μ m mesafede $\text{Ø}d=20$ mm takım çapında 82,3 HV, en düşük mikro sertlik değeri 1000 μ m mesafede $\text{Ø}d=5$ mm takım çapında 54,4 HV, yine mikro sertlik değerleri düşeyde delik yüzeyinden uzaklaştıkça azalmıştır. En yüksek mikro sertlik değeri 100 μ m mesafede $\text{Ø}d=15$ mm takım çapında 84,6 HV, en düşük mikro sertlik değeri 1000 μ m mesafede $\text{Ø}d=5$ mm takım çapında 53,7 HV olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi yatayda ve düşeyde aynı numunede mikro sertlik değerleri birbirine yakın sonuçlar olduğu tespit edilmiştir.

SDY’de, delik etrafındaki farklı bölgelerin tane büyüklüğü, hacim fraksiyonu ve kararsız ikinci faz parçacıkları

nedeniyle mikro sertlik artmaktadır. Sürtünmeli delme işleminde plastik deformasyonun, yüksek sıcaklığın ve sürtünmenin, tane yapısının yeniden kristalleşmesine neden olduğu çözünme etkisine bağlı kararsız ikinci faz parçacıklarının çözünmesine yol açtığı düşünülmektedir.



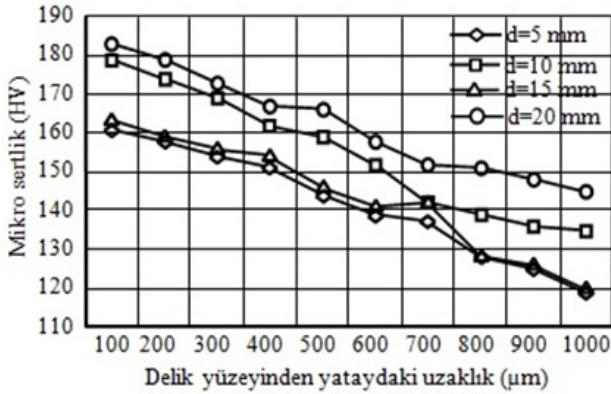
Şekil 14. A7075-T651 için delik yüzeyinden yatay doğrultuda elde edilen mikro sertlik değişimi (Micro hardness change in horizontal direction from hole surface for A7075-T651)



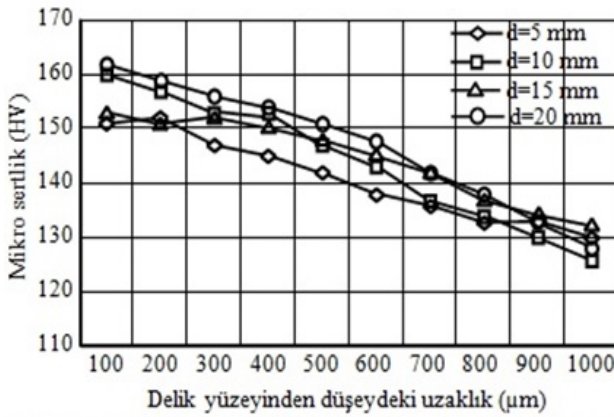
Şekil 15. A7075-T651 için delik yüzeyinden düşey doğrultuda elde edilen mikro sertlik değişimi (Micro hardness change in vertical direction from hole surface for A7075-T651)

St37 malzemesinin WC takım kullanılarak, $t=8$ mm, $\theta=36^\circ$, $n=1120$ d/min ve $f=25$ mm/min ilerleme hızında SDY ile delinmesinde, Şekil 16’da delik yüzeyinden yatay ve Şekil 17’de ise düşey doğrultuda 100’er μ m mesafelerde elde edilen mikro sertlik değişimleri verilmiştir.

St37 için mikro sertlik değerleri yatayda delik yüzeyinden uzaklaştıkça gene azalmıştır. En yüksek mikro sertlik değeri 100 μ m mesafede $\text{Ø}d=20$ mm takım çapında 183 HV, en düşük mikro sertlik değeri 1000 μ m mesafede $\text{Ø}d=5$ mm takım çapında 119 HV, aynı şekilde düşeyde de, takım çapı arttıkça elde edilen mikro sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 16. St37 için delik yüzeyinden yatay doğrultuda elde edilen mikro sertlik değişimi
(Micro hardness change in horizontal direction from hole surface for St37)



Şekil 17. St37 için delik yüzeyinden düşey doğrultuda elde edilen mikro sertlik değişimi
(Micro hardness change in vertical direction from hole surface for St37)

A7075-T651 ve St37 çeliği için yapılan deneylerde delik merkezinden çevreye doğru uzaklaştıkça mikro sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, merkezden çevreye doğru uzaklaştıkça plastik deformasyona uğramış tabakadan esas malzeme yapısına ulaşılmaktadır. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak mikro sertlikte delik çevresine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede yüksek, delik merkezinden uzaklaştıkça esas malzeme sertliğine yakın olarak artmakta ve esas malzeme sertliğine ulaşmaktadır. Esas malzeme sertliği 305 HV iken, sürtünmeli delme yapıldıktan sonra en yüksek sertliğin 183 HV olarak elde edilmiştir.

Isının tesiri altındaki bölgede mikro sertliğin azalması, sabit ikinci faz parçacıklarının artan hacim fraksiyonundan ve artan katı çözeltideki tane boyutundan kaynaklanmaktadır. Isının tesiri altındaki bölgede maksimum mikro sertlik, ince taneli yeniden kristalize olmuş malzeme tabakasında olmaktadır. Mikro sertlik sürekli ve düzenli olarak azalmakta, esas malzeme sertliğine ulaşmaktadır. SDY'de, sürekli bir şekilde esas malzeme sertliğine yakın ve giderek azalan mikro sertlik değişimi deliğin yakın bölgesinde

malzemenin sertleşmesine sebep olmaktadır. Maksimum mikro sertlik, delik çevresine yakın ve yeniden kristalize olmuş malzeme tabakasında olduğu tespit edilmiştir.

5. SEMBOLLER (SYMBOLS)

- t : Sac kalınlığı (mm)
n : Takım dönme hızı (d/d)
f : İlerleme hızı (mm/dev)
 θ : Takım koniklik açısı ($^{\circ}$)
d : Delik çapı/takım çapı (mm)
 h_c : Kovan çeper kalınlığı (mm)
 h_a : Kovan yüksekliği (mm)
 R_a : Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μ m)
 d_2 : Takım shaft çapı (mm)
 d_1 : Takım omuz çapı (mm)
 l_1 : Takım delme boyu (mm)
 l_n : Takım koniklik uzunluğu (mm)
 l_c : Takım özü yüksekliği (mm)
l : Takım shaft uzunluğu (mm)
L : Takım omuz uzunluğu (mm)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan deneylerden görüldüğü gibi takım çapı ve malzeme kalınlığının oluşan kovan çeper kalınlığı ve kovan yüksekliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Buna göre;

- Malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovan çeper kalınlığının arttığı görülmüştür. A7075-T651 malzemesinde, en büyük kovan çeper kalınlığı $\text{Ø}d=20$ mm takım çapında $t=6$ mm malzeme kalınlığında $h_c=4,25$ mm, en düşük kovan çeper kalınlığı ise $\text{Ø}d=5$ mm takım çapında ve $t=2$ mm malzeme kalınlığında $h_c=0,965$ mm dir. St37 malzemesinde ise en büyük kovan çeper kalınlığı $\text{Ø}d=20$ mm çapındaki takım ile $t=10$ mm malzeme kalınlığında $h_c=4,25$ mm, en düşük kovan çeper kalınlığı $\text{Ø}d=5$ mm çapındaki takım ile $t=2$ mm malzeme kalınlığında $h_c=0,75$ mm olarak elde edilmiştir.
- Malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan yüksekliği düzenli bir biçimde artmaktadır. A7075-T651 malzemesinde en yüksek kovan boyu, $\text{Ø}d=20$ mm takım çapında ve $t=10$ mm malzeme kalınlığında $h_a=13,40$ mm, en düşük kovan boyu ise $\text{Ø}d=5$ mm takım çapında $t=4$ mm malzeme kalınlığında $h_a=3,43$ mm ve St37 malzemesinde ise en yüksek kovan boyu, $\text{Ø}d=20$ mm takım çapında, $t=4$ mm malzeme kalınlığında ve $h_a=15,30$ mm, en düşük kovan boyu $\text{Ø}d=5$ mm takım çapında, $t=2$ mm malzeme kalınlığında ve $h_a=4,16$ mm olarak elde edilmiştir.
- A7075-T651 alaşımının ve St37 çeliğinin sürtünmeli delinmesinde yapılan tüm deneylerde delik merkezinden çevreye doğru uzaklaştıkça mikro sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmuştur. Mikro sertlik değerleri delik yüzeyinden yatay doğrultuda delik çevresinden uzaklaştıkça azalmıştır. Takım çapı arttıkça elde edilen mikro sertlik değerlerinin arttığı ve esas malzeme sertliği 305 HV iken,

sürtünmeli delme yapıldıktan sonra en yüksek mikro sertlik 183 HV olarak elde edildiği görülmüştür.

- A7075-T651 malzemesinde; en yüksek mikro sertlik değeri yatay eksende 100 µm mesafede $\text{Ød}=20$ mm takım çapında 82,3 HV, en düşük mikro sertlik değeri düşey eksende 1000 µm mesafede $\text{Ød}=5$ mm takım çapında 53,6 HV olmuştur. St37 malzemesinde; en yüksek mikro sertlik değeri yatay eksende 100 µm mesafede $\text{Ød}=20$ mm takım çapında 183 HV, en düşük mikro sertlik değeri ise düşey eksende 1000 µm mesafede $\text{Ød}=10$ mm takım çapında 126 HV olarak elde edilmiştir.

Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, Sünek malzemelerde amacına uygun silindirik boyu fazla ve bağlantı uzunluğunu artıracak biçiminde bir kovan meydana gelmektedir. Gevrek malzemelerde istenilen biçimde bir kovan elde edilemediği belirlenmiştir. SDY’de kovanın mikro yapısında önemli değişiklikler ve özellikle kovan yapısında boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar kovan yapısında tane boyutlarının küçülmesine, sürtünmeden ve dönen takımın yapmış olduğu baskıdan dolayı tane sınırlarının uzamasına ve taneler arası boşlukların artması ile mikro sertliği etkilemektedir. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak mikro sertlik delik çevresine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede artarken, delik merkezinden uzaklaştıkça esas malzeme sertliğine yakın ve giderek esas malzeme sertliğine ulaşmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Miller S. F., Wang H., Shih A. J., Experimental and Numerical Analysis of the Friction Drilling Process, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128, 802-810, 2006.
2. Miller S. F., Tao J., Shih A. J., Friction Drilling of Cast Metals, *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 46, 1526 -1535, 2006.
3. Miller S. F., Blau P. J., Shih A. J., Microstructural Alterations Associated With Friction Drilling of Steel, Aluminum, and Titanium, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14, 647-653, 2007.
4. Miller S. F., Shih A. J., Thermo-Mechanical Finite Element Modelling of the Friction Drilling Process, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann. Arbor. MI. 48109, 129, 531-538, 2007.
5. Miller S. F., Blau P. J., Shih A. J., Tool Wear in Friction Drilling, *International of Machine Tool and Manufacture*, 47, 1636-1645, 2007.
6. Chow H. M., Lee S. M and Yang L. D., Machining Characteristics Study of Friction Drilling on AISI304 Stainless Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 207, 180-186, 2008.
7. Ku W. L., Sheu T. S., Chow H. M., Lee S. M., Yang L. D., Lin Y.C., Optimization of Machining Parameters of a Novel Friction Drilling Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 207, 180-186, 2008.
8. Lee S., M., Chow H., M., Huang F., Y., Yan B, H., Friction Drilling of Austenitic Stainless Steel by Uncoated and PVD, AlCrN and TiAlN Coated Tungsten Carbide Tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 81-88, 2009.
9. Krishna, P. V. G, Kishore, K., Satyanarayana, V.V., Some Investigation In Friction Drilling AA6351 Using High Speed Steel Tools, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5 (3), March, 11-15, 2010.
10. Pantawane P. D., Ahuja, B. B., Experimental Investigations and Multi-Objective Optimization of Friction Drilling Process on AISI1015, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2 (2), 448-461, 2011.
11. Ku W.L, Hung C. L, Lee S.M., Chow H.M., Optimization in Thermal Friction Drilling for SUS304 Stainless Steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 53 (9-12), 935-944, 2011.
12. Raju B. P., Swamy M. K., Effect of Tool Material in Friction Drilling A Case Study, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2 (4), Dec. 51-60, 2012.
13. Yang L.D., Ku W.L., Chow H.M., Wang D.A., Lin Y.C., Mar-M247, Haynes-230&Inconel-718 Study of Machining Characteristics for Ni-based Superalloys on Friction Drilling, *Advanced Materials Research*, 459, 632-637, 2012.
14. Raju B.P., Swamy M.K., Finite Element Simulation of a Friction Drilling Process Using Deform-3D, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2, 716-721, 2012.
15. Krasauskas P., Keselys T., Kilikevicius S., Experimental Investigation and Simulation of Stainless AISI304 Steel Thermo Mechanical Drilling, *Proceedings of 17th International Conference-Mechanika*, 18 (2), 150-154, 2012.
16. Boopathi M., Shankar S., Manikandakumar S., Ramesh R., Experimental Investigation of Friction Drilling on Brass, Aluminium and Stainless Steel, *Procedia Engineering*, 64, 1219-1226, 2013.
17. Özek C., Demir Z., A7075-T651 Alaşımının Sürtünmeli Delinmesinde Kovan Yüksekliğinin Malzeme Kalınlığına Göre Araştırılması, *Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Dergisi*, 4 (2), 61-67, 2013.
18. Özek C., Demir Z., Investigate the Friction Drilling of Aluminium Alloys According to the Thermal Conductivity, *TEM Journal*, 2 (1), 93-101, 2013.
19. Kaya M., Aktaş A., Beylergil B., Akyıldız H. K., An Experimental Study on Friction Drilling of St12 Steel, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 38 (3), 319-329, 2014.
20. Hynes N. R. J., Kumaran M. M., Rakesh N., Gurubaran, C. K., Numerical Analysis in Friction Drilling of AISI1020 Steel and AA6061-T6 Alloy, *Recent Advances in Environmental and Earth Sciences and Economics*, ISBN:978-1-61804-324-5, 145-149, 2015.
21. Sara E. B., Midany T. E., Elshourbagy H., Optimization of Thermal Friction Drilling Process Based on Taguchi

- Method and Fuzzy Logic Technique, International Journal of Science and Engineering Applications, ISSN-2319-7560, 4 (2), 55-59, 2015.
22. Wu J., Wen J. M., Wang Z.Y., Study on the Predicted Model and Experiment of Drilling Forces in Drilling Ti6Al4V, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 38 (2), 1-8, 2016.
 23. Demir Z., An Experimental Investigation of the Effect of Depth and Diameter of Pre-drilling on Friction Drilling of A7075-T651 Alloy, Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 1 (2), 46-56, 2016.
 24. Eliseev A.A., Fortuna S.V. Kolubaev E.A., Kalashnikova T. A., Microstructure Modification of 2024 Aluminum Alloy Produced by Friction Drilling, Materials Science&Engineering, A691, 121-125, 2017.
 25. Bilgin M. B., Gök K., Gök A., Three-dimensional Finite Element Model of Friction Drilling Process in Hot Forming Processes, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 231 (3), 548-554, 2017.
 26. Rajesh N., Hynes J., Kumar R., Jebaraj A., Sujana J., Optimum Bushing Length in Thermal Drilling of Galvanized Steel Using Artificial Neural Network Coupled With Genetic Algorithm, Materials And Technology, ISSN1580-2949, MTAEC, 9, 51 (5), 813-822, 2017.
 27. Sara A., E. B., Hazem E., Shourbagy E., Ahmed M., Tawfik E.B., Experimental and Thermo-Mechanical Modeling Optimization of Thermal Friction Drilling for AISI304 Stainless Steel, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 20, 84-92, 2018.



ERUSLR: A new Turkish sign language dataset and its recognition using hyperparameter optimization aided convolutional neural network

Tayyip Özcan*^{ID}, Alper Baştürk^{ID}

Department of Computer Engineering, Erciyes University, Kayseri, 38039, Turkey

Highlights:

- A new sign language recognition data set called ERUSLR
- A classification model based on global / heuristic search method and GoogLeNet supported CNN
- 93.93% accuracy rate obtained by genetic algorithm based classification model

Keywords:

- Sign language recognition
- Transfer learning
- GoogLeNet
- Parameter optimization
- Global search method
- Heuristic search method

Article Info:

Research Article
Received: 02.06.2020
Accepted: 24.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.746793

Acknowledgement:

We would like to thank all participants involved in the data collection stage, especially the creation of the ERUSLR dataset.

Correspondence:

Author: Tayyip Özcan
e-mail:
tozcan@erciyes.edu.tr
phone: +90 532 764 3577

Graphical/Tabular Abstract

Sign language is an important communication tool for deaf-and-dumb people. There is a need to make provision for effective communication in the emergency departments of a hospital. Therefore, firstly, the 25 words needed in emergency services were identified, and subsequently used to create a new dataset, named Erciyes University Sign Language Recognition (ERUSLR) dataset. To classify the ERUSLR dataset, a GoogLeNet-based CNN model with global/heuristic search support is proposed as shown in Figure A. The GoogLeNet pre-trained model was used for transfer learning. A GoogLeNet-based CNN was created by replacing the last 3 layers with suitable layers that are stem from the related problem. Grid search (GS), random search (RS), and genetic algorithm (GA) were used as the parameter search method. These search methods were used to optimize the training options of the CNN including the initial learning rate, ℓ_2 regularization, and momentum parameters. The experimental results show that the GA supported model displayed a better performance.

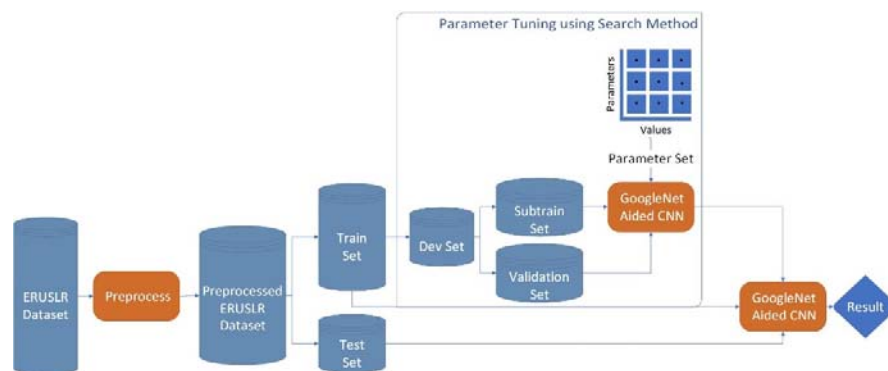


Figure A. The proposed system

Purpose: The first aim of the study is to create a new sign language recognition dataset that can be used in the hospital. The other aim involves the development of a global/heuristic search and GoogLeNet based method.

Theory and Methods:

In this study, instead of developing a CNN model from scratch, the transfer learning method, an easier and more effective approach, is selected. Consequently, a GoogLeNet based-CNN model was created by transfer learning from the GoogLeNet pre-trained model. The initial experiments with the ERUSLR dataset created in this study was performed using the GoogLeNet-based CNN model with the default parameter values. Search methods are typically used in parameter optimization to save time. In this study, GS, RS, and GA methods are used to optimize the training parameters of the GoogLeNet-based CNN model.

Results:

In the experimental studies, the GoogLeNet-based CNN model with the default parameter values recorded an accuracy rate of 88.62%. On the other hand, an accuracy rate of 93.63% was obtained with GS supported GoogLeNet-based CNN model while an accuracy rate of 89.81% was achieved with the RS supported GoogLeNet-based CNN. Finally, an accuracy rate of 93.93% was achieved with the GA supported GoogLeNet-based CNN.

Conclusion:

Transfer learning operation is an easy and effective way of building a new CNN model. Global/heuristic search-based parameter optimization is an important factor that improves classification performance.



ERUSLR: Yeni bir Türkçe işaret dili veri seti ve hiperparametre optimizasyonu destekli evrişimli sinir ağı ile tanınması

Tayyip Özcan*^{ID}, Alper Baştürk^{ID}

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi, Kayseri, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- ERUSLR adında yeni bir işaret dili tanıma veri seti
- Global / sezgisel arama yöntemi ve GoogLeNet tabanlı CNN üzerine kurulu sınıflandırma modeli
- Genetik algoritma tabanlı sınıflandırma modeli ile % 93,93 doğruluk oranı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.06.2020

Kabul: 24.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.746793

Anahtar Kelimeler:

İşaret dili tanıma,
transfer öğrenme,
GoogLeNet,
parametre optimizasyonu,
global arama,
sezgisel arama

ÖZET

İşaret dili, dilsel ve işitsel yetilerini kaybeden konuşma ve duyma engelli bireylerin iletişimini sağlayan en önemli araçtır. Sağır ve dilsiz bireylerin anlaşılması için gerekli olan işaret dilinin bilinmediği ortamlarda ciddi sorunlar ortaya çıkabilir. Hastanelerin acil servislerine başvuran engelli bireylerin anlaşılabilmesi ise kritik sonuçlar doğurabilir. Bu çalışmada, öncelikle, hastanelerin acil servisinde sıklıkla kullanılan kelimelerle yeni bir veri seti oluşturulmuştur. 25 kelime, 49 engelli birey tarafından birden fazla tekrarlanmış ve farklı açılardan videoları kaydedilmiştir. Erciyes University Sign Language Recognition (ERUSLR) adındaki bu veri seti 13186 örnek içermektedir. ERUSLR veri seti kullanılarak bir sınıflandırma modeli oluşturmak istenmiştir. İşaret dilinin tanınması, son yıllarda sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılan evrişimli sinir ağı (CNN) ile gerçekleştirilebilmektedir. Yeni bir CNN modelinin geliştirilmesinden daha etkili olan yöntem, transfer öğrenme ile CNN modeli oluşturmaktır. Dolayısıyla, GoogLeNet ön eğitilmiş modelinden transfer öğrenme gerçekleştirilerek GoogLeNet tabanlı bir CNN modeli oluşturulmuştur. CNN modelinin performansını artıran bir başka etken eğitim parametrelerinin optimize edilmesidir. Global ve sezgisel arama yöntemleri, parametre optimizasyonunda kullanılan ve zamansal kazanç sağlayan metotlardır. Bu çalışmada grid arama (GS), rastgele arama (RS) ve genetik algoritma (GA) yöntemleri, GoogLeNet tabanlı CNN modelinin eğitim parametrelerini optimize etmek için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, GA destekli GoogLeNet tabanlı CNN modeli (%93,93 ile) diğer yöntemlerden daha başarılı sonuç vermiştir.

ERUSLR: A new Turkish sign language dataset and its recognition using hyperparameter optimization aided convolutional neural network

H I G H L I G H T S

- A new sign language recognition data set called ERUSLR
- A classification model based on global / heuristic search method and GoogLeNet supported CNN
- 93.93% accuracy rate obtained by genetic algorithm based classification model

Article Info

Research Article

Received: 02.06.2020

Accepted: 24.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.746793

Keywords:

Sign language recognition,
transfer learning,
GoogLeNet,
parameter optimization,
global search,
heuristic search

ABSTRACT

Sign language is one of the most important tools of communication for deaf-and-dumb individuals who have lost their linguistic and auditory abilities. Significant problems may arise in situations where the sign language required to clearly understand deaf-and-dumb individuals is not known. More importantly, the failure to understand the disabled individuals who try to access emergency health services at a health institution may have fatal consequences. In this study, firstly, a new dataset was created with the frequently used words in the emergency department of hospitals. 25 words were repeated multiple times by 49 handicapped individuals where the videos were recorded from different angles. This dataset, named Erciyes University Sign Language Recognition (ERUSLR), contains 13186 samples. Classification experiments were performed by using the ERUSLR dataset. Sign language recognition can be realized by a convolutional neural network (CNN), which is frequently used for classification problems. Rather than developing a new CNN model, transfer learning, a more effective method, is preferred. Therefore, a GoogLeNet-based CNN model was created by transfer learning from the GoogLeNet pre-trained model. Another factor that increases the performance of a CNN model is the optimization of its training parameters. Global and heuristic search methods are typically used in parameter optimization to save time. In this study, both grid search (GS), random search (RS), and genetic algorithm (GA) methods were used to optimize the training parameters of the GoogLeNet-based CNN model. According to the experimental results, the GA supported GoogLeNet-based CNN model is more successful (with a success rate of 93.93%) than the other methods.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: tozcan@erciyes.edu.tr, ab@erciyes.edu.tr / Tel: +90 532 764 3577

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanlar arasında iletişimin kurulabilmesi için birbirlerini anlayacakları ortak bir iletişim diline ihtiyaç vardır. Bu iletişimin sağlanması dil, vücut dili veya hissel etkileşimle gerçekleştirilebilir. Sağır ve dilsiz bireyler dilsel ve işitsel yetilerini kaybeden kişilerdir. El hareketleri, mimik veya dudak hareketlerini kullanarak aralarında iletişim kuran bu bireylerin kullandığı dil, işaret dilidir. İşaret dili kullanmak zorunda kalan bireylerin aralarında iletişim kurmasından çok daha zor olan durum, işaret dilini bilmeyen kişilerle iletişim kurmak zorunda kalmalarıdır. Bu durum işaret dili kullanmak zorunda olanlar için büyük bir sorundur. Bu problemin çözümü ve işaret dilinin anlaşılması için literatürde veri seti oluşturma ve sınıflandırma çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Kelime düzeyinde hazırlanmış literatürde sıkça kullanılan veri setleri ve o veri setlerine ait özellikler Tablo 1 ile sunulmuştur.

Tablo 1. Literatürde sıklıkla kullanılan kelime düzeyinde işaret dili tanıma veri setleri

(Word level sign language recognition datasets which are frequently used in literature)

Veri seti	Ülke	Sınıf	Katılımcı	Örnek
DGS Kinect 40	Almanya	40	15	3000
GSL 20	Yunanistan	20	6	840
Boston ASL LVD	ABD	3300	6	9800
PSL Kinect 30	Polonya	30	1	300
PSL ToF 84	Polonya	84	1	1680
LSA64	Arjantin	64	10	3200
DEVISIGN-D	Çin	500	8	6000

German Sign Language (DGS) Kinect 40 veri seti [1] Cooper vd. tarafından Kinect kamera kullanılarak hazırlanmış Almanca kelimeler içeren kelime düzeyinde bir veri setidir. Bu veri seti 40 sınıf içermekte olup 15 gönüllünün katılımıyla oluşturulmuştur. Her bir örnek her katılımcı tarafından 5'er kez tekrar edilmiştir. Toplamda 3000 örnek içeren DGS Kinect 40 veri seti [1, 2] çalışmalarında, önerilen yöntemlerin test edilmesinde kullanılmıştır. Cooper vd. [1] çalışmasında geliştirilen bir diğer veri seti Greek Sign Language (GSL) veri setidir. GSL veri seti, 6 gönüllünün katılımıyla 20 sınıf üzerinden toplamda 840 örnekle oluşturulmuştur. [1, 2] çalışmalarında, DGS Kinect 40 veri setiyle birlikte GSL 20 veri seti de kullanılmıştır.

American Sign Language Lexicon Video Dataset (ASLLVD) veri seti [3] Athitsos vd. tarafından geliştirilen bir diğer kelime düzeyinde veri setidir. 3300'den fazla sınıf içeren bu veri setinde toplamda 6 gönüllü ve 9800 örnek bulunmaktadır. Bu veri seti kullanılarak yapılan çalışmaların bazıları [4-6] olarak sıralanabilir. Neidle vd. [4] ASLLVD'yi daha ön plana çıkararak bir bilgisayar görü uygulaması sunmuşlardır. Burada, dilbilim sözcüklere ait işaretlerde başlangıç ve bitiş el işaretleri arasındaki geçiş olasılıklarını modelleyen sistem kullanmışlardır. Bir diğer çalışmada, Kim vd. [5] geliştirmiş oldukları sistemle el takibi ve el poz tahmini gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri yöntemi

ASLLVD veri seti ile test etmişlerdir. Metaxas vd. [6], gelişmiş öğrenme yöntemlerini özelliklerle birleştiren karma bir yapı kullanarak işaretleri tanıma üzerine çalışma yapmıştır. Polish Sign Language (PSL) Kinect 30 veri seti [7] Oszust ve Wysocki tarafından oluşturulmuştur. 30 kelime, 1 katılımcı tarafından 10'ar kez tekrarlanarak 300 örneklilik bir veri seti geliştirilmiştir. Oszust ve Wysocki 2014 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarında [8] tam kelime modeli ve veri odaklı alt dizi modelini kullanarak sınıflandırma yapmış ve çalışmalarını PSL Kinect 30 veri seti ile test etmişlerdir. Bir diğer çalışmada [9], dinamik zaman atlama ile en yakın komşu tekniği ile saklı Markov modelleri bu veri setinin sınıflandırılmasında kullanılmıştır.

Argentinian Sign Language veri seti (LSA64) [10] 10 katılımcı ile oluşturulmuş toplamda 3200 örnek içeren kelime düzeyinde bir veri setidir. Veri seti oluşturulurken 64 sınıf için her katılımcı 5'er kez tekrar yapmıştır. [11-13] çalışmalarında LSA64 veri seti farklı metodların performanslarını analiz etmek için kullanılmıştır.

DEVISIGN-G veri seti [14] 36 sınıf için 8 gönüllüden kaydedilen 432 örnekten oluşmaktadır. El segmentasyonu üzerine çalışmasını geliştiren Zheng ve Liang [15, 14] çalışmasındaki başarı oranlarını geride bırakmıştır.

Literatürde son yıllarda farklı problemler [16-21] için derin öğrenme metodları yaygın olarak kullanılmıştır. Derin öğrenme yöntemlerinin başarılı sonuçlar vermesi işaret dili tanıma üzerine çalışma gerçekleştirecek araştırmacıların dikkatini çekmiş ve bu alanda çalışmalar [22-24] gerçekleştirilmiştir. Bir derin öğrenme yöntemi olan evrişimli sinir ağı (CNN) [25], sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Ön eğitilmiş CNN modeli kullanılarak sınıflandırma, özellik çıkarma ve transfer öğrenme gerçekleştirilebilir. CNN için yeni bir model geliştirmekten daha kolay ve etkili yöntemlerden birisi transfer öğrenme ile model oluşturmaktır. [26] çalışmasında transfer öğrenme ile model geliştirilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. CNN gibi bir derin öğrenme modelinin başarısını etkileyen en önemli etkenlerden bir başkası hiperparametrelerinin optimize edilmesidir. Bu parametrelerin optimizasyonunda sezgisel algoritmaların kullanıldığı [27-32] gibi global arama yöntemleri de kullanılabilir. Grid arama (GS) ve rastgele arama (RS) yöntemleri sıklıkla kullanılan global arama yöntemleridir ve parametre optimizasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır [27, 33-35]. Bu çalışmada öncelikle hastane ortamında kullanılmak üzere kelime düzeyinde yeni bir veri seti geliştirilmiştir. Erciyes University Sign Language Recognition (ERUSLR) adındaki bu yeni veri seti, 25 kelime (sınıf) için 49 gönüllünün katılımıyla toplamda 13186 örnekten oluşmaktadır. Gönüllülerin tamamı engelli bireylerden seçilerek, örnekler anlaşılır düzeyde kaydedilmiştir. Çalışmanın devamında, örnekler ön işleme tabii tutulmuştur. Burada, video formatındaki örnekler öncelikle çerçevelere ayrılmış daha sonra bu çerçeveler sıralı şekilde birleştirilerek sıralı tekil imge haline getirilmiştir.

Sınıflandırmalarda renklerin etkisi olmayıp sadece hareket odaklı olduğu için ön işleme aşamasının son kısmında RGB formatındaki tekil imgeler gri tonlama haline dönüştürülmüştür. Daha sonraki aşamada eğitim setinden türetilen geliştirme seti ve GoogLeNet tabanlı CNN kullanılarak parametre ayarlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Parametre ayarlaması için GS ve RS global arama yöntemleri olarak, genetik algoritma (GA) sezgisel arama algoritması olarak kullanılmıştır. GS ve RS yöntemlerinin yerel minimuma takılma riski olsa da derin öğrenme modelinin parametre optimizasyonunda zamansal maliyeti düşürmek için sıklıkla kullanılmaktadır. GS, RS ve GA yöntemleri kullanılarak elde edilen optima yakın parametre seti ile eğitim verisi kullanılarak GoogLeNet destekli CNN modeli eğitilip ve çıktı olarak elde edilen eğitim modeli test verisi ile test edilerek sistemin performans analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda GA destekli GoogLeNet tabanlı CNN modeli ile %93,93 doğruluk oranı elde edilirken GS destekli GoogLeNet tabanlı CNN modeli ile %93,63 doğruluk oranı elde edilmiştir. Diğer taraftan, RS destekli GoogLeNet tabanlı CNN ile %89,81 ve sadece varsayılan parametrelerin kullanıldığı GoogLeNet destekli CNN ile %88,62 başarı oranları elde edilmiştir.

Bu çalışmanın ana katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- ERUSLR adında hastane ortamında kullanılan genel kullanıma açık işaret dili tanıma veri seti oluşturulmuştur.
- Global ve sezgisel arama yöntemi destekli, GoogLeNet tabanlı CNN kullanan bir sistem geliştirilmiştir.
- GA destekli GoogLeNet tabanlı CNN ile %93,93 doğruluk oranı ile en başarılı sonuç elde edilmiştir.

Bu çalışmanın ilerleyen bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de yeni geliştirilen ERUSLR veri seti hakkında detaylı bilgi verilecektir. Bölüm 3'te önerilen yöntem açıklanacak olup Bölüm 4'te yöntemin uygulanması ile yapılan deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Bölüm 5 ile bu çalışmanın değerlendirilmesi yapılacak ve gelecek çalışmalardan bahsedilecektir.

2. ERUSLR VERİ SETİ (ERUSLR DATASET)

İşaret dilinin anlaşılmasının en önemli olduğu durumlardan bir tanesi hastane ortamlarıdır. Bu çalışmada, hastanın şikayetini anlatabilmesi için zaman kavramının önemli olduğu hastane ortamında, konuşma engelli bireylerin sıklıkla ihtiyaç duyabileceği 25 kelime belirlenmiş ve sadece engelli bireylerden alınan farklı sayıda örneklerle ERUSLR veri seti oluşturulmuştur. 25 sınıf üzerinden 49 katılımcıyla oluşturulan veri seti, toplamda 13186 örnek içermektedir. ERUSLR veri seti oluşturulurken alınan örnekler 3 farklı açıdan (karşıdan (F), sağdan (R), ve soldan (L)) kaydedilmiştir (Şekil 1 ile gösterildiği gibi). ERUSLR veri setindeki 49 gönüllünün yer aldığı bazı örnek çerçeveler Şekil 2 ile sunulmuştur.

Veri setinde bulunan sınıflar ve bu sınıflara ait İngilizce karşılığı ile örnek sayıları Tablo 2 ile gösterildiği gibidir.

Tablodan görüleceği üzere her bir sınıf için örnek sayısı farklıdır. Örnek sayısında dengeli dağılıma sahip olmayan bu veri seti için farklı tipte eğitim-test verisi ayırma teknikleriyle performans analizleri gerçekleştirilebilir.



Şekil 1. Üç farklı açıdan alınan örneklerle (Samples from three different angles)

3. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Bu çalışmada, yeni geliştirilen ERUSLR veri seti, GS, RS ve GA yöntemleri ile transfer öğrenme destekli CNN kullanılarak sınıflandırılmıştır. Deneysel çalışmalar için kullanılan bu yöntem Şekil 3 ile gösterildiği gibidir.

Önerilen yöntemde öncelikli olarak ERUSLR veri seti ön işlemden geçirilmektedir. Bu aşamada, video formatında olan örnekler öncelikle çerçevelere ayrılmakta ve daha sonra çerçeveler sıralı bir şekilde tekil imgeyi oluşturmaktadır. Bu aşamada gerçekleştirilen son işlem, RGB formatındaki tekil imgeyi gri formata dönüştürmektir. Ön işlem aşamasına ait örnek bir çalışma Şekil 4 ile gösterildiği gibidir.

Daha sonraki aşamada, ön işlemden geçirilmiş ERUSLR veri seti %70'i eğitim %30'u test verisi olacak şekilde rastgele ayrılır. Sonra, eğitim setinin %50'si kullanılarak geliştirme seti elde edilir. Parametre ayarlama, özellik çıkarma gibi işlemler için kullanılan geliştirme seti [36], bu çalışmada CNN eğitim ayarlarında yer alan ilk öğrenme oranı, ℓ_2 düzenleme ve momentum parametrelerinin ayarlanması için kullanılmıştır. Bir sonraki aşamada, geliştirme seti %70'i alt eğitim %30'u doğrulama verisi olacak şekilde ayrılır. Parametre ayarlama aşamasında çalıştırılan yöntemde göre GS için oluşturulan parametre setinden gelen veya rastgele oluşturulan veya GA ile üretilen olası ilk öğrenme oranı, ℓ_2 düzenleme ve momentum değerleri ile alt eğitim verisi GoogLeNet destekli CNN'e girdi olarak verilir. Eğitim sonucunda oluşan eğitilmiş model, doğrulama verisi ile test edilir ve Eş. 1 ile hesaplanan doğrulama hatası çıktı olarak saklanır. Parametre setinden gelen tüm olası ilk öğrenme oranı, ℓ_2 düzenleme ve momentum değerleri için bu işlem tekrarlanır. En düşük doğrulama hatasını veren parametre değerleri ve eğitim seti GoogLeNet destekli CNN'e girdi olarak verilir ve nihai eğitilmiş model elde edilir. Nihai eğitilmiş model, test seti ile test edilir ve Eş. 2 kullanılarak sistemin performansı doğruluk kriteri üzerinden sonuç olarak sunulur.



15

Şekil 2. ERUSLR veri setinde yer alan katılımcılar (Subjects in the ERUSLR dataset)

Tablo 2. ERUSLR veri setinde yer alan sınıflar ve örnek sayıları (Classes and sample counts of the ERUSLR dataset)

No	Sınıf	Sınıf (İngilizce)	Örnek Sayısı
1	Ağız	Mouth	621
2	Ağrı	Pain	393
3	Alerji	Allergy	564
4	Astım	Asthma	555
5	Ateş	Fever	416
6	Baş Ağrısı	Headache	607
7	Baş Dönmesi	Dizziness	373
8	Beyin	Brain	549
9	Böbrek	Kidney	616
10	Boğaz	Throat	571
11	Bulantı	Nausea	617
12	Grip	Flu	573
13	Halsizlik	Weakness	520
14	İlaç	Medicine	549
15	Kalp	Heart	445
16	Kan	Blood	526
17	Karın	Abdomen	554
18	Kemik	Bone	542
19	Kusmak	Spew	623
20	Nabız	Pulse	522
21	Nefes	Breath	361
22	Şeker Hastalığı	Diabetes	634
23	Tansiyon	Blood pressure	426
24	Terlemek	Exude	530
25	Yara	Wound	499

$$Hata = 1 - \left(\frac{\text{Doğrulama seti doğru tahmin sayısı}}{\text{Doğrulama seti tüm örnek sayısı}} \right) \quad (1)$$

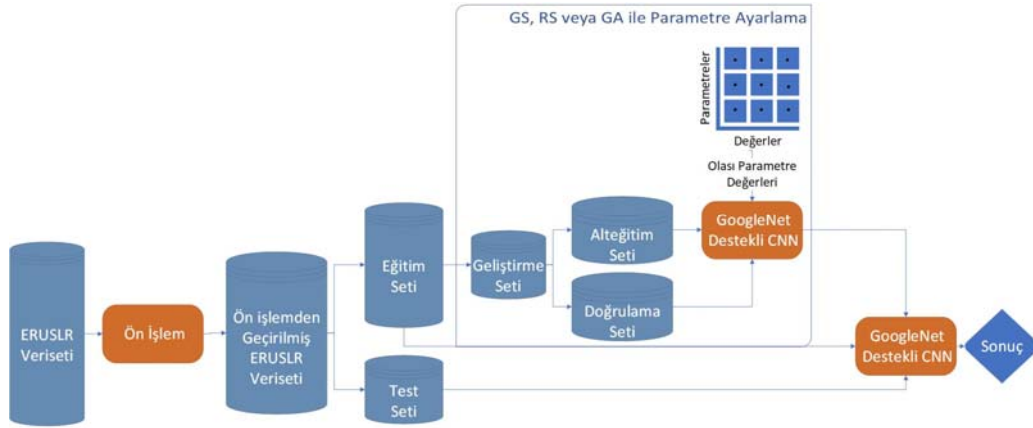
$$Doğruluk = 1 - \left(\frac{\text{Test seti doğru tahmin sayısı}}{\text{Test seti tüm örnek sayısı}} \right) \quad (2)$$

Önerilen yöntemde kullanılan hiperparametre arama yöntemleri alt bölüm 3.1 ile, transfer öğrenme destekli evrişimli sinir ağı alt bölüm 3.2 ile sunulmuştur.

3.1. Hiperparametre Ayarlama Yöntemleri (Hyperparameter Tuning Methods)

3.1.1. Grid arama yöntemi (Grid search method (GS))

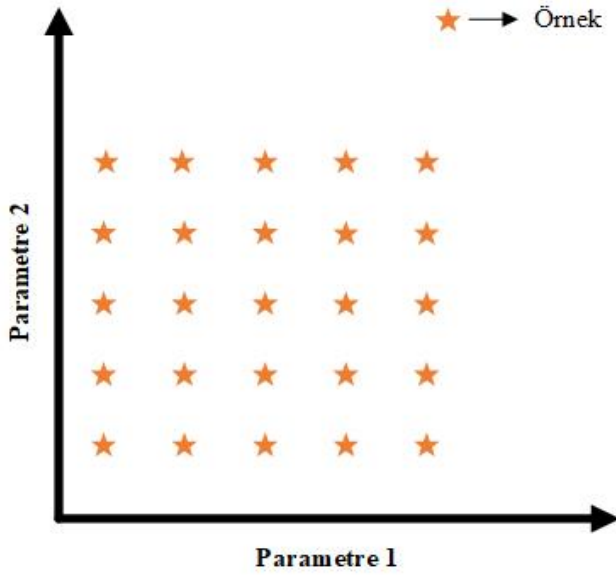
GS, bir modelin parametrelerini optimize etmek için kullanılan global bir arama yöntemidir. Bu yöntemle, modelin tüm parametrelerini optimize etmeye çalışmak oldukça zaman alan bir süreç olabilir. Bunun yerine, sonuca doğrudan etki edip performansı ciddi bir şekilde etkileyecek önemli parametreler üzerinde arama yapılabilir. Her bir parametre için olası farklı değerler belirlenir ve bu değerlerin tüm kombinasyonları (Şekil 5 örneğinde olduğu gibi) ilgili model için çalıştırılır. Performans kriterine göre en iyi sonucu veren parametre seti belirlenmiş olur. GS yöntemi, optimizasyon sürecinde zamansal fayda sağlamakla birlikte bütün arama uzayının eşit aralıklarla aranmasını sağlar. Bu avantajların yanında, sadece yerel en iyiyi bulma riski GS'nin dezavantajıdır.



Şekil 3. ERUSLR veri setini sınıflandırmak için önerilen yöntem (Proposed method for classifying the ERUSLR data set)



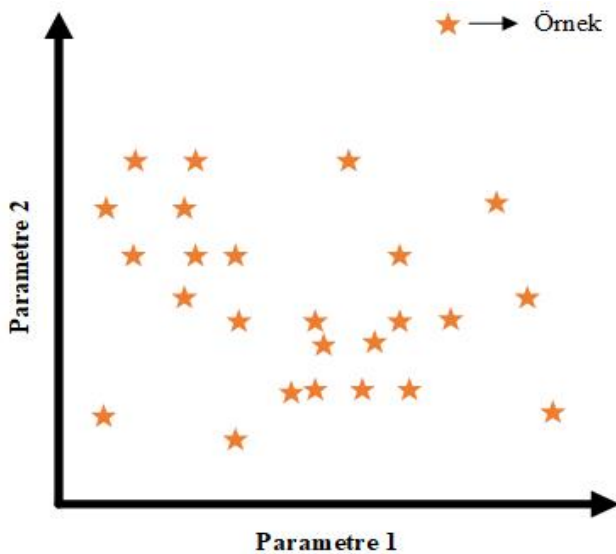
Şekil 4. Bir örnek üzerinde ön işleme çalışması (Pre-processing on a sample)



Şekil 5. GS için arama uzayındaki parametre setleri
(Parameter sets in the search space for grid search)

3.1.2. Rastgele arama yöntemi (Random search method (RS))

RS, GS yönteminde olduğu gibi bir modelin parametrelerini optimize etmede kullanılan global bir arama yöntemidir. Optimize edilecek parametrelerin alt ve üst sınırları belirlenir. Daha sonra her bir koşma için rastgele belirlenmiş parametre seti ile model eğitilip performans çıktısı alınır. Arama uzayında rastgele belirlenmiş parametre setleriyle (Şekil 6 örneğinde olduğu gibi) yapılan RS yöntemi ile zamansal kazanç sağlanabilir. Ayrıca global en iyiyi bulma ihtimali düşük de olsa vardır. Buna karşılık olarak parametre setleri rastgele seçildiğinden dolayı aramalar belirli noktalara sıkışıp arama uzayının her bölgesinde arama gerçekleştirilemeyebilir.



Şekil 6. RS için arama uzayındaki parametre setleri
(Parameter sets in the search space for random search)

3.1.3. Genetik algoritma (Genetic algorithm (GA))

GA, 1975'te John Holland ve arkadaşları tarafından önerilen sezgisel bir arama algoritmasıdır [37]. Kromozomlar genel çözümleri ifade ederken, GA'nın temel amacı en iyi uygunluk değerini veren gen dizilişinin bulunmasıdır. Durdurma kriteri sağlanana kadar algoritma olası çözümleri test etmeye ve en uygun sonucu veren gen dizilişini aramaya devam eder. GA'ya ait temel adımlar Algoritma 1 ile sunulmuştur.

Algoritma 1:

Adım 1: Başlangıç popülasyonu ve kontrol parametrelerinin belirlenmesi

Adım 2: Uygunluk değeri hesaplama

Tekrarla

Adım 3: Seleksiyon

Adım 4: Çaprazlama

Adım 5: Mutasyon

Durdurma kriteri sağlanana kadar

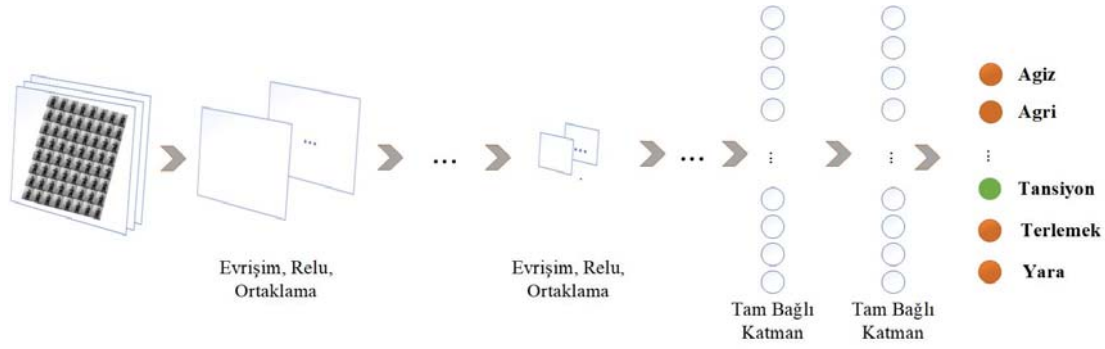
Algoritmanın ilk adımında, GA'nın mutasyon oranı, çaprazlama oranı, jenerasyon sayısı ve popülasyon büyüklüğü olan kontrol parametreleri ile başlangıç popülasyonu oluşturulur. Bir sonraki aşamada popülasyondaki her bir olası çözüm için uygunluk değeri hesaplanmaktadır. Daha sonra durdurma kriteri sağlanana kadar Adım 3, 4, 5 sırasıyla tekrarlanır. Adım 3 ile popülasyonda kaliteli çözümlerin artması, kalitesiz çözümlerin azalmasını sağlayan seleksiyon işlemi gerçekleştirilir. Rulet tekeri, sıralama ve turnuva en temel seleksiyon operatörleri arasında yer almaktadır. Adım 4'te çaprazlama işlemi ile yüksek kaliteye sahip bireylerden daha iyi bireylerin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Son adım olan Adım 5 ile genetik çeşitliliğin sağlandığı mutasyon işlemi gerçekleştirilmektedir.

3.2. Transfer Öğrenme Destekli Evrişimli Sinir Ağı (Transfer Learning Aided Convolutional Neural Network)

3.2.1. Evrişimli sinir ağı (Convolutional neural network (CNN))

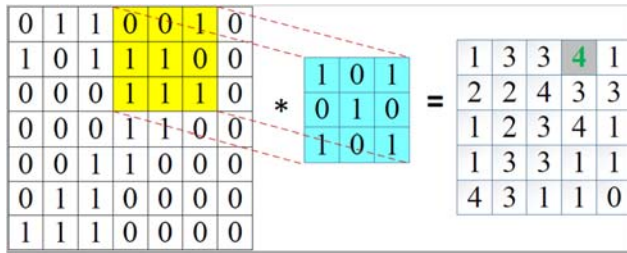
Evrişimli sinir ağı (CNN), bir görüntüyü girdi olarak alıp, kendi mimarisıyla çıkardığı özellikleri kullanarak görüntüyü anlamlandıran derin öğrenme metodudur [25]. Nesne tanıma, sınıflandırma gibi temel işlevleri olan CNN yapısı son yıllarda popüler kullanıma sahiptir. CNN, genellikle evrişim, ortaklama, düzleştirme ve tam bağlantı katmanlarına sahiptir. Örnek bir CNN mimarisi Şekil 7 ile sunulmuştur.

Evrişim katmanı, evrişim işleminin gerçekleştirildiği katmandır. Burada, girdi filtreden geçirilir ve elde edilen çıktı, özellik haritası veya aktivasyon haritası olarak adlandırılır [25]. Örnek bir evrişim işlemi Şekil 8 ile gösterilmiştir. Burada 2 boyutlu imge, evrişim çekirdeği olarak adlandırılan filtre ile çarpım işlemine uğradıktan sonra evrişmiş imge ortaya çıkmaktadır. Genellikle evrişim katmanından sonra kullanılan ortaklama katmanı ile mevcut



Şekil 7. Örnek bir CNN mimarisi (A sample architecture of CNN)

girdinin özelliklerini koruyarak daha küçük bir matris elde etmek amaçlanmaktadır. Maksimum ve ortalama ortaklama sıklıkla kullanılan ortaklama tipleridir [38]. Maksimuma ortaklama için işlem süreci Şekil 9 ile sunulduğu gibidir. Burada, 2x2'lik bloklar halinde imge ayrılır ve her bir bloktaki en büyük sayı alınarak ortaklama işlemi gerçekleştirilmiştir olur.



Şekil 8. Örnek bir evrişim işlemi (An example for convolution process)



Şekil 9. Örnek bir maksimuma ortaklama işlemi (An example for max pooling process)

Düzleştirme katmanı kendinden önceki matris formatındaki verileri tam bağlantı katmanına beslemek için hazırlar. CNN mimarisinin sonlarına doğru kullanılan tam bağlantı katmanı tüm nöronların önceki tüm girişe bağlı olduğu katmandır. Düzleştirme katmanından alınan veriler sinir ağı yoluyla eğitilir ve öğrenme işlemi gerçekleştirilir.

3.2.2. Transfer öğrenme (Transfer learning)

Bir sınıflandırma probleminin çözümü için yeni bir CNN mimarisi oluşturmak zahmetli ve zaman isteyen bir süreçtir. Bunun yerine ön eğitilmiş modellerden faydalanmak, yeni bir mimari kurmaya nazaran daha etkili bir yöntemdir. AlexNet

[25], GoogLeNet [39], ResNet50 [40], vb. modeller ön eğitilmiş model olarak adlandırılmaktadır. Ön eğitilmiş modeller kullanılarak sınıflandırma, özellik çıkarma veya transfer öğrenme gerçekleştirilebilir.

Transfer öğrenme, ön eğitilmiş modelin mimarisinden belirli bir katmana kadar olan kısmının atılarak, atılan katmanların yerine probleme uygun olan katmanların eklenmesiyle oluşmaktadır. Böylelikle ön eğitilmiş modelin düşük ve orta seviyeli özellik çıkarma katmanları transfer edilmiş olup, yüksek seviyeli özellik çıkarması mimariye sonradan eklenen ve ilgili sınıflandırma problemine uygun olarak seçilen katmanlarla gerçekleştirilir [41]. Örnek bir transfer öğrenme süreci adımları Şekil 10 ile gösterildiği gibidir. Bu çalışmada, 22 katman derinliğe sahip ve kullanımı popüler olan GoogLeNet ön eğitilmiş model kullanılarak transfer öğrenme gerçekleştirilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

GS, RS ve GA yöntemleri kullanılarak parametre ayarlaması ile transfer öğrenme destekli CNN kullanılarak sınıflandırma çalışmasının gerçekleştirildiği bu çalışmada ERUSLR veri seti üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmuştur.

4.1. Deneysel Kurulum (Experimental Setup)

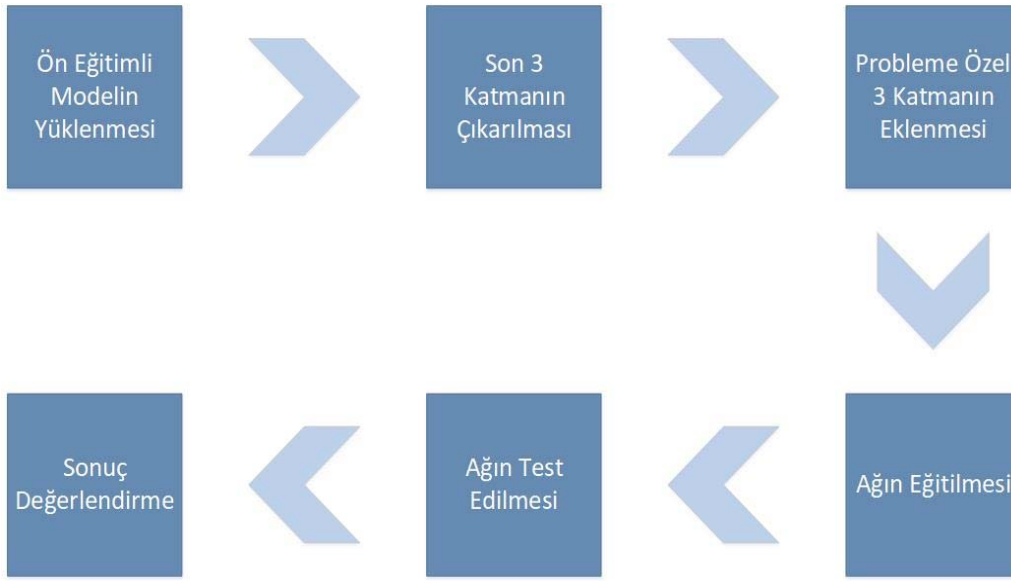
Deneysel kurulum, donanımsal kurulum ve parametre kurulumu olmak üzere iki alt başlıkta ele alınmıştır.

4.1.1. Donanımsal kurulum (Hardware setup)

Hem görsel veri üzerinde gerçekleştirildiği hem de veri setindeki büyük örnek sayısından dolayı bütün deneysel çalışmalar için 11 GB Ram destekli NVIDIA GTX 1080 Ti Turbo donanımı kullanılmıştır. Önerilen yöntem, Matlab 2019b platformunda koşulmuştur.

4.1.2. Parametre kurulumu (Parameter setup)

Önerilen yöntemde, parametre ayarlaması için GS, RS ve GA yöntemleri kullanılmıştır. GS için kullanılacak ilk öğrenme oranı (ILR), ℓ_2 düzenleme (ℓ_2R) ve momentum



Şekil 10. Örnek bir transfer öğrenme süreci adımları [38] (An example for main steps of transfer learning process)

(M) parametre değerleri Tablo 3 ile gösterilmiştir. RS yönteminde seçilecek ilk öğrenme oranı, ℓ_2 düzenleme ve momentum değerlerinin alt sınırı sırasıyla 0,001, 0,00001 ve 0,75 iken üst sınırı sırasıyla 0,01, 0,001 ve 0,95'tir. RS için kullanılan alt ve üst sınırlar GA için de kullanılmıştır. GA'da mutasyon oranı 0,20, çaprazlama oranı 0,80, popülasyon sayısı 5 ve iterasyon sayısı 25 olarak ayarlanmıştır. CNN modelinin eğitim parametreleri ayarında ilk öğrenme oranı, ℓ_2 düzenleme ve momentum parametrelerinin dışında var olan minibatch boyutu değeri 32 ve maksimum epok değeri 100 olarak seçilmiştir. CNN'in eğitiminde momentumlu stokastik gradyan inişi yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 3. GS için kullanılan parametre değerleri
(Parameter values used in grid search)

Parametre	Değerler				
ILR	0,001	0,003	0,005	0,007	0,01
ℓ_2R	0,00001	0,0005	0,0001	0,005	0,001
M	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95

4.2. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada önerilen yöntem ERUSLR veri seti ile test edilmiştir. Önerilen yöntemde GS, RS ve GA yöntemleri sistemdeki CNN modelinin eğitim parametrelerini optimize etmek için kullanılmıştır. Tablo 4 incelendiğinde GS için oluşabilecek tüm parametre seti kombinasyonları ve bu parametre setlerine ait doğrulama hataları sunulmuştur. 0,3201 doğrulama hatasını veren parametre değerleri GS sonucunda hafızada tutulan en iyi parametre değerleridir. RS için oluşan rastgele parametre setleri ve bu parametre setlerine ait doğrulama hataları Tablo 5 ile sunulmuştur. Tablo 5 incelendiğinde 0,3208 doğrulama hatasını veren parametre değerleri RS sonucunda hafızada tutulan en iyi

parametre değerleridir. parametre optimizasyonu için GA koşuturulduğunda 0,3237 doğrulama hatasını veren parametre seti çıktı olarak verilmiştir. Bu parametre değerleri sırasıyla ILR = 0,0019, ℓ_2R = 0,00097 ve M = 0,85 olarak elde edilmiştir.

GS yöntemiyle elde edilen en iyi parametre seti ile eğitim verisi kullanılarak eğitilen GoogLeNet tabanlı CNN modeli ile test verisi üzerinde %93,63 doğruluk oranı elde edilmiştir. İlgili modelin test verisi üzerindeki karmaşıklık matrisi Şekil 11 ile gösterilmiştir.

RS yöntemiyle elde edilen en iyi parametre seti ile eğitim verisi kullanılarak eğitilen GoogLeNet tabanlı CNN modeli ile test verisi üzerinde %89,81 doğruluk oranı elde edilmiştir. İlgili modelin test verisi üzerindeki karmaşıklık matrisi Şekil 12 ile gösterilmiştir.

GA yöntemiyle elde edilen en iyi parametre seti ile eğitim verisi kullanılarak eğitilen GoogLeNet tabanlı CNN modeli ile test verisi üzerinde %93,93 doğruluk oranı elde edilmiştir. İlgili modelin test verisi üzerindeki karmaşıklık matrisi Şekil 13 ile gösterilmiştir.

Herhangi bir global arama yöntemi kullanılmadan sadece varsayılan eğitim parametre değerlerini kullanarak eğitilen GoogLeNet tabanlı CNN modeli ile test verisi üzerinde %88,62 doğruluk oranı elde edilmiştir. İlgili modelin test verisi üzerindeki karmaşıklık matrisi Şekil 14 ile gösterilmiştir.

GoogLeNet tabanlı CNN modeli ile GS, RS ve GA destekli GoogLeNet tabanlı CNN modelleri için kullanılan eğitim parametreleri değeri ve bu parametreler sonucunda elde edilen doğruluk oranları Tablo 6 ile gösterildiği gibidir. Tabloya göre GA destekli GoogLeNet tabanlı CNN en başarılı sonucu vermiştir.

Tablo 4. GS yönteminde belirlenen parametre değerleri ve hesaplanan doğrulama hataları
(Parameter values and validation errors determined in grid search method)

No	ILR	ℓ_2R	M	H	No	ILR	ℓ_2R	M	H	No	ILR	ℓ_2R	M	H
1	0,001	0,00001	0,75	0,3691	43	0,003	0,00500	0,85	0,3576	85	0,007	0,00050	0,95	0,9517
2	0,001	0,00001	0,80	0,4232	44	0,003	0,00500	0,90	0,3518	86	0,007	0,00010	0,75	0,3497
3	0,001	0,00001	0,85	0,3857	45	0,003	0,00500	0,95	0,4845	87	0,007	0,00010	0,80	0,3439
4	0,001	0,00001	0,90	0,4009	46	0,003	0,00100	0,75	0,3684	88	0,007	0,00010	0,85	0,3771
5	0,001	0,00001	0,95	0,3035	47	0,003	0,00100	0,80	0,3605	89	0,007	0,00010	0,90	0,4247
6	0,001	0,00050	0,75	0,3958	48	0,003	0,00100	0,85	0,3583	90	0,007	0,00010	0,95	0,5083
7	0,001	0,00050	0,80	0,4110	49	0,003	0,00100	0,90	0,3360	91	0,007	0,00500	0,75	0,4196
8	0,001	0,00050	0,85	0,3850	50	0,003	0,00100	0,95	0,3800	92	0,007	0,00500	0,80	0,4420
9	0,001	0,00050	0,90	0,3619	51	0,005	0,00001	0,75	0,3785	93	0,007	0,00500	0,85	0,4470
10	0,001	0,00050	0,95	0,3331	52	0,005	0,00001	0,80	0,3901	94	0,007	0,00500	0,90	0,5811
11	0,001	0,00010	0,75	0,3973	53	0,005	0,00001	0,85	0,3720	95	0,007	0,00500	0,95	0,7931
12	0,001	0,00010	0,80	0,3915	54	0,005	0,00001	0,90	0,3951	96	0,007	0,00100	0,75	0,3922
13	0,001	0,00010	0,85	0,3821	55	0,005	0,00001	0,95	0,4650	97	0,007	0,00100	0,80	0,3828
14	0,001	0,00010	0,90	0,3720	56	0,005	0,00050	0,75	0,3857	98	0,007	0,00100	0,85	0,3634
15	0,001	0,00010	0,95	0,3273	57	0,005	0,00050	0,80	0,3518	99	0,007	0,00100	0,90	0,4146
16	0,001	0,00500	0,75	0,4146	58	0,005	0,00050	0,85	0,3821	100	0,007	0,00100	0,95	0,9517
17	0,001	0,00500	0,80	0,3836	59	0,005	0,00050	0,90	0,4124	101	0,010	0,00001	0,75	0,3886
18	0,001	0,00500	0,85	0,3764	60	0,005	0,00050	0,95	0,4463	102	0,010	0,00001	0,80	0,3598
19	0,001	0,00500	0,90	0,3670	61	0,005	0,00010	0,75	0,3634	103	0,010	0,00001	0,85	0,3879
20	0,001	0,00500	0,95	0,3944	62	0,005	0,00010	0,80	0,3381	104	0,010	0,00001	0,90	0,4470
21	0,001	0,00100	0,75	0,3893	63	0,005	0,00010	0,85	0,3691	105	0,010	0,00001	0,95	0,9531
22	0,001	0,00100	0,80	0,3468	64	0,005	0,00010	0,90	0,3526	106	0,010	0,00050	0,75	0,3518
23	0,001	0,00100	0,85	0,3641	65	0,005	0,00010	0,95	0,4585	107	0,010	0,00050	0,80	0,3446
24	0,001	0,00100	0,90	0,3706	66	0,005	0,00500	0,75	0,4456	108	0,010	0,00050	0,85	0,4167
25	0,001	0,00100	0,95	0,3360	67	0,005	0,00500	0,80	0,3547	109	0,010	0,00050	0,90	0,4996
26	0,003	0,00001	0,75	0,3619	68	0,005	0,00500	0,85	0,3792	110	0,010	0,00050	0,95	0,9517
27	0,003	0,00001	0,80	0,3720	69	0,005	0,00500	0,90	0,5213	111	0,010	0,00010	0,75	0,3655
28	0,003	0,00001	0,85	0,3338	70	0,005	0,00500	0,95	0,6301	112	0,010	0,00010	0,80	0,3778
29	0,003	0,00001	0,90	0,3684	71	0,005	0,00100	0,75	0,3800	113	0,010	0,00010	0,85	0,3843
30	0,003	0,00001	0,95	0,3742	72	0,005	0,00100	0,80	0,3259	114	0,010	0,00010	0,90	0,5501
31	0,003	0,00050	0,75	0,3627	73	0,005	0,00100	0,85	0,3439	115	0,010	0,00010	0,95	0,9531
32	0,003	0,00050	0,80	0,3670	74	0,005	0,00100	0,90	0,4348	116	0,010	0,00500	0,75	0,4859
33	0,003	0,00050	0,85	0,4182	75	0,005	0,00100	0,95	0,4535	117	0,010	0,00500	0,80	0,4492
34	0,003	0,00050	0,90	0,3201	76	0,007	0,00001	0,75	0,3785	118	0,010	0,00500	0,85	0,5032
35	0,003	0,00050	0,95	0,3396	77	0,007	0,00001	0,80	0,3526	119	0,010	0,00500	0,90	0,6128
36	0,003	0,00010	0,75	0,3879	78	0,007	0,00001	0,85	0,3410	120	0,010	0,00500	0,95	1,0000
37	0,003	0,00010	0,80	0,3699	79	0,007	0,00001	0,90	0,4218	121	0,010	0,00100	0,75	0,3396
38	0,003	0,00010	0,85	0,3627	80	0,007	0,00001	0,95	0,9517	122	0,010	0,00100	0,80	0,4037
39	0,003	0,00010	0,90	0,3713	81	0,007	0,00050	0,75	0,3915	123	0,010	0,00100	0,85	0,3915
40	0,003	0,00010	0,95	0,3901	82	0,007	0,00050	0,80	0,4117	124	0,010	0,00100	0,90	0,5912
41	0,003	0,00500	0,75	0,3699	83	0,007	0,00050	0,85	0,3987	125	0,010	0,00100	0,95	0,9517
42	0,003	0,00500	0,80	0,3482	84	0,007	0,00050	0,90	0,3605					

Tablo 5. RS yönteminde belirlenen parametre değerleri ve hesaplanan doğrulama hataları
(Parameter values and validation errors determined in random search method)

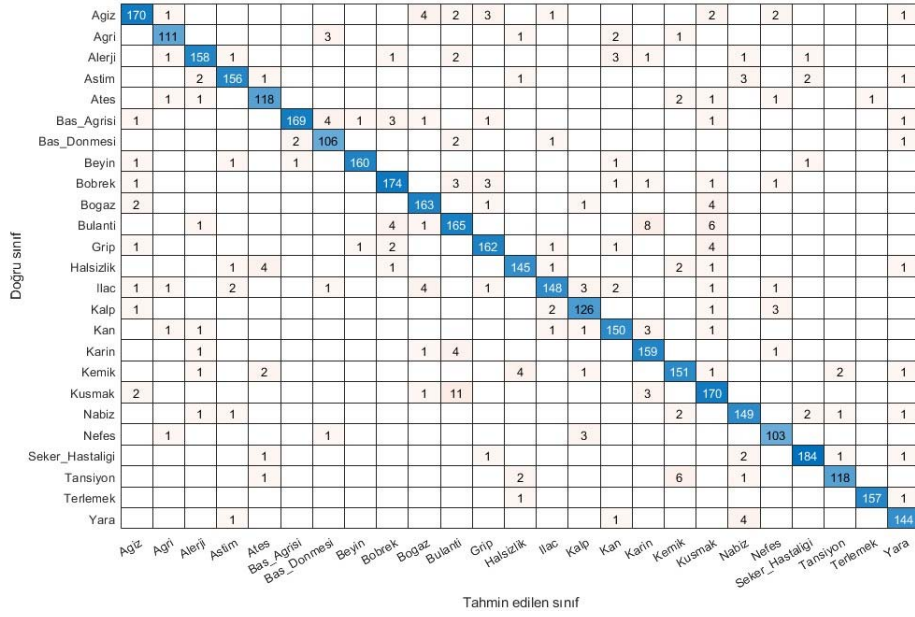
No	ILR	ℓ_2R	M	H	No	ILR	ℓ_2R	M	H	No	ILR	ℓ_2R	M	H
1	0,0045	0,00047	0,76	0,3764	43	0,0094	0,00053	0,85	0,4290	85	0,0019	0,00077	0,78	0,3727
2	0,0055	0,00083	0,85	0,3612	44	0,0036	0,00033	0,85	0,3922	86	0,0084	0,00094	0,95	0,9517
3	0,0018	0,00070	0,93	0,3345	45	0,0036	0,00093	0,84	0,3432	87	0,0079	0,00097	0,85	0,3663
4	0,0100	0,00033	0,86	0,3720	46	0,0093	0,00004	0,86	0,5061	88	0,0018	0,00092	0,81	0,3691
5	0,0092	0,00004	0,76	0,3590	47	0,0080	0,00081	0,80	0,3317	89	0,0061	0,00074	0,82	0,3713
6	0,0022	0,00019	0,77	0,3706	48	0,0081	0,00084	0,87	0,4074	90	0,0063	0,00028	0,94	0,4766
7	0,0040	0,00056	0,89	0,3973	49	0,0011	0,00087	0,90	0,4110	91	0,0049	0,00008	0,89	0,3533
8	0,0069	0,00039	0,86	0,3893	50	0,0059	0,00013	0,81	0,3295	92	0,0052	0,00022	0,88	0,3208
9	0,0080	0,00012	0,77	0,3720	51	0,0018	0,00029	0,94	0,3562	93	0,0015	0,00022	0,82	0,3944
10	0,0022	0,00079	0,89	0,3778	52	0,0057	0,00074	0,77	0,3208	94	0,0053	0,00047	0,80	0,3677
11	0,0099	0,00068	0,93	0,5263	53	0,0077	0,00086	0,76	0,3670	95	0,0078	0,00096	0,77	0,3720
12	0,0029	0,00089	0,93	0,3785	54	0,0084	0,00003	0,91	0,4275	96	0,0014	0,00018	0,79	0,3547
13	0,0035	0,00086	0,85	0,3345	55	0,0019	0,00097	0,84	0,3590	97	0,0050	0,00007	0,90	0,3583
14	0,0057	0,00091	0,80	0,3482	56	0,0047	0,00047	0,86	0,3396	98	0,0091	0,00050	0,89	0,4254
15	0,0066	0,00077	0,89	0,3518	57	0,0060	0,00032	0,76	0,3612	99	0,0011	0,00003	0,77	0,3800
16	0,0070	0,00054	0,77	0,3886	58	0,0088	0,00081	0,75	0,3547	100	0,0057	0,00053	0,78	0,3533
17	0,0049	0,00066	0,86	0,3994	59	0,0051	0,00005	0,79	0,3951	101	0,0025	0,00061	0,88	0,3374
18	0,0046	0,00056	0,95	0,4376	60	0,0058	0,00084	0,81	0,3677	102	0,0019	0,00045	0,93	0,3324
19	0,0041	0,00068	0,93	0,4297	61	0,0061	0,00097	0,83	0,4037	103	0,0049	0,00070	0,77	0,3929
20	0,0049	0,00049	0,84	0,3901	62	0,0025	0,00047	0,94	0,3605	104	0,0070	0,00038	0,86	0,3576
21	0,0045	0,00026	0,76	0,3432	63	0,0088	0,00085	0,85	0,4001	105	0,0081	0,00061	0,87	0,4484
22	0,0067	0,00004	0,82	0,3619	64	0,0064	0,00057	0,95	0,5061	106	0,0088	0,00086	0,88	0,4211
23	0,0071	0,00011	0,81	0,3526	65	0,0047	0,00047	0,83	0,3475	107	0,0055	0,00009	0,91	0,3980
24	0,0095	0,00009	0,86	0,3807	66	0,0046	0,00043	0,91	0,3670	108	0,0022	0,00008	0,93	0,3547
25	0,0079	0,00029	0,76	0,3482	67	0,0094	0,00047	0,93	0,9272	109	0,0013	0,00052	0,83	0,3518
26	0,0055	0,00059	0,87	0,3583	68	0,0092	0,00011	0,88	0,4189	110	0,0091	0,00092	0,81	0,3850
27	0,0030	0,00002	0,94	0,3663	69	0,0035	0,00009	0,76	0,3648	111	0,0082	0,00083	0,87	0,3792
28	0,0040	0,00055	0,91	0,3417	70	0,0033	0,00041	0,75	0,3684	112	0,0055	0,00035	0,89	0,3526
29	0,0083	0,00011	0,87	0,3987	71	0,0056	0,00057	0,80	0,3850	113	0,0053	0,00084	0,82	0,3482
30	0,0023	0,00060	0,85	0,3879	72	0,0065	0,00082	0,77	0,3922	114	0,0084	0,00072	0,81	0,4448
31	0,0061	0,00050	0,92	0,3893	73	0,0061	0,00095	0,84	0,3857	115	0,0016	0,00064	0,80	0,3684
32	0,0079	0,00005	0,76	0,3273	74	0,0070	0,00004	0,84	0,3490	116	0,0067	0,00020	0,85	0,3598
33	0,0092	0,00071	0,93	0,9517	75	0,0057	0,00071	0,87	0,3814	117	0,0053	0,00073	0,82	0,3872
34	0,0086	0,00088	0,90	0,4131	76	0,0084	0,00017	0,79	0,3821	118	0,0042	0,00010	0,94	0,3864
35	0,0050	0,00050	0,92	0,3583	77	0,0051	0,00045	0,90	0,3850	119	0,0021	0,00090	0,92	0,3259
36	0,0056	0,00056	0,95	0,4333	78	0,0078	0,00086	0,88	0,3836	120	0,0011	0,00031	0,86	0,4102
37	0,0051	0,00070	0,92	0,4124	79	0,0097	0,00028	0,77	0,3735	121	0,0030	0,00072	0,81	0,3576
38	0,0049	0,00002	0,90	0,3720	80	0,0088	0,00089	0,85	0,3915	122	0,0090	0,00006	0,76	0,3706
39	0,0028	0,00085	0,81	0,3706	81	0,0098	0,00085	0,87	0,4052	123	0,0014	0,00069	0,94	0,3562
40	0,0046	0,00009	0,83	0,3259	82	0,0064	0,00062	0,91	0,3922	124	0,0047	0,00032	0,94	0,4420
41	0,0083	0,00052	0,87	0,4174	83	0,0037	0,00071	0,93	0,3619	125	0,0038	0,00070	0,88	0,3381
42	0,0078	0,00084	0,92	0,4268	84	0,0040	0,00046	0,85	0,4268					

Doğru sınıf	Agiz	172	1				2	5	2	1		1	2														
	Agri	1	110			2						2		2			1										
	Alerji	1		159	1				1			3	1			1						2					
	Astım				158		4		1							2						1					
	Ates				1	118								1		2	2	1									
	Bas_Agrisi	1				168	3	1	1	3		2			1												
	Bas_Donmesi				2	3	1	103				1	1				1										
	Beyin	1				2		160		2																	
	Bobrek	2							180		2			1													
	Bogaz	2					1			159	5					4											
	Bulanti	1							3	1	167				2	11											
	Grip	2				1				1		167					1										
	Halsizlik		1		2	4			1	1			142	1	1		2						1				
	Ilac	1		2			2			3				152	2	2		1									
	Kalp		1										3	122	1	2		1		3							
	Kan	2	1	1						1	1				149	2		1									
	Karin			1				2	1	9						152		1									
	Kemik					4					2	2	1	3			144	1	3			3					
	Kusmak	2									7						3		174			1					
	Nabiz				1															151		1	1	3			
	Nefes	3					1			1		1					1			100							
Seker_Hastaligi			6	1										1	1	1				179		1					
Tansiyon			2	1													5	1				119					
Terlemek												3										1	155				
Yara				1								1			4								144				
		Agiz	Agri	Alerji	Astım	Ates	Bas_Agrisi	Bas_Donmesi	Beyin	Bobrek	Bogaz	Bulanti	Grip	Halsizlik	Ilac	Kalp	Kan	Karin	Kemik	Kusmak	Nabiz	Nefes	Seker_Hastaligi	Tansiyon	Terlemek	Yara	
		Tahmin edilen sınıf																									

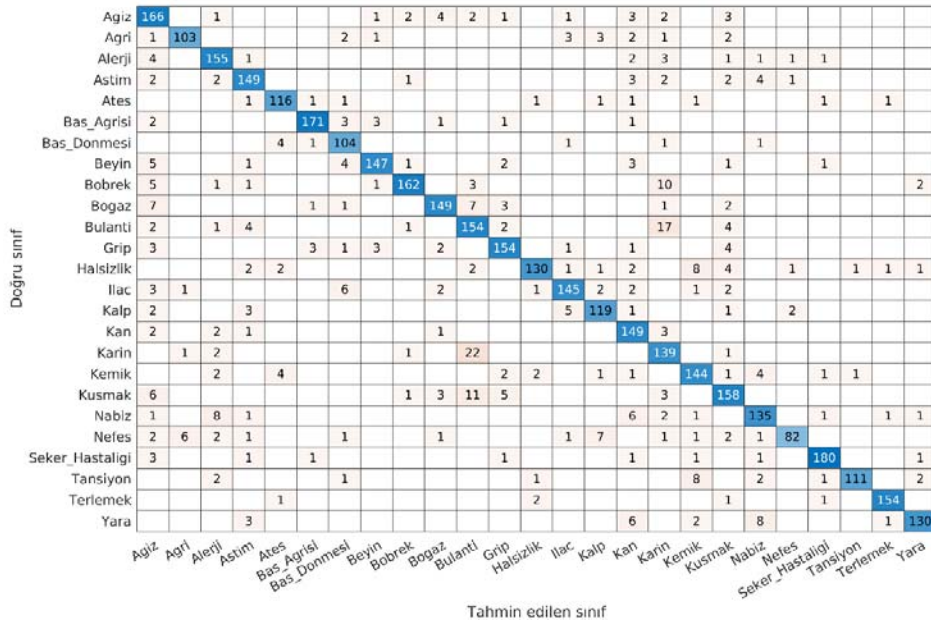
Şekil 11. GS destekli modelin karmaşıklık matrisi (Confusion matrix of grid search supported model)

Doğru sınıf	Agiz	148	1	2		3	1	3	6	2	6		2		1	10	1											
	Agri	1	108		1		2				1				2							3						
	Alerji			138	6						1					2	22											
	Astım				162			1									1					2						
	Ates				2	116							1	2	1					2					1			
	Bas_Agrisi					163	5	4	3	2	1	2								1					1			
	Bas_Donmesi	1				2	101	2					2						3	1								
	Beyin	1					1	156					3				4											
	Bobrek				1				175		1								6									2
	Bogaz	3				4				1	149	6						3		4		1						
	Bulanti				3					2		160	1						15	3				1				
	Grip	5						2	3	1			156							1	3	1						
	Halsizlik				4	4				1					135	1				1	5	1	2	1				1
	Ilac	1		1	2		2	1	3		6	1	142	2	2						1	1						
	Kalp								4							123			3	1	2							
	Kan	3		2	2			1	3	1	1	2				1	134	3		3	2	1						2
	Karin											3						163										
	Kemik				3								1	2						151	2	1		1				2
	Kusmak										20	3							14		150							
	Nabiz			2	4				1													148						1
	Nefes				2		1						2			2					1		100					
Seker_Hastaligi			5	5	3			1										4		3			167				2	
Tansiyon			2												1				7	5					111		2	
Terlemek								1				1									1		1				155	
Yara					4													1				3					142	
		Agiz	Agri	Alerji	Astım	Ates	Bas_Agrisi	Bas_Donmesi	Beyin	Bobrek	Bogaz	Bulanti	Grip	Halsizlik	Ilac	Kalp	Kan	Karin	Kemik	Kusmak	Nabiz	Nefes	Seker_Hastaligi	Tansiyon	Terlemek	Yara		
		Tahmin edilen sınıf																										

Şekil 12. RS destekli modelin karmaşıklık matrisi (Confusion matrix of random search supported model)



Şekil 13. GA destekli modelin karmaşıklık matrisi (Confusion matrix of GA supported model)



Şekil 14. Global arama desteksiz modelin karmaşıklık matrisi (Confusion matrix of global search unsupported model)

Tablo 6. Arama yöntemi destekli / desteksiz parametre seçimi ve doğruluk oranları (Search method supported / unsupported parameter selection and accuracy rates)

Metot	ILR	ℓ ₂ R	M	Doğruluk (%)
GS + GoogLeNet destekli CNN	0,0030	0,00050	0,90	93,63
RS + GoogLeNet destekli CNN	0,0057	0,00074	0,77	89,81
GA + GoogLeNet destekli CNN	0,0019	0,00097	0,85	93,93
GoogLeNet destekli CNN	0,0100	0,00010	0,90	88,62

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, öncelikle, hastane ortamında kullanılan kelimeleri içeren ERUSLR adında yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setinin sınıflandırılması için literatürde sıklıkla kullanılan ve bir derin öğrenme metodu olan CNN kullanılması amaçlanmıştır. Yeni bir CNN modelinin geliştirilmesi zorlu bir süreç gerektirdiğinden GoogLeNet ön eğitilmiş model kullanılarak transfer öğrenme destekli bir CNN modeli oluşturulmuştur. GoogLeNet tabanlı CNN modelinin başarımını artırmak için eğitim parametrelerini optimize etmek bu çalışmanın bir diğer amacı olmuştur. Global arama algoritmalarından en yaygın kullanılan GS ve RS yöntemleri ile yaygın kullanılan sezgisel arama yöntemlerinden GA, GoogLeNet tabanlı CNN modelinin eğitim parametrelerini optimize etmek için kullanılmıştır. Eğitim parametreleri arama yöntemleriyle optimize edilmiş CNN modelinin başarımları doğruluk oranı kriterine göre incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde, GA yöntemi destekli GoogLeNet tabanlı CNN modelinin başarımı diğer arama yöntemi destekli GoogLeNet tabanlı CNN modellerine göre daha yüksektir. Arama yöntemleri kullanılmadan sadece varsayılan eğitim parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmanın başarımı, arama yöntemi destekli modellere göre daha düşük kalmıştır.

Gelecek çalışmalar için parametre optimizasyonunda farklı global ve sezgisel arama yöntemlerinin kullanılması ve performans kıyaslaması amaçlanmaktadır. Bunun yanında, GoogLeNet dışında farklı ön eğitilmiş modeller kullanılarak transfer öğrenme gerçekleştirip performans analizi yapılabilir. Ayrıca, önerilen metodun farklı veri setleriyle test edilmesi bir diğer gelecek çalışma planıdır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Sosyal ve Beşerî Bilimler Etik Kurulu'ndan 113 nolu başvuru ile 25.12.2018'de izin alınarak oluşturulan ERUSLR, hastane ortamında kullanılmak üzere geliştirilen ve genel kullanıma açılan bir veri setidir. Bu veri setinin oluşumunda gönüllü olan değerli katılımcılara ve veri setinin toplanmasında yardımcı olan Gamze Korkmaz ve Nergis Baktır'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ong E.J., Cooper H., Pugeault N., Bowden R., Sign language recognition using sequential pattern trees, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington-USA, 2200–2207, 16-21 Haziran, 2012.
2. Ong E.J., Koller O., Pugeault N., Bowden R., Sign spotting using hierarchical sequential patterns with temporal intervals, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington-USA, 1923–1930, 23-28 Haziran, 2014.
3. Athitsos V., Neidle C., Sclaroff S., Nash J., Stefan A., Yuan Q., Thangali A., The american sign language

lexicon video dataset, 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Alaska-USA, 1–8, 23-28 Haziran, 2008.

4. Neidle C., Thangali A., Sclaroff S., Challenges in development of the american sign language lexicon video dataset(asllvd)corpus, Proc.5th Workshop on the Representation and Processing of Sign Languages: Interactions between Corpus and Lexicon, Language Resources and Evaluation Conference (LREC) 2012, İstanbul-Turkey, 1-8, 23-27 Mayıs 2012.
5. Kim J.H., Kim N., Park H., Park J.C., Enhanced sign language transcription system via hand tracking and pose estimation, Journal of Computing Science and Engineering, 10 (3), 95–101, 2016.
6. Metaxas D., Dilsizian M., Neidle C., Scalable ASL sign recognition using model-based machine learning and linguistically annotated corpora, 8th Workshop on the Representation & Processing of Sign Languages: Involving the Language Community, Language Resources and Evaluation Conference, Miyazaki-Japan, 1-5, 12 Mayıs, 2018.
7. Oszust M., Wysocki M., Polish sign language words recognition with Kinect, 2013 6th International Conference on Human System Interactions (HSI), Gdansk-Poland, 219–226, 6-8 Haziran, 2013.
8. Oszust M. ve Wysocki M., Some Approaches to Recognition of Sign Language Dynamic Expressions with Kinect, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 300, Hippe Zdzisaw S., Springer Cham, 75-86, 2014.
9. Kapuscinski T., Oszust M., Wysocki M., Warchol D., Recognition of hand gestures observed by depth cameras, International Journal of Advanced Robotic Systems, 12 (4), 36, 1-15, 2015.
10. Ronchetti F., Quiroga F., Estrebow C.A., Lanzarini L.C., Rosete A., LSA64: an Argentinian sign language dataset, CACIC 2016, Roma-Italy, 1-10, 3-7 Ekim, 2016.
11. Ronchetti F., Thesis Overview: Dynamic Gesture Recognition and its Application to Sign Language, Journal of Computer Science and Technology, 17, 1–10, 2017.
12. Konstantinidis D., Dimitropoulos K., Daras P., Sign Language Recognition based on Hand and Body Skeletal Data, 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON), Haziran, 1–4, 2018.
13. Masood S., Srivastava A., Thuwal H.C., Ahmad M., Real-Time Sign Language Gesture (Word) Recognition from Video Sequences Using CNN and RNN, Intelligent Engineering Informatics, Springer Singapore, 623–632, 2018.
14. Chai X., Wang H., Chen X., The devisign large vocabulary of chinese sign language database and baseline evaluations, Technical report VIPL-TR-14-SLR-001. Key Lab of Intelligent Information Processing of Chinese Academy of Sciences (CAS), Institute of Computing Technology, 2014.

15. Zheng L., Liang B., Sign language recognition using depth images, 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Phuket-Thailand, 1-6, 13-15 Kasım, 2016.
16. Yıldız O., Melanoma detection from dermoscopy images with deep learning methods: A comprehensive study, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 2241–2260, 2019.
17. Basturk, A., Sarikaya Basturk N., Qurbanov O., A comparative performance analysis of various classifiers for finger print recognition, Omer Halisdemir Universitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi, 7, 504 – 513, 2018.
18. Badem H., Basturk A., Caliskan A., Yuksel M.E., A new efficient training strategy for deep neural networks by hybridization of artificial bee colony and limited-memory BFGS optimization algorithms, Neurocomputing, 266, 506 – 526, 2017.
19. Arı A., Hanbay D., Tumor detection in MR images of regional convulsive neural networks, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1395 – 1408, 2019.
20. Yuksel M.E., Basturk N.S., Badem H., Caliskan A., Basturk A., Classification of high resolution hyperspectral remote sensing data using deep neural networks, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 34, 2273–2285, 2018.
21. Badem H., Basturk A., Caliskan A., Yuksel M.E., A new hybrid optimization method combining artificial bee colony and limited-memory BFGS algorithms for efficient numerical optimization, Applied Soft Computing, 70, 826 – 844, 2018.
22. Maraqa M., Abu-Zaiter R., Recognition of Arabic Sign Language (ArSL) using recurrent neural networks, 2008 First International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies (ICADIWT), Ostrava-Czech Republic, 478–481, 4-6 Ağustos, 2008.
23. Flores C.J.L., Cutipa A.G., Enciso R.L., Application of convolutional neural networks for static hand gestures recognition under different invariant features, International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Cuzco-Peru, 1–4, 15-18 Ağustos, 2017.
24. Alashhab S., Gallego A.J., Lozano M.Á., Hand Gesture Detection with Convolutional Neural Networks, International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence, 45–52, Springer, 2018.
25. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E., ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, NIPS, 1106–1114, 2012.
26. Cote-Allard U., Fall C.L., Campeau-Lecours A., Gosselin C., Laviolette F., Gosselin B., Transfer learning for sEMG hand gestures recognition using convolutional neural networks, 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Banff-Canada, 1663–1668, 5-8 Ekim, 2017.
27. Sanchez-Illana A., Pérez-Guaita D., Cuesta-García D., Sanjuan-Herráez J.D., Vento, M. Ruiz-Cerdá J.L., Quintas G., Kuligowski J., Model selection for within-batch effect correction in UPLC-MS metabolomics using quality control-Support vector regression, Analyticachimicaacta, 1026, 62–68, 2018.
28. Ozcan, T., Basturk, A., Transfer learning-based convolutional neural networks with heuristic optimization for hand gesture recognition, Neural Computing and Applications, 31 (12), 8955–8970, 2019.
29. Chen P., Xie Y., Jin P., Zhang D., A wireless sensor data-based coalmine gas monitoring algorithm with least squares support vector machines optimized by swarm intelligence techniques, International Journal of Distributed Sensor Networks, 14 (5), 1–21, 2018.
30. Stoean R., Analysis on the potential of an EA-surrogate modelling tandem for deep learning parameter optimization: an example for cancer classification from medical images, Neural Computing and Applications, 1-10, 2018.
31. Rubio G., Pomares H., Rojas I., Herrera L.J., A heuristic method for parameter selection in LS-SVM: Application to time series prediction, International Journal of Forecasting, 27 (3), 725 – 739, 2011.
32. Klein A., Falkner S., Bartels S., Hennig P., Hutter F., Fast bayesian optimization of machine learning hyperparameters on large datasets, arXiv, preprint arXiv:1605.07079, 1-9, 2016.
33. Hinz T., Navarro-Guerrero N., Magg S., Wermter S., Speeding up the hyperparameter optimization of deep convolutional neural networks, International Journal of Computational Intelligence and Applications, 17 (02), 1-15, 2018.
34. Kousias K., Riegler M., Alay Ö., Argyriou A., HINDSIGHT: An R-based framework towards long short term memory (LSTM) optimization, Proceedings of the 9th ACM Multimedia Systems Conference, Amsterdam-Netherlands, 381–386, 12-15 Haziran, 2018.
35. Czuszynski K., Ruminski J., Kwasniewska A., Gesture recognition with the linear optical sensor and recurrent neural networks, IEEE Sensors Journal, 18 (13), 5429–5438, 2018.
36. Ng, A., Machine Learning Yearning, deeplearning.ai., 2018.
37. Holland, J.H., 1992. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence, A Bradford Book.
38. Ozcan T., Basturk, A., Static Image-Based Emotion Recognition Using Convolutional Neural Network, Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Sivas-Turkey, 1–4, 24-26 Nisan, 2019.
39. Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S.E., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A., Going Deeper with Convolutions, CoRR, 1409.4842, 1-12, 2014.

40. He K., Zhang X., Ren S., Sun J., Deep Residual Learning for Image Recognition, CoRR, 1512.03385, 1-12, 2015.
41. Ozcan T., Basturk A., Lip Reading Using Convolutional Neural Networks with and without Pre-Trained Models, Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 7 (2), 195–201, 2019.



New driver behaviour models for fleet management based on big data analytics

Ramazan Terzi^{1*}, Şeref Sağıroğlu^{1*}, Özge Çöçü¹, Rabia Arkan¹, Merve Tosun¹, Yusuf Tulgar²

¹Computer Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

²NetDataSoft, Eskişehir Yolu 9.km. No:266, B Blok No:75, Çankaya Ankara, 06800, Turkey

Highlights:

- Driver behavior analysis based on big data
- New models for fleet management
- Real data driven models

Keywords:

- Fleet management
- Driver/drive behavior
- Big data analysis

Article Info:

Research Article
Received: 30.07.2019
Accepted: 27.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.598581

Acknowledgement:

This study was supported by Gazi University Scientific Research Projects Unit (Grant Number: 06/2015-04)

Correspondence:

Author: Ramazan Terzi
e-mail:
ramazanterzi@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3130

Graphical/Tabular Abstract

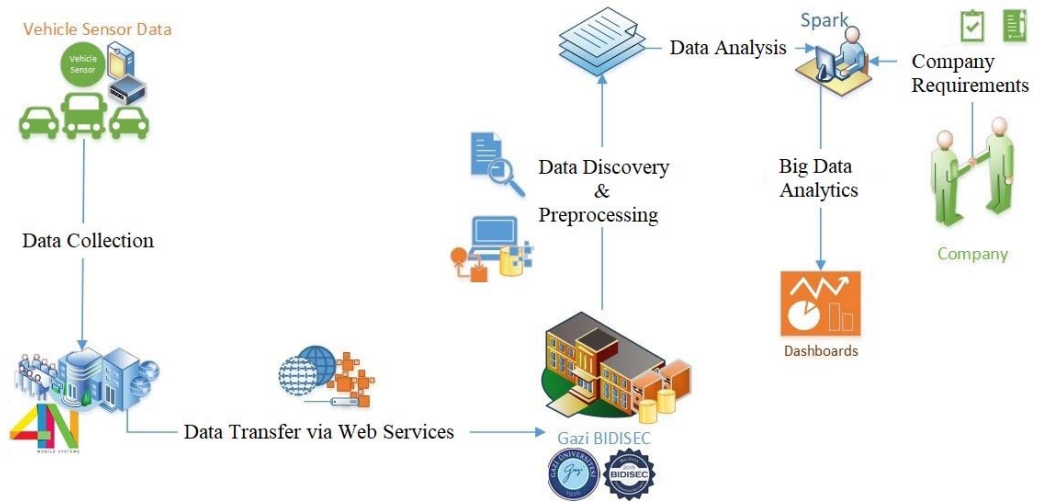


Figure A. Proposed big data based driver behavior analysis model for fleet management

Purpose: In this study, the deficiencies of fleet management systems have been examined from both big data and driver behavior perspectives, and the driver/driving behavior has been analyzed on real data and as a result, big data based new models have been proposed to perform data analysis. With 6 different scenarios on big data, new models have been developed with big data-based approaches that determine the differences in behavior of the drivers in the fleet, the behavior at various locations and the behavior at specific points.

Theory and Methods:

In this study, the deficiencies of fleet management systems have been examined both in terms of big data and driver/driving behavior, real scenarios has been determined and map reduce based models have been proposed to solve this problem with the real big fleet data for the first time.

Results:

From the obtained results, it was determined that (1) in particular, among drivers exceeding the speed limit of more than 50%, certain drivers have a 30% share of these violations compared to other drivers. (2) Even if the average speed is the same, there can be 6 times the difference in speed violations number between drivers, similar to that, even if the number of speed violations are the same, there could be a 2-fold difference in violation times. (3) According to the seasonal analysis, the highest number of speed violations occur in the summer season. However, speed violation duration occurred in autumn at most. (4) Roads where speed limit is exceeded in Ankara are Yenimahalle with a rate of 23.6% on a district basis, Saray with a rate of 4.62% on a quarter basis, Eskişehir road with a rate of 6.85% on intercity roads basis, and Anadolu Boulevard with 2.74% on urban roads basis. Finally, (5) it has been found that differences of near 300% occur in the analysis of 3 different radar points according to the number of speed violations before and after 1 kilometer of radar points.

Conclusion:

As a result, by using big data analytics, fleets can be used more easily and manageable within the scope of driver/driving behavior. These models can be used to prevent cost and work loss, and these analyzes for Ankara province can be used for other provinces. It is also considered that different values can be produced such as the analysis made at speed radar points.



Filo yönetimi için büyük veri temelli yeni sürücü davranış modelleri

Ramazan Terzi^{1*}, Şeref Sağıroğlu^{1*}, Özge Çöçü¹, Rabia Arkan¹, Merve Tosun¹, Yusuf Tulgar²

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

²NetDataSoft Şirketi, Eskisehir Yolu 9.km. No:266, B Blok No:75, 06800, Çankaya, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Büyük veri temelli sürücü davranış modelleri
- Filo yönetimi için yeni modeller
- Gerçek veri modelleri geliştirme

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 30.07.2019
Kabul: 27.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.598581

Anahtar Kelimeler:

Filo yönetimi,
sürücü/sürüş davranışı,
büyük veri analizi

ÖZET

Bu çalışmada, filo yönetim sistemlerinin eksikleri hem büyük veri hem de sürücü davranışı bakış açılarıyla incelenmiş, gerçek veriler üzerinde büyük veri temelli davranış analizleri gerçekleştirilmiş ve büyük veri tabanlı yeni modeller önerilmiştir. Büyük veri üzerinde 6 farklı senaryo ile filodaki sürücülerin davranış farklılıkları, çeşitli bölgelerde ve spesifik noktalardaki davranışları büyük veri temelli yaklaşımlar ile tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, özellikle %50 üzerinde hız limiti aşan sürücüler arasında belirli sürücülerin diğer sürücülere göre %30 oranında bu ihlalleri gerçekleştirdiği, ortalama hızları aynı olsa bile hız ihlalleri bakımından sürücüler arasında 6 kat farklılık olabileceği, hız ihlal sayıları aynı olsa bile ihlal sürelerinde 2 kat fark olabileceği, mevsimlere göre hız ihlal sayısının en fazla yaz mevsiminde olduğu ihlal süresinin de en fazla sonbaharda olduğu, Ankara içinde hız limitlerini aştığı yolların, ilçe bazında %23,6 oranıyla Yenimahalle, mahalle bazında %4,62 ile Saray, şehirlerarası yol bazında %6,85 ile Eskişehir yolunun, şehir içi yollarda ise %2,74 ile Anadolu Bulvarı olduğu, son olarak ise 3 farklı radar noktası incelemesinde, radar öncesi ve sonrası hız ihlallerinde %300'e yakın oranlarda farklılıkların oluşabileceği tespit edilmiştir. Sonuç olarak büyük veri analitiği kullanarak filoların sürücü/sürüş davranış kapsamında daha etkili kullanılabileceği, gerek maliyet gerekse iş gücü kaybının önlenmesi için bu modellerden faydalanılabileceği değerlendirilmektedir.

New driver behaviour models for fleet management based on big data analytics

H I G H L I G H T S

- Driver behavior analysis based on big data
- New models for fleet management
- Real data driven models

Article Info

Research Article
Received: 30.07.2019
Accepted: 27.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.598581

Keywords:

Fleet management,
driver/drive behavior,
big data analysis

ABSTRACT

In this study, shortcomings of fleet management systems have been examined from big data and driver behavior perspectives and big data based new models have been proposed to perform analysis with 6 different scenarios. According to the analysis results, it was determined that among the drivers exceeding the speed limit above 50%, certain drivers have committed 30% of these violations compared to other drivers, there may be a 6-fold difference between drivers in terms of speed violations, even if the average speed is the same, similarly, even if the number of speed violations are the same, there may be a 2-fold difference in violation times, according to the seasonal the highest number of speed violations is in summer, however, speed violation duration occurred in autumn at most, roads where speed limits are exceeded in Ankara in terms of districts, quarter, intercity roads and inner city roads are 23.6% Yenimahalle, 4.62% Saray, 6.85% Eskişehir road and 2.74% Anadolu Boulevard, respectively. Finally, according to 3 specific radar analysis, there may be differences of up to 300% in speed violations before and after radar. As a result, it is evaluated that by using big data analytics, fleets can be used more effectively within the scope of driver / driving behavior, and these models can be used to prevent both cost and work loss.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ramazanterzi@gazi.edu.tr, ss@gazi.edu.tr, ozge.cocu@gazi.edu.tr, rabia.arkan@gazi.edu.tr, merve.tosun@gazi.edu.tr, yusuf@netdatasoft.com / Tel +90 312 582 3130

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Filo yönetim sistemleri; birçok amaç için kullanılabilir. Bu sistemler genellikle araç/rota takibi, yakıt tasarrufu, sürücü/sürüş güvenliğinin sağlanması, optimum rotaların belirlenmesi, araç bakım maliyetlerinin azaltılması gibi amaçlara özgü kullanılabilir [1-6]. Belirtilen amaçlara uygun verilerin toplanabilmesi için filo araçlarına birçok sensör yerleştirilmekte ve bu sensörlerden gelen veriler ile amaca özgü analizler gerçekleştirilmektedir. Bu veriler ile kural tabanlı sürüş ihlali, yakıt tüketimi, sürüş mesafesi, rota vb. analizler, çeşitli yazılım araçları kullanılarak anlık takip edilebildiği gibi ayrıca çeşitli tahminleme modelleri kullanılarak filo ile ilgili gelecek projeksiyonlar da bu veriler yardımıyla gerçekleştirilebilmektedir [7].

Gerek filo yönetim sistemleri gerekse trafiğin temel unsurlarından biri olan sürücü göz önünde bulundurulduğunda sürücü/sürüş davranış analizleri, güvenlik, maliyet, filo verimliliği vb. alanlarda çok önemli bir rol üstlenmektedir. Bu kapsamda, [8]'nolu referansta verilen tez çalışmasında belirtilen ve aşağıda verilen senaryolar dikkate alınarak büyük veri temelli analizler gerçekleştirilmiştir.

1. Sürüş performansları bakımından sürücü davranışları birbirlerinden farklılık göstermekte midir?
2. Sürücülerin agresif sürüş performanslarını ortaya çıkaran temel parametreler nelerdir?
3. Sürücülerin sürüş performansları mevsimlere göre değişkenlik göstermekte midir?
4. Filonun faaliyet gösterdiği aktivite alanında riskli sürüşe olanak sağlayan yollar, bölgeler, ilçeler nerelerdir?
5. Şehir içi ve şehirlerarası yollarda sürüş davranışları nasıl değişmektedir?
6. Spesifik noktalarda (radar, kavşak, trafik ışığı vs.) sürüş davranışları nasıl değişmektedir?

Belirtilen senaryolar eşliğinde sürücü/sürüş davranış analizleri büyük veri bakış açıları ile verilmiştir. Makalenin ikinci bölümünde akademik çalışmalar özetlenerek filo yönetim sistemlerinin temel unsurları ve kullanım amaçları verilmiştir. Üçüncü bölümde ise filo yönetim sistemleri büyük veri bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümde ulusal ve uluslararası alanda faaliyet gösteren filo yönetim sistemlerine ait ticari ürünler incelenmiş ve bu sistemler kullandıkları veriler, yaptıkları analizler ve veri kaynakları bakımından karşılaştırılmıştır. Makalenin beşinci bölümünde ise önerilen büyük veri temelli filo yönetim analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak altıncı bölümde çalışmanın sonuçları verilmiştir.

2. FİLO YÖNETİM SİSTEMLERİ (FLEET MANAGEMENT SYSTEMS)

Literatürde verilen çalışmalar incelendiğinde, filo yönetim sistemleri çeşitli bileşenleri içermekte ve birçok alanda farklı

amaçlarla kullanıldığı gözlemlenmektedir. Bu sistemler kara, hava ve deniz taşımacılığında karşımıza çıkabilmektedir. Deniz taşımacılığında teknelerin konumlarının takibi, hava taşımacılığında uçak bakımlarının takibi gibi örnekler verilebilir [4, 9]. Filo yönetim sistemlerinin en sık karşımıza çıktığı alan ise kara taşımacılığında olmaktadır ve bu alan çok daha fazla kullanım alanına sahiptir. Bu alanlar Şekil 1(a)'da kategorik olarak verilmiştir.

Özellikle kara taşımacılığında otobüs, kamyon, binek araçları, ambulans, itfaiye gibi farklı türden araçlarda maliyet, planlama ve güvenlik gibi çeşitli alt başlıklar Şekil 1(b)'de verildiği gibidir [2, 6, 7, 10-13]. Her bir alt başlık kendi içerisinde farklı analizler içermektedir. Bu analizler ile karayolu taşımacılığında verimliliğin artırılması, zaman tasarrufu ve rota optimizasyonunun sağlanması, ulaşım ve çevre güvenliğinin artırılması gibi çeşitli çalışmalar raporlanmıştır [2, 7].

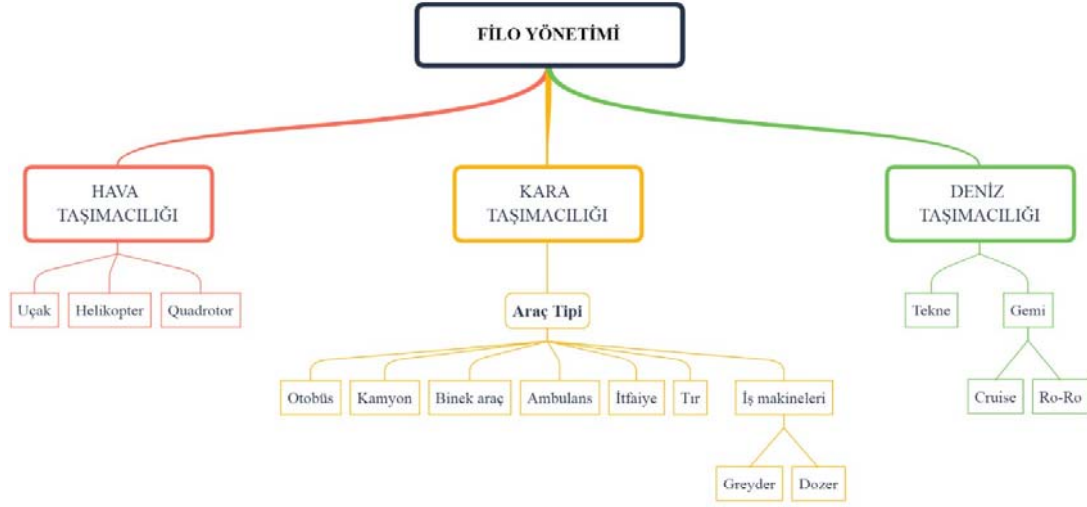
Benzer şekilde gittikçe artan bir pazar payına sahip elektrikli araçlar için de özellikle enerji optimizasyonu, şarj kullanım profillemesi gibi amaçlar için de filo yönetim sistemleri kullanılmaktadır [9, 14, 15].

Şekil 1'de belirtildiği üzere birçok alanda ve çeşitli amaçlarla filo yönetim sistemi bulunmakta ve bu sistemin temelinde de sürücü yer almaktadır. Sürücü, özellikle trafikte en önemli unsur olarak karşımıza çıkmaktadır ve filo yönetiminde diğer farklı unsurları doğrudan veya dolaylı bir şekilde etkilemektedir. Örneğin, güvenlik açısından incelendiğinde trafik kazalarının %90'a yakın bir oranda sürücülerden kaynaklandığı raporlanmaktadır [16] Ayrıca yapılan bir çalışmada insan faktörünün gemi kazalarının da temel nedeni olduğundan bahsedilmiştir [17].

Filo yönetim sistemlerinin temel unsurları Şekil 2'deki gibi özetlenmiştir. Sürücünün odağında olduğu filo yönetim sistemlerinde birçok sürücü davranış analizleri gerçekleştirilmektedir. Sürücü davranış analizleri veriye ihtiyaç duymaktadır ve bu veri çeşitli sensörlerden alınmaktadır. Bu verilere örnek olarak ani yavaşlama, ivme, hız, mesafe, gerçekleştirilen sefer sayısı, sürüş süresi, rölanti durumu/süresi ve devir bilgisi gibi parametreler verilebilir [3, 5]. Bu veriler üzerinde çeşitli analizler yapılabilmektedir. Sürücü profillerinin çıkarılması, sürücülerin puanlanması ve güvenli sürüş analizleri, sürücülerin fiziksel ve/veya zihinsel durumlarının tespiti, sürüş stillerinin belirlenmesi gibi analizler filo yönetim sisteminden alınan veriler ile gerçekleştirilmektedir [5, 18, 19].

Sürücü davranışlarının filo yönetim sistemi içerisinde çeşitli maliyetlerin takibi için de kullanıldığı bilinmektedir. Özellikle en büyük maliyet kalemlerinden biri olan yakıt verimliliği, araçların bakım ve onarımı gibi alanlarda sürücü davranışlarının etkisi çok fazla görülmektedir [18, 20-22].

Benzer bir şekilde çevreye olumsuz etki eden zararlı gaz salınımları üzerinde de sürücü davranış analizler



(a)



(b)

Şekil 1. Filo yönetimi ve optimizasyonu (a) filo yönetimi çeşitliliği, (b) kara taşımacılığında filo yönetimi kapsamında karşılaşılan çözümler (* sürücü davranış analizlerinin etkili olduğu başlıklardır.) [8].
(Fleet management and optimization a) diversity of fleet management, b) solutions in the scope of fleet management in road transportation (* indicating driver behavior related solutions))

yapılmaktadır ve çevresel zararın etkisini azaltmada bu analizler etkili olmaktadır [19, 22]. Ayrıca gittikçe artan araç sayısı ve sürücülerin hız limitlerini aşarak araç kullanması nedeniyle birçok ölüm ve yaralanmalı kaza meydana geldiği açık bir şekilde görülmektedir [23]. Bu nedenle trafikte sürücü, sürüş ve yaya güvenliğinin artırılması bakımından da sürücü davranış analizleri gerçekleştirilmektedir [21, 24].

Genel olarak filo yönetim sistemleri;

- Filo araçlarının bakım, arıza, lokasyon vb. durumları için anlık takibi,
- Çeşitli maliyet kalemlerinin azaltılması, zaman tasarrufu, rota ve yakıt optimizasyonu,
- Sürücü/sürüş güvenliğinin takibi,
- Çevresel endişelerin azaltılması,
- Özelleştirilmiş olarak yangın, sel, taşkın, kar, hastalık gibi durumlarda kullanılmaktadır [12, 13, 25].



Şekil 2. Filo yönetim bileşenleri [8]
(Fleet management components)

3. FİLO YÖNETİMİNDE BÜYÜK VERİ (BIG DATA IN FLEET MANAGEMENT)

Büyük veri, geleneksel yöntemlerle makul zamanda işlenemeyecek, farklı bileşenlere sahip (hacim, hız, çeşitlilik vb.) veriler için kullanılan bir terimdir [26]. Filo yönetim sistemleri doğası gereği birçok sensörden veri toplamakta ve bu verileri harici kaynaktan almış oldukları diğer veriler (hava durumu, trafik bilgisi, yol durumu vb.) ile de birleştirerek çeşitli analizler yardımıyla değer üretmektedirler. Özellikle binlerce araçlardan oluşan filo yönetim sistemleri düşünüldüğünde büyük veri problemi ortaya çıkabilmektedir. Filo yönetiminde büyük veri analizleri yeni bir alan olup, literatürde bu alanla ilgili detaylı çalışmalar yeteri kadar yer almamaktadır. Bu durumun oluşmasına ise büyük veri farkındalığının olmaması, insan kaynağının eksik olması, gerekli altyapı eksikliği, büyük veri bakış açısının olmaması gibi birçok etken sebep olmaktadır [27]. Büyük veri bakış açısıyla geliştirilen ürünler; geliştirme, iyileştirme, ürünün pazara girme süresinin azaltılması, filoların çeşitli davranışların tahmini, filo araçlarının çevrimiçi bir şekilde analiz yapılması için büyük veri teknolojileri ile bir ana çatı (framework) geliştirme gibi çeşitli avantajlara sahip olabilmektedir [10, 28].

Literatürde büyük veri bakış açısı ile sürücü davranışlarının yakıt tüketimi, trafik durumu ve emisyon salınımı ile ilişkisini araştıran çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [29-31]. Ayrıca sürücü davranış analizi, sürücülerin sürüş stiline göre sınıflandırılarak davranışlarının karakterize edilmesi, sürüş güvenliğini tehlikeye atabilecek sürücülerin diğer sürücülerden ayırt edilerek ya da sürücülere geri bildirimde bulunularak kaza riskinin azaltılması gibi çalışmalarda da kullanılmaktadır [3, 18, 30]. Büyük veri bakış açısıyla gerçekleştirilen çalışmalar ve filo yönetim sistemlerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde, karşılaşılan zorluklar ve büyük veri teknolojilerinin bu sistemlere uygulanabilirliğinin iki çalışmada değerlendirildiği gözlemlenmiştir [27, 28]. Buna ek olarak karşılaşılan zorlukların genellikle büyük verinin bileşenlerinden olan "hacim", "değer" ve "çeşitlilik" kavramları üzerinden incelenerek sorunlara çözüm önerileri sunulduğu görülmüştür [32-34]. Büyük veri ve filo yönetimi çalışmalarında verilerin objektif bir şekilde kullanılması ve kişisel veri mahremiyetinin ve güvenliğinin de göz ardı edilmemesi gerekliliğini ortaya koyan çalışmalar olduğu gibi büyük veri üzerinde gerçek zamanlı uygulamalarda verilerin işlenmesi ve analiz edilmesinde ortaya çıkan zorlukların verinin hacminden, çeşitliliğinden, kalitesinden veya kullanılan sensörden kaynaklı olabileceği ve bu zorluklarının çözümüne dair çeşitli öneriler sunan çalışmalar da mevcuttur [6, 28, 32-34].

Sonuç olarak, büyük veri bakış açısıyla geliştirilen ve çeşitli önerilerin olduğu bazı çalışmalar literatürde var olmasına rağmen, özellikle filo yönetim sistemlerinde büyük veri uygulamalarını gerçekleştiren, büyük veriden üretilebilecek potansiyel değerleri gerçek veriler üzerinde gösterebilen yeteri kadar çalışma mevcut değildir.

4. FİLO YÖNETİM SİSTEMİ UYGULAMALARI (FLEET MANAGEMENT SYSTEM APPLICATIONS)

Filo yönetim sistemleri genellikle ticari bir ürün olmalarından dolayı önceki bölümlerde de belirtildiği üzere birçok uygulama alanına sahiptir. Ticari ürünlerin üstünlüklerini, kullandıkları veri kaynakları ve çeşitliliği ile yapmış oldukları analiz türlerini göstermek için Tablo 1 hazırlanmıştır. Tablo 1'de ulusal ve uluslararası bazı ticari ürünler kıyaslanmış olup, bu kıyaslama ilgili veriler ilgili ürüne ait web sitelerinden elde edilmiştir.

Tablo 1 incelendiğinde görülebildiği gibi ticari ürünlerde, toplamda 14 farklı veri ile 5 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Kullanılan veri parametreleri, ürünlere göre çeşitlilik göstermekle birlikte hepsinde konum bilgisi kullanılmaktadır. Ayrıca hıza bağlı özelliklerin de sıklıkla kullanıldığı da gözlemlenmiştir. Sensörlerden toplanan veriler ile hız ihlali, ani hızlanma/yavaşlama, ani kalkış/duruş, keskin dönüş vb. bilgiler kullanılarak çeşitli analizler yapılmaktadır. Bu analizlerden çoğunlukla sürücü davranışı, sürüş performansı ve puanlama analizlerini gerçekleştirmek için yapılmaktadır. Verilerin toplanması için CANBus ve telemetri teknolojileri kullanılabildiği gibi bazı ürünler de şirketlerin kendi geliştirdikleri cihazlar ile veri toplayabilmektedir.

Birçok alanda olduğu gibi filo yönetim sistemlerinde de ihtiyaçlar, kullanılan sensörlerin çeşidi, üretilen verinin hızı ve üretilebilecek potansiyel değerler de değişmektedir. Kimi ürünlerde büyük veriden bahsedilse bile büyük veri tabanlı çözümlerden detaylı olarak bahsedilmemektedir ve bu çözümlerin henüz sunulmadığı görülmektedir. Bölüm 5'te filo yönetiminde büyük veri bakış açısıyla geliştirilmiş olan uygulama sunulacaktır. Böylece büyük veri bakış açısıyla filo yönetim sistemlerinden üretilen değerler, gerçek verilere dayalı analizler sonucunda ortaya konulmuştur.

5. ÖNERİLEN BÜYÜK VERİ TEMELLİ FİLO YÖNETİM SİSTEM MODELLERİ (PROPOSED BIG DATA BASED FLEET MANAGEMENT SYSTEM MODELS)

Tablo 1'de sunulan karşılaştırmalar ve raporlanan literatür çalışmalarından görülebildiği gibi bazı ön çalışmalar olsa da büyük veri temelli bir filo yönetim sistemi henüz bulunmamaktadır. Bu bölümde geliştirilen sistem ve bu sisteme ait işlem adımları Şekil 3'te ayrıntılı olarak verilmiş ve bu işlemler aşağıda farklı başlıklar altında kısaca açıklanmıştır.

5.1. Veri Toplama Stratejisi ve Kullanılan Veri Seti (Data Collection Strategy and Datasets)

Büyük veri tabanlı filo yönetim sistemi gerçekleştirilirken 4N Mobile/Netdatasoft adlı şirketin geliştirmiş olduğu araç takip sisteminden alınan veriler kullanılmıştır [45]. Veriler, sensörlerin donanımlarında (firmware) tanımlanmış birçok kullanıcı tanımlı eşik değerler ile tetiklenerek üretilmiştir.

Tablo 1. Filo yönetimi sistemlerini kullanan ticari ürünlerin sürücü/sürüş davranış bakış açısı ile karşılaştırılması [8]
(Comparison for commercial products for fleet management systems with the driver/driving behavior perspective)

Atıf	Şirket	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	Analiz	Veri Kaynağı	U/U A
[35]	Asis					✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓		SD	CANBus	U
[36]	Scania					✓	✓			✓			✓	✓		SK, AKB, SS	SESS	U
[37]	Infotech	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		SP	B*	U
[38]	Petrol Ofisi					✓		✓		✓	✓	✓	✓			AKB, SS, SP	AutoMatic Plus	U
[39]	Lenoi		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		AKB	CANBus Lenoi Max/Pro	U
[40]	Shell	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓		SD, SK	ESGS	U
[41]	Vodafone					✓	✓	✓	✓	✓			✓			SP	B*	U
[42]	Arvento	✓				✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		AKB, SP	B*	U
[43]	Turkcell					✓				✓			✓			B*	Sensmarine	U
[44]	Opet					✓							✓	✓		AKB, SS, SP	B*	U
[45]	4N Mobile			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		SD, SP	CANBus	U
[46]	Geotab	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		SD, SP	NFC	UA
[47]	Ctrack	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		SD, SP	CANBus	UA
[48]	Chevin Fleet						✓			✓			✓			SD	Telemetri	UA
[49]	Gpstrackit	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	SD, SP	B*	UA
[50]	Samsara			✓	✓	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓	SD, SP	Telemetri	UA
[51]	Vehicle Tracking Solutions	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓		SD, SP	Telemetri	UA
[52]	Verizon Connect	✓		✓		✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	SD, SP	Verizon Networkfleet Fleetmatics	UA
[53]	Fleetio	✓		✓					✓	✓			✓			SD, SK	Telemetri	UA
[54]	Transpoco	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	SD, SP	Telemetri	UA
[55]	US Fleet Tracking	✓	✓			✓	✓		✓	✓			✓			B*	GPS Tracker	UA
[56]	Webfleet Solutions	✓		✓		✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓	SD, SS, SP	Telemetri	UA
[57]	Gurtam	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	SD, SP	CANBus	UA

P1: Ani hızlanma/ yavaşlama
P2: Ani kalkış/duruş
P3: Sert fren
P4: Keskin dönüş
P5: Hız

P6: Rölanti
P7: Kontak açma/ kapama
P8: Çalışma süresi
P9: Km
P10: Hız ihlal

P11: Mesai içi /dışı çalışma
P12: Konum
P13: Araç durumu (durma/kalkma/çekilme)
P14: İvmelenme

SD: Sürücü Davranışı, SK: Sürücü Karnesi, SP: Sürücü Performansı/Puanlama, AKB: Araç Kullanım Bilgisi, SS: Sürüş Stili, U: Ulusal, UA: Uluslararası, B*: Bulunamadı, SESS: Scania Entegre Sürüş Sistemleri, ESGS: Entegre Sürüş Güvenliği Sistemi



Şekil 3. Büyük veri temelli filo yönetimi için önerilen model [8] (Proposed big data analytical process model for fleet management)

Tablo 2. Analizlerde kullanılan veri istatistikleri [8] (Data statistics used in analysis)

Kayıt Sayısı	Sürücü Sayısı	Araç Sayısı	Sürüş Süresi(h)	Toplam Mesafe(km)
13429078	136	101	60058	1770286

Tablo 3. Analizde kullanılan alarm tipleri ve üretilme sayıları [8] (Alarm types and their counts used in analysis)

Alarm Tipi	%10-%30	%30-%50	%50	Pozitif İvmelenme	Negatif İvmelenme
Alarm Sayısı	807944	400081	452669	229264	237283

Herhangi bir alarmın (hız limiti, ivmelenme) üretilmesi, yön değişimleri, araç durması veya ilk harekete başlaması ve çekilme, belirlenen coğrafik alanın dışına çıkılması gibi durumlarda sensör tetiklenerek veri üretmektedir. Ayrıca yukarıda bahsedilen tetiklerden herhangi birinin olmaması durumunda zaman tetiklemesi devreye girerek (belirlenen eşik değerine göre) veri üretilmektedir. Sensörlerden alınan toplam 43 farklı veriden analizlerde kullanılanlar; adres, alarm açıklaması, alarm tipi, araç hızı, araç toplam kilometre, sürücü ismi, GPS zamanı, kontak açılma zamanı, kontak kapanma zamanı, enlem, boylam ve plakadır.

Bir yıllık zaman dilimi içerisinde toplanan veri setindeki genel istatistikler Tablo 2’de verilmiştir. Verilen istatistiklerden de anlaşıldığı üzere orta büyüklükteki filodan alınan senelik verilerin analizinde geleneksel ilişkisel veri tabanlarının büyük veri alt yapılarına göre daha kötü bir sorgu performansı gerçekleştireceği ortadadır. Ayrıca bir aracı birden fazla sürücünün kullandığı bilgisi de tablodan çıkarılabilmektedir.

Sensörler tarafından toplam 19 farklı alarm üretilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan alarmlar; ivmelenme alarmı ve hız limiti ihlal alarmı olarak belirlenmiştir. Üretilen hız ihlalleri, yolun hız limiti aşım oranına göre %10-

%30, %30-%50 ve %50 üzeri olarak ayrılmıştır. Her yolun hız limiti bilgisine göre hız alarmları üretilmektedir. Belirtilen alarmlardan, sürücü davranış analizinde kullanılan alarm türleri ve istatistikleri Tablo 3’te verilmiştir. Özellikle hız ve aşırı hız limiti ihlal alarmları veri setinde diğer alarm türlerine göre çok daha fazla üretilmiştir.

Sensörlerden alınan veriler Gazi Üniversitesi Büyük Veri ve Bilgi Güvenliği (BIDISEC) Laboratuvar altyapısı ve bu altyapıda bulunan büyük veri temelli yazılım araçları kullanılarak işlenmiştir [58].

5.2. Veri Keşfi ve Ön İşleme (Data Discovery and Preprocessing)

Sensörler doğası gereği gürültülü veri üretebilirler. Bu istenmeyen verilerin analizler üzerindeki olumsuz etkisini ortadan kaldırmak ve sefer bazlı analizler gerçekleştirmek için çeşitli veri ön işleme teknikleri kullanılmıştır. Bunlar aşağıda maddeler halinde listelenmiştir.

Sefer bilgisinin eklenmesi: Daha etkin analizler yapılması amacıyla veri setine sefer numarası adında yeni bir özellik eklenmiştir. Sefer numarası bilgisi, bir aracın kontak açılıp kapatılıncaya kadar geçen sürüşü tanımlamak için verilmektedir. Bir seferin tanımlı olabilmesi için kontak

açılma ve kapanma bilgisinin doğru bir şekilde gelmesi gerekmektedir. Sensör hatalarından dolayı kontak açılma veya kapanma bilgisinde herhangi bir eksiklik olduğu durumlarda seferler tanımsız olarak atanmıştır ve tanımsız seferler analizlerden çıkartılmıştır.

Sensör hataları: Özellikle sensörlerin araçlara doğru bir şekilde sabitlenememesinden dolayı hatalı veriler gelebilmektedir. Örneğin, sensörün yerinden çıkması ve bulunduğu yerde serbestçe hareket etmesi darbe sensörünü aktif hale getirebilmektedir. Bu gibi durumlar büyük veride tespit edilerek raporlanmıştır ve analizlere dâhil edilmemiştir.

Kilometre eşik değeri konulması: Filo yönetiminde büyük resmi görmek için çok kısa mesafeli (< 1km) seferler sürücü davranışındaki değişiklikler çok az olduğu için analiz kapsamına alınmamıştır.

Adres bilgisinin standardizasyonu: Sensörlerden alınan enlem, boylam bilgileri coğrafi kodlama yapılarak adres bilgisi çıkarılmaktadır. Fakat adres bilgileri zaman zaman standart dışı gelmektedir. Bundan dolayı adres bilgisinin cadde, mahalle, ilçe, il ve ülke olmak üzere beş detayda standardizasyonu gerçekleştirilerek lokasyon bazlı analizler yapılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen veriler anonimleştirilmiş veriler olup, kişisel mahremiyete önem verilerek bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

5.3. Veri Analizleri/Büyük Veri Analitiği (Data Analysis/Big Data Analytics)

Bu bölümde sağlıklı analizler yapılması için analizler sefer bazlı ve lokasyon bazlı olarak iki grupta incelenmiş ve bu gruplar kısaca açıklanmıştır.

5.3.1. Büyük veri tabanlı analiz metodu (Big data based methods for analysis)

Bu çalışmada büyük veri tabanlı analizlerin gerçekleştirilmesi için MapReduce tabanlı dağıtık bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma Şekil 4'te sözde kod olarak verilmiştir. Bu büyük veri paradigmasına göre veriler çeşitli parçalara bölünerek (varsayılan 128 MB) paralel olarak işlenmekte (Map aşaması) daha sonra ise bu parçalardan dönen sonuçlar birleştirilerek (Reduce aşaması) genel sonuca ulaşmaktadır. Böylece veriler olduğu yerde işlenmektedir. Diğer bir deyişle veriler kod bloğuna giderek değil, kod bloğu verilere giderek ilgili veri üzerinde çalışmaktadır (data locality). Bu çalışmada büyük veri temelli analizlerde BIDISEC büyük veri altyapısı kullanılmakta olup uygulama aracı olarak Apache Spark kullanılmıştır. Önerilen metoda göre veriler öncelikle araç plakaları ve sürücü isimlerine göre parçalara ayrılmaktadır (Partitions) ve zamana göre sıralanmaktadır. Toplamda 13429078 satır veriyi içeren 907 veri bloğu oluşmaktadır (bir sürücü birden fazla aracı kullanabilmektedir). Oluşan 907

veri bloğu üzerinde aynı anda paralel olarak çalışan kod bloğu (Map aşaması) Şekil 4'te verilmiştir.

Algorithm 1: Map Aşaması - Sefer Tabanlı Sürüş Özelliklerin Çıkarılması

```

Girişler: HDFS bloğu üstündeki bütün satırlar(Satırlar), Radar
Noktaları (RN), Radar Noktasının Öncesi-Sonrası Eşik
Değeri (RNE), Mesafe Eşik Değeri (MED)
Çıktı : Analizler için <Anahtar,Değer> ikilileri
1 mapPartition (Satırlar, RN, RNE, MED)
2 SK = List() ; // Sürüş Kayıtları için
3 SD = "Park Halinde"; // Sürüş durumları için
4 SBZ = Null ; // Sefer Başlangıç Zamanı
5 AKS = 0 ; // Araç Kilometre Sayacı
6 foreach satır in Satırlar do
7 SD=satır.AracTakipDurumu ;
8 if SD == "Kontak Açıldı" then
9 | SBZ = satır.GPSZamani;
10 | AKS = satır.AracToplamKM;
11 else if SD == "Hareket Halinde" then
12 | SK = sürüşVerisiAl(satır);
13 else if SD == "Kontak Kapanı" then
14 | AKS = satır.AracToplamKM - AKS ;
15 | if AKS >= MED then
16 | | SBZ=satır.GPSZamani - SBZ ;
17 | | SeferID = AnahtarUret(SK.Surucu,SK.Plaka, SBZ);
18 | | AlarmBilgileri = AlarmBilgileriCikar(SK.HizAlarmi,
19 | | SK.IvmeAlarmi) ;
20 | | AdresBilgileri = AdresBilgileriCikar(SK.Adres) ;
21 | | HizBilgileri = HizBilgileriCikar(SK.AracHizi) ;
22 | | RadarBilgileri = RadarBilgileriCikar(SK.HizAlarmi,
23 | | RN, RNE) ;
24 | | Mevsim = MevsimBilgiCikar(SBZ) ;
25 | else
26 | | continue;
27 | end
28 else
29 | continue;
30 end
return <SeferID,[AKS,SBZ, AlarmBilgileri, AdresBilgileri,
HizBilgileri, RadarBilgileri, Mevsim]>

```

Şekil 4. Büyük veri temelli filo yönetimi için önerilen algoritma (Proposed big data analytical process algorithm for fleet management)

Önerilen algoritma Map aşamasında giriş olarak; harita programlarından elde edilmiş radar noktalarını (her bir radar noktasını bir dikdörtgen içine alan köşe koordinatları, RN), radar noktalarındaki analizlerde kullanılmak üzere radar öncesi ve sonrası hangi mesafede analizlerin yapılacağını temsil eden eşik değerleri (RNE) ve bir seferin en az ne kadarlık bir mesafe de gerçekleşmesini belirten eşik değeri (ME) bilgilerini almaktadır. Her bir veri bloğu üzerinde (partition) ilgili sürücü ve plakaya ait veriler olduğundan dolayı her bir Map aşamasında ilgili sürücü-plakaya ait seferlerin bilgisi çıkarılmaktadır. Sürüş durumları ve çeşitli kayıtlar için değişkenler tanımlandıktan sonra (satır 2-5) ilgili araçtan üretilen her bir sinyal okunmaya başlanmaktadır (satır 6). Analiz kapsamında aracın sadece hareket durumundayken üretilen sinyaller kullanıldığından, aracın hareket durumu takip edilmektedir (satır 7). Bu çalışmada bir sefer, kontak açılıp kapanıncaya kadar geçen süreç olarak tanımlanmıştır. Kontak açıldığında zaman ve kilometre bilgisi alınmaktadır (satır 8-10). Araç hareket halindeyken Bölüm 5.1'de belirtilen sensörlerden gelen

sürüş bilgileri alınmaktadır ve bir listede tutulmaktadır, SK (satır 11-12). Aracın kontak kapatması durumunda bir sefer sonlandığından dolayı gerçekleştirilen seferle ilgili bütün analizler gerçekleştirilmektedir (satır 13). Öncelikle algoritmaya giriş olarak verilen ME değeri kullanılarak seferin analizlerde kullanılma durumu tespit edilir. Eğer sefer süresince kat edilen mesafe AKS, ME değerinden büyükse (satır 14-15) sefer ile ilgili analizler gerçekleştirilir. Her bir seferi diğer seferlerden ayırt etmek ve sefer bazı analizlerde kullanmak üzere sürücü ismi, plaka ve zaman bilgisini girdi olarak alan *AnahtarUret()* fonksiyonu ile tekil bir tanımlayıcı oluşturulmaktadır (satır 17). Daha sonra toplanan sürüş bilgilerinden hız ve ivme alarmları kullanılarak *AlarmBilgileriCikar()* fonksiyonu Tablo 3'te belirtilen alarm sayıları sefer bazı çıkarılmaktadır (satır 18). Adres bazı analizlerde girdi olarak kullanılan adres bilgisini alan *AdresBilgileriCikar()* fonksiyonu yardımıyla Bölüm 5.2'de belirtilen adres standardizasyonun yapılmaktadır (satır 19). Araç hızı bilgilerini kullanarak *HizBilgileriCikar()* fonksiyonu ile sürüşe ait hız istatistikleri çıkarılmaktadır (satır 20). Radar noktalarındaki analizleri gerçekleştirmek için hız alarm bilgileri, radar noktaları ve analiz için kullanılacak eşik değerleri girdi olarak alan *RadarBilgileriCikar()* fonksiyonu kullanılmaktadır (satır 21). Son olarak mevsimsel analizlerde kullanılmak üzere, zaman bilgisini irdi olarak alan *MevsimBilgiCikar()* fonksiyonu kullanılmaktadır (satır 22). Bütün analiz sonuçları üretilen tekil tanımlayıcı kullanılarak <anahtar, deger> ikilileri oluşturarak Reduce aşamasına gönderilmiştir.

Bu çalışmada Reduce aşaması herhangi bir birleştirme işlemine gerek duyulmamıştır (Identity Reducer). Map aşamasına giren 13429078 satır 907 veri bloğundan oluşan veri paralel bir şekilde işlenmiştir. Map aşamasında sefer bazı analizler tamamlandıktan sonra toplamda 184827 sefere ait veriler çıkarılmıştır. Elde edilen sefer bilgileri çeşitli görselleştirme araçları kullanılarak görselleştirilmiştir.

5.3.2. Sefer bazı analizler (Trip based analysis)

Bu bölümde sefer bazı analizler ile bu analize bağlı sonuçlar sırasıyla açıklanmıştır. Bu kapsamda hız ihlalleri, toplam kilometre, maksimum-ortalama hız bilgileri, mevsimlik ihlal oranları analiz edilmiştir. Analizler için bu çalışma kapsamında işlemlerin hem hızlı hem de belirli bir sistematik içerisinde yapılması için çeşitli gösterge panelleri tasarlanmıştır. Sefer bazı çıkarılan göstergelerde kilometre ve hız analizleri üzerinde odaklanılmıştır. Bu göstergeler sayesinde sürücü, zaman, alarm türü ve plaka bilgisine göre çeşitli filtreleme araçları kullanılabilir. Ayrıca grafiklerdeki her bir farklı renk bir sürücüyü temsil etmektedir.

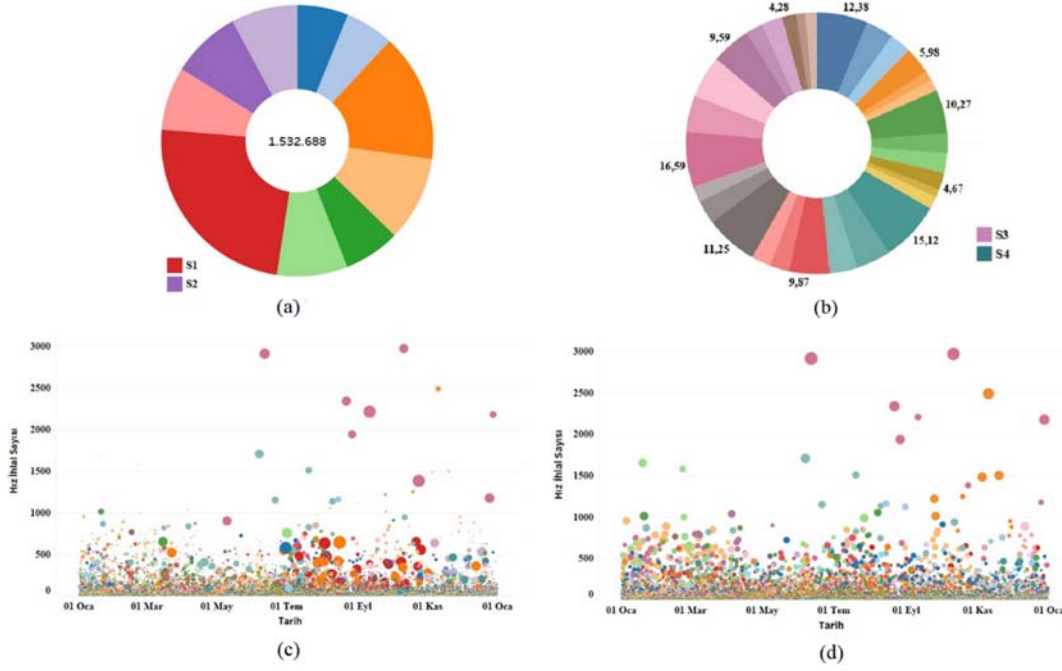
Hız ihlal analizi: Bu bölümde giriş bölümünde de belirtilen Senaryo#1'e ait soruya cevap aranmaktadır. Bir yıllık veri üzerinde yapılan hız ihlallerinin analizleri çeşitli şekillerde görselleştirilmiştir. Şekil 5(a)'da aşırı hız limiti ihlal süreleri(s) en yüksek olan 10 sürücü gösterilmiştir. Şeklin

ortasında verilen sayı ise o sürücüler için yapılan aşırı hız limiti ihlallerinin toplam süresini(s) vermektedir.

Şekil 5(c)'de her bir sürücüye ait günlük aşırı hız limiti ihlal sayıları görülmektedir. Grafikteki dairelerin büyüklüğü gerçekleştirilen ihlal süreleri (s) ile orantılıdır. Ancak üzerinde durulması gereken nokta ihlal sayılarının büyüklüğü değil, sürelerinin fazlalığıdır. Örneğin, S1 ve S2 sürücülerinin hız ihlal sayıları toplamının birbirine yakın olduğu bilinmektedir (S1, 14199 hız ihlali, S2 ise 14992 hız ihlali gerçekleştirmiştir). Buna karşın Şekil 5(a)'dan S1 sürücüsünün yapmış olduğu ihlalin süresinin S2 sürücüsüne göre fazla olduğu (yaklaşık 1,8 kat) anlaşılmaktadır. Bu durumda S1 ve S2 sürücülerinin farklı sürüş karakteristiğine sahip olduğu görülebilir. Şekil 5(b) ise, o yolun hız limitinin yüzdelik olarak ne kadar aşıldığı hakkında bilgi vermektedir. Yüzdelik dilimler üçe ayrılmıştır ve grafikteki renk yoğunlukları ile temsil edilmektedir. Bunlar; %10-%30 arası (en koyu renk), %30-%50 arası, %50 ve üzeri (en açık renk) yapılan hız limiti aşım oranlarıdır. Yüzdelik dilimler, yapılan ihlallerin derecesi hakkında bize önemli bilgiler vermektedir. Bir sürücü hız limitinden %10 ve %30 arası daha fazla bir hız ihlali yaptıysa, o sürücü %50'den fazla hız ihlali yapan sürücülerden daha az tehlikeli bir sürüş gerçekleştirmiştir. Verideki tüm sürücülerin yaptıkları hız ihlal sayıları yüzdelik dilimlere göre; %10-%30 arası 807794 adet, %30-%50 arası 400081 adet ve %50 üzeri 452669 adet şeklinde dağılım göstermektedir. Şekil 5(b)'de %50 ve üzeri aşım oranına sahip ilk 10 sürücü gösterilmektedir. Örneğin, %50 ve üzeri oranda en fazla ihlal gerçekleştiren S3 ve S4 sürücüleridir. Bu iki sürücünün ihlalleri, ilk 10 sürücü arasında gösterilen sürücülerin toplam ihlallerinin %31,71'ini oluşturmaktadır.

Her bir sürücüye ait günlük hız limiti ihlal sayılarının gösterildiği Şekil 5(d)'de dairelerin büyüklüğü %50 ve üzeri oranda gerçekleştirilen hız ihlal sayısı ile orantılıdır. Şekil 5(d) genelinde hız ihlal sayısı arttığında %50 ve üzeri yapılan hız ihlal sayısının da arttığını görülmektedir. Şekil 5(d)'de açıkça görülmektedir ki hız limiti ihlal alarmı üreten belirli sürücüler mevcuttur. Örneğin, günlük 2K hız limiti ihlal sayısını aşan sürücü sayısı ikidir ve bu sürücülerden biri Şekil 5(b)'de en yüksek oranda ihlal gerçekleştiren S3 sürücüsüdür. Şekil 5'te verilen grafikler ile hız ihlalleri açısından sürücü bazı tehlikeli sürüş performansları görselleştirilmiştir.

Hız Analizi: Bu bölümde giriş bölümünde de belirtilen Senaryo#2'ye ait soruya cevap aranmaktadır. Yüksek hız, trafik kazası riskini büyük bir oranda artırmaktadır. Bu nedenle sürücülerin sürüş performansını değerlendirmek açısından araç hızı bilgisi önemli bir yer tutmaktadır. Ancak sürüş performansının değerlendirilmesi için sadece araç hızlarına bakılması doğru olmayabilir. Bu yüzden çeşitli verilerin birlikte alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Örneğin, Şekil 6'da en yüksek hız ihlal sayısına sahip 50 sürücünün maksimum ve ortalama hızları gösterilmiştir. Ortalama hız, çizgi grafiği ile gösterilmiştir ve çizginin kalınlığı hız ihlal sayıları ile doğru orantılıdır. Yani grafikte, bir sürücünün bir yıl boyunca yapmış olduğu en yüksek ve ortalama hız ile birlikte yapmış olduğu hız ihlal sayısı da gösterilmektedir.



Şekil 5. Senaryo#1 dâhilinde sürücülerin sürüş performanslarında farklılıklar (a) aşırı hız limiti ihlal süresi(s), (b) hız limiti aşım yüzdesi, (c) aşırı hız limiti ihlal sayısı, (d) hız limiti aşım ihlal sayısı [8]

(Differences in driving performance of drivers in Scenario#1 (a) Duration of limit speed violations, (b) Percentage of speed limit violations, (c) Number of excessive speed violations, (d) Number of speed limit violations)

Şekil 6'daki grafikte, iki sürücünün hızları yaklaşık olarak aynıdır ve bu durum agresif sürücü davranışını ortaya çıkarmak için yeterli değildir. Örneğin, S5 sürücüsünün ortalama hızı 37,17 iken S6 sürücüsünün ortalama hızı 36,54'tür. Ortalama hızları yaklaşık olmasına rağmen S6 sürücüsünün hız ihlal sayısı S5 sürücüsünün hız ihlal sayısının 5,97 katıdır. Ayrıca, sürücülerin farklı yollarda sürüş yapmış olabileceğini de düşünmek gerekmektedir. Hız ihlal sayısı az olan sürücü şehirlerarası yolda giderken, diğer sürücü şehir içi bir yolda aynı hıza ulaşmış olabilir.

Mevsimlik İhlal Analizi: Bu bölümde Senaryo#3'e ait soruya cevap aranmaktadır. Mevsimlik aşırı hız limiti ihlal süresinin(min) ve %50 ve üzeri oranda yapılan hız ihlal sayısının gösterildiği Şekil 7'deki grafikte sürücüler farklı renklerle gösterilmiştir. Mevsimler ise farklı renk yoğunlukları ile gösterilmektedir. Koyudan açığa doğru renk yoğunlukları sırasıyla ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış mevsimlerini içermektedir.

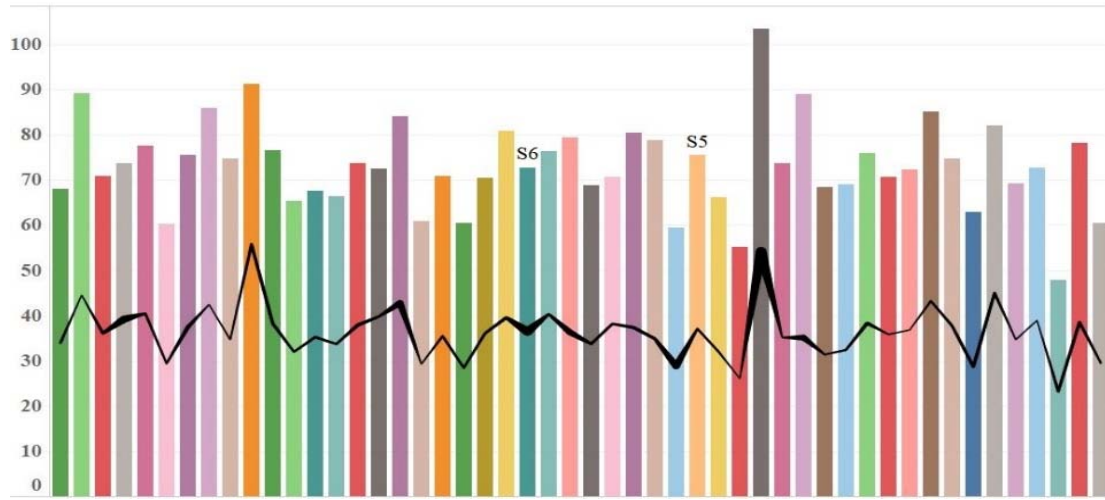
%50 üzeri oranda yapılan hız ihlal sayısının en çok olduğu mevsim 127747 ile yaz mevsimi, en az olan mevsim ise 92380 ile kış mevsimidir. Hız ihlal süresinin en çok olduğu mevsim ise 25297 dakika ile sonbahar mevsimidir. Bu grafikte S7 sürücüsünün ilkbahar ve yaz mevsimlerinde hız limiti aşım sayısı S8 sürücüsüne göre fazla olmasına rağmen sürüş başına düşen aşırı hız limiti ihlal süreleri daha azdır. Sürücülerin kış mevsiminde hız ihlal sayıları yakın olmasına rağmen S8 sürücüsünün sürüş başına düşen hız ihlal süresi diğerinin 2,3 katıdır. Yani, S8 sürücüsünün oluşturduğu tehlike S7 sürücüsünden daha fazladır. Çünkü kışın yollarda

daha fazla tehlike olması ihtimali bulunmaktadır. Bu grafik ile birlikte sürücü karakteristiğinin ortaya konması kolaylaşmaktadır.

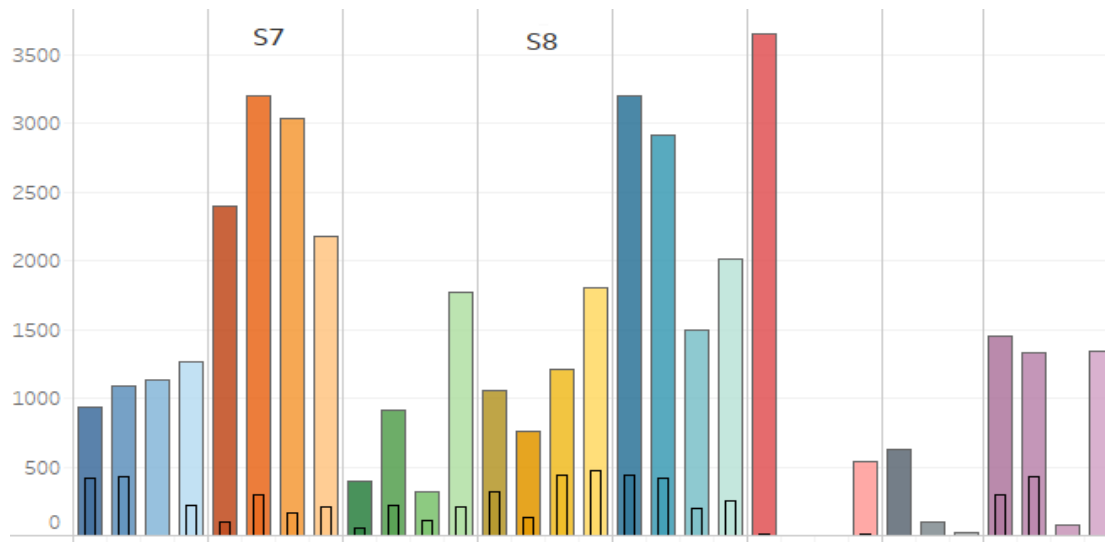
5.3.3. Lokasyon bazlı analizler (Location-based analysis)

Bu bölümde lokasyon bazlı analizler ve sonuçları verilmiştir. Bu kapsamda adres ve noktasal konumlar için hız ihlalleri analiz edilmiştir.

Adres Analizi: Bu bölümde Senaryo#4 ve Senaryo#5'e ait sorulara cevap aranmaktadır. Adres bilgisinin standardizasyonu işlemi sonucunda elde edilen sonuçlar ile çeşitli grafikler çıkarılmıştır. Oluşturulan modeller detay seçimine göre sonuçlar gösterilmekte ve büyüklükler hız ihlal sayısına göre belirlenmektedir. Şekil 8(a)'da hız ihlallerinin hangi illerde daha çok yapıldığı görülmektedir. Yapılan tüm hız ihlallerinin %83'ü Ankara, %7'si İstanbul geri kalanı ise diğer illerde yapılmıştır. Şekil 8(b)'de gösterilen en çok ihlal yapılan 3 ilçe Yenimahalle %23,6, Etimesgut %16,8 ve Sincan %19,8 olarak tespit edilmiştir. Mahalle bazlı hız analizlerine göre ise Saray %4,62, Sincan OSB %3,09 ve Susuz %2,88 oranı ile sıralanmaktadır (Şekil 8(c)). En küçük detayın da tam bir formatı bulunmadığından adres bilgisine yapılan işlemlere benzer olarak bazı işlemler gerçekleştirilmiş ve detay, sokak/cadde/bulvar ve yollar olarak bölünmüştür. Bu detay için yapılan hız ihlal sayılarının gösterildiği Şekil 8(d)'ye bakıldığında Ankara Eskişehir yolunun %6,85, Ankara Ayaş yolunun %5,64 ve Ankara Bolu yolunun %4,94 ile en fazla hız ihlal oranlarına sahip yollar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Senaryo#2 dâhilinde sürücülere göre maksimum, ortalama hız(km/h) ve hız ihlal sayılarındaki değişimler [8]
(Differences in maximum, average speed and speed violations for each driver in Scenario#2)

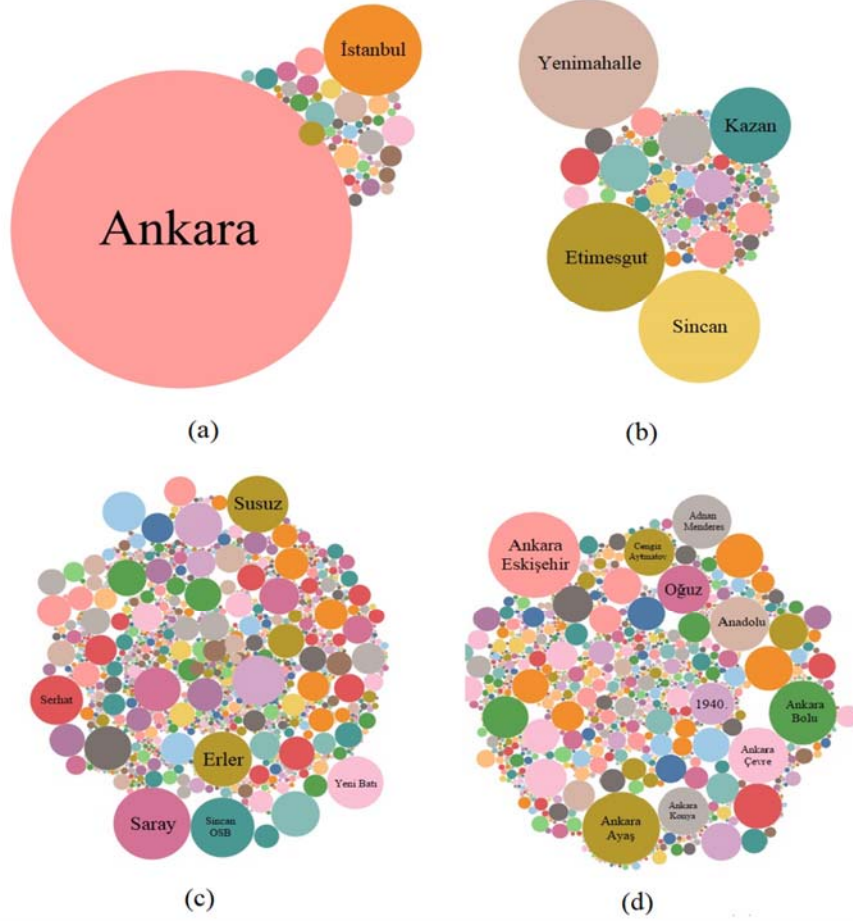


Şekil 7. Senaryo#3 dâhilinde sürücülerin mevsimlik hız ihlal süreleri(min) ve aşım oranları değişimi [8]
(Seasonal changes of speed limit violations in Scenario#3)

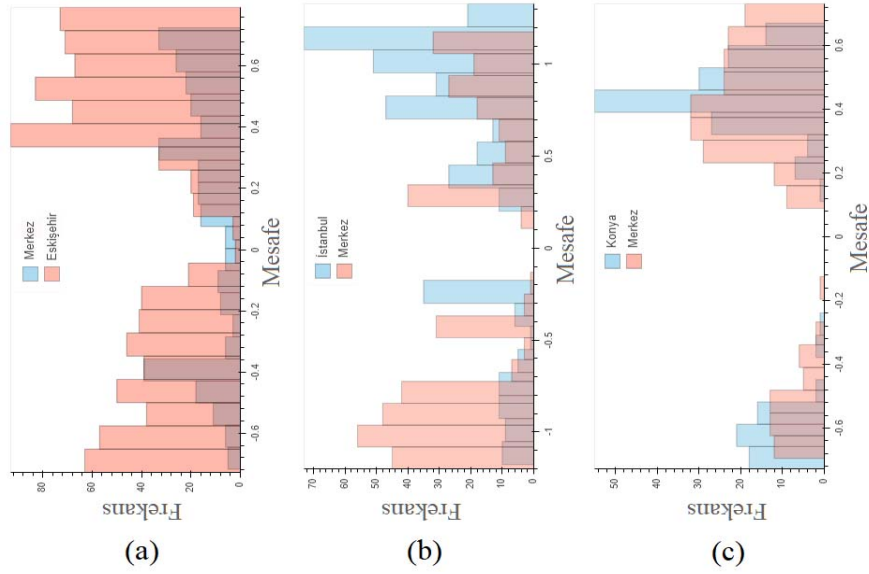
Şehir içi yollarda ise Anadolu Bulvarı, Adnan Menderes Bulvarı, Oğuz Caddesi en fazla ihlalin yapıldığı yollardır ve toplam ihlal sayılarına göre oranları sırasıyla %2,74, %2,67 ve %2,3 olarak tespit edilmiştir. Bu grafik bize hangi yolun kritik olduğu ve sürücülerin daha dikkatli bir sürüş gerçekleştirmesi gerektiği çıkarımını sağlamaktadır. Bu sayede lokasyon bazlı alınabilecek önlemler için bilgi sağlamaktadır.

Konum Analizi: Bu bölümde Senaryo#6'ya ait soruya cevap aranmaktadır. Bu kapsamda Ankara ilinin 3 farklı noktasında (İstanbul yolu, Konya yolu ve Eskişehir yolu) bulunan hız radar bölgelerindeki sürücü davranışları incelenmiş ve sonuçlar Şekil 9(a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Şekil 9(a), (b) ve (c)'de belirtilen analizler, belirtilen radar noktalarındaki hız ihlal değişimlerini radar noktasının 700-1000 metre

öncesi ve sonrasındaki değişimlerini iki yönlü incelemektedir. Böylece radar noktasına varmadan ve radar noktasından sonra (her iki yön dâhil) sürüşlerin hız ihlalleri bakımından nasıl bir davranış sergiledikleri analiz edilmiştir. Belirtilen analizlerde yatay eksen kilometre cinsinden mesafeyi, dikey eksen de mesafe aralığına denk düşen hız ihlal sayısını temsil etmektedir. Şekil 9'da belirtilen mesafedeki negatif değerler radar öncesini pozitif değerler radar sonrası sıfıra yakın değerler ise radar noktasındaki sürüş durumunu belirtmek için kullanılmıştır. Ayrıca belirtilen analizlerdeki renkler ise gerçekleştirilen ihlallerin şehir merkezi veya şehir dışına doğru gerçekleşme durumlarını belirtmektedir. Şekil 9(a)'da Eskişehir yoluna ait radar noktası analiz sonuçlarına göre merkez yönde radar öncesine göre radar sonraki hız ihlal sayılarında %85, Eskişehir yönünde ise %33 artış gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Senaryo#4 ve Senaryo#5 dâhilinde adreslere göre riskli sürüşe olanak sağlayan a) il bazlı, b) ilçe bazlı, c) mahalle bazlı, d) bulvar/cadde/sokak bazlı detaylardaki analizler [8]
(Roads that allow risky driving in Scenario#4 and Scenario#5 a) province based, b) country based, c) district based, d) street based)



Şekil 9. Senaryo#6 dâhilinde spesifik noktalardan biri olan radar noktaları üzerinde analiz sonuçları (a) Eskişehir yolu, (b) İstanbul yolu, (c) Konya yolu radar noktası hız ihlal değişimleri [8]
(Analysis results on radar points, one of the specific points in Scenario#6, (a) Eskişehir road, (b) İstanbul road, (c) Konya road)

Şekil 9(b)'de İstanbul yoluna ait radar noktası analiz sonuçlarına göre merkez yönde radar öncesine göre radar sonraki hız ihlal sayılarında %26 azalma, İstanbul yönünde ise %236 artış gözlemlenmektedir. Şekil 9(c)'de Konya yoluna ait radar noktası analiz sonuçlarına göre merkez yönde radar öncesine göre radar sonraki hız ihlal sayılarında %292 artış, Konya yönünde ise %168 artış gözlemlenmektedir. Genel olarak bakıldığında İstanbul yolu merkez yön hariç bütün radar noktalarında ve yönlerde radar sonrası, öncesine göre katlanarak hız limit aşımı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum ise radar noktalarındaki sürüş davranış farklılıklarının bariz bir şekilde değiştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca radar noktalarının sadece noktasal olarak bir önlem olduğunu öncesine ve sonrasına bakıldığında sürücülerde farklı bir davranışa sebebiyet verdiği ve bu anlamda verimliliğin beklenen düzeyde olmadığı da açıkça gözlemlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu makalede filo yönetim sistemleri kapsamlı olarak incelenmiş, filo yönetimi için filonun lokasyona, hız limitlerine, yapılan ihlallere göre analizler yapılarak büyük veri temelli olarak bir filonun analizi ilk kez yapılmış, belirlenen 6 senaryo kapsamında yeni modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller ile sürücü davranış temelli filo yönetim sistemlerinin başarı ile kullanılabilirliği, filoların analiz edilebileceği ve yeni senaryoların da test edilebileceği görülmüştür. Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde,

1. Senaryo 1 dâhilinde; hız ihlal sayısı ve süreleri bakımından sürücülerin davranışlarının birbirlerinden farklılık gösterdiği,
2. Senaryo 2 dâhilinde; yıl içerisinde gerçekleştirilmiş olan sürüş performanslarının tamamına göre sürücülerin ortalama hızları yakın olsa bile hız ihlal sayıları arasında 6 kata kadar farklılık olabileceği, iyi bir değerlendirme için ortalama hızın bu kapsamda yeterli bir gösterge olamayacağı, iki sürücünün hız ihlal sayıları birbirine yakın olsa bile hız ihlal süreleri arasında yaklaşık 2 kata yakın fark olabileceği,
3. Senaryo 3 dâhilinde; sürücülerin mevsimlere göre davranışlarının farklılaştığı,
4. Senaryo 4 dâhilinde; Ankara ilçeleri arasında en fazla hız limiti ihlali yapılan ve hız limiti aşımına ortam sağlayan ilçelerin Yenimahalle (%23,6), Etimesgut (%16,8) ve Sincan (%19,8) olduğu, mahalle bazlı hız analizlerde ise en fazla Saray (%4,62), Sincan OSB (%3,09) ve Susuz (%2,88) olduğu,
5. Senaryo 5 dâhilinde; şehirlerarası yollarda yapılan hız ihlallerinin Ankara-Eskişehir (%6,85), Ankara-Ayaş (%5,64) ve Ankara-Bolu (%4,94) yollarında en fazla olduğu, şehir içi yollarda ise sürücü üzerinde sinirlilik (agresiflik) yapma potansiyeli en fazla olan yolların ise Anadolu Bulvarı (%2,74), Adnan Menderes Bulvarı (%2,67), Oğuz Caddesi (%2,3) olduğu,

6. Senaryo 6 dâhilinde; yapılan radar noktalarının analizlerine göre her iki yönde de radar sonrası radar öncesine göre aşırı farklılık gösterdiği ve radar öncesi ve sonrası arasındaki hız oranlarında %300'e yakın farklılıklar olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada filo yönetiminin çok geniş bir uygulama sahasının olduğu, her uygulama alanında ise birçok amaca göre filo yönetimlerinin organize edildiği Şekil 1'de kategorik olarak verilmiş ve ilgili literatüre katkı olarak sunulmuştur.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, filo yönetim sistemlerinde büyük veri temelli analizler için içerisine sektörün ilgili paydaşlarını ve araştırma merkezlerini dâhil eden gerekli model önerilerine çok fazla yer verilmediği görülmüştür. Çünkü özellikle nitelikli büyük veri merkezlerinin kurulması ve insan kaynağı ihtiyacı düşünüldüğünde bu ihtiyacın tek bir paydaş tarafından karşılanması mümkün olmamaktadır. Bu kapsamda ulusal/uluslararası literatüre katkı olarak Şekil 3'te verilen model filo yönetimi açısından bir örnek olarak sunulmuştur.

Tablo 1'de 11 ulusal, 12 uluslararası olmak üzere filo yönetim sistem uygulamalarından bahsedilmiş olup tablo detaylı incelendiğinde, birçok uygulamada benzer sürüş parametrelerinin toplandığı ve benzer analizler gerçekleştirildiği görülebilmektedir. Fakat büyük veri temelli filo analizlerinden bahseden çalışma sayısı çok azdır. Bunda ise genellikle, filo yönetiminde sürücülerin davranışları anlık-günlük ya da belirli periyotlarda tespit edip raporlaması önemli rol almaktadır. Bu durum büyük resmi görme durumunda yetersizlik ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışmada Tablo 1'deki uygulamalardan farklı olarak ilk kez filo yönetimin sistemlerden alınan verilerin sadece ilgili sürücü ve/veya sürüşlerin analizinde fayda sağlama, ilgili kullanıcılara çeşitli maliyetlerin (araç bakım, yakıt tüketimi vs.) iyileştirmesi açısından değil bu verilerden farklı analizler yaparak (il, ilçe, mahalle, sokak bazlı ve radar noktalarındaki sürüş davranış farklılıklarının tespiti) çok daha farklı bir bakış açısı sunmaktadır. Bu durum ise filo yönetim sistemlerinden toplanan büyük verinin farklı değerler üretmesi bakımından ilk olma özelliği taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında Bölüm 5.3.1'de verildiği üzere, filo yönetim sistemlerinde veri analizinde kullanılmak üzere ilk defa dağıtık programlama tabanlı algoritma önerilmiştir.

Bu makale çalışmasında kullanılan verilerin boyutu gelecek çalışmalarda artırılabilecek, çeşitliliği zenginleştirilecek, burada elde edilen modeller ise yeni çalışmalara uygulanacaktır. Ayrıca, geliştirilen modeller, 4N Mobile firması bünyesine uygulanacak ve bu sayede geliştirilen modellerin sağladığı üstünlükler daha net olarak görebilecek ve sonuçta daha hızlı, farklı, konforlu ve güvenli çözümlerin bu sayede geliştirilebileceği, ekonomik kazanımlar elde edilebileceği değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu makale çalışmasında kullanılan verilerin anonimleştirilerek kullanılmasına izin veren 4N Mobile/Netdatasoft şirketine yazarlar teşekkür eder. Ayrıca, yazarlar, 06/2015-04 numaralı BAP projesi kapsamında kurulan ve bu çalışmanın gerçekleşmesi için destek veren Gazi BIDISEC'e ve Gazi Üniversitesi BAP Birimine desteklerinden dolayı teşekkür ederler. Bu makale kapsamında kullanılan veriler ve yapılan çalışmalar Gazi Üniversitesi Etik Kurul Komisyonundan 2017-320 sayılı kararı ile izin alınarak yapılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Xu G., Wang J., Huang G. Q., and Chen C.-H., Data-Driven Resilient Fleet Management for Cloud Asset-enabled Urban Flood Control, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 19 (6), 1827-1838, 2018.
2. Gogoulos F. et al., An Intelligent Trucking Operations Management System, *IFAC Proceedings Volumes*, 46 (25), 49-54, 2013.
3. Chauhan B., Jain A., Chaturvedi T., and Saini S., User Interactive and Assistive Fleet Management and Eco-Driving System, *IEEE Region 10 Symposium*, Ahmedabad, India, 41-44, 2015.
4. Zhang G. et al., A integrated vehicle health management framework for aircraft—A preliminary report, *IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, Austin, TX, USA, 1-8, 2015.
5. Yokoyama D. and Toyoda M., A large scale examination of vehicle recorder data to understand relationship between drivers' behaviors and their past driving histories, *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Santa Clara, CA, USA, 2877-2879, 2015.
6. Tilocca P. et al., Managing data and rethinking applications in an innovative mid-sized bus fleet, *Transp. Res. Procedia*, 25, 1899-1919, 2017.
7. Stancel I. N. and Surugiu M. C., Fleet Management System for Truck Platoons - Generating an Optimum Route in Terms of Fuel Consumption, *Procedia Eng.*, 181, 861-867, 2017.
8. Terzi, R., Filo ve toplu taşıma araçları için büyük veri temelli sürücü ve sürüş davranış model önerileri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019.
9. Fabbri G., Calenne F., London M., Boccaletti C., Cardoso A. M., and Mascioli F. F., Development of an on-board unit for the monitoring and management of an electric fleet, *20th International Conference on Electrical Machines*, Marseille, France, 2404-2410, 2012.
10. Johanson M., Belenki S., Jalminger J., Fant M., and Gjertz M., Big automotive data: Leveraging large volumes of data for knowledge-driven product development, *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Washington, DC, USA, 736-741, 2014.
11. Gowda V. C. and Gopalakrishna K., Real time vehicle fleet management and security system, *IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS)*, Trivandrum, India, 417-421, 2015.
12. Bélanger V., Kergosien Y., Ruiz A., and Soriano P., An empirical comparison of relocation strategies in real-time ambulance fleet management, *Comput. Ind. Eng.*, 94, 216-229, 2016.
13. Pérez J., Maldonado S., and López-Ospina H., A fleet management model for the Santiago Fire Department, *Fire Saf. J.*, 82, 1-11, 2016.
14. Ostermann J. and Koetter F., Energy-management-as-a-service: Mobility aware energy management for a shared electric vehicle fleet, *5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*, Rome, Italy, 1-11, 2016.
15. Klauenberg J., Rudolph C., and Zajicek J., Potential Users of Electric Mobility in Commercial Transport – Identification and Recommendations, *Transp. Res. Procedia*, 16, 202-216, 2016.
16. Driving-tests. Agressive Driving Statistics in The Ultimate List of Driving Statistics for 2019. <https://driving-tests.org/driving-statistics/>. Erişim tarihi Mart 6, 2019.
17. İnan T., Baba A.F., Building a hybrid algorithm based decision support system to prevent ship collisions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1213-1230, 2020.
18. Bassoo V., Hurbungs V., Ramnarain-Seetohul V., Fowdur T. P., and Becharry Y., A framework for safer driving in Mauritius, *Future Comput. Inf. J.*, 2 (2), 125-132, 2017.
19. Toledo G. and Shiftan Y., Can feedback from in-vehicle data recorders improve driver behavior and reduce fuel consumption?, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, 194-204, 2016.
20. Wijayasekara D., Manic M., and Gertman D., Data driven fuel efficient driving behavior feedback for fleet vehicles, *8th International Conference on Human System Interaction (HSI)*, Warsaw, Poland, 75-81, 2015.
21. Díaz-Ramirez J. et al., Eco-driving key factors that influence fuel consumption in heavy-truck fleets: A Colombian case, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 56, 258-270, 2017.
22. Ruddy M., Matthews L., Andrey J., and Matto T. D., Eco-driver training within the City of Calgary's municipal fleet: Monitoring the impact, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 24, 44-51, 2013.
23. Aydın M.M., Akgöl K., Günay B., The investigation of different chicanes applications in traffic calming studies using driving simulator, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1793-1805, 2019.
24. Yokoyama D. and Toyoda M., Do Drivers' Behaviors Reflect Their Past Driving Histories? - Large Scale Examination of Vehicle Recorder Data, *IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)*, San Francisco, CA, USA, 361-368, 2016.

25. Entin M. R., Heirichs C. M., Peine A., Warych E. R., Timmerman J., and Cresmore S., Data Analytics for Snow Plow Trucks Fleet, 19th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM), Aalborg, Denmark, 294-295, 2018.
26. Sagioglu S. and Sinanc D., Big data: A review, International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), San Diego, CA, USA, 42-47, 2013.
27. Terzi R., Sagioglu S., and Demirezen M. U., Big Data Perspective for Driver/Driving Behavior, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 12 (2), 20-35, 2020.
28. Orlovska J., Wickman C., and Söderberg R., Big Data Usage Can Be a Solution for User Behavior Evaluation: An Automotive Industry Example, Procedia CIRP 2018 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 72, 117-122, 2018.
29. Luo X. et al., Analysis on spatial-temporal features of taxis' emissions from big data informed travel patterns: a case of Shanghai, China, J. Cleaner Prod., 142, 926-935, 2017.
30. Chen J., Wu Y., Huang H., Wu B., and Hou G., Driving-Data-Driven Platform of Driving Behavior Spectrum for Vehicle Networks, 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS), Exeter, United Kingdom, United Kingdom, 518-525, 2018.
31. Paffumi E., De Gennaro M., and Martini G., European-wide study on big data for supporting road transport policy, Case Studies on Transport Policy, 6 (4), 785-802, 2018.
32. Zhang M., Wo T., Xie T., Lin X., and Liu Y., CarStream: an industrial system of big data processing for internet-of-vehicles, Proceedings of the VLDB Endowment, 10 (12), 1766-1777, 2017.
33. Yin J.-L. and Chen B.-H., An Advanced Driver Risk Measurement System for Usage-Based Insurance on Big Driving Data, IEEE Trans. Intell. Veh., 3 (4), 585-594, 2018.
34. Birek L., Grzywaczewski A., Iqbal R., Doctor F., and Chang V., A novel Big Data analytics and intelligent technique to predict driver's intent, Comput. Ind., 99, 226-240, 2018.
35. Asis Elektronik. Filo Yönetimi. <https://www.asiselektronik.com.tr/anasayfa>. Erişim tarihi Ocak 29, 2019.
36. Scania Türkiye. Ürünler ve Hizmetler. <http://scaniauruculigi.com/StaticPage/sdsFilo>. Erişim tarihi Ocak 29, 2019.
37. InfoMobil. Kullanımı En Kolay Mobil Araç Takip Uygulaması. <http://www.infomobil.com.tr/#services>. Erişim tarihi Ocak 29, 2019.
38. Petrol Ofisi. AutoMatic Plus ile Araç Takibi. <http://www.automaticplus.com.tr/automatic-plus- nedir.html>. Erişim tarihi Ocak 29, 2019.
39. Lenoi. Araç Takip Sistemi. <http://lenoi.com.tr/arac-takip-sistemi/>. Erişim tarihi Ocak 29, 2019.
40. Shell. Shell Filoplatform. <https://www.shell.com.tr/kurumsal-musteriler/shell-fuel-card/shell-film-platform.html?cid=ppc:google:CommercialFleetSearch Turkey:april2017>. Erişim tarihi Ocak 29, 2019.
41. Vodafone. Araç Takip Sistemi Nedir? <https://www.vodafone.com.tr/VodafoneBusiness/Arac-Takip-Kampanyasi.php>. Erişim tarihi Ocak 29, 2019.
42. Arvento. Arvento Araç Takip ve Filo Yönetim Sistemi. http://a19.arvento.com/arvento_help/index.html. Erişim tarihi Ocak 29, 2019.
43. Turkcell. Akıllı Araç (Araç Takip). <https://www.turkcell.com.tr/kurumsal/kurumsal-cozumler/akilli-arac>. Erişim tarihi Ocak 28, 2019.
44. Opet. Otokonum. <https://www.opet.com.tr/Otokonum>. Erişim tarihi Ocak 28, 2019.
45. 4N Araç Takip Sistemi. Araç Takip Sistemi. <http://4n.com.tr/>. Erişim tarihi Ocak 20, 2019.
46. Geotab. myGeotab. <https://www.geotab.com/fleet-management-software/>. Erişim tarihi Ocak 28, 2019.
47. Ctrack. Ctrack Vehicle Tracking Systems. <https://www.ctrack.com/>. Erişim tarihi Ocak 28, 2019.
48. Chevin Fleet Solutions. Fleet Management Software. <https://www.chevinfleet.com/gb/asset-fleet-management-software-system/>. Erişim tarihi Ocak 27, 2019.
49. Gps Trackit. Fleet Management. <https://gpstrackit.com/solutions/fleet-management/>. Erişim tarihi Ocak 26, 2019.
50. Samsara. Samsara for Fleets. <https://www.samsara.com/fleet>. Erişim tarihi Ocak 28, 2019.
51. Silent Passenger. Manage a More Efficient, Productive, and Profitable Fleet. <https://www.silentpassenger.com/>. Erişim tarihi Ocak 27, 2019.
52. Verizon Connect. Fleet management solutions. <https://www.verizonconnect.com/solutions/>. Erişim tarihi Ocak 28, 2019.
53. Fleetio. Fleetio Manage. <https://www.fleetio.com/manage>. Erişim tarihi Ocak 29, 2019.
54. Transpoco. SynX & Fleet Management. <https://www.transpoco.com/fleet-management>. Erişim tarihi Ağustos 12, 2020.
55. USFleetTracking. The GPS Tracking Service for Managing Your Assets. <https://www.usfleettracking.com/fleet-tracking/>. Erişim tarihi Ağustos 12, 2020.
56. Webfleet. Fleet Management. https://www.webfleet.com/en_gb/webfleet/fleet-management/. Erişim tarihi Ağustos 12, 2020.
57. Gurtam. Gurtam. <https://gurtam.com/>. Erişim tarihi Ağustos 12, 2020.
58. Gazi Bidisec. <http://bigdatacenter.gazi.edu.tr/>. Erişim tarihi Ocak 20, 2019.



Design of energy management system algorithms for the improvement of fuel economy of intracity hybrid buses and development of an adaptive hybrid algorithm

Bayramcan İnce¹, Selahattin Çağlar Başlamışlı*¹

Hacettepe University, Department Mechanical Engineering, Ankara, 06800, Turkey

Highlights:

- Generating intracity driving cycle
- Development of an adaptive hybrid energy management system algorithm
- Sizing of hybrid power pack

Keywords:

- Hybrid energy management systems
- Adaptive ECMS (EEMY)
- Hybrid bus

Article Info:

Research Article
Received: 29.09.2019
Accepted: 27.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.626431

Acknowledgement:

The authors are grateful for and acknowledge the support of the Scientific and Technological Research Council of Turkey (Tubitak grant number 115M593)

Correspondence:

Author: S. Çağlar Başlamışlı
e-mail:
scaglarb@hacettepe.edu.tr
phone: +90 538 315 3476

Graphical/Tabular Abstract

Within the scope of this study, original methods were developed to determine driving cycles for local intracity busses and were used in the subsequent hybridization analyses. In this regard, powertrain and vehicle dynamics models of aforementioned vehicles were established in the virtual environment. The algorithms of the energy management systems of the electric/hybrid vehicles were investigated from the literature and analyses were carried out to determine the benefits of advanced optimal control based methods such as the Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) compared to simpler rule based methods.

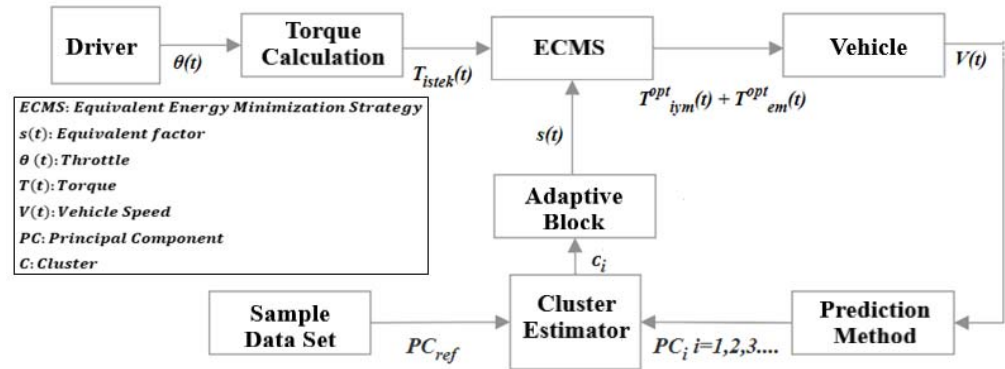


Figure A. Control diagram for adaptive ECMS

Purpose: Within the scope of this study, original methods were developed to determine driving cycles for local intracity busses and were then used in the subsequent hybridization analyses.

Theory and Methods:

Within the scope of the proposed method, the parameters of the bus energy management system were adapted to the traffic density information provided by the vehicle tracking system. In other words, in the virtual environment, the speed time graph for the road segment where the ego vehicle is about to travel is predicted theoretically, using the vehicle tracking system data of vehicles that travelled on the same road segment in the recent past.

Results:

ECMS and Adaptive ECMS controller achieved a fuel consumption improvement of nearly 40 % while the rule based controllers achieved an improvement of 30% only, which clearly indicates the benefit of using driving cycle information when designing hybrid EMS strategies for urban transportation systems.

Conclusion:

In the present study, we presented a systematic method for the determination of a real time applicable optimal energy management strategy for a hybrid road vehicle. Rule based and optimization based control strategies were compared. The comparison was conducted in parallel with a parametrization of the size of the electric motor and battery that allows following the line of best fuel economy. ECMS controllers were shown to provide a huge improvement over rule-based controllers in terms of fuel economy



Şehir içi hibrit otobüslerin yakıt ekonomisi iyileştirilmesi için enerji yönetim sistemi algoritmalarının tasarımı ve uyarlanabilir bir hibrit algoritmanın geliştirilmesi

Bayramcan İnce^{ID}, Selahattin Çağlar Başlamışlı*^{ID}
Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Böl, 06800 Beytepe, Ankara

Ö N E Ç I K A N L A R

- Şehir içi sürüş çevriminin oluşturulması
- Adaptif hibrit enerji yönetim sistemi algoritması geliştirilmesi
- Hibrit Güç Grubunun boyutlandırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 29.09.2019
Kabul: 27.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.626431

Anahtar Kelimeler:

Hibrit enerji yönetim sistemleri,
Uyarlanabilir EEMY (ECMS),
Hibrit otobüs

ÖZET

Çalışma kapsamında, özgün bir yöntemle, araç takip sistemi verileri aracılığıyla şehir içi yerel sürüş çevrimlerinin belirlenmesinde kullanılacak bir yöntem geliştirilmiş ve sonrasında bu yöntem paralel hibrit otobüs analizinde kullanılmıştır. Bu doğrultuda, otobüs taşıtına ait güç dizini ve taşıt dinamiği modelleri sanal ortamda kurulmuştur. Elektrik-hibrit güç grubuna sahip taşıtların enerji yönetim sistemlerinin algoritmaları literatürden araştırılmış ve özellikle Eşdeğer Enerji Minimizasyon Yönteminin (EEMY) daha basit olan kural tabanlı yöntemlere göre ne miktarda fayda sağlayacağı konusunda analizler yürütülmüştür. EEMY'nin gerçek zamanlı sürüş çevrimine göre eşdeğerlilik faktörünün güncellenmesi tabanlı özgün bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem kapsamında, araç takip sistemlerinin kullanımı ile enerji yönetim sistemi parametrelerinin trafik yoğunluk bilgisine göre uyarlanması sağlanmıştır. Başka bir deyişle, sanal ortamda, trafiğe yeni katılan bir aracın, teorik olarak bulunduğu yol segmenti için hız zaman grafiğinin ne şekilde olacağı, yakın geçmişte bu yol segmentinde seyahat etmiş araçların araç takip sistemindeki hız-zaman verileri kullanılarak enerji sarfiyatı en aza indirilmiştir. Dolayısıyla, sürüş çevrimleri kullanılarak elde edilmiş algoritmaların kalibrasyonu araç rotası için yapılmıştır. Bu yöntem kullanılarak şehir içi sürüş çevrimlerinde %40'a varan yakıt tüketimi tasarrufu yapmanın mümkün olduğu tespit edilmiştir.

Design of energy management system algorithms for the improvement of fuel economy of intracity hybrid buses and development of an adaptive hybrid algorithm

H I G H L I G H T S

- Generating intracity driving cycle
- Development of an adaptive hybrid energy management system algorithm
- Sizing of hybrid power pack

Article Info

Research Article
Received: 29.09.2019
Accepted: 27.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.626431

Keywords:

Hybrid energy management systems,
Adaptive ECMS (EEMY),
Hybrid bus

ABSTRACT

Within the scope of this study, original methods were developed to determine driving cycles for local intracity buses and were used in the subsequent hybridization analyses. In this regard, powertrain and vehicle dynamics models of aforementioned vehicles were established in the virtual environment. The algorithms of the energy management systems of the electric/hybrid vehicles have been investigated from the literature and analyses have been carried out to determine the benefits of advanced methods such as the Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) compared to simpler rule based methods. In particular, an original method based on adaptive- ECMS, which consists in scheduling the equivalency factor according to the real-time driving cycle has been developed. Within the scope of the method, the parameters of the energy management system were adapted to the traffic density information provided by the vehicle tracking system. In other words, in the virtual environment, the speed profile for the road segment where the ego vehicle is about to travel is assumed to be known, using the vehicle tracking system speed data of vehicles that travelled on the same road segment in the recent past. Thereby, the calibration of the hybrid energy system algorithms is made possible by using driving cycles calculated for the road segment under interest. By using this method, it was found that fuel consumption savings up to 40% fuel consumption were possible for intracity driving cycles.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, kara taşıtlarının zararlı emisyonlarını azaltmak adına yapılan bilimsel çalışmalar ve siyasi teşebbüsler, petrole bağımlı toplu taşıma sektörünün yerini alacak alternatif teknolojilerin uygulamasına yönelik yenilikçi teknolojilerin tasarlanmasını kapsamaktadır [1]. Konvansiyonel içten yanmalı motoru (İYM) tahrikli araçların ürettiği emisyonları azaltmak amacıyla, ülkeler tarafından ortak oluşturulan standartların uygulanmasının (ör: Euro Standartları) belli bir etkisi olsa da bu girişimler, Kyoto protokolünde öngörülen emisyon hedeflerini karşılamak için henüz yeterli değildir. Bu doğrultuda, karayolu taşımacılığı sektöründe emisyon seviyelerini minimum düzeyde tutabilmek için alternatif teknolojilerin gerekli olduğu bilimsel literatürde yer alan çalışmalarda görülmektedir [2, 3]. Farklı teknolojik çözümler son yıllarda kullanılmakla beraber, petrol bazlı taşımacılık halen bu sektörde önemli bir paya sahiptir ve alternatif teknolojilerin pazar payı halen çok azdır [4]

Hibrit elektrikli otobüs teknolojisi çekiş gücünü tekerleklerle iletmek için, çeşitli yapılandırmalarla hem İYM hem de elektrik motorunu (EM) kullanır. Hibrit otobüsler genelde iki ayrı formda yapılandırılmıştır. Paralel yapılandırmada, motorlar (İYM ve EM) araca çekiş sağlamak için tork kuplörüyle bağlı bulunmaktadır. Çekiş gücü, İYM ve EM'nin beraber veya bağımsız bir şekilde çalışmasıyla üretilebilir. Seri yapılandırmada ise, İYM genellikle jeneratörü tahrik ederek elektrik üretmek için kullanılır. Üretilen elektrik EM'ye aktarılır veya batarya paketinde depolanır [5].

Bilimsel literatürde, elektrikli/hibrit otobüs benzetimleri oluşturularak, emisyon etkilerini ve ekonomik fayda değerlerini modelleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [6]. Bunun yanı sıra, enerji tüketimi modelleri, elektrikli/hibrit otobüsün enerji verimliliğini araştırmakta [7] ve ekonomik fizibilite çalışmaları elektrikli/hibrit otobüs uygulanmasının maliyet-fayda analizine odaklanmaktadır [8]. Topal [9] çalışmasında, Türkiye özelinde elektrikli otobüs uygulamalarının toplu taşıma içerisindeki kullanımını ve eğilimini incelemektedir. Aynı çalışmada, elektrikli otobüs kullanımının dünyadaki güncel durumuna da yer verilmektedir. Elektrikli/hibrit otobüs pazar payında son yıllarda istikrarlı bir büyüme vardır. 2012 yılında, elektrikli otobüsler dünya çapında yeni alımların %6 payını oluşturmuştur. Bu pay, Asya Pasifik, Avrupa ve Amerika (güney ve kuzey) gibi dünyadaki kilit oyuncular arasında dağılmıştır. Elektrikli/hibrit otobüsler için potansiyel pazar payını tahmin etmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır; en önemlisi Frost ve Sullivan'ın çalışmalarında bulunmaktadır [10]. Araştırmacıların tahminlerine göre, elektrikli otobüsler 2020 yılında %26,4 Bileşik Yıllık Büyüme Oranı (CAGR- Compound Annual Growth Rate) ile küresel pazarın %15 payını oluşturacaktır. Bir başka çalışmaya göre [11], 2030 yılında, batarya elektrikli ve yakıt hücreli elektrikli otobüslerin sayısı, Avrupa'da hibrit otobüs

sayısını aşacaktır. Çalışmada, kentsel elektrikli otobüs sistemleri için teknik fizibilite değerlendirmesine ve toplam sahip olma maliyetine dayanan temel performans göstergesi olarak kullanılan bütünsel bir tasarım metodolojisi sunulmaktadır. Çalışmada, operasyonel dönemde, tüm maliyet unsurlarının gelecekteki gelişmeleri göz önünde bulundurulmakta ve teknik sistemlerin maliyetini tahmin etmek için bileşene ait deneyim eğrisi yaklaşımı seçilmektedir. Değerlendirmeler, 2017 ve 2025 yılları için yapılmıştır. Elektrikli otobüs sistemlerinin teknik olarak elverişli olduğunu ve 2025 yılından itibaren ekonomik olarak rekabetçi olabileceğini belirlemiştir. Mevcut teknolojiler ve işletme gereklilikleri göz önüne alındığında kısa şarj süreli tipinin yıllar içinde en uygun çözüm olacağı belirlenmiştir.

Hibrit araç enerji yönetim sistemlerinin tasarımında sürüş çevrimi bilgisi kullanılmaktadır. Farklı hibridizasyon faktörleri ve sürüş çevrimleri parametrelerinin yakıt ekonomisi üzerindeki etkisi üzerine bilimsel çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda, Temel Bileşen Analizi gibi yöntemler sürüş çevrimi verilerini değerlendirerek hibrit kontrol stratejisine önemli girdiler sunmaktadır [12, 13].

Hibrit araç uygulamalarında, yakıt ekonomisi veya emisyon değerlerinin azaltılmasına yönelik çeşitli enerji yönetimi stratejileri bulunmaktadır. Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritması, Sınırlanmış Termostat algoritması ve Uyarlanabilir/ Uyarlanabilir olmayan Eşdeğer Minimizasyon Yöntemi, hibrit tahrik sistemlerin kontrol yöntemleri arasında yer almaktadır. Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritmasında yüksek doluluk oranındaki batarya, sürücünün veya yolun istediği yüksek güç gereksinimlerinde araç performansını artırıcı olarak devreye girmektedir. Bu strateji sürekli dur- kalk yapan sürüş şekline oldukça uygundur. Sınırlanmış Termostat algoritması yönteminde motor gücünü belirlemek için sadece batarya doluluk oranı kullanılmaktadır. Algoritma son derece basit olduğundan ilk hibrit araç kontrol tasarımlarında sıklıkla kullanılmıştır. Buna rağmen, bahsi geçen algoritmanın birkaç olumsuz yönü vardır. Birinci olarak, içten yanmalı motorun açılıp kapanması, araç sürüşünden tamamen bağımsız koşullarda gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple araç içi oluşacak gürültü konforu etkilenmektedir. İkinci olarak, motorun açılma/kapanma sıklığının emisyonlar üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır [14] Eşdeğer Enerji Minimizasyon Yönteminde (EEMY), anlık optimizasyon yöntemi kullanılarak, minimum yakıt tüketiminin elde edilmesi için İYM ve bataryadan talep edilen toplam gücün iki enerji kaynağı arasında hangi oranlarla paylaşılması gerektiği çevrimiçi olarak belirlenmektedir. Batarya enerji tüketimi eşdeğer İYM yakıt tüketimine çevrilip, eşdeğer toplam yakıt tüketimi hesaplanmakta ve her bir zaman diliminde hibrit aracın eşdeğer minimum yakıt tüketiminin bulunmasını sağlayan enerji paylaşımı tespit edilmektedir [14, 15, 16]. EEMY uygulamalarında ana parametre eşdeğerlik faktörüdür. Birçok çalışmada bu parametrenin anlık tahmini için çeşitli yöntemler sunulmuştur. Yöntemlerden biri, anlık araç hızından tahmin edilen yol yükünün mevcut sürüş

Tablo 1. Araç Takip Sistemi Veri Örneği (Data of Vehicle Tracking System)

Kayıt No	Cihaz No	Plaka	Tarih/Saat	Hız km/s	Mesafe km	Enlem	Boylam	Yükseklik metre
1	191753	06 BS 3483	19.9.2016 00:00:05	35,68		39,926544	32,854778	863
2	191753	06 BS 3483	19.9.2016 00:00:13	43,37	0,07	39,92598	32,854149	864
3	191753	06 BS 3483	19.9.2016 00:00:17	46,13	0,06	39,925713	32,85368	866

çevrimleri (NEDC, ECE vb.) ile karşılaştırılarak o sürüş çevrimlerine ait bir eşdeğerlik faktörü seçilmesine dayanmaktadır [17]. EEMY'nin daha da verimli hale getirilmesi için global optimuma yaklaşan öngörülü kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Kural vd. [18] çalışmalarında, rejeneratif geri kazanım için yol eğiminin bilinmesinin öneminden bahsetmektedir. Dijital harita ve GPS ile mevcut rota üzerinde olası yokuş aşağı yol profilleri öngörülebilmektedir. Bu kapsamda, mevcut yol eğimlerinin bilinmesiyle en uygun rejeneratif enerji kazanım stratejileri belirlenebilmektedir. Bunların belirlenmesinde batarya doluluk oranı da dikkate alınmalıdır. Belirlenen batarya doluluk alt ve üst sınırlarına göre geri kazanım noktaları etkilenmektedir. Bu yöntem ile yol eğiminden kaynaklı rejeneratif enerji kazanımı maksimize edilmektedir.

Mevcut çalışmanın amacı, paralel hibrit mimariye sahip otobüslerin, şehir içi taşımacılıkta uzun vadede ekonomik ve çevreye duyarlı bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda Bölüm 2'de, güzergâhları belirli taşıtlardan bir ay boyunca Ankara şehrinde bir hat üzerinden veri toplanarak, Temel Bileşenler Analizi yöntemi ile sürüş çevrimi oluşturulmuş ve makine öğrenmesiyle sınıflandırılmıştır. Bu noktada, MATLAB® programının 'Classification Learner' uygulamasından yararlanılmış ve uygulama içerisinde 'Fine KNN' kümeleme yöntemiyle sınıflandırılmıştır. Bölüm 3 ve 4 ile hibrit enerji yönetim algoritma yaklaşımları ve 220 nolu hat üzerinde hibridizasyon benzetimleri anlatılmaktadır. Aynı zamanda Bölüm 4 ve Bölüm 5 ile kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı enerji yönetim algoritmaları tasarlanmış ve performansları otobüs modeli üzerinde sınanmıştır. Bölüm 7'de çalışma içerisinde oluşan sonuçların genel bir değerlendirmesine yer verilmiştir. Bu kapsamda, sürüş çevrimlerine göre geliştirilen 'Sınırlanmış Termostat Kontrol', 'Maksimum Batarya Doluluk Kontrol' algoritmaları ve Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan Eşdeğer Enerji Minimizasyon yöntemleri kullanılarak hibrit otobüsler için yakıt tasarrufu ve emisyon değerlerinin düşmesini sağlayacak detaylı bir çalışma yapılmıştır.

2. OTOBÜS İÇİN ŞEHİR İÇİ SÜRÜŞ ÇEVİRİMİNİN OLUŞTURULMASI VE SINIFLANDIRILMASI (GENERATION AND CLASSIFICATION OF URBAN BUS DRIVING CYCLE)

2.1. Veri Toplama (Data Acquisition)

Sürüş çevrimi tespiti için veri toplama işlemi bir araç takip firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Ankara ili sınırları içerisinde, farklı hatlar üzerinde hizmet veren belediye

otobüslerine araç takip cihazı takılarak bir ay boyunca veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Temin edilen veriler Tablo 1' de gösterilen formatta kaydedilmiştir.

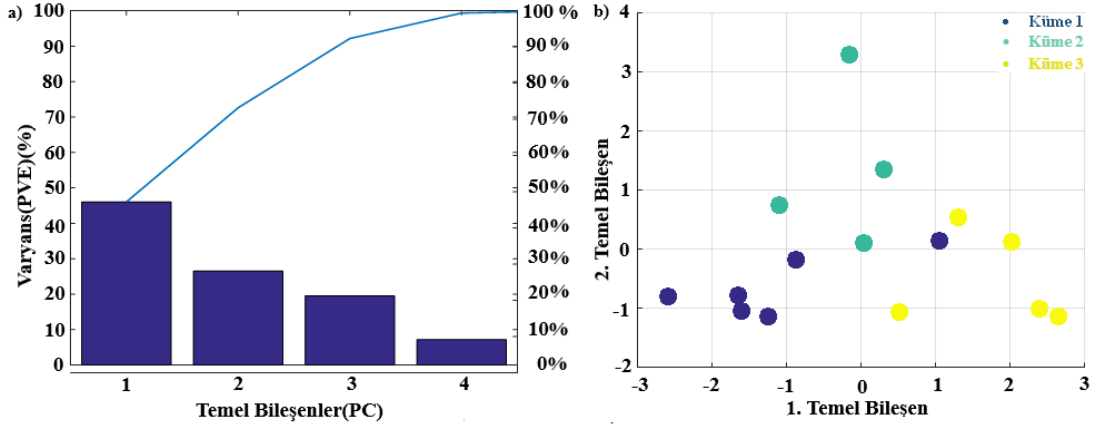
Tablo 1 ile gösterildiği gibi veri toplama cihazı sayesinde, takip edilen aracın belirli bir tarih ve saatteki konum bilgilerine ve hız bilgisine ulaşılabilmektedir. Aynı hat üzerinde farklı günlerde ve saatlerde birçok kez veri toplanmıştır. Buna ek olarak enlem ve boylam bilgilerinden otobüs hatlarına ait durakların yerleri işletme müdürlüklerinden doğrulanmıştır. Ankara şehrinde veri toplanan hatlardan birine ait rota Şekil 1 ile gösterilmektedir. Veri toplanan hatlardan biri olan 220 numaralı hat üzerinde toplam 141 adet durak vardır ve gün içerisinde 59 sefer düzenlenmektedir. Rotada gidiş ve geliş yönünde toplam kat edilen mesafe 61,38 km ve süresi 180 dakikadır. Hat üzerinde iki durak arası en kısa mesafe 107 m, en uzun mesafe ise 2427 metredir. Seferler 6:30-22:30 arası gerçekleşmekte ve bekleme süresi bulunmamaktadır. Sürüş çevrimi, 220 numaralı hat üzerinden toplanan veriler üzerinden oluşturulacaktır.



Şekil 1. 220 numaralı hatta ait rota bilgisi (Route information for line 220)

2.2. Sürüş Çevriminin Oluşturulması (Generation of Driving Cycles)

Sürüş çevrimleri oluşturulurken kümeleme yöntemlerine başvurulmuştur. Kümeleme kavramı, bir veri kümesindeki alt grupları bulmak için çeşitli teknikleri kapsamaktadır. Bir veri setinin gözlemlerinde kümeleme yapıldığında bu veri seti ayrı gruplara ayrılmış olur. Her gruptaki gözlemler birbirine oldukça benzerken, farklı gruplardaki gözlemler birbirinden oldukça farklıdır. Bu benzerlik ve farklılığı ifade etmek için gerekli kriterlerin tanımlanması gerekmektedir. Bu da genellikle, incelenen verilere dayalı olarak yapılması gereken alana özel bir işlemdir. Sürüş çevrimleri özelinde, bu parametreler, trafik koşullarına göre değişen maksimum hızlanma, yavaşlama, sabit hız süresi ve maksimum ve ortalama araç hızı gibi değerlerdir. Bu parametrelerin maksimum, minimum, yüzdesel ve ortalama değerleri



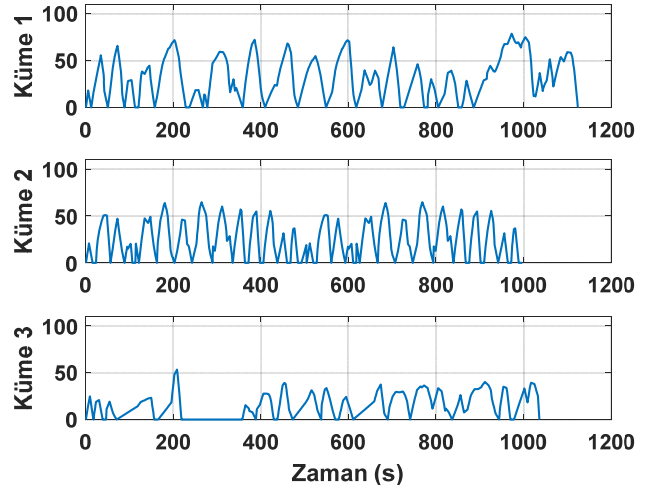
Şekil 2. a) Temel bileşenlere göre varyans değişimi b) Gözlemlerin k-means kümeleme işlemi sonucunda temel bileşenlere göre dağılımı (a) Change of variance according to principal components b) Distribution of observations according to principal components as a result of k-means clustering process)

standart sapma oranlarına göre sürüş çevrimi için alt gruplarda toplanmakta ve birbirine benzeyen grupları eşleştirmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada araç sürüş verilerine göre beş farklı sürüş parametresi seçilmiştir. 1- Maksimum hız, 2- Ortalama Hız 3- Maksimum Hızlanma İvmesi 4- Maksimum Yavaşlama İvmesi 5- Rölanti süresi.

2.2.1. Temel Bileşen Analizinin (Principal Component Analysis-PCA) Uygulanması ve k-means kümeleme işlemleri (Implementation of Principal Component Analysis and k-means clustering)

Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis-PCA), çok değişkenli bir veriseti içerisindeki bilgiyi daha az değişkenle ve minimum bilgi kaybıyla açıklamanın bir matematiksel tekniğidir. Başka bir tanımla PCA, çok sayıda birbiri ile ilişkili değişken içeren veri setinin boyutunu, veri seti içerisindeki veriyi koruyarak daha küçük boyuta indirgenmesini sağlayan bir dönüşüm tekniğidir. Dönüşüm sonrasında elde edilen değişkenler ilk değişkenlerin temel bileşenleri olarak adlandırılır. İlk temel bileşenler varyans değeri en büyük olan seçilir ve diğer temel bileşenler varyans değerleri azalacak şekilde sıralanır. Bu çalışmada araç takip sistemi verileri üzerinden elde edilen sürüş veri setinde PCA analizi yapılmıştır ve dört adet temel bileşenle sürüş çevrimi içindeki bilginin temsil edilebileceği görülmüştür (Şekil 2a). Temel Bileşenler tespit edildikten sonra elde edilen rota verileri k-means kümeleme işlemiyle üç ayrı kümeye bölünmüştür. Bu kümeler, pratik anlamda, trafik yoğunluğu ile ilintilidir. Şekil 2b’de seçilen farklı rota verilerinin hangi kümede yer aldıkları temel bileşenlerin ikili gösterimi üzerinden gösterilmiştir. Kümeleme işlemi sonucunda farklı kümelere farklı sürüş sürelerine sahip rota verileri elde edilmiştir. Hibrit enerji yönetim algoritmalarından Uyarlanabilir EEMY’nin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için süre olarak standartlaştırılmış sürüş çevrimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bilimsel literatürle uyumlu olarak, otobüs sürüş çevrimi analizi için, makalede, 3 ayrı 1000 sn lik sürüş çevrimi oluşturulmuştur. Şehir içi sürüş çevrimleri olan Küme 1, Küme 2 ve Küme 3, süre kısaltma işlemi öncesinde, 180 dakikalık çevrimlerden

oluşmaktadır. Bu sebeple Sürüş çevrimleri içerisinde o kümeyi temsil edecek şekilde 1000 sn’lik numuneler seçilmiştir. Seçilen 1000 sn’lik sürüş çevrimleri Şekil 3 ile gösterilmekte ve ait olduğu kümenin trafik karakteristiğini (akıcı, yoğun akıcı ve yoğun) yansıtmaktadır. Bu bağlamda, şehir içi otobüslere ait sürüş çevrimlerinin standartlaştırılmış olması, mevcut trafik yoğunluk bilgisinin hesaplanmasında kullanılmasını ve enerji yönetim sistemi parametrelerinin yoğunluk bilgisine göre uyarlanmasını sağlamıştır.



Şekil 3. Sınıflandırılmış sürüş çevrimleri (Classified driving cycles)

2.3. Sürüş Çevrimlerinin Çevrimiçi Sınıflandırılması (Online Classification of Driving Cycles)

MATLAB programının ‘Classification Learner’ uygulaması, verileri sınıflandırmak için modelleri eğitmektedir. Bu uygulama içerisindeki çeşitli sınıflandırıcı teknikler (karar ağacı, farklılık analizi, en yakın komşu vb.) kullanılarak gözetimli öğrenme işlemi yapılabilmektedir. Bu bağlamda, ‘Classification Learner’ uygulaması içerisinde ‘Fine KNN’ kümeleme yöntemi kullanılarak ‘Temel

Bileşen' özelliklerine göre 220 numaralı hat için oluşturulmuş modele giren yeni bir verinin hangi alt kümeye ait olduğu ile ilgili öngörü işlemi yapılmıştır. Yukarıda anlatılan modelin eğitilme amacı, çevrimiçi çalışmalarda öngörülerde kullanmaktır. Örnek bir sürüş setinden, belli bölgeler alınarak süresi 150 ila 200 sn arası değişen üç farklı hız profili elde edilmiştir (bkz. Şekil 4). Bu hız profilleri, sürüş çevrimlerini oluşturan alt sürüş çevrimleri olarak tanımlanmıştır ve özellik değerleri saptanmıştır. Alt sürüş çevrimleri, çevrimiçi çalışmalarda girdi olarak kullanılacağından dolayı hızlanma, sabit hız, boşta seyir ve yavaşlama modlarını kapsayacak en kısa süreli hız zaman profillerinden oluşturulmuştur. Oluşan özellik değerlerine göre ana bileşenler hesaplanmıştır. Eğitilen modelin hesaplamalarına göre, gözlemin hangi alt kümeye yerleştiği Tablo 2 ile gösterilmektedir. Bu yöntem ile Uyarlanabilir EEMY benzetiminde hız profili 150 sn'lik aralıklarla değerlendirmeye alınarak hangi kümeye ait olduğu %77,4 başarı oranıyla ön görülmüştür. Şüphesiz, 150 sn yerine daha uzun bir süre seçilmiş olsa, uyumdaki başarımlar daha yüksek olacaktır. Ancak, hem araç bilgisayarının işlem kapasitesi göz önünde bulundurulmalı, hem de sürenin uzamasıyla beraber, gerçek bir uygulamada, sürüş tipinin değişme ihtimali bulunmaktadır. Dolayısıyla, önerilen algoritmayı, 150 sn gibi kısa bir süre içerisinde güncelleyip sürüş tipini tespit etme gibi bir zorluluğumuz bulunmaktadır. Bu da uyumun mevcut seviyede olmasına neden olmaktadır. Böylelikle, yaşanan son hız profilinin hangi trafik koşulunda olduğu tahmin edilerek hibrit enerji yönetim algoritması parametreleri bu kapsamda güncellenmiştir (Bkz. Bölüm 3.4).

3. ŞEHİR İÇİ OTOBÜS SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİ İÇİN UYGULANAN HİBRİT ENERJİ YÖNETİM ALGORİTMALARI (HYBRID ENERGY MANAGEMENT ALGORITHMS IMPLEMENTED FOR INTRACITY CITY BUS DRIVING CYCLES)

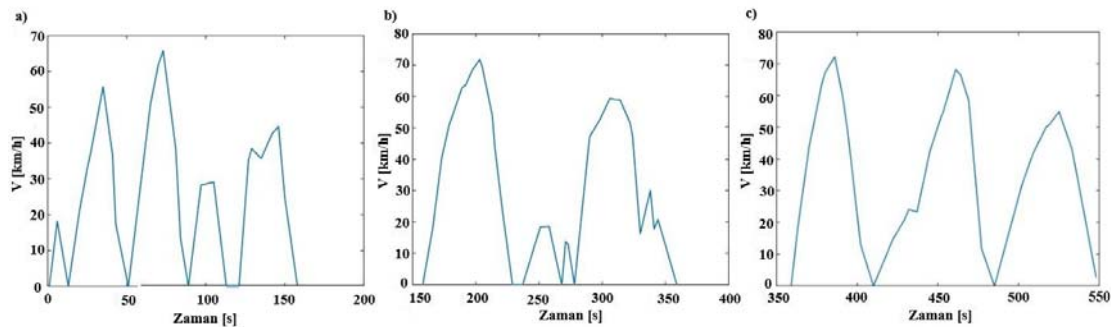
Hibrit araç benzetiminde kural tabanlı enerji yönetim algoritması olarak Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya Doluluk Oranı stratejisi, optimizasyon tabanlı enerji yönetim algoritması olarak ise Uyarlanabilir/ Uyarlanabilir

olmayan Eşdeğer Enerji Minimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

3.1. Maksimum Batarya Doluluk Oranı Kontrol Stratejisi (Maximum SOC of Battery Control Strategy)

Maksimum batarya doluluk kontrol stratejisinde ana hedef güç talebinin karşılanmasıyla beraber batarya doluluğunun olabildiğince yüksek seviyede olmasını sağlamaktır. Maksimum Batarya Doluluk stratejisinde, yalnız elektrik motoru itiş modu, hibrit itiş modu, maksimum güç kaynağı şarj modu, yalnız içten yanmalı motor itiş modu, yalnız rejeneratif fren modu ve hibrit fren modu olmak üzere altı farklı sürüş modu bulunmaktadır. Güç talebine göre hangi işletim modunun devreye gireceği Şekil 5 ile gösterilmektedir. Şekil 5a ile gösterilen örnek çalışma bölgeleri ve araç hızına göre algoritma davranışı açıklanmak istenirse:

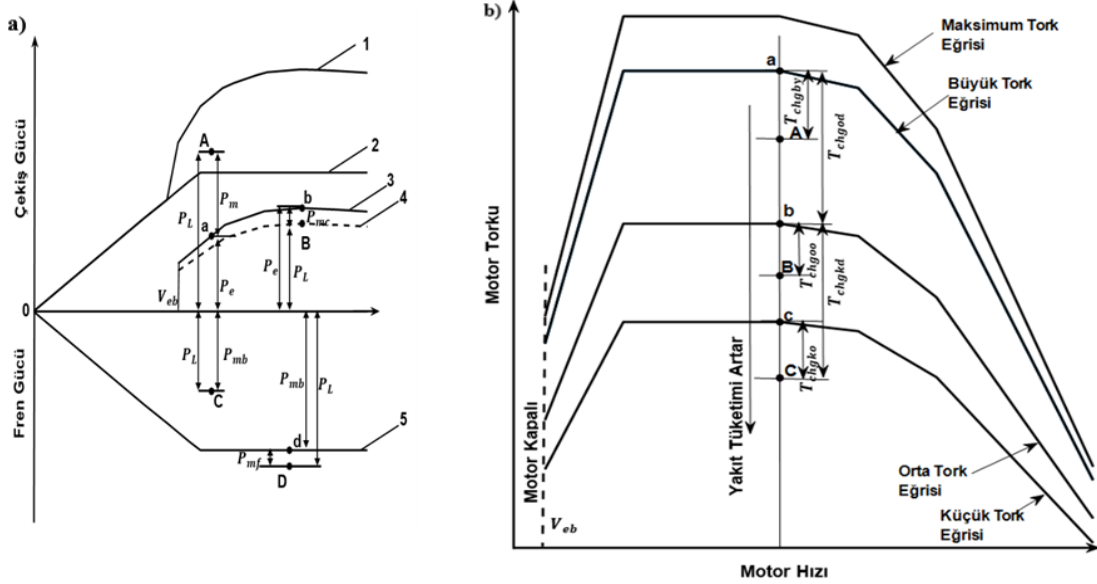
Eğer aracın hızı önceden belirlenen V_{eb} (kalkış esnasında seçilen düşük bir hız değeri) hızından düşüğe ya da içten yanmalı motorun verimsiz ya da yüksek emisyonlu bölgede çalışmasını gerektiriyorsa aracın hareketi için gerekli itiş kuvveti elektrik motoru tarafından sağlanır (*Yalnız Elektrik Motoru İtiş Modu*). A noktasına ait bölgeyi kapsayan bir güç talebi ihtiyaç duyulduğunda içten yanmalı motor ve elektrik motor birlikte çalışmaktadır (*Hibrit İtiş Modu*). Eğer güç talebi B noktası bölgesine ait bir yerde ve batarya doluluk oranı istenilen seviyeden düşük ise elektrik motoru jeneratör olarak çalışarak bataryayı şarj etmektedir (*Batarya Şarj Modu*). İçten yanmalı motorun en uygun çalışma çizgisi ile elde edilecek güçten daha az bir tahrik gerektiği ve aynı zamanda batarya da dolduğunda elektrik sistemi durdurularak tahrik yalnızca içten yanmalı motora bırakılır (*Yalnız İçten Yanmalı Motor İtiş Modu*). C noktası bölgesinde talep edilen güç elektrik motor tarafından rejeneratif fren gücü kullanılarak yapılmaktadır (*Rejeneratif Fren Modu*). İhtiyaç duyulan fren gücü elektrik motorunun sağlayabileceği maksimum rejeneratif fren gücünden fazlaysa (D noktası) mekanik frene de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda elektrik motoru maksimum fren gücünü sağlayacak şekilde kontrol edilmekte ve kalan fren gücü ise mekanik fren aracılığıyla sağlanmaktadır.



Şekil 4. a) Alt sürüş çevrimi 1 b) Alt sürüş çevrimi 2 c) Alt sürüş çevrimi 3
(a) Sub driving cycle 1 b) Sub driving cycle 2 c) Sub driving cycle 3

Tablo 2. Ön görülen kümeler ve temel bileşen değerleri (Predicted clusters and principal component analysis)

	PC1	PC2	PC3	PC4	Ön görülen kümeler
Alt Sürüş Çevrimi 1	-0,0105	-0,8869	-0,0986	0,1399	Küme 1
Alt Sürüş Çevrimi 2	3,2727	-1,4175	0,3419	0,6178	Küme 3
Alt Sürüş Çevrimi 3	-0,6323	3,0240	1,1316	-0,3839	Küme 2



Şekil 5. Maksimum batarya doluluk ve sınırlanmış termostat kontrol stratejisinde güç talebine göre çeşitli işletim modları a) Maksimum batarya doluluk oranı kontrol stratejisi b) Sınırlanmış termostat kontrol stratejisi, 1: Hibrit mod'da Maksimum güç, 2: Yalnız elektrikli çekiş maksimum güç, 3: Optimum çalışma çizelgesinde İYM gücü, 4: Kısmi İYM gücü, 5: Elektrikli motorun maksimum rejeneratif gücü, P_e : İYM gücü, P_m : Motor çekiş gücü, P_{mb} : Motor fren gücü, P_{mf} : Mekanik fren gücü, P_{mc} : PPS şarj gücü, P_L : Yük gücü, çekiş ya da fren, V_{eb} : İYM minimum motor hızına göre elde edilen taşıt hızı [17]

(Various operating modes according to power demand in Max. SOC of battery and Constrained thermostat control strategy) a) Demonstration of Max. SOC of Battery control strategy b) Demonstration of constrained thermostat control strategy: ICE operation areas, 1: Maximum power with hybrid mode, 2: Maximum power with electric alone traction, 3: Engine power on its optimum operating line, 4: Engine power with partial load, 5: Maximum generative power of electric motor, P_L : Load power, traction or braking, P_e : Engine power, P_m : Motor traction power, P_{mb} : Motor braking power, P_{mc} : PPS charging power, P_{mf} : Mechanical braking power, V_{eb} : Vehicle speed corresponding to the engine minimum rpm)

3.2. Sınırlanmış Termostat Kontrol Stratejisi (Constrained Thermostat Control Strategy)

Sınırlanmış termostat kontrol stratejisi, maksimum batarya doluluğu stratejisine benzer şekilde çalışmaktadır. Ancak düşük, orta ve büyük tork alanlarında komuta edilen çekiş tork değerleri, içten yanmalı motorun düşük, orta ve büyük tork alanlarına göre oluşturulmuş optimal verimlilik çizgisinin altında kalıyorsa bataryanın doluluk durumuna göre içten yanmalı motor, özel olarak belirlenen gaz kelebeği pozisyonlarına göre çalışmaktadır. Güç talebine göre hangi işletim modunun devreye gireceği Şekil 5b ve Tablo 3 ile anlatılmaktadır.

Tablo 3 ile aktarılan tork ve batarya doluluk oranlarına göre işletim stratejilerine bakıldığında genel yaklaşım, sürücünün tork isteğini gerçekleştirirken batarya doluluk oranının durumuna göre mevcut tork isteğinin bir üst alanına ait değeri vermesidir. Örneğin, Şekil 5b ile gösterilen C noktası

istek torku küçük alanda yer almaktadır. Bu tork isteğinde, içten yanmalı motor torku, eğer batarya doluluk oranı düşük seviyede ise orta alan optimal verimlilik çizgisi üzerinde yer alan b noktası tork değerini almaktadır. Ancak batarya doluluk oranı orta seviyede ise küçük alan optimal verimlilik çizgisinde yer alan c noktası tork değerini almaktadır. Aynı zamanda, küçük alan bölgesi tork isteği için mevcut batarya doluluk oranı istenilen seviyenin bir üst seviyesinde yer aldığı içten yanmalı tork değeri sıfır olarak tanımlanmaktadır. Algoritmada bu durum sadece düşük tork alanı için geçerli olmaktadır.

3.3. Eşdeğer Enerji Minimizasyon Yöntemi (EEMY) (Equivalent Consumption Minimization Strategy -ECMS)

EEMY algoritmasının mantığı, minimum yakıt tüketiminin anlık olarak sağlanması halinde tüm yolculuk boyunca minimum yakıt tüketileceği varsayımına dayanmaktadır [14]. Bu durum Eş.1 ile ifade edilmektedir.

Tablo 3. Farklı komut çekiş torku ve batarya doluluğuna göre motor tork kontrol stratejisi şeması [19]
(Engine torque control strategy for different commanded traction torque and battery SOC)

		Batarya doluluk durumu		
		Düşük	Orta	Yüksek
Tork İsteği, T_L	Küçük Alan (C noktası)	$T_e = T_b$ $T_{chgkd} = T_b - T_c$	$T_e = T_c$ $T_{chgko} = T_c - T_c$	$T_e = 0$ $T_{chgky} = 0$
	Orta Alan (B noktası)	$T_e = T_a$ $T_{chgod} = T_a - T_B$	$T_e = T_b$ $T_{chgoo} = T_b - T_B$	$T_e = T_B$ $T_{chgoy} = 0$
	Yüksek Alan (A noktası)	$T_e = T_a$ $T_{chgyd} = T_a - T_A$	$T_e = T_A$ $T_{chgyo} = 0$	$T_e = T_A$ $T_{chgyy} = 0$

T_A, T_B, T_C --- A, B ve C noktalarına göre, küçük, orta ve büyük tork alanlarında komuta edilen çekiş tork değerleri
 T_a, T_b, T_c --- a, b ve c noktalarına göre, İYM kontrol edilerek üretilen tork değerleri
 T_{chgxx} --- Batarya şarj torku, xx = kd küçük tork, düşük batarya doluluk durumu, ko: küçük tork, orta batarya doluluk oranı, ky: küçük tork, yüksek batarya doluluk durumu, od: orta tork, düşük batarya doluluk durumu, oo: orta tork, orta batarya doluluk durumu, oy: orta tork, yüksek batarya doluluk durumu, yd: yüksek tork, düşük batarya doluluk durumu, yo: yüksek tork, orta batarya doluluk durumu, yy: yüksek tork, yüksek batarya doluluk durumu, T_e --- İYM torku

$$\int \text{Min}[\dot{m}_{iym}(t)]dt \approx \text{Min} \int \dot{m}_{iym}(t)dt \quad (1)$$

Her optimal kontrol yönteminde olduğu gibi, bu yöntemde de bir anlık maliyet fonksiyonu bulunmaktadır ve aşağıda belirtildiği gibi bu maliyet fonksiyonu EEMY yönteminde eşdeğer yakıt tüketimine dayanmaktadır. Maliyet fonksiyonu Eş. 2 ile ifade edilmektedir.

$$J_t = \dot{m}_{iym}(P_{iym}) + \Omega(SOC)\dot{m}_{elek,eqv}(P_{em}) \quad (2)$$

Güç üretimi sırasında, içten yanmalı motor devrinin tanımlanmış çalışma aralığında olması, içten yanmalı motor torkunun pozitif ve maksimum tork değerinden küçük olması, elektrik motor devrinin tanımlanmış çalışma aralığında yer alması, elektrik motor torkunun tanımlanmış çalışma aralığında olması (minimum kısıt elektrikli motor rejeneratif frenleme durumunda negatif olabilmektedir) optimizasyon problemi için Eş. 3 ile Eş. 6 arasındaki tanımlanmış kısıtları oluşturmaktadır:

$$w_{iym,min} \leq w_{iym} \leq w_{iym,maks} \quad (3)$$

$$0 \leq T_{iym}(t) \leq T_{iym,maks}(t) \quad (4)$$

$$w_{em,min} \leq w_{em} \leq w_{em,maks} \quad (5)$$

$$0 \leq T_{em}(t) \leq T_{em,maks}(t) \quad (6)$$

Hibrit güç paylaşımı, kontrol parametresi $u(t)$ değeri tarafından kontrol edilmektedir. Ayrıca, hibrit sistemin çalışması sırasında, beklenen Batarya Doluluk Oranı (SOC), seçilen üst ve alt sınırları aşmamalıdır. Bu sınırlar Eş.7 ve Eş. 8 ile ifade edilmektedir.

$$u(t) = \frac{P_{em}(t)}{P_{iym}(t)+P_{em}(t)} \quad (7)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{maks} \quad (8)$$

Yolun güç isteği, maliyet fonksiyonu en aza indirilirken, mutlaka karşılanması gereken bir şarttır. Karşılanması gereken diğer kısıtlamalar, işletim aralıklarında olması gereken İYM ve EM' nin çalışma hızları ile ilgilidir. Elektrik motoru torku için minimum sınır, rejeneratif frenleme nedeniyle negatif olabilir.

Bataryanın işletilmesi için iki eşdeğerlik faktörü tanımlanır: $S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$. Bu faktörler, sürüş boyunca, batarya deşarjı ve şarjı esnasında, maliyet fonksiyonundaki eşdeğer yakıt miktarının ağırlıklandırılması sağlamaktadır [14-16], [20]. Maliyet fonksiyonundaki eş değer yakıt miktarı Eş. 9 ve Eş.10 ile ifade edilmektedir.

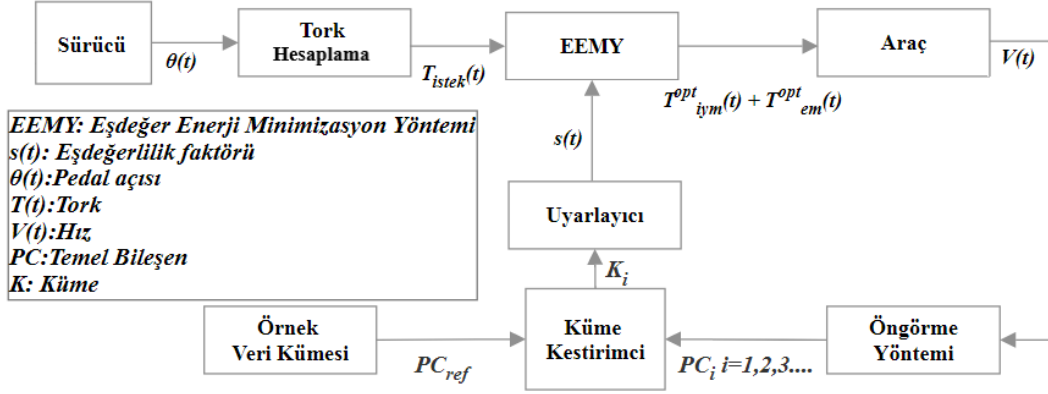
$$\dot{m}_{elek,eqv} = \gamma S_{deşarj} \frac{P_{em}(t)}{\eta_{batt}(P_{em})\eta_{em}(P_{em})H_{thv}} + (1 - \gamma)S_{şarj}\eta_{batt}(P_{em})\eta_{em}(P_{em}) \frac{P_{em}(t)}{H_{thv}} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{1+\text{sgn}(P_{em})}{2} \quad (10)$$

Bataryadaki doluluk miktarının, çevrim başı ile sonunda aynı kalmasını sağlamak amacı ile aşağıdaki ceza fonksiyonu, optimal kontrol denklemlerine Eş. 11 ile ifade edildiği gibi eklenmektedir [16].

$$\Omega(SOC) = \begin{cases} \left(1 + \left(\frac{SOC_f - SOC(t)}{SOC_f - SOC_{min}}\right)^{2n+1}\right), & SOC(t) < SOC_f \\ \left(1 - \left(\frac{SOC(t) - SOC_f}{SOC_{maks} - SOC_f}\right)^{2m+1}\right), & SOC(t) \geq SOC_f \end{cases} \quad (11)$$

EEMY algoritmasının her zaman adımında, J_t değerini en düşük seviyede tutan uygun $u(t)$ değeri hesaplanmakta ve



Şekil 6. Uyarlanabilir EEMY için kontrol şeması (Control diagram for adaptive ECMS)

kontrol değeri olarak bir sonraki zaman adımına gönderilmektedir. Başka bir deyişle, aracın zaman adımı boyunca belli bir hız ve vites oranında hareket ettiği varsayılarak, İYM ve elektrik motorunun devirleri esas alınır. Bu devirlerde her iki eyleyicinin üretebileceği ve toplamda sürücü isteğini karşılayan tork değerleri tespit edilir. Sonuç olarak, her hesaplama adımında, maliyet fonksiyonunu minimize eden tork çifti seçilerek uygulanır.

3.4. Uyarlanabilir EEMY Uygulaması (Implementation of Adaptive ECMS)

Bölüm 3.3'te EEMY algoritmasında anlık olarak maliyet fonksiyonu hesaplanmasında elektrikli güç grubu için eşdeğerlik faktörleri ($s_{deşarj}$ ve $s_{şarj}$) tanımlanmaktadır. Farklı sürüş çevrimleri için farklı eşdeğerlik faktörleri tespit edilmelidir. Gelecek yol profilinin ve koşulunun bilinmesiyle eşdeğerlilik faktörlerinin uygun değeri tahmin edilebilmektedir. Bu noktada, farklı güç taleplerine sahip sürüş çevrimlerine göre, eşdeğerlilik faktörleri kümesi oluşturulduğunda, anlık olarak karşılaşılabilecek farklı güç taleplerine göre en yakın kümeye ait eşdeğerlilik faktörleri seçilebilecektir. Yeni veri setinin hangi kümeye ait olduğunun tespiti Şekil 6 ile gösterilen öngörme yöntemi bloğuyla gerçekleştirilmektedir. Öngörme yönteminde, Bölüm 2.2.1 ile temel bileşen analizine göre oluşturulmuş dört ana bileşen (PC1, PC2, PC3, PC4) MATLAB 'Classification Learner' aracıyla işlenmektedir. Böylelikle Küme Kestirimci bloğuyla modelin hesaplamalarına göre, ön görme bloğunun hazırladığı 150 sn'lik veri setini, örnek veri kümesi (Trafik koşullarını temsil eden 1000 sn'lik sürüş çevrimleri) ile eşleştirerek hangi alt kümeye ait olduğu belirlenmektedir. Veri kümesi oluşturularak gerçekleştirilen kontrol diyagram Şekil 6 ile gösterilmektedir. Şekil 6'da $s(t)$ fonksiyonu Tablo 5'te yer alan örnek veri kümesi içerisindeki $s_{deşarj}$ ve $s_{şarj}$ faktörlerinden oluşmakta ve eşleştiği sefer grubuna ait değerleri EEMY'ye göndermektedir. Böylelikle, EEMY'nin uygulanabilmesi için sürüş çevriminin önceden bilinmesi gerekliliğine ihtiyaç duyulmadan anlık yol bilgisine dayalı (150 sn'lik veri seti) eşdeğerlik faktörü seçilebilmekte ve uyarlanabilir bir EEMY ortaya çıkmaktadır.

4. 220 NOLU HAT İÇİN HİBRİT OTOBÜS MODELİ YAPILANDIRMASI (CONFIGURATION OF HYBRID BUS MODEL FOR LINE 220)

4.1. Boylamasına Otobüs Modeli (Longitudinal Bus Model)

MATLAB ortamında, bir paralel hibrit otobüs modeli oluşturulmuştur. Tablo 4 ile çalışmada kullanılan hibrit otobüsün parametreleri ve Şekil 8 ile, enerji kaynaklarında oluşturulan gücü tekerleklere aktaran bir paralel hibrit mimari gösterilmektedir. Araç üzerinde uygulanan yol dirençleri, yuvarlanma (F_r), hava direnci (F_a) ve yol eğiminden (F_g) ibarettir. F_{xf} ve F_{xr} araca etkiyen toplam çekiş ya da fren kuvvetleri olmak üzere, aracın boyuna ivmesi a_x Eş. 12 ile Eş. 15 arasındaki ifade edilen eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = \gamma m a_x = F_{xf} + F_{xr} - F_a - F_r - F_g \quad (12)$$

$$F_r = P^\alpha W^\beta (a + bV + cV^2) \quad (13)$$

$$F_a = \frac{1}{2} A \rho C_D V_{rel}^2 \quad (14)$$

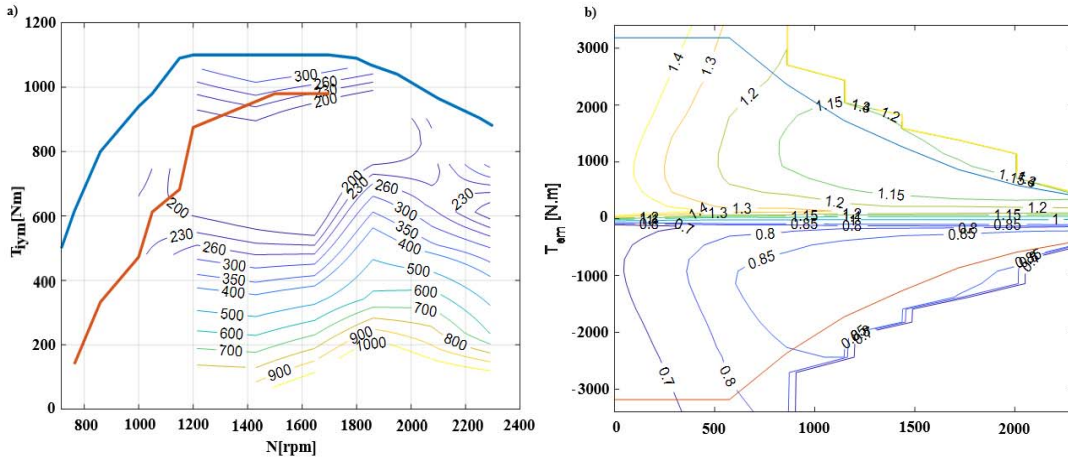
$$F_g = mg \sin \theta \quad (15)$$

İYM için, hız ve gaz keleşi pozisyonuna bağlı olan bir yakıt tüketimi haritası (Bkz. Şekil 7a) ve İYM'ye entegre bir CVT modeli kullanılmıştır. Bu modelde, istenilen güç miktarına bağlı olarak İYM'nin çalışma noktasını Hız-Tork haritasında 'Ekonomik Çizgi' üzerinde tutmak şartıyla uygun vites oranı seçilmektedir. EM için tork ve motor açısız hızına bağlı bir verimlilik haritası kullanılmıştır (Şekil 7b).

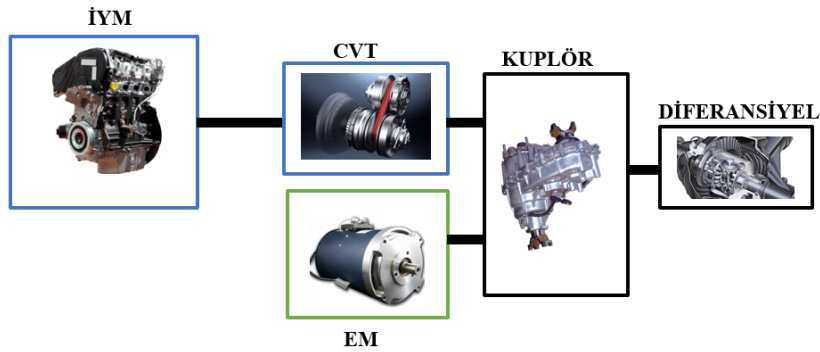
Batarya modellemesi eşdeğer bir devre diyagramı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu devrede, bataryanın iç direnci batarya doluluk oranının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Batarya iç direnci R_i , batarya şarj miktarı fonksiyonu olarak modelde tablolardan elde edilmektedir. Şarj ve deşarj sırasında, bataryadan çekilen veya batarya terminaline verilen akım büyüklüğü I , batarya açık devre voltajı V_{oc} ve iç direnç kullanılarak hesaplanmaktadır.

Tablo 4. Hibrit otobüs özellikleri (Specifications of hybrid bus)

Öge	Parametre	Değer
Araç	Tür	Paralel Hibrit
	Ağırlık	10000(kg)+Yolcu kütlesi
	Aerodinamik sürtünme katsayısı	0,6
	Hava yoğunluğu	1,24 (kg/m ³)
	Ön cephe alanı	7,2 (m ²)
	Teker yarıçapı	0,475 (m)
İYM Vites Kutusu	Vites oranları	(0,7- 4,8) CVT
	Son dişli oranı	3,5
	Şanzıman verimi	0,8
İYM	Yakıt Türü	Dizel
	Maksimum Tork	1100 (N.m)
	Maksimum Güç	213(kW)
Elektrik Motor	Maksimum Hız	2300 (RPM)
	Maksimum Tork	3185 (N.m)
	Maksimum Güç	200 (kW)
Batarya	Maksimum Hız	2300 (RPM)
	Kapasite	3kW.h



Şekil 7. Güç gruplarına ait performans haritaları a) İYM yakıt haritası b) EM verim haritası
(Performance plots of power sources a) ICE fuel map b) EM efficiency map)



Şekil 8. Hibrit güç aktarma mimarisi (Hybrid powertrain architecture)

Tablo 5. Seferlere göre eşdeğerlik faktör değerleri
(Equivalence factor values according to route)

Sürüş Çevrimi	$S_{şarj}$	$S_{deşarj}$
10:00-13:00 arası 220 Numaralı Otobüs Hattı	2,14	1,21
13:00-16:00 arası 220 Numaralı Otobüs Hattı	2,2	1,03
16:00-19:00 arası 220 Numaralı Otobüs Hattı	2,36	1,30
19:00-21:00 arası 220 Numaralı Otobüs Hattı	2,25	1,40

Batarya iç gücü (P_s) ve batarya terminal gücü (P_{batt}) Eş. 16 ve Eş. 17 ile ifade edilmektedir.

$$P_s(t) = V_{oc}(SOC(t))I(t) \quad (16)$$

$$P_{batt}(t) = V_{oc}(SOC(t))I(t) - I(t)^2R_i(SOC(t), sign(P_{batt})) \quad (17)$$

Yukarıdaki denklemlerde batarya doluluk oranı (SOC) bataryanın anlık şarjının $Q(t)$, batarya nominal kapasitesine Q_0 oranı olarak hesaplanmaktadır. Bu değer (0-1) arasında değişmektedir. Batarya doluluk oranı hesaplamalarında Eş. 18 ve Eş. 19 tanımları kullanılmaktadır.

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} \quad (18)$$

$$\dot{Q}(t) = I(t) \quad (19)$$

Eşdeğer devre için şarj vedeşarj durumlarında Eş. 17 yazılırsa, Eş. 20 ve Eş. 21 eşitlikleri elde edilecektir.

$$R_iI(t)_{şarj}^2 + V_{oc}I(t)_{şarj} - P_{şarj} = 0 \quad (20)$$

$$R_iI(t)_{deşarj}^2 - V_{oc}I(t)_{deşarj} + P_{deşarj} = 0 \quad (21)$$

Şarj akımı, daima pozitif,deşarj akımı daima negatif olacağından, Eş. 17, Eş. 21 içerisinde yerine konulduğunda, akımlar Eş. 22 ve Eş. 23 ile verilmiş eşitlikler yardımı ile elde edilmektedir.

$$I_{chg} = \frac{-V_{oc} + \sqrt{V_{oc}^2 + 4R_iP_{şarj}(t)}}{2R_i} \quad (22)$$

$$I_{dis} = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_iP_{dis}(t)}}{2R_i} \quad (23)$$

Bataryanın verimi, iç dirençler nedeniyle ortaya çıkan, batarya terminalindeki güç ve iç güç farklılığından dolayı Eş. 24 ile tanımlanmıştır. Verim, batarya şarj seviyesi ve iç dirençlerin bir fonksiyonudur.

$$\eta_{batt}(t) = \frac{P_s(t)}{P_{batt}(t)} = \frac{V_{oc}I(t)}{V_{oc}I(t) + I(t)^2R_i} \quad (24)$$

Ek olarak bu bölümde, araç ağırlığının yolcu sayısına göre değişmesi ve yol eğimi parametreleri de hesaplamalara eklenmiştir (Bkz. Şekil 9).

4.1. Elektrik Güç Grubunun Boyutlandırılması (Sizing of Electric Power Group)

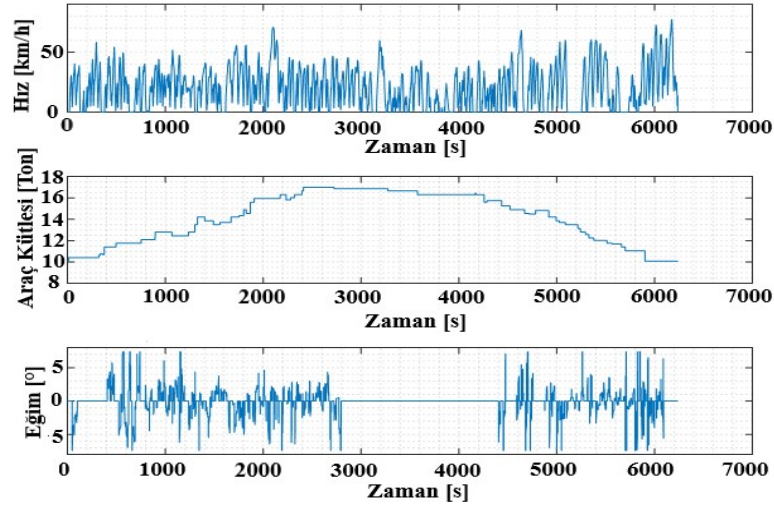
Ankara şehir içinde işletilen 220 nolu belediye otobüsüne ait veriler kullanılarak farklı trafik durumlarını gösteren üç grup sürüş çevrimi Bölüm 2.2’de elde edilmiştir. Bir ön analiz olarak, şehir içi sürüş koşullarını temsil eden üç küme ve EEMY algoritması kullanılarak, farklı batarya kapasiteleri ve farklı elektrik motor güç kombinasyonları kurularak hibrit araç mimarisi için yakıt tüketimi açısından en verimli elektrik güç grubu seçilmiştir. Aynı zamanda, benzetim yapılan bütün sürüş çevrimlerinde üç farklı kütle alınarak otobüs modelinin boş, yarı dolu ve tam dolu durumlarının elektrik güç grubu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Oluşturulan durumlara göre üç farklı sürüş çevrimi kümesi için 12,15,18 ton ağırlıklarla EEMY algoritması oluşturulmuştur. Benzetim sonucunda batarya ve elektrik motor kapasitesine göre EEMY algoritmasının sağladığı yakıt tasarrufları değerlendirilmiştir. Batarya paketi 2, 2,5 ve 3 kwh’lik, elektrik motor gücü ise 120, 150 ve 200 kW’lık kapasitelerde seçilmiştir. Bu doğrultuda, bütün otobüs kütlelerinde 200kW elektrik motoru, 3kWh batarya paketiyle en verimli sonuçların elde edilebileceği görülmüştür.

5. 220 NOLU HAT İÇİN TAM TUR BENZETİM SONUÇLARI (RESULTS OF SIMULATIONS FOR LINE 220)

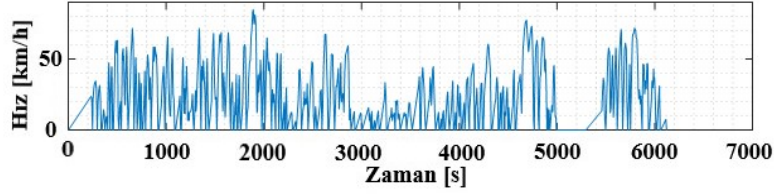
Enerji yönetim algoritmaları tasarlanırken Araç Takip Sistemi üreticisinden temin edilen ve düzenlenen verilerden, saat 10:00-13.00, 13:00-16:00, 16:00-19:00 ve 19:00-21:00 arasına denk gelen seferler seçilmiştir. Yol eğimini hesaplamak adına toplanan veriler içerisinde yer alan mesafe ve yükseklik değerlerinden faydalanılmıştır. Duraklardaki yolcu inmesi/binmesi nedeniyle aracın kütlesi zaman içerisinde değişken varsayılmıştır. Seferlere ait hız profili, eğim bilgisi ve kütle değişimi Şekil 9’da gösterilmektedir. Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12 ile araç kütlesi ve yol eğimi değişmediği için sadece hız profili gösterilmektedir.

5.1. Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya Doluluk Oranı Algoritma Sonuçları (Results of Constrained Thermostat and Maximum Battery SOC Algorithms)

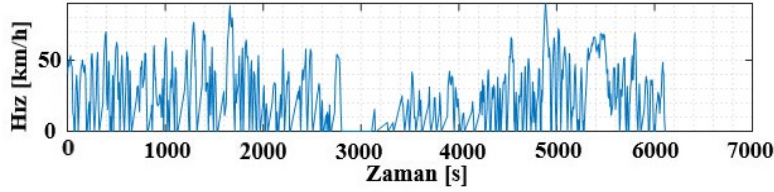
Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya Doluluk Oranı kontrol algoritması tespit edilen dört farklı sefer için gerçekleştirilmiştir. Benzetim yapılan algoritmalarda batarya doluluk oranı sürüş çevriminin başında %70 olarak tanımlanmıştır. Bununla beraber, batarya doluluk oranının istenilen sınırlar içerisinde tutulması için Sınırlandırılmış Termostat algoritması kurgusunda minimum, orta ve maksimum batarya doluluk oranı sırasıyla %60, %67,5-%72,5, %80, Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritmasında, maksimum batarya doluluk oranı %80 olarak tanımlanmaktadır.



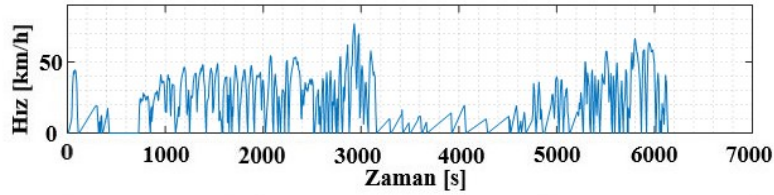
Şekil 9. Saat 10:00-13:00 arası 220 numaralı hatta ait hız profili, araç kütleşi ve eğim verisi (Speed profile, vehicle mass and gradient data of line 220 between 10: 00-13: 00)



Şekil 10. Saat 13:00-16:00 arası 220 numaralı hatta ait hız profil verisi (Speed profile of line 220 between 13: 00-16: 00)



Şekil 11. Saat 16:00-19:00 arası 220 numaralı hatta ait hız profil verisi (Speed profile of line 220 between 16: 00-19: 00)



Şekil 12. Saat 19:00-21:00 arası 220 numaralı hatta ait hız profil verisi (Speed profile of line 220 between 19: 00-21: 00)

Tablo 6. Uyarlanabilir EEMY benzetimlerinde kullanılan seferlere ve araç kütleşine göre eşdeğerlik faktör değerleri oranları (Equivalence factors used for adaptive ECMS according to route and vehicle mass)

	Küme 1	Küme 2	Küme 3
	$S_{şarj}/S_{deşarj}$	$S_{şarj}/S_{deşarj}$	$S_{şarj}/S_{deşarj}$
Araç Kütleşi-12 ton	3,76/2,08	3,68/1,88	4/2,85
Araç Kütleşi-15 ton	3,92/1,25	3,4/1,4	3,57/2,88
Araç Kütleşi-18 ton	3,93/1,77	3,20/1,18	3,34/2,64

10:00-13:00, 13:00-16:00, 16:00-19:00 ve 19:00-21:00 saat dilimleri arasında oluşturulmuş seferlere göre gerçekleştirilen kural tabanlı hibrit algoritmalarının sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 7 ile verilmektedir. Bunun dışında algoritma sonucu olarak 10:00-13:00 arası sefere ait sonuçlar Şekil 13 ile verilmektedir.

5.2. Uyarlanabilir / Uyarlanabilir Olmayan EEMY Sonuçları
(Results of adaptive and non-adaptive ECMS)

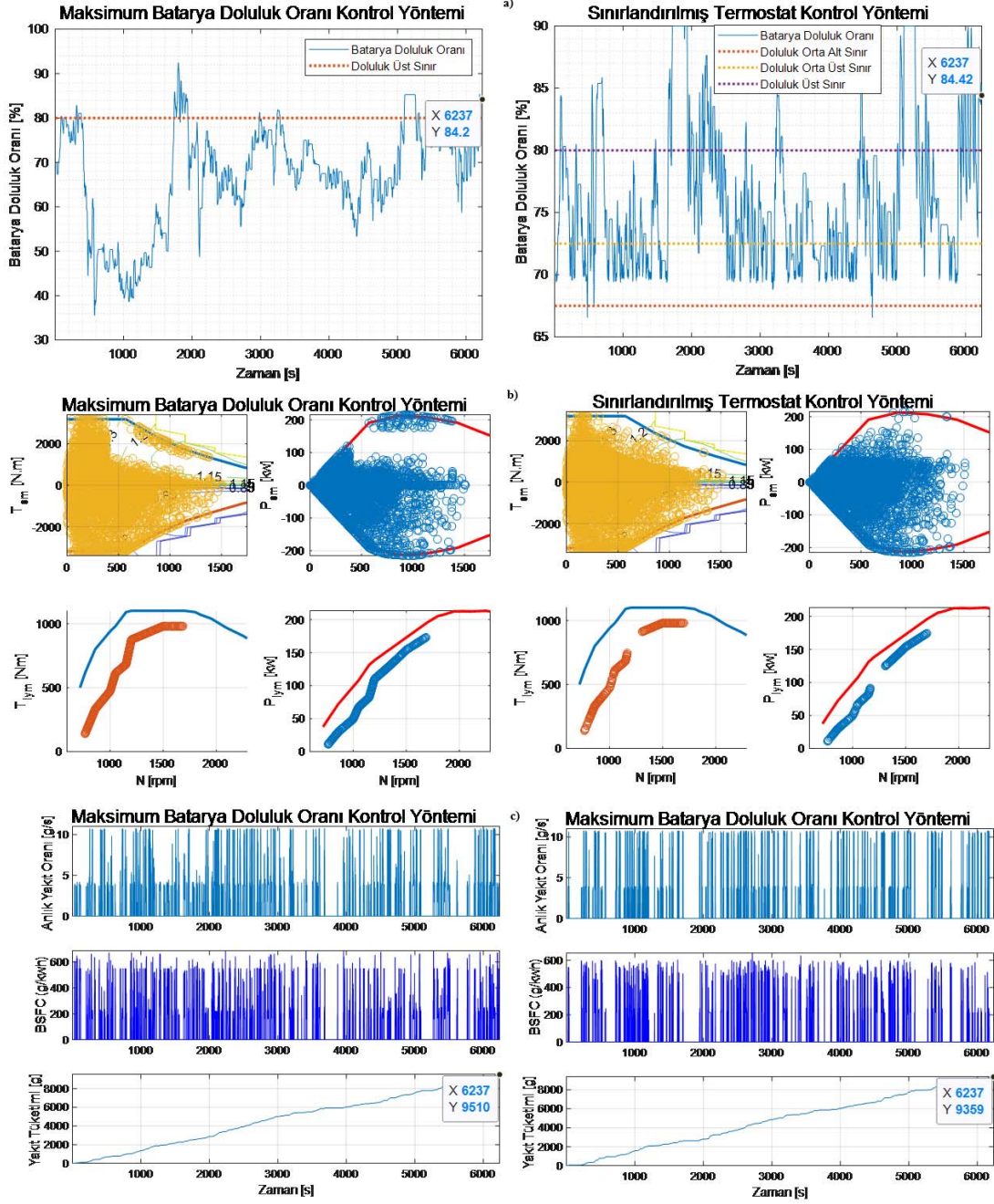
Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan EEMY algoritmaları da önceki bölümde tanımlanan seferler üzerinde uygulanmıştır. Uyarlanabilir olmayan eşdeğer enerji minimizasyon yönteminde eşdeğerlik faktörü, koşturulan sefer için optimize edilebilmektedir. Uyarlanabilir Olmayan EEMY benzetimlerinde kullanılan seferlere göre $S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$ parametreleri Tablo 5 ile gösterilmektedir. Tablo 5 ile gösterilen $S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$ parametrelerinin nasıl hesaplandığı Bölüm 3.3 içerisinde ifade edilmektedir.

Eşdeğerlik faktörünün optimal değeri yalnızca sürüş döngüsü biliniyorsa optimize edilebilmektedir. Bu sebeple mevcut çalışmada, farklı sürüş koşullarına göre kümelendirilmiş sürüş alt çevrimlerine (Bkz. Bölüm 2.2.1) ait eşdeğerlik faktörleri kümeleri oluşturulmuştur. Böylelikle sürüş esnasında sisteme girecek yeni veri setinin (150 sn'lik hız profili, güç talebi vb.) hangi sürüş alt çevrimine benzediği öngörülerek o kümeye ait eşdeğer katsayısı anlık olarak güncellenmiştir. Uyarlanabilir EEMY benzetimlerinde kullanılan seferlere ve araç kütlelerine göre $S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$ parametreleri Tablo 6 ile gösterilmektedir.

Her iki yöntemde de, batarya doluluk oranı sürüş çevrimi sonunda istenilen seviyede tutmak için önlemler bulunmaktadır. Batarya doluluk oranının değişmesiyle uygulanan ceza fonksiyonları batarya doluluk oranının başlangıç değerine yönelmesini sağlamaktadır. Benzetim yapılan algoritmalarda batarya doluluk oranı sürüş çevriminin başında %70 ve alt-üst sınırları 60%-80% olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 7. Farklı sefer saatleri ve farklı araç mimarilerine göre yakıt ve batarya doluluk oranları (Fuel consumption and SOC according to different vehicle architectures between 10: 00-13: 00)

Sefer	Durum	Eşdeğer Yakıt miktarı (gram)	Bitiş Batarya doluluk oranı (%) **Başlangıç SOC:70%	Yakıt Tasarrufu (%)
10:00-13:00	İYM	13690	-	-
	Sınırlandırılmış Termostat	9325	83,00	31,89
	Maks. Batarya Doluluk Oranı	9429	84,00	31,13
	EEMY	8625	69,66	37,03
	Uyarlanabilir EEMY	8522	72,35	37,75
13:00-16:00	İYM	14490	-	-
	Sınırlandırılmış Termostat	9292	78,42	30,61
	Maks. Batarya Doluluk Oranı	9903	86,7	31,64
	EEMY	8641	61,07	40,36
	Uyarlanabilir EEMY	8550	61,38	40,99
16:00-19:00	İYM	13900	-	-
	Sınırlandırılmış Termostat	9054	79,35	35,64
	Maks. Batarya Doluluk Oranı	9778	68,52	29,65
	EEMY	8310	66,42	40,21
	Uyarlanabilir EEMY	8220	66,45	40,86
19:00-21:00	İYM	10280	-	-
	Sınırlandırılmış Termostat	6294	83,2	38,78
	Maks. Batarya Doluluk Oranı	6832	80	33,54
	EEMY	5420	63,08	47,27
	Uyarlanabilir EEMY	5418	63,46	47,30

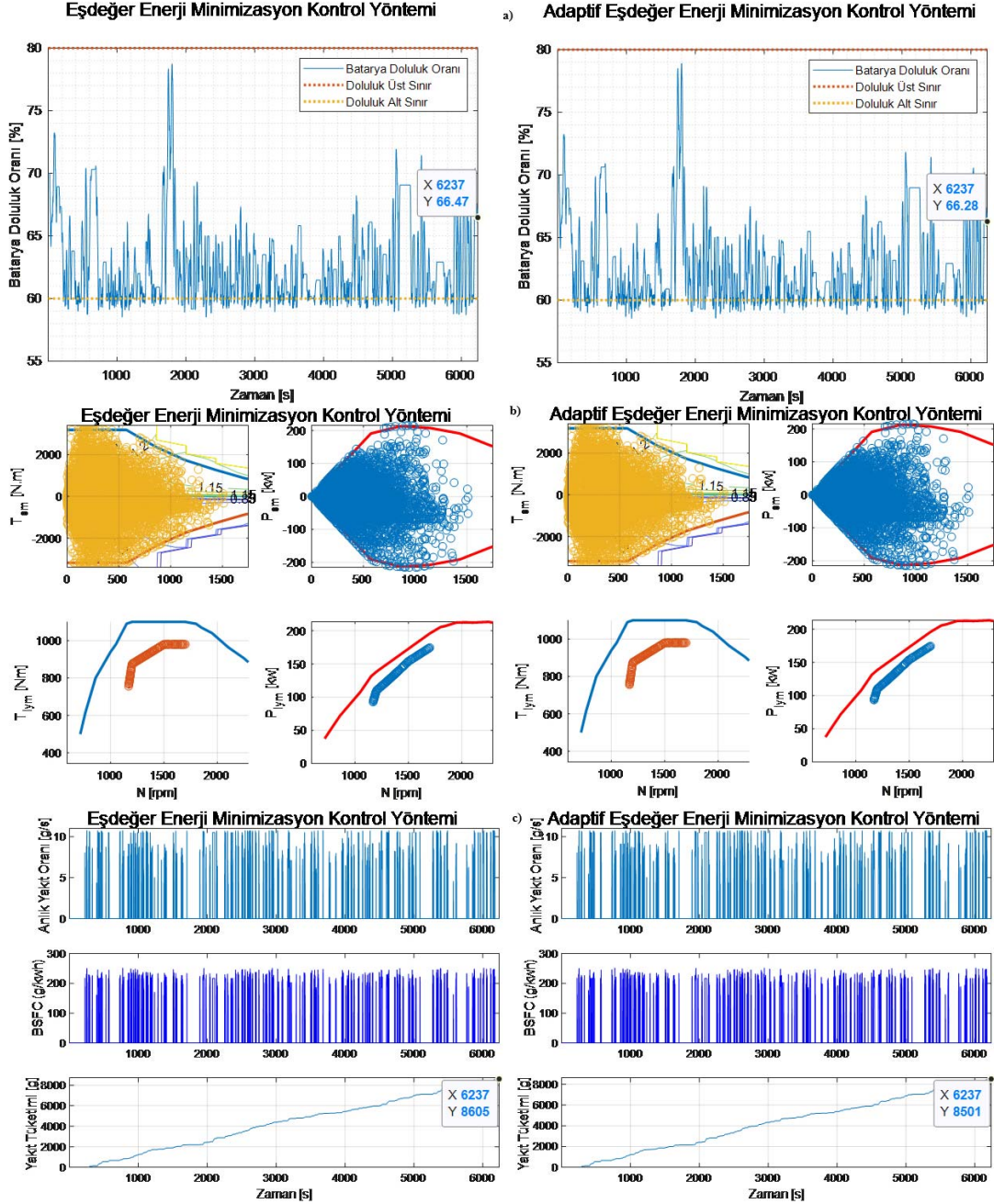


Şekil 13. 10:00-13:00 seferinde koşturulmuş Maksimum Batarya Doluluk Oranı ve Sınırlanmış Termostat kontrol yöntemi sonuçları a) Batarya doluluk oranları b) İYM ve EM çalışma noktaları c) Yakıt tüketim grafikleri
(Results of Maximum SOC and Constrained Thermostat Control Strategy simulated between 10:00-13:00 a) SOC b) Operation points of ICE and EM c) Charts of fuel consumption)

10:00-13:00, 13:00-16:00, 16:00-19:00 ve 19:00-21:00 saat dilimleri arasında oluşturulmuş seferlere göre gerçekleştirilen Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan eşdeğer enerji minimizasyon yöntemi algoritmalarının sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 7 ile verilmektedir. Bunun dışında algoritma sonucu olarak 10:00-13:00 arası sefere ait sonuçlar Şekil 14 ile verilmektedir.

5.3. Sonuçların Genel Değerlendirilmesi (General Discussion of Results)

Batarya doluluk oranlarının başlangıç ve bitiş yüzdeleri karşılaştırıldığında ortaya çıkan batarya enerjisinin ne kadarlık bir yakıt miktarına denk geldiği EPA (Environmental Protection Agency) tarafından, yayınlanan



Şekil 14. 10:00-13:00 seferinde Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan EEMY sonuçları a) Batarya doluluk oranları b) İYM ve EM çalışma noktaları c) Yakıt tüketim grafikleri
(Results of adaptive and non-adaptive ECMS between 10:00-13:00 a) SOC b) Operating point ICE and EM c) Charts of fuel consumption)

bir çalışmada ele alınmıştır [21]. Bu çalışmaya göre, 33,7 kwh'lik enerji 1 galon yakıtı denk gelmektedir.

Bu doğrultuda, benzetimler sonucu ortaya çıkan başlangıç/bitiş batarya enerji farkları yukarıdaki bilgiler doğrultusunda İYM yakıt tüketimine eklendiği zaman, eşdeğer yakıt miktarı elde edilmiştir. Tablo 7 ile dört farklı sefer için sadece İYM ile tükettiği yakıt miktarı ve diğer enerji yönetim algoritmalarına ait eşdeğer yakıt tüketimi

verilmektedir. Eşdeğer yakıt miktarına göre yapılan yakıt tasarrufuna bakıldığında uyarlanabilir EEMY bütün sürüş çevrimlerinde en az yakıt tüketen algoritma olarak ortaya çıkmaktadır.

Şekil 13 ve 14 ile gösterilen grafiklerde enerji yönetim sistemi algoritmalarının benzetimi sonucu 'a' bölümünde batarya doluluk oranı değişimi, 'b' bölümünde elektrik ve içten yanmalı motorların çalışma noktaları, 'c' bölümünde

ise yakıt tüketim değerleri gösterilmektedir. Şekil 13 ile 10:00-13:00 seferine ait kural tabanlı hibrit algoritmalar, Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritması sonuçları, Şekil 14'te ise 10:00-13:00 seferinde Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan EEMY sonuçları gösterilmiştir. Şekil 13 ve Şekil 14 incelendiğinde, kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı algoritmalar arasında %6 ile %15 arasında yakıt tasarrufu farkı bulunmaktadır.

Kural tabanlı hibrit algoritmalar içerisinde Sınırlandırılmış Termostat algoritması 10:00-13:00 seferinde Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritmasına göre daha az yakıt tüketimi sağlamıştır. Tablo 7 incelendiğinde, sadece 13:00-16:00 seferinde Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritması daha az yakıt tüketimi sunmuştur. Batarya doluluk oranı açısından, kural tabanlı hibrit algoritmalarının bazı sürüş çevrimleri içerisinde minimum belirlenen %60 doluluk seviyesinin altına düştüğü gözlemlenmekte, ancak çevrim sonunda istenen doluluk seviyeleri elde edilmektedir. EEMY ve Uyarlanabilir EEMY algoritmaları arasında yakıt tasarrufu farkı %1 seviyesindedir. Ancak genel olarak varılan sonuç, otobüs hatları gibi araç takip sistemleri vasıtasıyla oldukça yoğun hız-zaman verisi bulunan ulaştırma sistemlerinde, EEMY yönteminin yakıt tüketimi azaltımı konusunda oldukça yüksek başarımlı olduğudur.

6. SİMGELER (SYMBOLS)

θ	: Yol eğimi
m	: Araç kütlesi (kg)
g	: Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
F_g	: Yokuş direnç kuvveti (N)
A	: Aracın ön yüzey alanı (m^2)
C_D	: Aerodinamik sürtünme katsayısı
ρ	: Hava kütle yoğunluğu (kg/m^3)
V_{rel}	: Bağlı Hız (m/sn)
F_a	: Hava direnci
P	: Tekerlek basıncı (kPa)
W	: Tekerler üzerindeki yük
a, b, c, α, β	: Yuvarlanma direncine ait katsayı
F_f	: Yuvarlanma direnci (N)
F_{xf}, F_{xr}	: Çekiş/fren kuvvetleri (N)
γ	: Dönel Kütle Katsayısı
S_{dis}, S_{chg}	: Eşdeğerlik faktörü
η_{em}	: Elektrik motor verimi
η_{batt}	: Batarya verimi
H_{thv}	: Isıl değer (J/kg)

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, şehir içi ulaşımda kullanılan otobüslerin paralel hibrit güç aksamı yapılandırması için hibrit enerji yönetim algoritma yaklaşımları ve 220 nolu hat üzerinde hibridizasyon benzetimleri anlatılmaktadır. Hibrit araç benzetiminde kural tabanlı enerji yönetim algoritması olarak Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya doluluk stratejisi, optimizasyon tabanlı enerji yönetim algoritması olarak ise Uyarlanabilir/ Uyarlanabilir olmayan Eşdeğer

Enerji Minimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon tabanlı yöntemlerden EEMY'nin gerçek zamanlı sürüş çevrimine göre güncellenmesi tabanlı özgün bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem kullanılarak % 40 seviyesinde yakıt tüketimi tasarrufu yapmanın mümkün olduğu tespit edilmiştir. Yöntem kapsamında, araç takip sistemlerinin kullanımı ile enerji yönetim sistemi parametrelerinin trafik yoğunluk bilgisine göre uyarlanması sağlanmıştır. Dolayısıyla, bu yöntemle sanal ortamda, trafiğe yeni katılan bir aracın teorik olarak bulunduğu yol segmenti için hız zaman grafiğinin ne şekilde olacağı yakın geçmişte bu yol segmentinde seyahat etmiş araçların araç takip sistemi verilerine göre öngörülerek enerji sarfiyatının oldukça azaltılabileceği gösterilmiştir. Bununla beraber, yol eğimi ve anlık araç kütlesi hesaplamalara dâhil edilmiş ve EEMY algoritması üzerinden elektrik güç grubu için boyutlandırma benzetimleri yapılmıştır. Hibrit otobüslerin, kullandıkları güç dizinleri ve sürüş çevrimlerine bağlı olarak, dizel otobüslere göre %29 ile %40 arası yakıt tasarrufu sağlayabildikleri gösterilmiştir. Bu yöntemler doğrultusunda kurgulanan Uyarlanabilir EEMY algoritmasının, güç kaynaklarını daha verimli bölgelerde çalıştırarak en yüksek yakıt tasarrufunu sağlayacağı ortaya konulmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

115M593 numaralı projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Spash C.L., The Kyoto Protocol: A guide and assessment, Environmental Values, 2001.
2. Sarikurt T., Balıkcı A., A novel energy management system for full electric vehicles, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2) 323-333. 2017.
3. Sezer İ., Theoretical investigation of the effects of diesel fuel, biodiesel fuel and their blends on internal combustion engines, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (4), 799-812, 2016.
4. Mahmoud M., Garnett R., Ferguson M., Kanaroglou P., Electric buses: A review of alternative powertrains, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016.
5. McKinsey & Company, Urban buses: alternative powertrains for Europe, November, 1-57, 2012.
6. McKenzie E.C., Durango-Cohen P.L., Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology, Transp. Res. Part D Transp. Environ., 2012.
7. Ou X., Zhang X., Chang S., Alternative fuel buses currently in use in China: Life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations, Energy Policy, 2010.
8. Nurhadi L., Borén S., Ny H., A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in swedish medium sized cities in Transportation Research Procedia, 2014.

9. Topal O., Türkiye Toplu Ulaşımında Elektrikli Otobüsler, *Eur. J. Sci. Technol.*, 15, 155–167, 2019.
10. Sold H. T. B., Hybrid F., Drive E., Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market, 2013.
11. Göhlich D., Fay T., Jefferies D., Lauth E., Kunith A., Zhang X., Design of urban electric bus systems, 1–28, 2018.
12. Zhou W., Driving cycle development for electric vehicle application using principal component analysis and k-means cluster: with the case of Shenyang, 105, 2831–2836, 2017.
13. Fu J., Gao W., Principal Component Analysis Based on Drive Cycles For Hybrid Electric Vehicle, 2009 IEEE Veh. Power Propuls. Conf., 1613–1618, 2009.
14. Galip Ulsoy A., Peng H., Çakmakçı M., Automotive control systems. 2012.
15. Boyalı A., Hibrit Elektrikli Yol Taşıtlarının Modellenmesi ve Kontrolü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
16. Liu J., Peng H., Modeling and control of a power-split hybrid vehicle, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2008.
17. Musardo C., Rizzoni G., Staccia B., A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management, 1816–1823, 2005.
18. Kural E., Güvenç B. A., Predictive-Equivalent Consumption Minimization Strategy for Energy Management of a Parallel Hybrid Vehicle for Optimal Recuperation Paralel Hibrit Elektrikli Aracın Optimal Reküperatif Frenleme için Öngörülü-Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu *Start*, 18 (3), 113–124, 2015.
19. Ehsani M., Gao Y., Gay S.E., Emadi A, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design, 39 (5). 2008.
20. Koprubasi K., Modeling and Control of a Hybrid-Electric Vehicle for Drivability and Fuel Economy Improvements, Thesis, 2008.
21. Environmental Protection Agency, New Fuel Economy and Environment Labels for a New Generation of Vehicles, 2011, 9, 2011.

