



MÜHENDİSLİKTE ÖNCÜ ARAŞTIRMALAR



All Sciences Academy

MÜHENDİSLİKTE ÖNCÜ ARAŞTIRMALAR

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA





Mühendislikte Öncü Araştırmalar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Mayıs 2025

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-5900-33-3

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	6
Kuvars Porfiri ve Mineralizasyon Geçmişi <i>Ayşe Didem KILIÇ</i>	
2. Bölüm	19
Petrografik Tanımlamalarda Derin Öğrenme Tabanlı Uygulamalar <i>Ayşe Didem KILIÇ, Taha Kubilay ŞENER</i>	
3. Bölüm	32
Kanaldaki Isınmış Tümsek Desenli Üçlü Elemanlardan Olan Isı Transferinin Karışık Taşınım İyileştirilmesinin İrdelenmesi <i>Koray KARABULUT, Yeliz ALNAK</i>	
4. Bölüm	57
Gri Ajan Tabanlı Simülasyon Yöntemi İle Tahliye Anında Bireylerin Davranış Analizi <i>Mustafa Emrah BURHAN, Erdal AYDEMİR,</i>	
5. Bölüm	79
Osmaniye İlinin Doğa Sporları Potansiyelinin SWOT Analiziyle Değerlendirilmesi <i>Nuri ERDEM</i>	
6. Bölüm	95
Yazılım Geliştirmede Kodun Yeniden Yapılandırılması Prensipleri <i>Ömer KASIM</i>	
7. Bölüm	110
Yazılım Tasarımında Farklı Bir Bakış Açısı: Alan Odaklı Tasarıma Giriş <i>Ömer KASIM</i>	

8. Bölüm	125
Derin Öğrenme ile PV Arıza Tespiti <i>Raheleh GHADAMI</i>	
9. Bölüm	141
Cilt Lezyonu Görüntülerinde Derin Öğrenme Yaklaşımları: ISIC 2019 Veri Kümesi Üzerinden Transfer Learning Modellerinin ve Özel CNN Modelinin Karşılaştırılması <i>Berk Tolga ÇİFCİ, Nihan ÖZBALTAN</i>	
10. Bölüm	156
BUSI Veri Seti Üzerinde Derin Öğrenme Tabanlı Meme Kanseri Sınıflandırma Modellerinin Karşılaştırılması <i>Sena ADATEPE, Nihan ÖZBALTAN</i>	
11. Bölüm	165
Yalın Üretim Perspektifiyle Yapı Malzemeleri Üretiminde Toplam Ekipman Etkinliği Optimizasyonu SMED Uygulaması <i>İrem DÜZDAR, Ebrar KÜTÜK</i>	
12. Bölüm	180
Meme Ultrason Görüntülerinde Lezyon Segmentasyonu <i>Yasin YILMAZ, Nihan ÖZBALTAN</i>	
13. Bölüm	191
Sürdürülebilir Frenleme Yaklaşımı: Elektrikli Bisikletler için Akım Baskılı Manyetik Tozlu Fren Sistemi Uygulaması <i>Furkan GÜÇLÜ, Serdar HALİS, Emre ARABACI</i>	
14. Bölüm	206
Nanokristal Alaşımların Mekanik Alaşımlama Tekniği ile Üretilmesi <i>Musa GÖGEBAKAN</i>	
15. Bölüm	222
Polipropilen Polimeri; Yapısı, Çeşitleri ve Özellikleri <i>Hüseyin ÜNAL, Kemal ERMİŞ</i>	

Doymamış Polyester Kompozit Özelliklerine Mika Katkının Etkisi

Cihat ARDA, Hüseyin ÜNAL

Kuvars Porfiri ve Mineralizasyon Geçmişi

Ayşe Didem KILIÇ

Doç. Dr.; Fırat Üniversitesi Mühendislik Jeoloji Bölümü. adkilic@firat.edu.tr
ORCID No: 0000-0002-6804-6764

ÖZET

Elazığ çevresi litolojik birimleri ve kuvars porfiri oluşumlarındaki mineralizasyonları kapsayan bu çalışma, değerli metal mineralizasyonlarının geliştiği farklı büyüklük ve rezervde cevherleşmeleri kapsar. Magmatik-hidrotermal ve sedimanter-hidrotermal gelişim sürecinde oluşu işaret eden mineralizasyonlar silikat zonlanmaları ile de tipiktir. Kuvars porfiri yataklarının petrografisi, cevherleşme türü ve jeokimyası ile mineralizasyon işlevlerini kapsayan bu çalışma, yüksek K-kalkalkalin bileşimleriyle karakterize olup, LILE'ler ve LREE'lerde belirgin zenginleşme, HFSE'lerde ise güçlü bir tükenme gösterir. Bölgesel mineralizasyon verileriyle birleştirildiğinde, altın, bakır ve gümüş göçü ve çökmesi magmatik kökeni işaret eden uçucu madde kaçıışı öncesinde kaynak eriyikte zenginleşebileceğini ve bunun magmatik-hidrotermal Altın yatağı oluşturabileceği ifade edilebilir. Mineralojik ve jeokimyasal veriler bu tür işlevleri göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – ICP-MS Mikroanaliz, Kuvars Porfiri, Mineralizasyon, Silikat Zonlanması, Elazığ.

GİRİŞ

Belirli bir metalojenik kuşakta gümüş, bakır ve altın zenginleşmesiyle ilgili en yaygın görüş, ortalama kimyasal bileşime sahip bir kabukta gelişen uyumlu magmatik-hidrotermal zenginleşme süreçleridir [1-5]. Ancak güncel yaklaşımlar, litosfer ölçeğinde altın, pirit, bakır, gümüş gibi metalik cevherleşmelerin kritik anormal derecede zenginleşmiş kaynak bölgeleri ve/veya eriyiklerin varlığıdır [6-8]. Buna göre, bu tür metalik zenginleşmeler özellikle altın, yalnızca üst kabukta gelişen magmatik-hidrotermal süreçlerle sınırlı değil [8,9], aynı zamanda magmanın odasında, kıtasal alt litosferik manto (SCLM) [10] ve alt kabukta [11] da oluşabildiğidir. Bu nedenle, kaynak bölgedeki yüksek altın içeriği, oluşan altın yatağının büyüklüğü üzerinde belirleyici bir rol oynayabilir [12]. Bu görüşü destekleyen çok az veri mevcuttur ki; bunun önemli nedeni çok düşük tespit limitine sahip analizler ve yüksek hassasiyetli jeokimyasal analizlerin yetersizliği ve konusunda uzman çalışandır. Değerli metallerden bakır ve altının felsik eriyiklerdeki davranışı tartışmalı bir konudur. Cevher rezervuarlarının zenginliğini değerlendirme için; Nd-Hf izotopları [12,13] kontrol unsuru olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Nd-Hf izotopları, magmanın uçucu bileşenleri ve oksijen kaçınımları hakkında önemli veri sağlamaktadır [14]. Bir diğer yöntem zirkonun Ce^{4+}/Ce^{3+} ve $(Eu/Eu^*)/Y$ oranlarının belirlenmesidir [15]. Bir başka önemli belirleme yöntemi ise kükürt içeriği ve tümkaya PGE (platin grubu elementler) jeokimyasıdır [13,16]. Felsik kayalarındaki metalik zenginleşmeler üzerine yapılmış birçok model bulunmaktadır ve bu tür

cevherleşmelerin birikim sürecini kontrol eden başka faktörlerin de olup-olmadığı araştırılmaktadır.

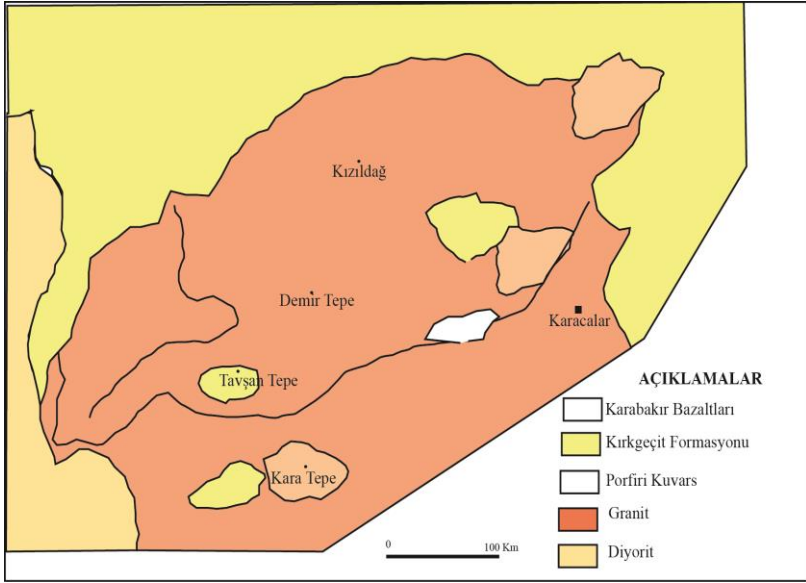
Kuzey Elazığ ili Kızıldağ cevherleşmeleri ağır metal zenginleşmesi ve bu tür zenginleşme süreçlerinin değerlendirilmesi açısından iyi bir örnek sunmaktadır. Bu yatak, önemli rezervlerinin bulunduğu, felsik Baskil magmatitleri içerisinde bulunur. Bölgede gelişen farklı zamanlı faylar ile ilişkili gümüş, bakır, altın, pirit, spekülait, sfalerit, kalkopirit ve galen gelişmiştir [17]. Bu cevherleşmeler işletilebilir reserve sahip olmalarına rağmen şuan işletim yapılmamaktadır.

Elazığ ilinde Keban, baskil, ağır ilçelerinde farklı lokasyonlarda tespit edilmiş 51 bin 300 ton altın rezervi bilinmektedir [18].

Bu tür cevherleşmelerin kökeni için magmatik–hidrotermal [19] veya uzak yayımlı sedimanter–hidrotermal [20] iki görüş öne çıkmaktadır. Dolayısıyla, bu bölge için cevher oluşum sürecinin hâlâ belirsiz olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar[16,17,20], cevherleşmenin, ortamdaki akışkanların derin kökenli metamorfik veya magmatik kaynaklardan itibaren geliştiğini öne sürerken, arazi çalışmaları ağır metal mineralizasyonunun kuvars porfiri ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Şekil 1). Yapılan çalışmada karşılaşılan en önemli güçlük, az altere yeraltı kayaç örneklerinin eksikliği ve bu tür magmatik kayalarda (örneğin, kuvars porfiri stokları) yapılmayan bilimsel çalışmalar yani literatür eksikliğidir. Özellikle kuvars porfirlerin petrojenezi üzerinde bilimsel çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, inceleme alanı kuvars porfirlerinin petrografisi, petrolojisi ve ağır metallerin oluşum süreci ve mineralizasyon türleri hakkında bilgi elde edilmesini amaçlamaktadır.

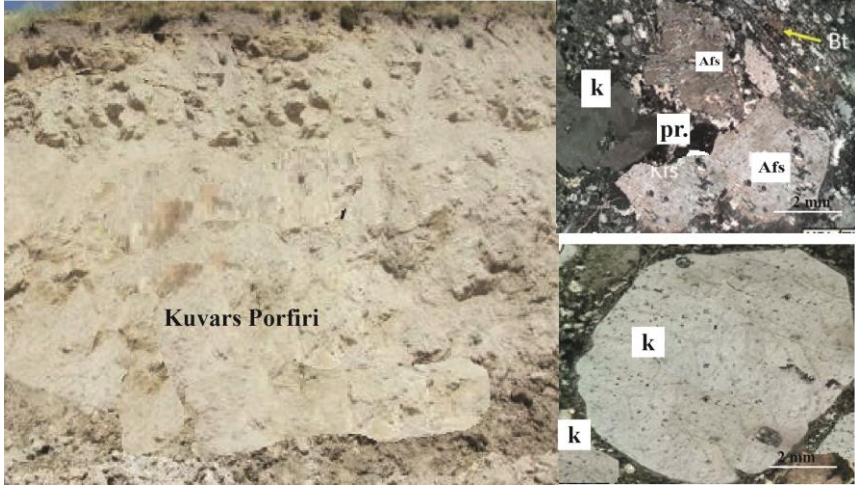
JEOLJİ VE MİNERALİZASYON

Baskil magmatitleri içerisindeki mineralizasyonlar, Elazığ ilinin kuzeyinde Keban ve Baskil ilçeleri civarında yoğunlaşmaktadır [17,20]. Yaklaşık 5 km uzunluğunda ve 2 km genişliğinde olan cevherleşmeler, kısmen metamorfize olmuş sedimanter temel kayaçlar içerisinde yer alır (Şekil 2). İnceleme alanında yüzeylenen Baskil Magmatitleri, Kırkgeçit Formasyonu ve Karabakır Formasyonu yer alır (Şekil 1).



Şekil 1: İnceleme alanının jeolojik haritası ve kuvars porfirilerin konumu [1]

Baskil magmatitleri granit ve diyoritle temsil edilirken, Kırkgeçit kumtaşı, marn, kıltaşı ve kumlu kireçtaşı ile temsil edilir. Bu birim baskil magmatitlerinin hem granitlerini hem de diyoritlerini uyumsuz olarak örtmektedir. Orta-Üst Eosen yaşlı bir birimdir [13]. Birimin uyumsuz olduğu bazı alanlarda yeşilimsi gri, yer yer milonitik serisit-klorit-amfibol şistler ve aralarında ince kristalize kireçtaşlarının bulunduğu belirlenmiştir (Şekil 2). Yaklaşık 100 m kalınlığında karbonat seviyesi üzerinde, genellikle organik maddece zengin, piritli, koyu gri renkli şeyl ve silttaşı, aralıklı olarak ince taneli grovak seviyeleri belirlenmiştir. Genel olarak, sedimanter bir birim olan Kırkgeçit formasyonunun şeyl birimi, zayıf veya orta derecede metamorfize olmuş, yüksek açılı normal faylarla parçalanmış, breşik yer yer klast-matris dokusu özelliğindedir. Ağır metal özellikle altın cevherleşmesinin, kalsit ve alüvyonel yelpazelerin geçirgen zonları boyunca yoğunlaştığı görülür. Bazı alanlarda kısmen metamorfize olmuş, cevher içermeyen dolomit ve şeyller tarafından uyumsuz bir şekilde örtüldüğü kesimlerde görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 2: Kuvars poririye ait makro ve mikroskop görüntüleri.(k)kuvars, (pr)pirit, (Afs) Alkali feldispat

Temel kayalardan bir diğeri Üst Miyosen yaşı, bazalt, kireçtaşı ve aglomeralardan oluşan Karabakır formasyonudur. Kuvars porfirinin geliştiği alanlarda fayların etkisiyle gelişen cevherleşmeler, D-B doğrultulu olup, yaklaşık 60 derece ile kuzeye eğimli zonlar şeklinde gelişmiştir. Faylanmaların yoğun olduğu alanlarda metalik zenginleşmelerin yoğunlaştığı ve fay zonlarının genel olarak 1-2 m ulaştığı kesimlerde ise cevherleşmelerin azaldığı görülür.

Orta-Üst Eosen yaşı Kırkgeçit formasyonu faylanmlardan etkilenirken, Baskil graniti faylanmalardan etkilenmemiştir. Bölgedeki faylanmalar, Kretase sonu-Paleosen zaman aralığında gelişmiş olup [17,13], bu yaş aynı zamanda Keban Metamorfikleri'nin Baskil magmatitleri üzerine bindirme yaşıdır. Bindirme sonucu olduğu düşünülen fay zonunun doğrultusunun, Tunceli ili Pertek ilçesi kuzeyinde izlenen Keban metamorfikleri- Elazığ magmatitleri bindirmesi ile aynıdır. Dolayısıyla, fayların doğrultusu önemli bir kanıt sunmaktadır.

Dolomitik kireçtaşı ara seviyeleri içeren siyah mika-kuvarsit şistler ile mermer arasındaki milonitik zon ve bindirme fayları ile sınırlı, süreksiz ve metamorfize kayalar dar bir lokasyonda izlenmektedir. Pirit, sfalerit ve altın gibi cevherleşmelerin izlendiği bu temel kayalar, D-B yönelimli Keban bindirme fayıyla paralel bir konumdadır (Şekil 2). D-B yönelimli Keban bindirme fayına dik olan K-G ve KD-GB yönelimli küçük faylar boyunca gelişmiş vadilerde, silisleşmiş mineralize zonlara yakın alanlarda karbonatları dekalsifiye olmuş mineralizasyonlar belirlenmiştir. Yüksek açılı normal faylar, kesişim ilişkileri ve stratigrafik yer değiştirmelere göre iki gruba ayrılabilir (Şekil 1). Bu yapılar, Orta Eosen'den Üst Kretase' ye kadar olan kayaları kesen KB ile KD yönelimleri arasında değişen doğrultulara sahiptir. Daha genç olarak değerlendirilen yapılar ise, D-KD yönelimli

yüksek açılı normal fay özelliğindedir. Ayrıca, doğu-batı yönelimli, daha yaşlı ve derin kökenli olduğu düşünülen fay sistemleri de bulunmaktadır.

ANALİZ METODLARI

Bu çalışmada, inceleme alanı olarak seçilen lokasyonlardan on adet kuvars porfiri örneği alınmıştır. Yüzeydeki kayaç örnekleri, yüksek alterasyon nedeniyle incelenememiştir. Seçilen on adet taze kaya örneği, tüm kaya ana ve iz element analizleri için kullanılmıştır.

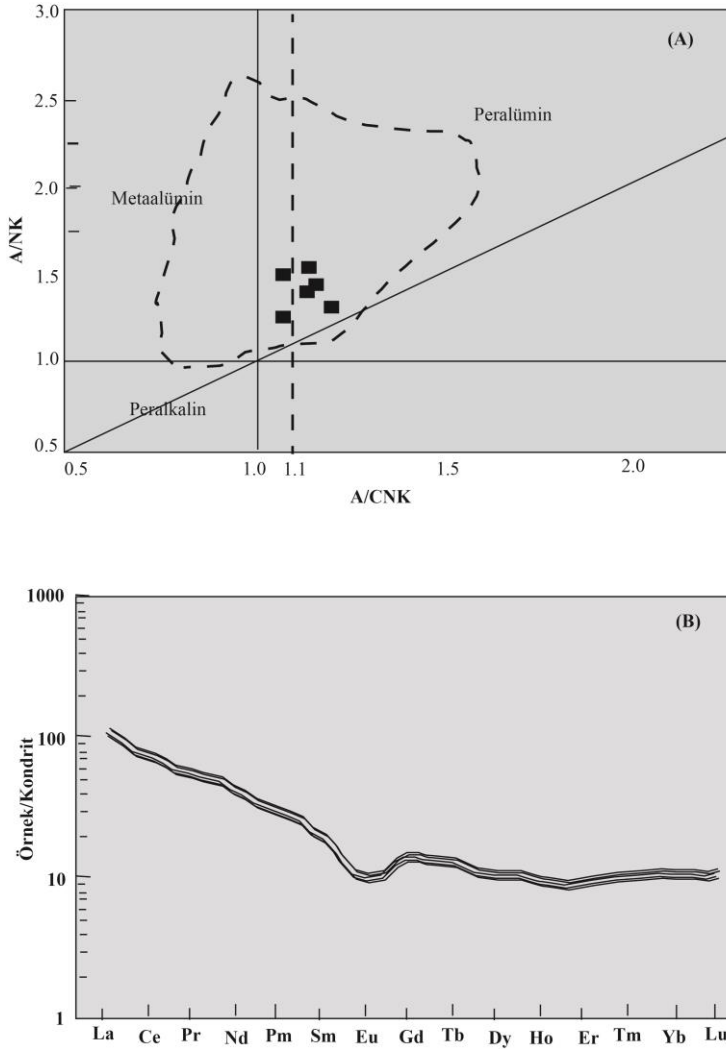
Seçilen örneklerin petrografik incelemeleri Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği laboratuvarı'nda yapılmıştır. Jeokimyasal analizler ise ACME' de İndüktif bağlı plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) kullanılarak tüm kaya ana ve iz elementleri incelenmiştir. Ana elementlerin bolluğu, örneklerin lityum tetraborat ve metaborat ile karıştırılıp platin bir kaseinin içinde 1150°C'de 15 dk., süreyle fırına yerleştirildikten sonra camlaştırılmış ve öğütülmüş örneklerle ölçülmüştür. Ateş kaybı (LOI) değerleri, ana element analizlerinden önce 1000°C'de sabit sıcaklıkta ölçülmüştür. Ana elementlerin analiz hassasiyeti %2'den iyidir. İz elementlerin belirlenmesi için, Teflon kaplarda (1 ml HNO₃ ve 1 ml HF ile) yerleştirilmesinin sonrasında ICP-MS'e konulmuştur. İz elementler için analiz hassasiyeti ve doğruluğu %10'dan büyüktür.

BULGULAR

Literatürde Kızıldağ cevherleşmeleri olarak ifade edilen cevherleşmelerin mineral içeriği ve dokusal özellikleri incelenmiştir. Kuvars porfiri sınırında metasedimentlerle yakın konumlanmış bu cevherleşmeler, massif ve saçmımlı bir doku göstermektedir. Saçmımlı cevherleşmeleri, küçük fay zonlarının yakın çevresinde dar bir lokasyonda, masif cevherleşmeleri ise, milonitik fay breşi matriksi olarak geliştiği görülür (Şekil 3). Masif cevherleşmenin kalınlığı yaklaşık 5-10 cm'dir. Petrografik incelemeler, spekularit, pirit, kalkopirit, galen kısıtlı olarak altın ve bakır cevherleşmeleri şeklinde izlenir (Şekil 3). Kuvars porfiri örneklerinin jeokimyasal analizleri değerlendirildiğinde, LOI değerinin <%3'ün altında olduğu ve post-magmatik alterasyon veya atmosferik koşullarının ihmal

edilebilir olduğunu göstermektedir ki bu, petrografik incelemelerle uyumludur.

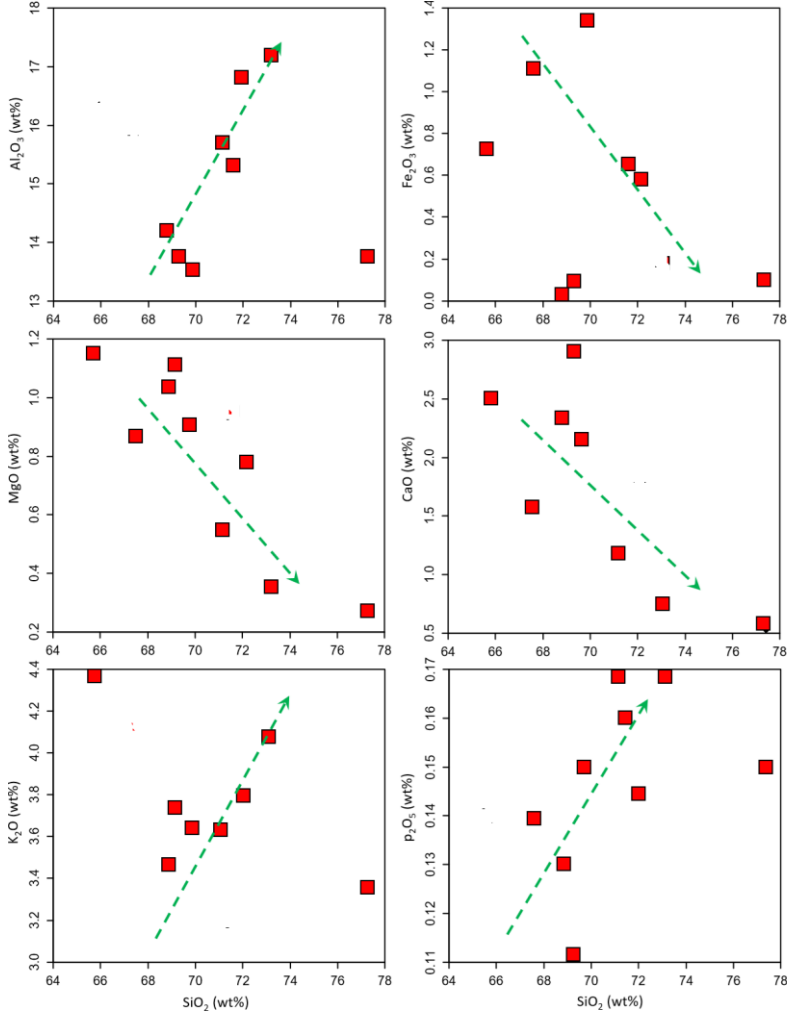
Kuvars porfiri örneklerinin SiO_2 - ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) içerikleri, %70.12–76.33 ve %3.52–4.81 arasında değişmektedir. Toplam alkali-silika (TAS) sınıflandırması, kayaç örnekleri çoğunlukla sub-alkalin granit olduğunu göstermektedir. SiO_2 - K_2O ve ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}$) diyagramlarında ise tüm örnekler, yüksek $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ oranlarına (>10) sahip olup, yüksek-K kalk-alkalin ve I-tipi serilerine ait K_2O zenginleşmesi gösterir. Örneklerin P_2O_5 içeriği %0.14–0.18 ve CaO içeriği %0.44–2.74, Mg# değerleri ise 30–56 aralığındadır. A/NK ile A/CNK diyagramında örnekler peralümino alanda bulunmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3: (A) A/NK-A/CNK diyagramı ve kuvars porfiriye ait örümcek diyagramı []

Kuars porfiri örneklerinin NTE içerikleri, 135–185 ppm arasında olup, yüksek $(La/Yb)_n$ değerlerine 6.54–12.32 sahiptir. Örnekler, zayıf negatif Eu anomalisi ($Eu/Eu^* 0.52–0.84$) göstermektedir. Örneklerin Kondrit normalizasyonlu nadir toprak elementleri desenleri (Şekil 4), HNTE zenginleşmesi ve ANTE tükenmesi şeklindedir. Kuars porfiri örneklerinde Au içeriği (11.31–43.60 ppb) arasındadır [(Sun ve McDonough, 1989).

Kuars porfiri örneklerinin Harker diyagramlarında (Şekil 5), Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO , CaO ve MnO içerikleri, SiO_2 ile artış göstermektedir. Bu özellikler, magmaların evrimi sırasında hornblend, biyotit ve titanit kristalleşmesini gösterir. TiO_2 , FeO_T ve SiO_2 içerikleri arasındaki negatif lineer korelasyon, ayrıca açık bir Ti tükenmesi, Ti-Fe oksitlerinin fraksiyonasyonunu işaret eder.



Şekil 4: Kuvars porfiri örneklerine ait Harker diyagramı

Örnekler, yüksek Σ NTE değerleri (2370–3216 ppm), pozitif Ce anomalileri (46.8–150) ve negatif Eu anomalileri (0.3–0.5) vermektedir. Ce ve Eu farklı iyonik koşullarda bulunabildiğinde magmatik oksidasyon durumuna duyarlıdır[. Zirkonların Kristalleşme sıcaklıkları, Watson et al. (2006)[] ve Ferry ve Watson (2007)[] tarafından önerilen Ti-termometresi kullanılarak hesaplanır. Hidrotermal alterasyon sırasında mobil (K, Ba, Rb, Sr ve Cs) ve mobil olmayan (Nb, Ta, Y, Zr, Hf olarak HFSE ve La'dan Lu'ya kadar olan NTE'ler) elementlerin kovaryansları, incelenen örneklerin düşük dereceli alterasyona uğradığını göstermektedir [(Pearce et al., 1982; Staudigel ve Hart, 1983; MacLean ve Barrett, 1993). Bazı örnekler, SiO_2 'yi diferansiyasyon indeksi olarak kullanan seçilmiş Nb, Yb ve Ba elementleri

bakımından küçük sapmalar göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada sunulan iz elementlerin, Na₂O ve K₂O konsantrasyonlarının alterasyon etkisiyle önemli bir şekilde değişmediğini ve incelenen kuvars porfirlerinin petrografik ve jeokimyasal özelliklerini tartışmak için kullanılabileceğini kanısına ulaşılmıştır (Şekil 4).

SONUÇ

Felsik magmalar üç ana petrojenez modeline göre şekillendirilebilir: (1) manto kökenli mafik magmanın yüksek diferansiyasyonu [(Castillo et al., 1999; Chappell et al., 2012; Zhang et al., 2013), (2) kabuk ve başlangıçtaki mafik magmaların karışımı [(Kemp et al., 2007), ve (3) kısmi erimiş kabuk anateksisidir [(Patiño-Douce ve Harris, 1998; Castro, 2013; Gao et al., 2017). İnceleme alanında kuvars porfiri ve mineralizasyon türleri üzerine yapılan bu çalışmada, pirit, altın ve kısmen bakır konsantrasyonları, altının farklı sülfid fazlarına ayrılmadığı, bunun yerine eriyiğin içinde kaldığı kükürtün doymamış magmatik kayalardan kaynaklandığı, dolayısıyla, yüksek magmatik diferansiyasyon oranından türeyen magmaların, kükürt doymamış olma eğiliminin daha yüksek olduğu ve bu nedenle daha fazla altın kapasitesine sahip olduğu ifade edilir [(Keays, 1995). Mustard ve ark. [(2006), plutonun son fazında yüksek Au konsantrasyonunun (~0.12 ppm), yüksek diferansiyasyon derecesinin bir sonucu olduğunu belirtmiştir. (Rankama ve Sahama, 1950; Blevin, 2004), bu nedenle Au uyumsuzdur ve daha yüksek fraksiyonasyon derecelerinde daha fazla yoğunlaşır. Altın, bu magmalarda uyumsuz davranışı nedeniyle ve kükürt doymamış sistemlerde daha fazla diferansiyasyon tarafından seyreltilerek Mg# ile negatif bir korelasyon sergiler. Kuvars porfiri örnekleri, tüm kaya Mg# negatif korelasyon göstermesi, ana magmasının yüksek derecede kristal fraksiyonasyonu ile üretildiğinin kanıtıdır.

Magmatik kaynaklı sıvıların, altının sülfid ergisinden çözünerek veya manyetit gibi oksitleyici minerallerin kristalleşmesiyle altın gibi ağır elementlerin çökeldiği Simon ve diğerleri [19] tarafından ifade edilmiştir. Sun ve diğerleri [22], manyetit fraksiyonel kristalleşmesinin başlangıcı ve toplam Fe ve özellikle Fe⁺³'ün magma içerisinden uzaklaştırılma hızının artmasının, redoks reaksiyonunda bir kaymaya yol açtığını göstermiştir (örneğin, $8\text{FeO} + \text{SO}_4^{-2} \rightarrow 4\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{S}^{-2}$). Buna göre, cevher oluşturan magma, Au ve Cu yataklarıyla benzer şekilde oksitlenmiş olmalıdır [12] Daha yaygın olan Fe-S minerallerinin (pirit ve pirotin) varlığı ve eşzamanlı sıvı inklüzyonları, özellikle H₂S ve CH₄ gibi indirgenmiş bileşenlerden kaynaklanabilir [20,21]. Bu durum, çalışma alanı mineralizasyon sisteminin

oksitleyici koşullardan indirgenmiş koşullara büyük bir redoks değişikliği geçirdiğini göstermektedir. Redoks değişiklikleri ve mineralizasyon, Au içeren mineral sistemlerinde; manyetit kristalleşmesi, SO₂'nin oranlı redüksiyon reaksiyonu [21], karbonlu bileşenlerin varlığına [22] bağlıdır. Çalışma alanında, kuvars porfirlerinin içerisinde ince taneli dağılmış manyetit bulunması, manyetit oluşumunun redoks değişikliklerini etkileyen önemli bir etken olduğunu göstermektedir. Magma–hidrotermal sistemlerinin sıcaklıkları 450  C'ye düştüğünde, SO₂ oranlı redüksiyon reaksiyonu gerçekleşir ve H₂S ile H₂SO₄ üretir; bu da anhidrit ve sülfür oluşumuna sebep olur. Ancak, inceleme alanında anhidrit bulunmadığından, bu reaksiyonun inceleme alanı mineralizasyonunda önemli olmadığı ifade edilebilir.

Magma yerleşimi ve asimilasyonu ile yan kayaçlarındaki karbonlu bileşenler termal ayrışmaya uğrayarak metal içeriğine sahip sıvılar oluşturur [8,13]. Bu sıvılar cevher sıvılarının oksijen kaçış hızını düşürebilir. Çalışılan cevherleşme alanında, kireçtaşı birimi karbonlu silttaşı ve şist içermektedir. Magma cevher oluşturran sıvılardaki redoks değişikliğine ve ardından gelen altın içeren pirit oluşumuna sebep olabilir [17,22]. Alkali felsik magmalar, uygun yapısal sistemler boyunca orta‐üst kabuğa doğru yükselerek, ağır metal mineralizasyonlarını oluşturran sıvıların yoğunlaşmasına katkıda bulunduğu söylenebilir. Zhang ve ark. (2023)[], felsik magmaların (kuvars porfiri, granit porfiri), yerleşimden önce ve sonra dayanıklı, yüksek ısı rezervleri sağlayarak, bir mineral sisteminin ömrünü sürdürebilen bir ısı motoru işlevi görebileceğini göstermiştir. Bu nedenle, kuvars porfirleri, yüksek oksidasyon durumu, rezerv kaynağı, volatil içerikler ve alkali magmalar olmak üzere cevher oluşturabileceği ve dolayısıyla altın birikimi için iyi bir potansiyele sahip olabileceği gelecekteki keşiflerde dikkate alınması gereken bir konudur.

REFERANSLAR

1. Rogers, G., Saunders, A. D., Terrell, D. J., Verma, S. P., & Marriner, G. F. (1985). Geochemistry of Holocene volcanic rocks associated with ridge subduction in Baja California, Mexico. *Nature*, 315, 389–392.
2. Schmidt, M. W., & Poli, S. (2014). Devolatilization during subduction. In H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., Vol. 4, pp. 669–701). Elsevier.
3. Rollinson, H. (1997). Eclogite xenoliths in West African kimberlites as residues from Archaean granitoid crust formation. *Nature*, 389, 173–176.
4. Polat, A., Hofmann, A. W., & Rosing, M. T. (2002). Boninite-like volcanic rocks in the 3.7–3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: Geochemical evidence for

- intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth. *Chemical Geology*, 184, 231–254.
5. Polat, A., & Kerrich, R. (2002). Nd-isotope systematics of ~2.7 Ga adakites, magnesian andesites, and arc basalts, Superior Province: Evidence for shallow crustal recycling at Archean subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 202, 345–360.
 6. Schuth, S., Münker, C., König, S., Qopoto, C., Basi, S., Garbe-Schönberg, D., & Ballhaus, C. (2009). Petrogenesis of lavas along the Solomon Island Arc, SW Pacific: Coupling of compositional variations and subduction zone geometry. *Journal of Petrology*, 50, 781–811.
 7. Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105, 3–41.
 8. Sillitoe, R. H. (2018). Why no porphyry copper deposits in Japan and South Korea? *Resource Geology*, 68, 107–125.
 9. Hao, L. L., Wang, Q., Zhang, C., Ou, Q., Yang, J. H., Dan, W., & Jiang, Z. Q. (2019). Oceanic plateau subduction during closure of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: Insights from central Tibetan volcanic rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 131, 864–880.
 10. Hou, Z., Yang, Z., Qu, X., Meng, X., Li, Z., Beaudoin, G., Rui, Z., Gao, Y., & Zaw, K. (2009). The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen. *Ore Geology Reviews*, 36, 25–51.
 11. Zhang, G. B., Niu, Y. L., Song, S. G., Zhang, L. F., Tian, Z. L., Christy, A. G., & Han, L. (2015). Trace element behavior and P–T–t evolution during partial melting of exhumed eclogite in the North Qaidam UHPM belt (NW China): Implications for adakite genesis. *Lithos*, 226, 65–80.
 12. Wu, K., Zhang, L., Yuan, H., Sun, W., Deng, J., Robert, E., Zartman, E., Guo, J., Bao, Z., & Zong, J. (2021). Boron, arsenic and antimony recycling in subduction zones: New insights from interactions between forearc serpentinites and CO₂-rich fluids at the slab-mantle interface. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 298, 21–42. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.01.010>
 13. Hoekist, E. V. F. (1974). Regional characteristics of porphyry copper deposits of South America. *SME Transactions*, 256, 45–53.
 14. Yazgan, E. (1983). A geotraverse between the Arabian Platform and Munsir Nappes. In *International Symposium on the Geology of the Taurus Belt*, Field Guidebook. İzmir: İFAG Publications.
 15. Kılıç, A. D., & İnceöz, M. (2015). Mineralogical, geochemical and isotopic effect of silica in ultramafic systems, eastern Anatolian Turkey. *Geochemistry International*, 53(4), 369–382. <https://doi.org/10.1134/S0016702915040045> (DOI varsayılmıştır; eğer elinizde doğru DOI yoksa link eklenmeyebilir.)
 16. McDonough, W. F. (1989). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
 17. Sağıroğlu, A. (1986). Features and Origin of The Kızıldağ-Elazığ Mineralizations. *Geological Engineering*, 29, 13–20.
 18. <http://mtaelazığ1094229952510260>
 19. Ghasemi Siani, M. (2020). Mineralogy, hydrothermal alteration, fluid inclusion, and O–H stable isotopes of the Siah Jangal-Sar Kahno epithermal gold deposit, SE Iran. *Ore Geology Reviews*, 125, 103689. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103689>
 20. Gresens, R. L. (1967). Composition–volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, 2, 47–65.

Petrografik Tanımlamalarda Derin Öğrenme Tabanlı Uygulamalar

Ayşe Didem KILIÇ¹
Taha Kubilay ŞENER²

Doç. Dr.; Fırat Üniversitesi Mühendislik Jeoloji Bölümü. adkilog@firat.edu.tr

ORCID No: 0000-0002-6804-6764

Arş.Gör., Fırat Üniversitesi Mühendislik fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.

tkseuer23@gmail.com

ORCID No: 0000-0002-9846-967X

ÖZET

Jeoloji’de kayaç ince kesitlerin tanımlanması, petrojenez, alterasyon, doku, kayaçlar ve yerkabuğu işlevleri hakkında bilgi almak için kritik öneme sahiptir. Geleneksel ince kesit tanımlama yöntemi uzman deneyimi, kişisel dikkat, ağır iş yükü, uzun tanımlama döngüsü ve doğru nicelleştirme yapılamaması gibi dezavantajlar gösterir. Bu makale, mineral tanımlama için genel, güvenilir ve parametre verimliliği yüksek derin öğrenme mimarilerini kullanarak bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Foid’li magmatiklerden kayaç ince kesit görüntüsü alınmış ve feldispatoid, alkali feldispat ve plajiyoklas mineralleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Otomatik sınıflandırma için önerilen mimari, mikroskobik ince kesit görüntülerinin girişi ve artırımı, segmentasyonun gerçekleştirilmesi, mineral türlerinin tanımlanması ve sınıflandırılması ile kayaç adlanması aşamalarından oluşmaktadır. Model eğitimi ve testi için %60 oranında örnek seçilmiş ve feldispatoid ile diğer iki mineral türünün sınıflandırılması deepLabV3+ derin öğrenme mimarisi ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, mevcut derin öğrenme modellerinin, mineral tanımlama ve sınıflandırma, görüntü segmentasyonu açısından temel modellere kıyasla daha üstün performans gösterdiğini ortaya koyar. Genel doğruluk oranı %92’den fazladır. Dolayısıyla, bu çalışmada önerilen yaklaşım, mikroskobik ince kesit görüntüleri için kapsamlı, nicel ve doğru bilgiler sunduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler –Makine Öğrenmesi, Deeplabv3+, Mineraller, Diyagramlar.

GİRİŞ

Belirli Magmadan itibaren oluşan magmatik kayaçlar, oluşum yerlerine, mineralojik ve kimyasal bileşimlerine ve renk indislerine göre sınıflandırılırlar. Magmatik kayaçların mineralojik sınıflaması, kuvars, alkali feldispat, plajiyoklas ve feldispatoid minerallerine göre QAPF-diyagramı üzerinde yapılırken, ultramafik mineraller dikkate alınmaz. Streckeisen [1] tarafından, Q(Kuvars-tridimit, kristobalit), A(Alkali feldispatlar-ortoklas, sanidin, mikroklin), P(Plajiyoklas), F(Feldispatoidler-lösit, nefelin, sodalit, analsim) ve M (Koyu renkli mineraller-mika, piroksen, olivin, amfibol) olarak sınıflandırılan diyagramdaki ilk dört mineral açık renklidir.

Günümüzde, polarize, floresan, döküm, taramalı elektron mikroskop ve katodoluminesans analizleri üzerinde ince kesit çalışmaları yapılmaktadır [2,3,4,5]. Geleneksel ince kesit tanımlamaları, görsel incelemeyle manuel olarak mikroskopta yapılırken, zaman alıcı ve yorucu bu süreci büyük veri ve yapay zekâ algoritmaları ile kısaltmak mümkündür [2,6,7,8]. Makina öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları, kayaç sınıflamalarında güvenilir ve hızlı bir yöntem olarak kullanılmaktadır [8, 9,10]. Derin öğrenme,

görüntü tanıma ve bilgisayarlı görme teknolojilerinin gelişmesi, minerallerin ve kayaçların sınıflanmasını mümkün kılmaktadır [2,11]. İnce kesit görüntüsü kullanılarak yapılan çalışmalar arasında, Yu ve diğerleri [12], Polat ve diğerleri [2], Baykan ve Yılmaz [3], Pires de Lima [13] gibi araştırmacılar farklı kayaç türlerinde çalışmalar yapmıştır. Jeolojide, makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları ile büyük yapılandırılmış ve yapılandırılmamış verileri [7], jeokimyasal anormallikleri [2-5, 13], potansiyel mineral kaynaklarını [14,15] ve paleontolojik verileri değerlendirmek mümkündür. Jeolojide derin öğrenmenin gelişimiyle görüntü tabanlı bilgisayarlı görme teknolojisi kullanarak sınıflandırabilmektedir. Kaya ince kesit görüntülerinden sınıflandırmada, UNet [16], Residual Network (ResNet) [10], Visual Geometry Group Network (VGG) [17], Dense Convolutional Network (DenseNet) [19], Inception-v3 [20] ve Faster Region-based Convolutional Neural Network (Faster RCNN) [19] gibi olgunlaşmış konvolüsyonel sinir ağı modelleri kullanılır. Marmo ve diğerleri [21], yapay sinir ağları (ANN)' yi karbonat ince kesit görüntülerinde kullanmış ve %93.5' lik bir başarı sağlamıştır. Patel ve diğerleri [22], probabilistik sinir ağlarını (PNN) farklı dokuda kireçtaşlarında dokuz histogram özelliği ile birlikte kullanmıştır. K-en yakın komşu algoritmaları ile dokuz farklı kayaç türünü sınıflandırmıştır. Bir başka çalışmada, Polat ve diğerleri [2] altı volkanik kayaç türünü otomatik sınıflamak için iki CNNs algoritmasını kullanmıştır. Karbonat kayaçların ince kesit görüntülerindeki üç özelliğe dört CNN modelini uygulamıştır. Kayaç ince kesitlerinde CNN ile mineral segmentasyonu kullanmıştır [23]. Bazı araştırmacılar, kayaç ince kesitlerinde kayacın beş farklı özelliğini ResNet0 sinir ağları kullanarak belirlemeye çalışmış ve başarı sağlamıştır [24]. Bazı çalışmalarda, üç kayaç türü (magmatik, metamorfik ve sedimanter) sınıflamasında SeNet' e dayanarak CNN model özelliğini artırarak başarı sağlamış ve dataset üzerinde %90.89 başarı elde etmiştir [25]. Chen ve diğerleri [14] ResNet50 ve ResNet 101 sinir ağlarını kayaç ince kesitlerini tanımlamak için kullanmış ve %90.24-%91.63 performans sağlamıştır. Zhang ve diğerleri [16] Inception-V3 derin öğrenme modeli ve transfer derin öğrenme modelini kullanarak, granit, fillit ve breş türü kayaçları sınıflandırmıştır. Su [27], pirit, kalkopirit, galen ve sfalerit ince kesit görüntülerinde UNet modelini kullanmıştır. Veri artırımından sonra bu mineral türlerind %90 başarı elde edilmiştir. Bai ve diğ. (), dolomit, andezit, oolitik kireçtaşı, litik kumtaşı, granit ve kuvarslı kumtaşlarında VGG modelini uygulamışlardır. Bu araştırmacılar veri setlerinde %82' lik başarı yakalamışlardır. Visual Geometry Group ağları (VGG) [26], UNet [27], Yoğun iletişimsel sinir ağları ResNet [28], DenseNet [29], Inception+v3 [30] ve hızlı bölgesel iletişimsel sinir ağları (Faster RCNN) [31] gibi evrimsel sinir ağlarına (CNN) gibi derin öğrenme modelleridir. Bu modeller, bilgisayar görmeye mükemmel performans göstermiştir.

Bu çalışma, QAPF ikiz üçgeninin APF bölümünün kullanılmasını ve çoklu mineralli ince kesitlerden feldispatoidlerin nicel tanımlaması ile sonuçların kapsamlı bir şekilde gösterimini gerçekleştirmeyi amaçlar.

MATERYAL VE METOT

Fırat Üniversitesi jeoloji mühendisliği laboratuvarında hazırlanan petrografik ince kesitler kullanılmıştır. Feldispatlar magmatik kayaların ana bileşimini oluştururken ($>50\%$), feldispatoidli kayalar sınırlıdır. Feldispatoidler, silis içermeyen eriyiklerden itibaren oluşur ve feldispatların yerini, lösit ($KAlSi_2O_6$) ve nefelin ($NaAlSi_3O_8$) gibi feldispatoid mineralleri alır. Sodalit, lazurit, hauyn, nosean ve petalit ise diğer feldispatoid kayalarındır. Feldispatoid minerallerden birini veya birkaçını birarada bulunduran kayaca ise foid- denir (Foid-monzonit gibi). Foid- veya fonolit kayalarında feldispatoidler, ya alkali feldispatla veya plajiyoklazla (anortit) birlikte bulunabilir.

Görüntü işleme ve derin öğrenmeye dayalı yöntemlerden, VGG16[32] ve ResNet18[33], DeepLabV3+[34] bazılarıdır. Mask-RCNN temelli yaklaşım ise bir diğer segmentasyon yöntemidir [9, 19, 34]. Bu makalede, önerilen semantik segmentasyon ağının etkinliğini göstermek için, birden fazla Güncel En İyi (SOTA) model test edilmiştir. Seçilen veri kümesi üzerinde eğitilen ve doğrulama setinde kontrol edilen sonuçlar, metrikler bölümünde tartışılan değerlerle karşılaştırılmıştır.

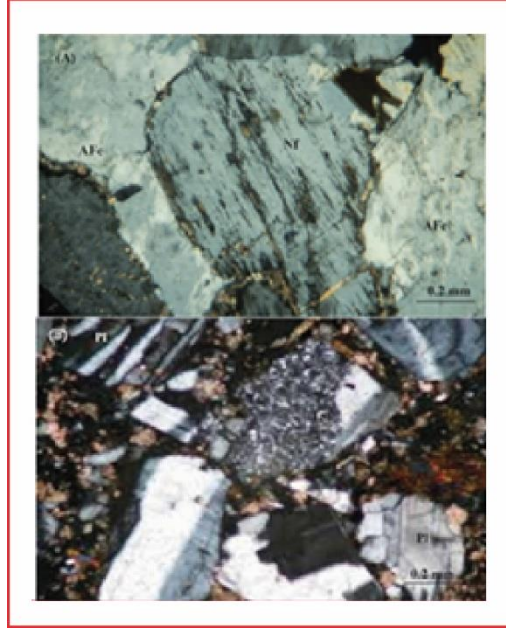
DeepLab (DeepLabV3+) semantik segmentasyonun gelişmiş bir versiyonudur [35]. Karmaşık görüntüleri bileşenlerine ayırma görevinde başarılıdır. DeepLabV3+, uzamsal piramit havuzlama ve encoder-decoder yapılarının güçlü yönlerini birleştirir. DeepLabV3+ 'deki büyük ilerleme, modelin görüş alanını kontrol etmesine ve bir hesaplama maliyeti artışı olmadan çok ölçekli bilgileri yakalamaya olanak vermesi ve atrous evrişim stratejisinin dâhil edilmesidir [11, 36]. Bu özellik, semantik segmentasyon görevlerinde sıkça karşılaşılan zorlu görvelerden biridir. Farklı ölçeklerdeki nesnelerin anlaşılması için kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, modelin geliştirilmiş, Atrous Uzamsal Piramit Havuzlama (ASPP) modülü ile farklı boyuttaki özellikler birleştirilerek mükemmel detay elde edilebilir. Atrous (dilated) evrişimi, deepLabv3+ derin evrişimli sınır ağları tarafından hesaplanan özellikleri keyfi bir çözünürlükte açığa çıkarmak için kullanılır [37-39]. Burada, çıktı stride'ını, giriş görüntüsünün mekânsal çözünürlüğünün nihai çıktı çözünürlüğüne oranı şeklinde hesaplanır. Görüntü sınıflandırma görevi için, nihai özellik haritalarının mekânsal çözünürlüğü genellikle giriş görüntüsünün çözünürlüğünden 32 kat küçüktür. Bu nedenle, çıktı stride'ı = 32'dir. Semantik segmentasyon görevi

için, son bir/iki bloktaki stride kaldırılarak ve atrous evrişim uygulayarak, daha yoğun özellik çıkarımı için çıktı stride'ı = 16 (veya 8) kullanılabilir [4, 40-43]. Ek olarak, DeepLabv3+, farklı oranlarla atrous evrişim uygulayarak evrişimsel özellikleri birden fazla ölçekte araştıran Atrous Uzamsal Piramit Havuzlama modülünü, görüntü düzeyindeki özelliklerle zenginleştirebilir. Önerilen encoder-decoder yapımızda, orijinal DeepLabv3'te logits'den önceki son özellik haritasını, encoder çıktısı olarak kullanarak, özellik haritasının 256 kanallı ve zengin anlamsal bilgi ile keyfi bir çözünürlükte özellikler çıkarabilmektedir.

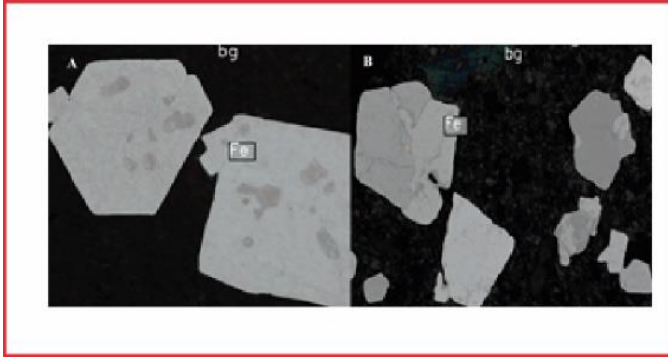
BULGULAR

Literatürde Çalışma kapsamında önerilen deepLabV+3 modeli, önceki deneysel çalışmalarla kıyaslanmış ve veri kümesindeki performans Tablo 1'de özetlenmiştir. Bu çalışmada, önerilen deepLabV+3 modeli derin öğrenme yöntemleri ile kıyaslandığında, önerilen deepLabV+3 modelinin yüksek bir başarı verdiğini görülür. Ayrıca, farklı veri kümeleri ile eğitilip, transfer öğrenme modelleri ile veri kümelerinin başarı oranları eğitilen deeplabV+3 modelinin daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Feldispatoid minerali içeren kayaç türünün azlığı veri setini sınırlamasına rağmen, nefelinli siyenit ve monzosiyenit örneklerinden hazırlanan ince kesit görüntüleri (Şekil 1) üzerinde feldispatoid mineralleri deeplabv3+ modeli ile otomatik olarak belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 2).

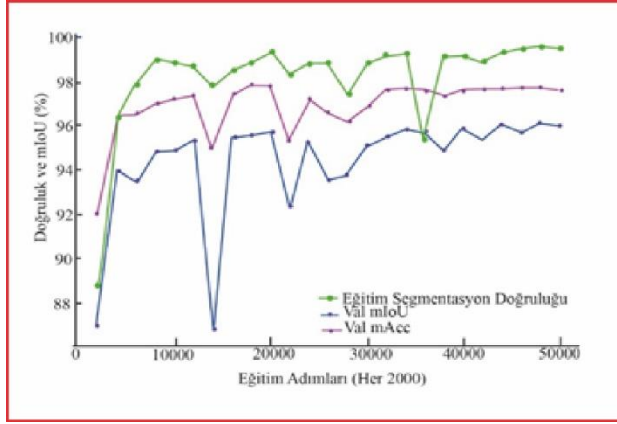


Şekil 1. A) Nefelinli siyenit ve B) monzosiyenit örneklerine ait ince kesit görüntüleri. Plajiyoklaz (Pl), Alkali feldispat (Afe), Nefelin (Nf).

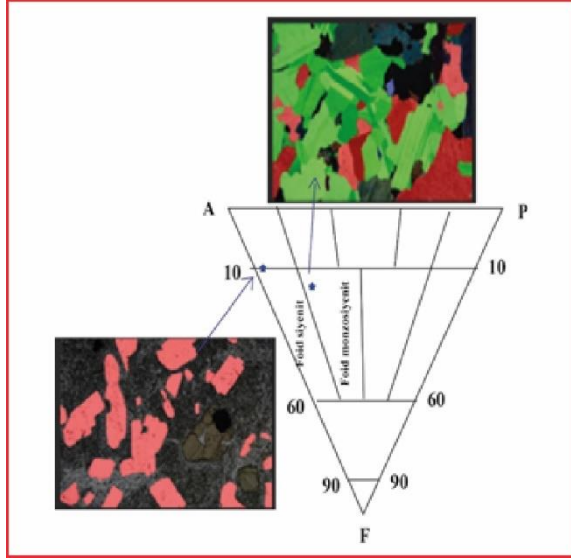


Şekil 2. Feldispatoid mineralinin semantik segmentasyon görüntüsü

Seçilen ince kesit görüntülerinin eğitimi sonucunda, deeplabv3+ modelinin feldispatoid minerali tespitinde başarılı sonuçlar vermektedir. Eğitim ve validasyon seti arasındaki korelasyonda modelin ezber yapmadığını desteklerken, uygulama geliştirmede rahatlıkla kullanılabileceği belirlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Eğitim sonucunda nefelin mineralinin doğruluk ve kestirlik değişim grafiği



Şekil 4. İnce kesit görüntülerinde belirlenen mineraller ve APF diyagramında konumu

Şekil 3' de yer alan grafikleri temel alınarak, ortalama doğrulama doğruluğu ve mIoU değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, test durumları için çıkarım süreleri değerlendirilerek, Tablo 1'de bu metriklerle karşılık gelen sonuçlar özetlenmiştir.

Tablo 1. Her modelin doğrulama verisi için performans metrikleri

Model	Doğruluk	MIoU	Inference Speed (Seconds/Image)
DeepLabV3+	86.76	78.09	0.92
SegFormer	76.36	59.16	1.06
ConvNext	73.56	57.37	0.88
Mask2Former	86.73	76.89	1.47
Mask2Former+Refining	91.26	82.59	1.51

Önerilen Post-Refining aşaması ile desteklenen Mask2Former’ın, hem doğruluk hem mIoU bakımından diğer modellere kıyasla üstün performans sergilediği izlenmiştir. SegFormer, ConvNext ve DeepLabV3+ modelleri benzer çıktılar sunarken, karşılaştırılabilir bir sayıda eğitilebilir parametreleri korumaktadır. Bu mimariler, segmentasyon görevleri için yaygın olarak benimsenen ve sınırlı parametre sayısına rağmen yüksek doğruluk alınan modeller olarak önemlidir. Mask2Former ise, söz konusu modellere kıyasla yaklaşık 218 milyon eğitilebilir parametreye sahiptir. Dolayısıyla, yüksek parametre hacmi, daha karmaşık yapısal özellikleri ve potansiyel olarak büyük öğrenme kapasitesini kapsar. Ancak, yüksek parametre sayısına rağmen Mask2Former, diğer modellere göre, beklenen çıkarım süresinde bir yavaşlama göstermez. Mask2Former’ın transformer blokları, paralel işlem yetenekleri ile parametre hacmindeki önemli artışla verimli çıkarım sağlamaktadır (Şekil 5). Özellikle uzun mesafe bağımlılıklarını modellemede yetkin olan transformer blokları, derin öğrenme modellerinin karmaşık görsel görevlerde daha doğru ve hassas sonuçlar vermektedir.

SONUÇ

Jeoloji biliminde, kayaç ve mineraller farklı diyagramlar kullanılarak sınıflandırılır. QAPF diyagramı en yaygın sınıflama diyagramlarından biridir. Petrografik ince kesit görüntülerinde mineral bileşimi, doku ve yapısal özellikler dikkate alınarak, kayaç türü sınıflandırılması, petrojenezin açıklanması, paleoevrin ve olası cevher alanlarının tespiti gibi birçok çalışmaya temel oluşturmaktadır. Günümüzde, optik mikroskopla manuel yapılan tanımlama, derin öğrenme tabanlı yöntemle otomatik yapılabilmektedir. Bu çalışmada, derin öğrenme nesne tespit algoritmaları, petrografik ince kesit görüntüleri kullanılarak, birden fazla minerali tanımlamak için uygulanmıştır. Modelin yakınsama hızını artırmak için transfer öğrenme, modelin genelleme yeteneğini artırmak için veri artırma kullanılmış, hesaplama verimliliğini artırmak içinse GPU kullanılmıştır.

DeepLabV3+ kullanarak yapılan mineral test setinin AP değeri %92.25 olarak bulunmuş olması, genel algılama performansının iyi olduğunu göstermektedir. Bu nesne tespiti modelinin, görüntünün ortasındaki mineral ve kenardaki mineralleri tanımlama yeteneği ile oldukça genellenebilir ve yüksek doğruluk verdiği görülmüştür. Bu model, diğer transfer öğrenme modellerine göre eğitim başarısı oldukça yüksek, ancak test başarısı kısmen düşük olduğu görülmüştür.

Eğitim setindeki örneklerin çeşitliliği ve mineral şekillerinin farklılığı algılama üzerinde etkili olmuştur; bunlar arasında ikinci durum daha fazla etki göstermiştir. Derin öğrenme, eğitim setinden özellikler öğrenmek ve test seti üzerinde tahmin yapılması için kullanılmıştır, ancak mineral örneklerinin bir ince kesitten diğerine aynı örnek için farklılı göstermesi, özelliklerin dağılımının sapmasına neden olmuş ve tahmin sürecinde yanlış oluşmasına sebep olmuştur. Hedef mineral (feldispatoid) ile arka plan arasındaki fark nedeniyle mikroskobik görüntü bileşiminin çeşitliliği de küçük yanlışlar oluşturmıştır. Bu çalışma, petrografik ince kesit görüntülerinin sınıflandırılmasından çoklu hedef tespitine geçiş yapmayı amaçlamıştır. Araştırma ölçeği daraltılarak, kayalardan içlerindeki dokulara ve yapılara geçiş yapılmış ve petrografik ince kesit görüntülerinde çoklu hedef akıllı tanıma için bir başlangıç oluşturmıştır.

Feldispatoid mineralleri, lösit, nefelin, sodalit, analsim olup özel kirstal şekillerine sahiptir. Önerilen deepLabV3+ literatürde aynı veri seti üzerinde uygulanan derin öğrenme yaklaşımı SegFormer, ConvNext ve Mask2Former gibi modellerle karşılaştırılmış ve doğrulama başarımı %3'ün üzerinde artırılması sağlanmıştır. Bu karşılaştırma için, Mask2Former'ın performansını artırmak için geliştirilmiş bir versiyonu tercih edilmiştir. Eğitimin tamamlanması ve segmentasyon aşamasından sonra, Mask2Former'ın performansını (>%5) artırmak için, SLIC süper piksel ve morfolojik işlemler kullanılmıştır. İlgili veri seti ile modellerin başarı oranları, doğruluğu ve hata değerleri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada feldispatoid mineralinin tespiti ve ilk kez Streckisen-QAPF diyagramı'nın APF üçgeni üzerinde otomatik kayaların adlandırılması sağlanmıştır.

REFERANSLAR

- [1] A. Streckeisen, Classification and nomenclature of plutonic rocks: recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geologische Rundschau*, 63, 773–786, 1974
- [2] Ö. Polat, A. Polat, T. Ekici, Automatic classification of volcanic rocks from thin section images using transfer learning networks. *Neural Computing and Applications*, 33(18), 11531-11540, 2021.
- [3] N.A. Baykan, N. Yılmaz, Mineral identification using color spaces and artificial neural networks. *Computers & Geosciences* 36, 91–97, 2010.
- [4] E. Menteşe, E. Hançer, E., Histopatoloji Görüntülerde Derin Öğrenme Yöntemleri ile Çekirdek Segmentasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 95-102, 2020.
- [5] S. Aligholi, G.R. Lashkaripour, R. Khajavi, M. Razmara, M. Automatic mineral identification using color tracking. *Pattern Recogn*, 65, 164–174. 2017.
- [6] A. Balasubramanian, Branches of Geology(Earth Sciences), Department of Studies in Earth Science Centre for Advanced Studies University of Mysore,570-006, 2017. <https://doi:10.13140/RG.2.2.12500.30087>.
- [7] W. Lai, Ji. Jiang, J. Qiu, Photomicrograph dataset of rocks for petrology teaching in Nanjing University[DS/OL],V1.Science Data Bank, 2020. <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.j00001.00097>.
- [8] D. Li, J. Zhao, J. Ma, Experimental studies on rock thin-section image classification by deep learning-based approaches. *Mathematics*, 10(13), 2317,2022.
- [9] B. Cheng, I. Misra, A. G. Schwing, A. Kirillov, R. Girdhar, Masked-attention mask transformer for universal image segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 1290-1299, 2022.
- [10] L.C. Chen, G. Papandreou, F. Schroff, H. Adam, Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation. *arXiv:1706.05587*, 2017.
- [11] C. Sun, A. Shrivastava, S. Singh, A. Gupta, Revisiting unreasonable effectiveness of data in deep learning era. In: *ICCV*, 2017.
- [12] J. Yu, F. Wellmann, S. Virgo, M. von Domarus, M. Jiang, J. Schmatz, B. Leibe, Superpixel segmentations for thin sections: Evaluation of methods to enable the generation of machine learning training data sets. *Computers & Geosciences*, 170, 105232, 2023.
- [13] R. Pires de Lima, D. Duarte, Pretraining convolutional neural networks for mudstone petrographic thin-section image classification. *Geosciences*, 11(8), 336, 2021.
- [14] L. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, H. Adam, Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, 2018. *CoRR*, abs/1802.02611.
- [15] R. P. de Lima, D. Duarte, C. Nicholson, R. Slatt, K. J. Marfurt, Petrographic microfacies classification with deep convolutional neural networks. *Computers & geosciences*, 142, 104481, 2020.
- [16] P. Zhang, J. Zhou, W. Zhao, X. Li, L. Pu, The edge segmentation of grains in thin-section petrographic images utilising extinction consistency perception network. *Complex & Intelligent Systems*, 10(1), 1231-1245, 2024.

- [17] W. Seo, Y. Kim, H. Sim, Y. Song, T. S. Yun, Classification of igneous rocks from petrographic thin section images using convolutional neural network. *Earth Science Informatics*, 15(2), 1297-1307, 2022.
- [18] T. Elsken, J.H. Metzen, F. Hutter, The search for neural architecture: an overview. *Journal of Machine Learning Research*, No. 20(1), 2019.
- [19] H. Liu, Y. L. Ren, X. Li, Y. X. Hu, J. P. Wu, B. Li, W. K. Fang, Rock thin-section analysis and identification based on artificial intelligent technique. *Petroleum Science*, 19(4), 1605-1621, 2022.
- [20] E. Xie, W. Wang, Z. Yu, A. Anandkumar, J. Alvarez P.Luo, SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers. *Advances in neural information processing systems*, 34, 12077-12090, 2021.
- [21] R. Marmo, S. Amodio, R. Tagliaferri, V. Ferreri, G. Longo, Textural identification of carbonate rocks by image processing and neural network: methodology proposal and examples, *Computers & Geosciences* 31 (5), 649-659, 2005. doi: 10.1016/j.cageo.2004.11.016.
- [22] A. Patel, S. Chatterjee, Computer vision-based limestone rock-type classification using probabilistic neural network, *Geoscience Frontiers*, 7 (1), 53-60, 2016, doi: 10.1016/j.gsf.2014.10.005
- [23] F. Fueten, J. Mason, An artificial neural net assisted approach to editing edges in petrographic images collected with the rotating polarizer stage. *Computers & Geosciences*, 33(9), 1176-1188, 2007.
- [24] J.S. Goodchild, F. Fueten, Edge detection in petrographic images using the rotating polarizer stage. *Computers and Geosciences*, 24, 745-751, 1998.
- [25] P. Gottlieb, G. Wilkie, D. Sutherland, E. Ho-Tun, S. Suthers, K. Perera, J. Rayner, Using quantitative electron microscopy for process mineralogy applications. *Jom* 52(4), 24-25, 2000.
- [26] R. P. Heilbronner, C. Paull, Integrated Spatial And Orientation Analysis Of Quartz C-Axes By Computer Aided Microscopy. *Journal of Structural Geology*, 15, 3-5, 369-382, 1993.
- [27] C. Su, S. J. Xu, K. Y. Zhu, X. C. Zhang, Rock classification in petrographic thin section images based on concatenated convolutional neural networks. *Earth Science Informatics*, 13, 1477-1484, 2020.
- [28] S. Karimpouli, P. Tahmasebi, Segmentation of digital rock images using deep convolutional autoencoder networks. *Computers & geosciences*, 126, 142-150, 2019.
- [29] I. Kononenko, E. Simec, M. Robnik-Sikonja, Overcoming the myopia of inductive learning algorithms with RELIEFF. *Applied Intelligence* 7, 39-55, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1008280620621>.
- [30] N. Li, H. Hao, Q. Gu, D. Wang, X. Hu, A transfer learning method for automatic identification of sandstone microscopic images. *Comput Geosci* 103, 111-121, 2017.
- [31] H. Ma, G. Han, L. Peng, L. Zhu, J. Shu, Rock thin sections identification based on improved squeeze-and-Excitation Networks model. *Computers & Geosciences*, 152, 104780, 2021.
- [32] A. Kolesnikov, L. Beyer, X. Zhai, J. Puigcerver, J. Yung, S. Gelly, N. Houlsby, Big transfer (BiT): General visual representation learning, In *ECCV*, 2020.
- [33] D. Mahajan, R. Girshick, V. Ramanathan, K. He, M. Paluri, Y. Li, A. Bharambe, L. Van der Maaten, Exploring the limits of weakly supervised pretraining. In *ECCV*, 2018.

- [34] H. Wang, Z. Yukun, B. Green, H. Adam, A.Yuille, L.Chieh Chen, Axial-deeplab: Stand-alone axial-attention for panoptic segmentation. In ECCV, 2020a.
- [35] D.A. Martyushev, I.N. Ponomareva, S. Davoodi, H. Izadi, J. Sadri, M. Bayati, Interporosity Flow Between Matrix and Fractures in Carbonates: A Study of its Impact on Oil Production. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09533-1>.
- [36] M. Młynarczuk, A. Górszczyk, B. Ślipek, The application of pattern recognition in the automatic classification of microscopic rock images. *Computers & Geosciences*, 60, 126-133, 2013.
- [37] A. Paszke, S. Gross, F. Massa, A. Lerer, J. Bradbury, G. Chanan, S. Chintala, Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library. *Advances in neural information processing systems*, 32, 2019.
- [38] P. Pinheiro, R. Collobert, Recurrent convolutional neural networks for scene labeling. In ICML, 2014.
- [39] T. Pohlen, A. Hermans, M. Mathias, and B. Leibe. Fullresolution residual networks for semantic segmentation in street scenes. arXiv:1611.08323, 2016.
- [40] T. Pohlen, A. Hermans, M. Mathias, B. Leibe, Fullresolution residual networks for semantic segmentation in street scenes. 2016, arXiv:1611.08323.
- [41] Y. Bazi, L.Bashmal, M. M. Al Rahhal, R. A. Dayil, N. A. Ajlan, Vision Transformers for Remote Sensing Image Classification. *Remote Sens.*, 13, 516, 2021, <https://doi.org/10.3390/rs13030516>
- [42] A. Dosovitskiy, L. Beyer, A. Kolesnikov, D. Weissenborn, X. Zhai, T. Unterthiner, M. Dehghani, M., Minderer, G. Heigold, S. Gelly, J. Uszkoreit, N. Houlsby, An Image Is Worth 16x16 Words:Transformers For Image Recognition At Scale., ICLR, 2021. arXiv:2010.11929v2.
- [43] O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox, U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Computer Science*, 2015.

Kanaldaki Isınmış Tümsek Desenli l Elemanlardan Olan Isı Transferinin Karışık Taşınımla İyileştirilmesinin İrdelenmesi

**Koray KARABULUT¹
Yeliz ALNAK²**

- 1- Doç. Dr.; Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü. kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5680-0988
- 2- Dr. gr. Üyesi; Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü. ytas@cumhuriyet.edu.tr ORCID No: 0000-0003-4383-3806

ÖZET

Doğal taşınım ile olan ısı transferi engellenmeden zorlanmış taşınım ile desteklenerek oluşturulan karışık taşınım ile ısı transferi iyileştirilebilmektedir. Bu çalışmada, dikey bir kanalın karşılıklı yüzeylerine yerleştirilen ısınmış üç adet tümsek desenli elemanlardan olan karışık taşınım ile ısı transferi ve desenler etrafındaki akış özellikleri sayısal olarak değerlendirilmiştir. Araştırmada akışkan olarak 293 K kanal giriş sıcaklığında sıkıştırılamaz su ve %2 hacimsel konsantrasyona sahip Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılmıştır. Akışın ısınmış desenli elemanlara yönlendirilerek karışık taşınım etkisinin iyileştirilmesi amacıyla kanal içerisine sağ ve sol olmak üzere her iki üst giriş kısmından 30° ve 60° açılı akış yönlendirici kanatçıklar konumlandırılmıştır. Sayısal çözümleme, iki boyutlu, sürekli ve laminar akış şartlarında süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin Ansys-Fluent programı kullanılarak çözülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Tümsek desenli elemanlar sabit ısı akıllı iken, kanatçıklar ve kanalın desenli eleman harici yüzeyleri adyabatik olarak tasarlanmıştır. Çalışmada, kullanılan Reynolds sayısının (Re) değer aralığı 50-200, değiştirilmiş Richardson sayısı (Ri^*) değerleri ise 50 ve 200, kanatçık uzunluğuna bağlı AGM (Akış Geçiş Mesafesi) değeri ise 2 olarak uygulanmıştır. Ulaşılan sonuçlar, literatürdeki deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılarak birbirleriyle tutarlı oldukları bulunmuştur. Sonuçlar, Re sayısına bağlı olarak farklı Ri^* sayısı değerlerinde ısınmış desen elemanlarının her biri için su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılarak değişik kanatçık açılarında ortalama Nu sayısının (Nu_m) ve yüzey sıcaklığının (T_s) değişimleri olarak incelenmiştir. Ayrıca, Al_2O_3 -su nanoakışkanı için Ri^* ve Re sayılarının 200 değerinde kanatçıksız ve 30° ve 60° açılı kanatçıklı kanal durumlarında karışık taşınımın hız, akım çizgisi ve sıcaklık konturu dağılımları incelenmiştir. Sonuçlar, sol üst taraftaki tümsek nesne için $Ri^*=50$ ve $Re=150$ değerinde 60° kanatçık açılı kanalda Al_2O_3 -su nanoakışkanının su akışkanına göre Nu_m sayısında %36,23 daha fazla artışa sebep olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler – Karışık Taşınım, Tümsek Desen, Nanoakışkan, Isı Transferi, Kanatçık.

GİRİŞ

Günümüzde, enerji üretimi ülkelerin öncelikli gündemleri arasında yerini almaktadır. Teknoloji alanında sağlanan gelişmeler, kalkınma hamleleri, hızlı nüfus artışı ve sanayileşme paralelinde ülkelerin gün geçtikçe enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artış göstermektedir. Bu nedenle, birçok ülke bu ihtiyaç temelinde ulusal enerji politikaları oluşturarak enerji portföyünü iyileştirme yönünde adımlar atmaktadır. Bu amaca yönelik

olarak ısı transferi uygulamalarında da yeni yaklaşımlarla geliştirilmiş ekipmanların verimliliklerinin artırılarak işletme maliyetleri düşük, çevre hassasiyeti gözetilmiş ve güvenliği yüksek ürünler geliştirme çalışmaları son yıllarda yoğunlaşmıştır (Alnak ve Karabulut, 2024:161).

Isınmış elektronik elemanların soğutulması, daha hızlı, daha küçük ve daha güvenilir ekipmanların tasarlanması bakımından oldukça önemlidir. Uygulamada ısı yayan birçok eleman dizileri dikey veya eğimli paralel plaka kanalları arasında yerleştirilerek soğutulmaktadır. Böylece, cihazdan elde edilen verimlilikte artış sağlanırken, oluşabilecek ısıl gerilmelere karşı önlem alındığından cihazın ömrü uzatılabilmekte ve maddi açıdan da kazanç sağlanabilmektedir.

Bununla birlikte, kanal içi akış ve ısı transferi uygulamalarında doğal ve zorlanmış taşınımın birlikte kullanıldığı karışık taşınım uygulamaları son zamanlarda mühendisler ve tasarımcılar tarafından yoğun olarak değerlendirilen uygulamalar arasında bulunmaktadır. Karışık taşınımla ısı transferi üzerine yapılan araştırmalar, ısı eşanjörleri, kimyasal işleme ekipmanlarında, güneş enerjisi toplayıcılarının ve elektronik soğutma vb. gibi uygulamalar birçok mühendislik alanında giderek daha fazla ilgi görmektedir. Böylece, ısınmış olan bileşenler tarafından etrafındaki akışkan ile olan sıcaklık farkına dayalı olarak gerçekleşen doğal taşınımla olan ısı transferinin engellenmeden zorlanmış taşınımla desteklenerek ısı transferi artırılabilir.

Literatürde karışık taşınımla ısı transferi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bunlardan birinde, Papanicolaou ve Jaluria (1993:463) çalışmalarında yalıtılmış ve sabit değerde bir ısı kaynağı içeren dikdörtgensel bir sistemdeki karışık taşınımı irdemişlerdir. Auletta ve ark. (2001:4345) ise dik olarak konumlanmış ve simetrik olarak ısıtılan aşağı yönlü akışı olan bir kanalda adyabatik olarak genişlemenin ısı transferi üzerindeki etkilerini sayısal olarak değerlendirmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda ortalama Nusselt (Nu) sayısında eğim açısına büyük ölçüde bağlı olarak %10-20 arasında bir artış olduğunu belirlemişlerdir. Moukalled ve ark. (2000:1947) eğimli yüzeylerine ısıtma uygulanan ve duvarlarının ise adyabatik olarak şartlandırıldığı dik bir kanal için karışık ısı taşınımının sayısal olarak araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kesit alanının artırılması durumunda konveks yüzeyinin ısıtıldığı bir kanal için akış hızının azaldığı ve bu duruma bağlı olarak kaldırma kuvvetlerinin arttığı belirlenirken; ısıtılan yüzeylere yakın bölgelerde düşük değerlerde Ri sayıları ve karşısındaki dik duvarda ise yüksek Ri sayıları değerlerine ulaşmışlardır. Rao ve Narasimham (2007:3561) birbirlerine göre yatay olarak sıralanmış ısı üretimi olan elemanlardan oluşan duvarın olduğu yatay ve dik bir kanaldaki karışık konveksiyonun sayısal olarak incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Karışık konveksiyonda doğal konveksiyonun neden olduğu kütle akış hızının Gr ve Re sayılarıyla ilişkili olduğu göz önüne alınarak, alt tabakadan iletim yoluyla çalışma akışkanına aktarılan ısı

%41-47 oranında arttığı belirlenmiştir. Rosas ve ark. (2017:155) bir tarafı adyabatik diğer tarafı sabit bir ısı akısına sahip olan yarı silindirik engel içeren dik bir kanaldaki karışık konveksiyon sonucu oluşan ısı transferini deneysel olarak araştırmışlardır. Noktasal sıcaklık dağılımlarını yarı silindirik engelin açıl konumlarına ve engelin uzunluğu boyunca elde ederken; üç boyutlu vorteks yapılarını ve engele yakın kısımdaki gelişimlerini değerlendirmişlerdir. Young ve Vafai (1999:34) bir duvarına sıralı olarak yerleştirilmiş ısıtılan engellerin bulunduğu kanaldaki zorlanmış taşınım ısı transferinin sayısal olarak analizini gerçekleştirmişlerdir. İncelemelerinde engellerin yüksekliğinin, genişliğinin, aralarındaki mesafenin, engellerin sayısının, ısı iletim katsayılarının, ısıtılma yöntemlerinin ve akışkanın Re sayısının değiştirilmesinin ısı transferi üzerindeki etkilerini çalışmışlardır. Sonuçlar, daha uzun bir engel gibi geometrik olarak farklı engellerin uygun şekilde yerleştirilmesinin, çevresindeki ısı transferini pasif olarak arttırmak için kullanılabileceğini göstermiştir. Karabulut ve Alnak (2024:1) birbirine paralel dikey levhaların sol yüzeyi üzerinde iki adet yamuk geometrili sabit ısı akılı elektronik engel bileşenlerinin bulunduğu bir kanalda karışık taşınım ısı transferi ve engeller etrafındaki akışkan hareketi sayısal olarak incelemişlerdir. Akış geçiş mesafesinin 4 ve değiştirilmiş Richardson sayısının 150 olduğu değerler için kanalda kullanılan su akışkanının Nu_m sayısının 45° açılı kanatçıklı durumda kanatçıksız duruma göre %1.54 daha fazla olduğu belirlemişlerdir. Özdemir ve ark. (2023:1805) sabit ısı akılı silindirik ve dikdörtgen olmak üzere iki farklı engele sahip dik bir kanaldaki karışık taşınım ısı transferi özelliklerini sayısal olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında akışkan olarak su kullanmışlardır. Nu sayısının engeller arası uzaklıkların ve doğal taşınım akımlarının yoğunluklarının artmasıyla genel itibarıyla artış sergilediğini keşfetmişlerdir.

Geleneksel ısı transferi akışkanlarının içerisine nano boyutta parçacıkların, belirli hacimsel oranlarda katılarak oluşturulan süspansiyonlara “nanoakışkan” denilmektedir. Nanoakışkan kullanılarak yapılan ısı transferi uygulamalarında; akışkan içerisine süspanse edilen parçacıklar akışkanın ısı kapasitesini artırır. Parçacıklar arasındaki etkileşim ve çarpışmalar akış içerisinde çalkantılara ve türbülans şiddetinin artmasına neden olur. Böylece, daha yüksek ısı iletimi ile birlikte çalkantı şiddeti ve geniş yüzey alanı daha çok ısı transferine izin verir. (Kılıç, 2018:121). Bu nedenle, doğal ve zorlanmış taşınım hareketlerinin birlikte teşkil edildiği karışık taşınım uygulamalarında da ısı transferini iyileştirici bir faktör olarak nanoakışkanların kullanıldığı çeşitli çalışmalara literatürde sınırlı olsa da rastlanmaktadır. Farklı akışkanların kullanılmasıyla yapılan çalışmalardan birinde You ve Li (2021:1107) eğik bir kanaldaki karışık konveksiyonu incelemek amacıyla hibrit nanoakışkanlar kullanarak eşit ısı akısına sahip duvarların bulunduğu bir geometride sayısal analiz gerçekleştirmişlerdir. Akışın yönünün tersine çevrildiği durumda duvar yüzeyi sürtünmesinin ve

hibrit nanoakışkandaki Nu sayısının, nanoparçacık hacim konsantrasyonuna ve basınç parametrelerine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada, Al-Obaidi ve ark. (2019:11) tek bir yüzeyine ısı akısı verilen dik bir kanal için nanoakışkan kullanılmasının karışık konveksiyon davranışlarına olan etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, farklı nanoakışkanların, Re sayısının ve geometrik boyutlardaki değişimlerin etkilerini sayısal olarak araştırmışlar ve SiO_2 nanoparçacıkları içeren nanoakışkanın en yüksek Nu sayısı değerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Algehyne ve ark. (2024:1) çalışmalarında Ag ve Al_2O_3 den oluşan bir hibrit nanoakışkanın bir germe levhası üzerindeki zorlanmış ve karışık konveksiyon akışlarının karşılaştırmalı analizi yapmışlardır. Mevcut çalışmalarda viskoz dağılım, ısı kaynağı ve Joule ısıtması kullanılmaktadır. Zorlanmış taşınımında karışık taşınım ile kıyaslandığında akım çizgilerinin daha yakın olduğu yani buna bağlı olarak değişimin daha fazla olduğu bulunmuştur. Mozafary ve ark. (2024:88) sayısal olarak kare bir boşlukta doğal, karışık ve zorlanmış konveksiyonun üç modunda Al_2O_3 -Su nanoakışkanını kullanarak nanoparçacık hacim oranı, Richardson sayısı, Reynolds sayısı ve Rayleigh sayısı gibi bağımsız değişkenleri değiştirerek ısı transferi ve akış yapısını değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, karışık konveksiyon için en yüksek ve en düşük Nu sayısı değerlerinin sırasıyla %17.68 ve %14.84 olduğunu ve zorlanmış konveksiyon için ise sırasıyla %30.46 ve %17.94 olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ghasemi ve Ranjbar (2025:1) dikey bir kanalda farklı konsantrasyonlarda Al_2O_3 -Su nanoakışkan akışı için zorlanmış ve doğal konveksiyon etkileri altında entropi üretimini analiz etmişlerdir. Sonuçlar, sıcaklık farkının artmasıyla entropi üretiminin arttığını göstermiştir.

Bu çalışmada, tümsek desenli ısınmış elemanın karışık taşınım akışıyla ısı transferi ve kanaldaki akış yapısı sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal çözümleme, iki boyutlu, sürekli ve laminar akış şartlarında süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin Ansys-Fluent programı kullanılarak çözülmesiyle yapılmıştır. Çalışma akışkanları olarak sıkıştırılamaz özellikte su ve %2 hacimsel konsantrasyonlu Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılmıştır. Literatürde kullanılan nanoakışkanlarla kıyaslandığında konsantrasyon düşük olduğundan nanoakışkan tek fazlı akışkan olarak düşünülerek modelleme yapılmıştır. Kanalda ikisi sol tarafta ve biri ise sağ tarafta olmak üzere üç adet tümsek desenli eleman bulunmaktadır. Akışın kanal içerisindeki ısınmış desenli elemanlara yönlendirilerek karışık taşınım etkisinin iyileştirilmesi amacıyla kanal içerisine her iki üst giriş kısmından 30° ve 60° açılı akış yönlendirici kanatçıklar yerleştirilmiştir. Kanatçıklar, AGM (Akış Geçiş Mesafesi) 2 olacak şekilde sabit olarak ayarlanmıştır. Tümsek desenli elemanlar sabit ısı akılı iken, kanatçık ve kanalın desenli elemanlar hariç yüzeyleri adyabatik olarak tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan değiştirilmiş Richardson sayısı (Ri^*) değerleri 50 ve 200 olarak alınırken, Reynolds sayısının (Re) değer

aralığı ise 50-200 olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, Re sayısına bağlı olarak değişen Ri^* sayısı değerlerinde ısınmış tümsek desen elemanlarının su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanını göz önüne alarak ortalama Nu sayıları (Nu_m) ve yüzey sıcaklıkları (T_s) üzerindeki etkisinin değişimleri olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, Al_2O_3 -su nanoakışkanının Ri^* ve Re sayılarının 200 değerleri için kanatçısız ve 30° ve 60° açılı kanatçıklı durumlarda kanaldaki karışık taşınımın hız ve sıcaklık konturu dağılımları görselleştirilerek detaylı bir şekilde incelenmiştir.

SAYISAL YÖNTEM

Kanalın üst girişinden üniform olarak sabit u_0 hızı ile giren akışkan akımı sonucu meydana gelen zorlanmış taşınım ile ısınmış olan elemanlardan kaldırma kuvvetinin etkisiyle oluşan doğal taşınım akımlarıyla birlikte karışık taşınım akımları oluşmaktadır. Kanalın girişinden itibaren her iki yüzeyden yerleştirilen akış yönlendirici kanatçıklarla, hem akışkanın ısınmış engel elemanlarına doğru yönlendirilmesi hem de kanalda ve desenli elemanlar etrafında akışın hızlandırılarak zorlanmış taşınım hareketleriyle daha iyi bir karışık taşınım akımı oluşturulması amaçlanmaktadır.

Kanaldaki karışık taşınım ısı transferinin çözülmesinde Ansys-Fluent programından yararlanılmıştır. Ayırıklaştırma yöntemi olarak momentum denklemleri için “Second Order Upwind” yöntemi tercih edilmiştir. Sayısal çözümlerin yakınsaması için yakınsama kriteri momentum denklemi için 10^{-6} ve enerji denklemi için 10^{-7} olarak alınmıştır.

Bu çalışmada ele alınan akışın, zamandan bağımsız, sıkıştırılamaz, iki boyutlu ve laminar olduğu kabul edilirken, dikey olarak konumlandırılan kanalda yer çekimi kuvveti aşağı yönlü olarak modellenmiş ve kaldırma kuvvetinin etkisi de hesaba katılmıştır.

Kartezyen koordinatlarda zamandan bağımsız, sıkıştırılamaz akış için süreklilik, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri aşağıda sunulmuştur (Özdemir ve ark., (2023:1809)).

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v - \rho g \quad (3)$$

Enerji denklemi

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

Çalışmada kullanılan boyutsuz sayılardan değiştirilmiş Grashof sayısı (Gr^*), Richardson sayısı (Ri^*) ve Reynolds sayısı (Re) aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$Gr^* = \frac{g \beta \dot{q} D^4}{k \nu^2} \quad (5)$$

$$Ri^* = \frac{Gr^*}{Re^2} \quad (6)$$

$$Re = \frac{u_o D}{\nu} \quad (7)$$

Burada, g yerçekimi ivmesi (m/s^2), β ısı genleşme katsayısı ($1/K$), $\dot{q}$ ısı akısı (W/m^2), k ısı iletim katsayısı (W/mK), ν kinematik viskozite (m^2/s)' dir.

Desenli engel elemanlarının yüzeylerindeki ortalama ısı taşınım katsayısı Eş. (8), Nusselt sayısı (Nu) ise Eş. (9) yardımıyla hesaplanacaktır.

$$h = \frac{\dot{q}}{(T_s - T_o)} \quad (8)$$

Nu sayısı, taşınım ile ısı geçişinin iletimle ısı geçişine oranı olarak değerlendirilir.

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = h (T_s - T_o) \text{ ve } Nu = \frac{h (2b+a)}{k} \quad (9)$$

Ortalama ısı taşınım katsayısı (h_m)

$$h_m = \frac{1}{(2b+a)} \int_0^{(2b+a)} h d(a+b) \quad (10)$$

Ortalama Nu sayısı (Nu_m) Eş. 8 ile hesaplanmaktadır.

$$Nu_m = \frac{\dot{q} D}{k (T_s - T_o)} = \frac{h_m (2b+a)}{k} \quad (11)$$

Bu eşitliklerde, $\dot{q}$ ısı akısı, u_o dikey kanalın üst kısmından giren akışkanın hızı (m/s), T_e ısınmış engelin ortalama sıcaklığı iken T_o , akışkanın kanal girişindeki sıcaklığıdır (K). $2b+a$ akışkanla temasta olan tümsek şekilli yüzeyin karakteristik uzunluğu (m) ölçüsü iken; u ve v kartezyen koordinatlarda akışkanın x ve y yönlerindeki hızlarıdır (m/s). k akışkanın ısı iletim katsayısı (W/mK), h yüzey üzerindeki yerel ısı taşınım katsayısı (W/m²K), n ise yüzeye dik yöndür.

Akış Geçiş Mesafesi (AGM), kanal genişliğinin kanatçık uzunluğuna oranı olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$AGM = \frac{W}{c} \quad (12)$$

Burada, W kanal genişliği (m) ve c ise akış yönlendirici kanatçık uzunluğudur (m).

Nanoakışkanın yoğunluğu

$$\rho_{na} = (1 - \varphi)\rho_{na} + \varphi\rho_{np} \quad (13)$$

Nanoakışkanın ısı kapasitesi

$$(\rho c_p) = (1 - \varphi)(\rho c_p)_{su} + \varphi(\rho c_p) \quad (14)$$

Nanoakışkanın ısıl genleşme katsayısı

$$(\rho\beta)_{na} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_{su} + \varphi(\rho\beta)_{np} \quad (15)$$

Nanoakışkanın ısıl iletkenliği

$$k_{na} = \frac{k_{np} + 2k_{su} + 2(k_{np} - k_{su})\varphi}{k_{np} + 2k_{su} - 2(k_{np} - k_{su})\varphi} k_{su} \quad (16)$$

Nanoakışkanın viskozitesi

$$\mu_{nf} = \mu_{su}(1 + 2.5\varphi) \quad (17)$$

Bu denklemlerde, ϕ ve ρ_{np} sırasıyla nanoakışkanın konsantrasyonu ve nanoparçacığın katı haldeki yoğunluğunu c_p özgül ısıyı belirtmektedir. na ve np sırasıyla nanoakışkan ve katı nanoparçacık'ı temsil etmektedir.

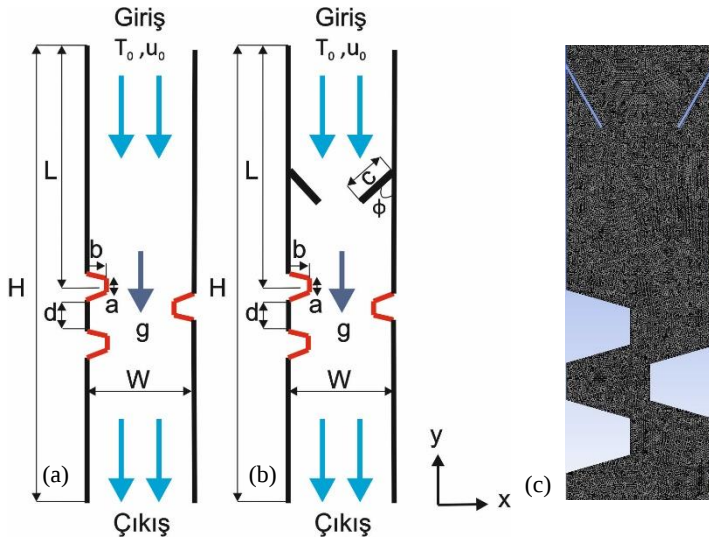
Çalışmada kullanılan su ve %2 hacimsel konsantrasyonlu nanoakışkana ait termofiziksel özellikler Tablo 1’de gösterilmekte olup; denklem (13-17)’ den faydalanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 1: Su ve nanoakışkana ait termofiziksel özellikler (293 K)

Akışkan	k (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	μ (Ns/m ²)	β (1/K)
Su	0,613	998,2	4182	0,001003	0,0001430
Al ₂ O ₃ -su nanoakışkanı	0,65037	1188,236	3484,44	0,0010531	0,0001540

SAYISAL HESAPLAMA ALANI

Sayısal çözümlemede kullanılan hesaplama alanı Şekil 1 (a) ve (b)’ de belirtilmektedir. Şekil 1 (a)’da kanatçıksız tümsek desenli üçlü ve Şekil 1 (b)’ de ise dikey kanalın her iki yüzeyiyle farklı ϕ açısı yapan kanatçıkların olduğu kanal kesiti sunulmaktadır. Yapılan kabuller ve sınır şartları Tablo 2’de verilirken, dikey kanalın birbirine paralel yüzeylerine yerleştirilmiş olan tümsek desenli ve sabit ısı akısına sahip elemanlara ait ölçüler ve çalışmada uygulanacak sınır şartları Şekil 1 üzerinde de belirtilirken, kanallara ve kanatçığa ait boyutsal ölçüler Tablo 3’ de sunulmaktadır. Bununla birlikte, sayısal hesaplamalarında kullanılan tetragonal (düzgün dört yüzlü) ağ yapısı Şekil 1 (c)’de gösterilmektedir.



Şekil 1: Çalışmada kullanılan kanal modelleri (a) kanatçıksız (b) kanatçıklı (c) ağ yapısı

Tablo 2: Kullanılan kabuller ve sınır şartları

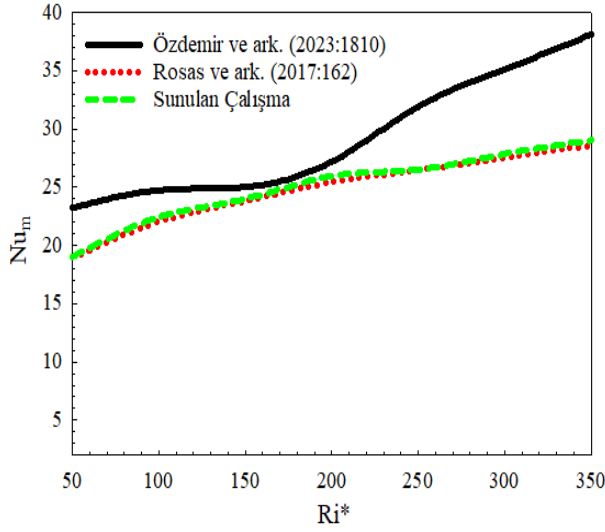
a)	Sürekli, iki boyutlu ve laminar akış hacmi kullanılmıştır
b)	Sıkıştırılmaz akışkan olarak su ve Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanılmıştır
c)	Akışkanın ısı özellikleri sabit olup, sıcaklıktan bağımsızdır
d)	Kanalın ve kanatçıkların yüzeyleri adyabatiktir
e)	Kanalın çıkış basıncı, atmosfer basıncına eşit olarak alınmıştır ($P_c=P_{atm}$)
f)	Kanalın çıkışındaki sıcaklık farkının ihmal edilebilecek kadar az miktarda olduğu kabul edilerek $\partial T/\partial y=0$ olarak belirlenmiştir
g)	Kanal, kanatçık ve tümsek desenli nesne yüzeylerinde kaymama sınır şartı olduğu ve bu nedenle bahsedilen yüzeylerde tüm hız bileşeni değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir.
h)	Tümsek desenli nesne yüzeylerine kanaldaki Re ve Ri^* sayılarına bağlı olarak Gr^* sayısına karşılık gelen sabit ısı akısı uygulanmıştır.
i)	Akışkanın kanala giriş sıcaklığı 293 K' dir.
j)	Su için çalışılan $Re=200$ ' de akışkan giriş hızı 0,0040172 m/s' dir.
k)	Kanal girişinde “velocity inlet” ve çıkışında ise “pressure outlet” sınır şartı geçerlidir.
l)	Dikey kanala aşağı yönlü yerçekimi ivmesi uygulanmıştır

Tablo 3: Kanal ve kanatçığa ait boyutsal ölçüler

Değişken	Ölçü (mm)
L	1000
W	50
H	1800
a	25
b	12,5
c	10,3
ϕ	30° ve 60°

SONUÇLARIN DOĞRULANMASI

Çalışmanın sonuçları, Rosas ve ark. (2017:162)'nin deneysel çalışması ile Özdemir ve ark. (2023:1810) tarafından sonlu hacimler yönteminin kullanıldığı FloEFD programıyla ulaşılan sayısal sonuçlarla Şekil 2'de görüldüğü gibi kıyaslanmıştır. Bununla birlikte, Özdemir ve ark. (2023:1810)'nın sayısal çalışmasıyla olan farklılıkların ağ sayısı ve yapısına bağlı olarak özellikle yüksek Ri^* sayılarında oluşan girdap bölgelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sunulan çalışma ile Rosas ve ark. (2017:162)'nin deneysel çalışmasının birbirleriyle oldukça uyumlu oldukları belirlenmekle birlikte, bu sonuçlara dayanarak çalışmanın doğru ve kabul edilebilir olduğu söylenebilmektedir.



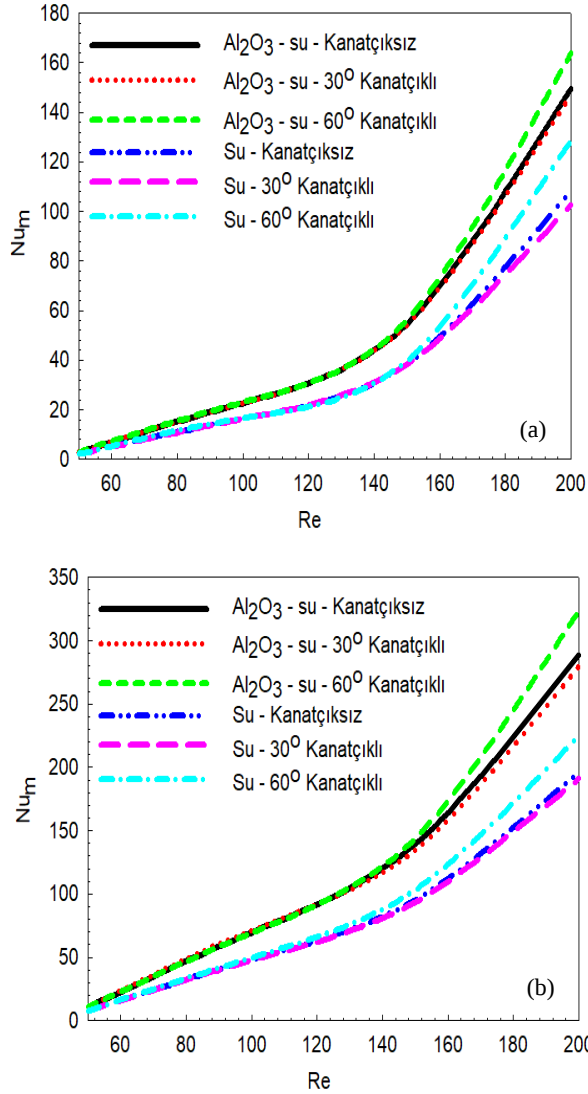
Şekil 2: Çalışmanın sonuçlarının deneysel ve sayısal sonuçlarla kıyaslanarak doğrulanması

ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE BULGULAR

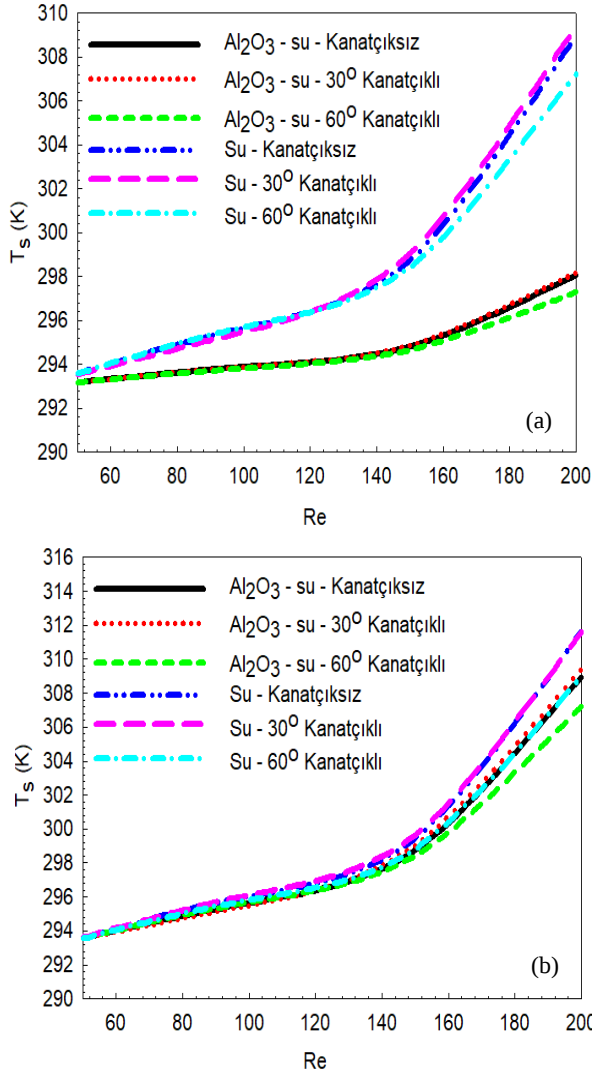
Şekil 3’de (a) $Ri^*=50$, (b) $Ri^*=200$ için dikey bir kanalda sol alt tarafta bulunan ısınmış tümsek yüzeyli nesnenin karışık taşınım ile ısı transferinde su ve %2 hacimsel konsantrasyonlu Al_2O_3 -su nanoakışkanının ortalama Nu_m sayısı üzerindeki etkisi Re sayısına bağlı olarak incelenmektedir. Her iki Ri^* sayısı değeri için de (Şekil 3(a) ve (b)) su akışkanına göre Al_2O_3 -su nanoakışkanının Nu_m değerleri daha yüksek olmakla birlikte Re sayısının artışıyla artan zorlanmış taşınım akımlarına bağlı olarak Nu_m değerleri artmaktadır. Bununla birlikte, 60° açılı kanatçıklı kanalda her iki akışkan ve Ri sayısı değeri için Nu_m sayıları daha yüksek iken, Ri^* sayısının artışıyla artan doğal taşınım akımları karışık taşınım akımlarını iyileştirdiğinden daha yüksek ısı transferi değerlerine ulaşılabilir. Ri^* ve Re sayısının 200 ve kanatçık açısının 60° olduğu durumda Al_2O_3 -su nanoakışkanının Nu_m sayısı su akışkanından %43,92 daha fazla olurken, $Ri^*=50$ ve $Re=200$ için bu değer %27,23 daha yüksektir. Bu durum, Ri^* sayısının karışık taşınım üzerindeki etkisini göstermektedir.

Sol alt taraftaki tümsek desenli nesnenin yüzeyi boyunca sıcaklığın (T_s), (a) $Ri^*=50$ ve (b) $Ri^*=200$ sayılarına göre Re sayısına bağlı değişimi Şekil 4’de karışık taşınım etkilerini göz önüne alarak su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanını kullanılması durumlarında değerlendirilmiştir. Ri^* sayısının artışıyla artan doğal taşınım akımlarının Re sayısının da artışıyla zorlanmış

taşıyım akımlarıyla desteklenmesi sonucu kanal içerisinde T_s değerlerindeki artış daha belirgin hale gelmektedir. Bununla birlikte, Al_2O_3 -su nanoakışkanı için düşük Ri^* sayısı değerinde T_s daha az iken $Ri^*=200$ olduğunda hem su için hem de nanoakışkanı için nesnenin yüzey sıcaklığı artmaktadır. Çünkü, artan doğal taşıyım akımları kanal içerisinde yeniden dolaşım bölgelerinin artışına sebep olarak kendi içinde sirkülasyona uğrayan akışkan bölgelerini artırmaktadır.



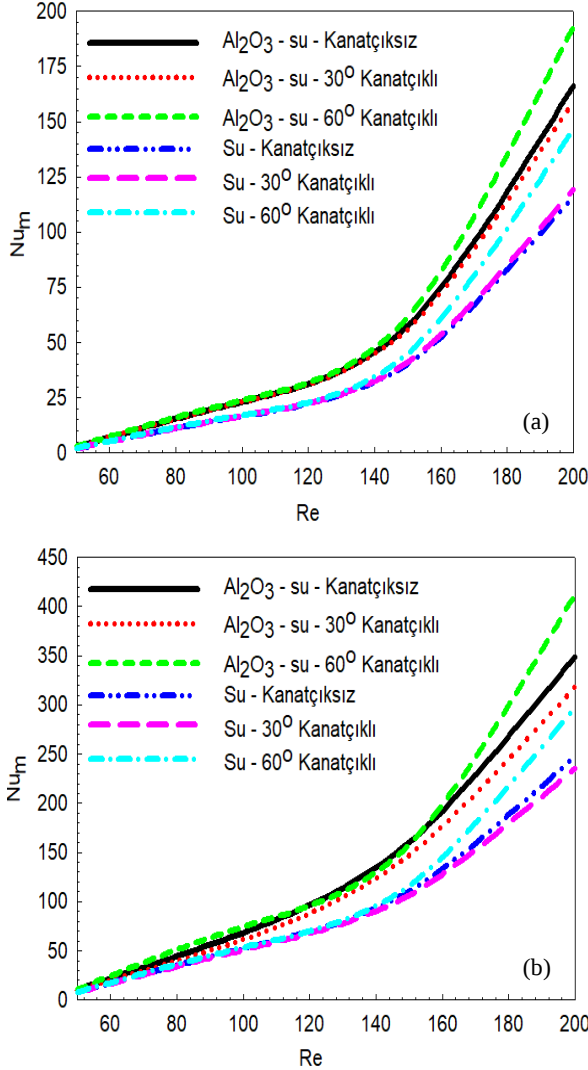
Şekil 3: Karışık taşıyımli dikey kanalda sol alt tümsek yüzey boyunca Nu_m sayısının Re sayısıylı değişimi (a) $Ri^*=50$ (b) $Ri^*=200$



Şekil 4: Karışık taşınımli dikey kanalda sol alt tümsek yüzey boyunca sıcaklık değişiminin (T_s) Re sayısı ile değişimi (a) $Ri^*=50$ (b) $Ri^*=200$

(a) $Ri^*=50$ ve (b) $Ri^*=200$ için Şekil 5’de dikey kanalın sol üst tarafında tümsek desenli ısıtmış nesnenin kanatçıksız, 30° ve 60° olmak üzere farklı açılarda kanatçık bulunan karışık taşınımın ortalama Nu sayısının (Nu_m) Re sayısına bağlı değişimleri su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanı için sunulmaktadır. Kanala kanatçık eklenmesi akışkanı sol üst taraftaki tümsek şekilli elemana yönlendirirken, kanatçık açısının artırılarak 60° ’ye çıkarılması nesne üzerindeki yeniden dolaşım bölgelerini hareketlendirerek hızlanmasını sağladığından hem su akışkanı hem de Al_2O_3 -su nanoakışkanı için her iki Ri^* sayısı durumunda da Nu_m sayısının daha yüksek olmasını

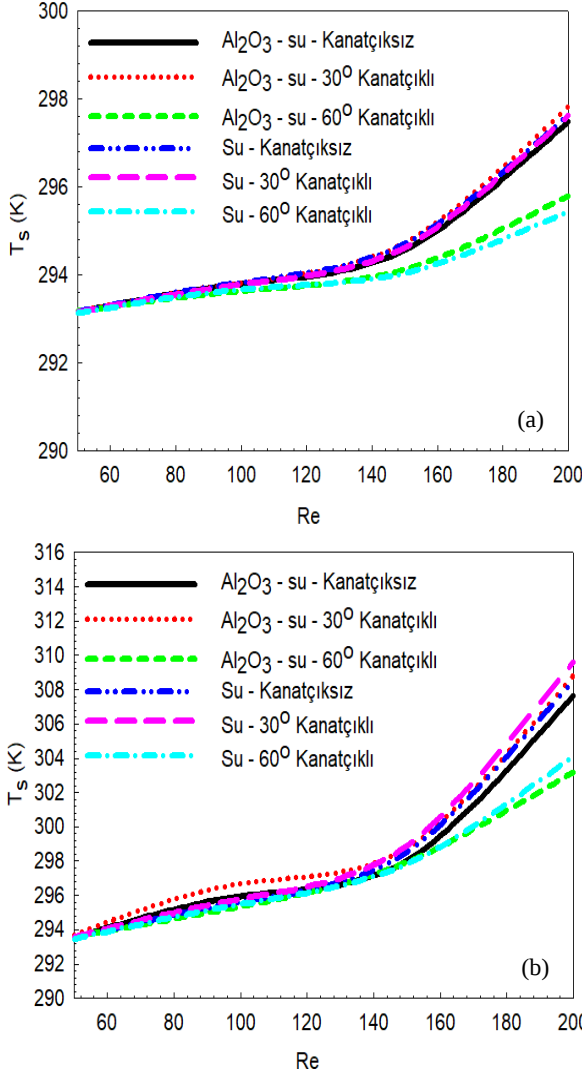
sağlamaktadır. $Ri^*=50$ ve $Re=150$ 'de 60° açılı kanalda Al_2O_3 -su nanoakışkanı için su akışkanına göre Nu_m sayısında %36,23 artış elde edilirken, bu değer $Ri^*=200$ 'de %35,68'e kadar çıkabilmektedir. Bununla birlikte, sol alt tümsek nesne ile kıyaslandığında her iki nesne arası oluşan yeniden dolaşım bölgeleri nedeniyle sol üst nesne için karışık taşınım akımları engellenmediğinden daha yüksek Nu_m sayılarına ulaşılmaktadır.



Şekil 5: Karışık taşınımlı dikey kanalda sol üst tümsek yüzey boyunca Nu_m sayısının Re sayısı ile değişimi (a) $Ri^*=50$ (b) $Ri^*=200$

(a) $Ri^*=50$ ve (b) $Ri^*=200$ değerlerinde Re sayısına bağlı olarak karışık taşınımlı dikey kanalın sol üst tarafındaki tümsek desenli nesnenin yüzeyi boyunca sıcaklığın (T_s) değişimi Şekil 6'da su ve Al_2O_3 -su

nanoakışkanı kullanılması durumları için incelenmiştir. Genel itibariyle nesnenin yüzey sıcaklıkları, Re sayısının artışına bağlı olarak kanaldaki karışık taşınım akımlarının artışıyla kanalda oluşan yeniden dolaşım bölgeleri nedeniyle artarken, nanoakışkanı için artış daha sınırlı olmaktadır. Ayrıca, sol alt taraftaki nesneye göre yüzey sıcaklık değerleri daha düşüktür. Bunun yanı sıra, $Ri^*=200$ değerinde doğal taşınım akımları arttığından oluşan yeniden dolaşım bölgeleri yüzeyden olan ısı transferini sınırladığından sıcaklık değerleri $Ri=50$ 'ye göre daha yüksektir.



Şekil 6. Karışık taşınımlı dikey kanalda sol üst tümsek yüzey boyunca sıcaklık değişiminin (T_s) Re sayısı ile değişimi (a) $Ri^*=50$ (b) $Ri^*=200$

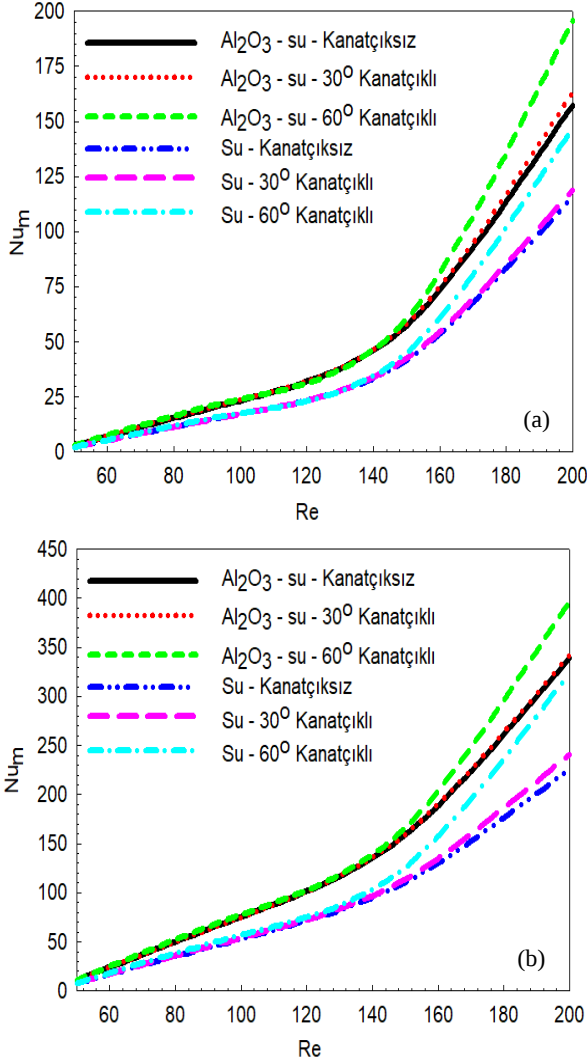
Şekil 7’de (a) $Ri^*=50$ ve (b) $Ri^*=200$ için dikey kanalın sağ tarafında sol taraftaki nesnelere göre ikisinin orta noktasında bulunan ısınmış tümsek yüzeyli bir nesnenin karışık taşınım ısı transferi performansı su ve %2 hacimsel konsantrasyonlu Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılarak farklı açılar değerlerinde kanatçık etkisinin değerlendirilmesiyle ortalama Nu_m sayısı göz önüne alınarak Re sayısına bağlı olarak araştırılmaktadır. Her iki Ri^* sayısı değeri için de su akışkanıyla kıyaslandığında Al_2O_3 -su nanoakışkanın Nu_m değerleri daha yüksek olmakla birlikte, Re sayısının artışıyla artan zorlanmış taşınım akımlarıyla karışık taşınım etkisinin artmasına bağlı olarak Nu_m değerleri artmaktadır. Buna bağlı olarak, $Ri^*=200$ için elde edilen Nu_m değerleri $Ri^*=50$ ’ye göre daha yüksektir. Ayrıca, 60° kanatçık açısında akışkanın nesneler arasında daha homojen olarak yönlendirilebilme kabiliyeti, 30° kanatçık açısına göre Nu_m sayısında daha fazla artışlar elde edilmesini sağlamıştır.

Dikey kanalın sağ tarafında bulunan tümsek desenli nesnenin yüzeyi boyunca sıcaklığın (T_s) değişimi, Re sayısına olarak Şekil 8’de (a) $Ri^*=50$, (b) $Ri^*=200$ sayıları için karışık taşınım etkilerini göz önüne alarak su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılması durumlarında değerlendirilmektedir. Her iki Ri^* sayısı değeri için de su akışkanının yüzey sıcaklık değerleri nanoakışkandan daha yüksek iken, Re ve Ri^* sayılarının artışıyla karışık taşınım akımları arttığından yüzey sıcaklık değerleri de daha fazla artış sergilemektedir.

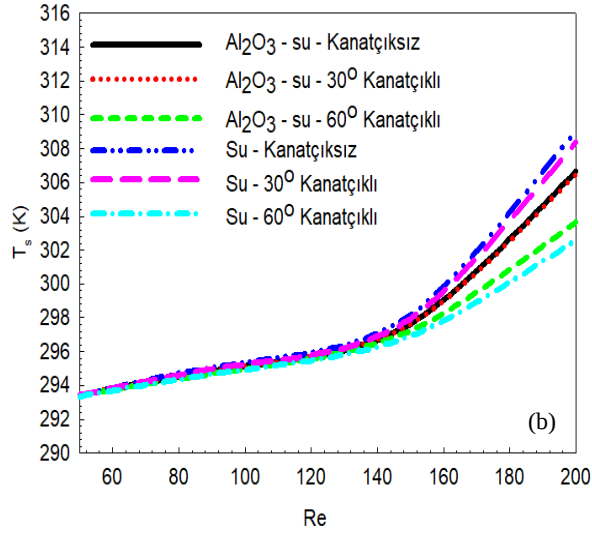
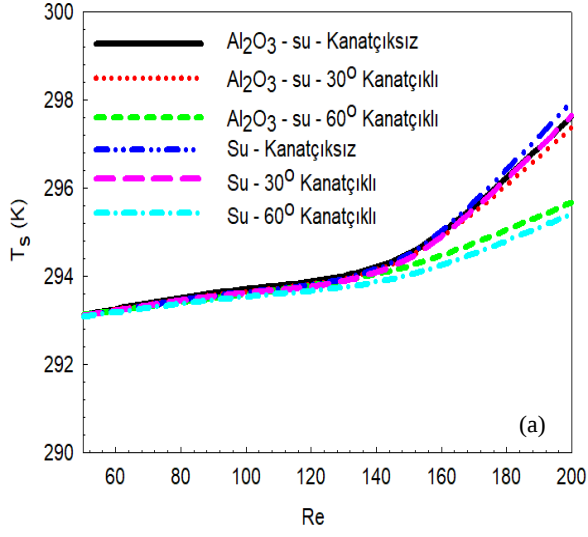
Şekil 9’ da $Ri^*=200$ ve $Re=200$ değerleri için kanatçıksız, 30° ve 60° kanatçık açılı karışık taşınım akımlı dikey kanallarda Al_2O_3 -su nanoakışkanının (a) hız ve (b) akım çizgisi konturu dağılımları verilmektedir. Kanatçıksız kanal durumunda kanalın üst kısmından gelen nanoakışkan tümsek nesnelere kısmi olarak temas edebilirken, Şekil 9(b)’de görüldüğü gibi nesnelerin etrafında oluşan yeniden dolaşım girdap bölgeleri akışkanı nesneden uzağa yönlendirmektedir. Bununla birlikte, kanala farklı açılı kanatçıklar eklendiğinde akışkanın tümsek desenli nesnelere teması iyileştirildiğinden nesneler etrafında akışkan hızlandırılırken yeniden dolaşım bölgelerinin büyüklükleri azalmaktadır. Özellikle kanatçık açısının 60° olduğu durumda yeniden dolaşım bölgelerinin şiddetleri artarken, büyüklükleri de azalmaktadır. Bu durum da karışık taşınım akımlarının artışının bir sonucu olarak elde edilen performans artışının bir göstergesi olarak görülebilir.

$Re=200$ ve $Ri^*=200$ değerleri için kanatçıksız, 30° ve 60° kanatçık açılı karışık taşınım akımlı dikey kanallarda Al_2O_3 -su nanoakışkanının sıcaklık konturu dağılımları Şekil 10’da belirtilmektedir. Kanatçıksız durumda nesne etrafında akışkan hareketliliğinin dikey kanalın diğer kısımlarına göre daha az olduğu girdap bölgelerinde akışkanda ve tümsek nesnelerin etrafında sıcaklık artışları görülmektedir. Bununla birlikte, 30° kanatçıklı kanalda kanatçıkların alt kısımlarında ve dikey duvarın sol tarafındaki tümsek nesneler arasında yüksek sıcaklıklı akışkan bölgelerine

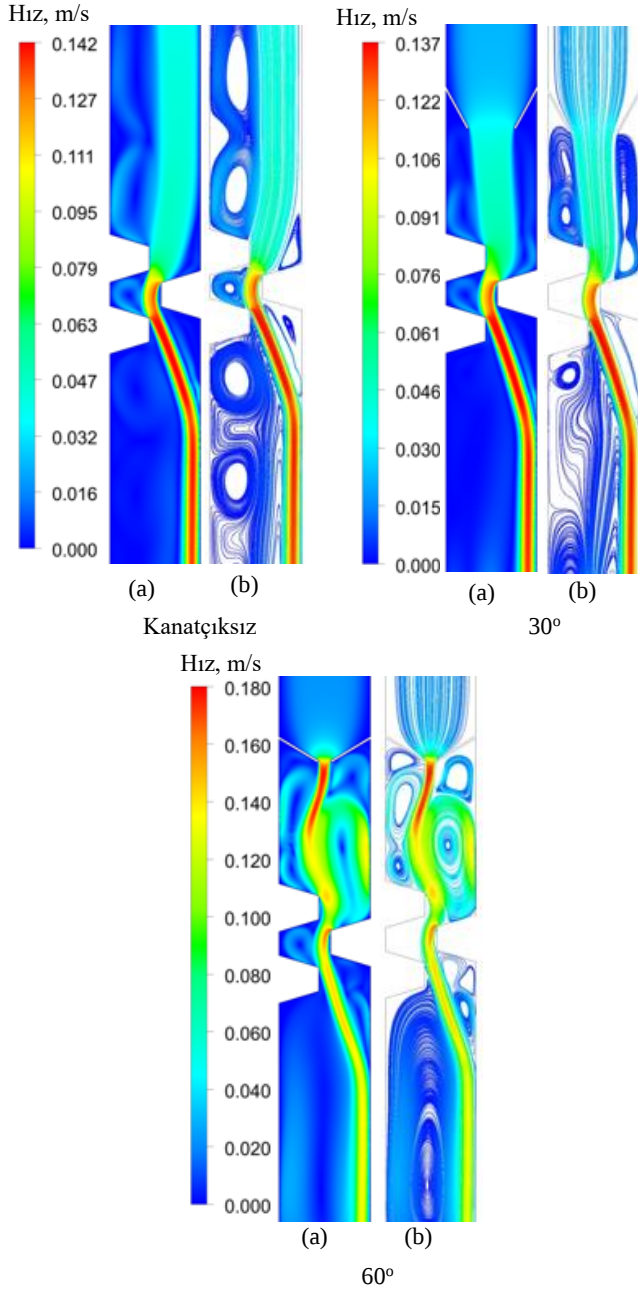
rastlanmakta iken, kanatçık açısı 60° 'ye çıkarıldığında akışkanın daha iyi karışarak taşınım etkisinin artmasıyla ısı transferi artarak sıcak akışkan bölgeleri azalmaktadır.



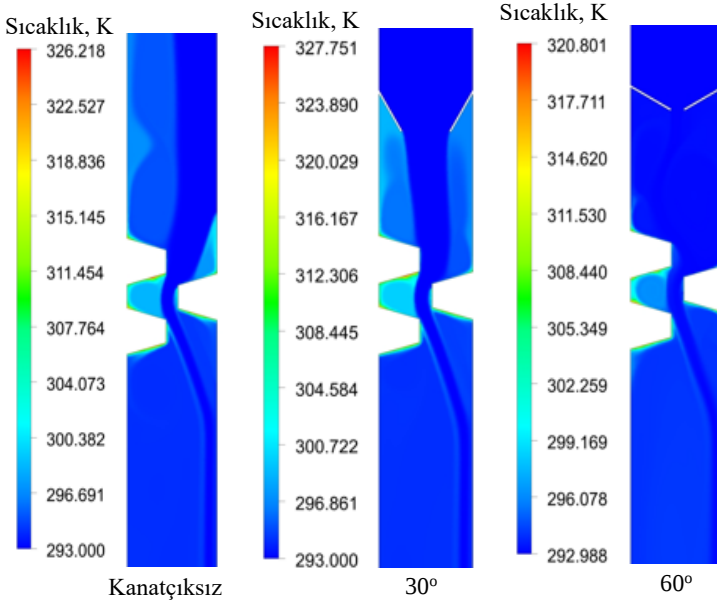
Şekil 7: Karışık taşınımlı dikey kanalda sağ taraf tümsek yüzey boyunca Nu_m sayısının Re sayısı ile değişimi (a) $Ri^*=50$ (b) $Ri^*=200$



Şekil 8: Karışık taşınımli dikey kanalda sağ taraf tümsek yüzey boyunca sıcaklık değişiminin (T_s) Re sayısı ile değişimi (a) $Ri^*=50$ (b) $Ri^*=200$



Şekil 9: $Ri^*=200$ ve $Re=200$ değerleri için kanatçiksız, 30° ve 60° kanatçık açılı kanallarda Al_2O_3 -su nanoakışkanının (a) hız (b) akım çizgisi konturu dağılımları



Şekil 10: $Ri^*=200$ ve $Re=200$ değerleri için kanatçksız, 30° ve 60° kanatçık açılı kanallarda Al_2O_3 -su nanoakışkanının sıcaklık konturu dağılımları

GENEL SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi derlenebilir:

- Sol alt taraftaki tümsek desenli nesne için her iki Ri^* sayısı değeri için de su akışkanına göre Al_2O_3 -su nanoakışkanının Nu_m değerleri daha yüksek olmakla birlikte Re sayısının artışıyla artan zorlanmış taşınım akımlarına bağlı olarak Nu_m değerleri artmaktadır.

- 60° açılı kanatçıklı kanalda her iki akışkan ve Ri sayısı değeri için Nu_m sayıları daha yüksek iken, Ri^* sayısının artışıyla artan doğal taşınım akımları karışık taşınım akımlarını iyileştirdiğinden daha yüksek ısı transferi değerlerine ulaşılabilir.

- Ri^* ve Re sayısının 200 ve kanatçık açısının 60° olduğu durumda Al_2O_3 -su nanoakışkanının Nu_m sayısı su akışkanından %43,92 daha fazla olurken, $Ri^*=50$ ve $Re=200$ için bu değer %27,23 daha yüksektir. Bu durum, Ri^* sayısının karışık taşınım üzerindeki etkisini göstermektedir.

- Ri^* sayısının artışıyla artan doğal taşınım akımlarının Re sayısının da artışıyla zorlanmış taşınım akımlarıyla desteklenmesi sonucu kanal içerisinde T_s değerlerindeki artış daha belirgin hale gelmektedir.

- Al_2O_3 -su nanoakışkanı için düşük Ri^* sayısı değerinde T_s daha az iken, $Ri^*=200$ olduğunda hem su için hem de nanoakışkanı için nesnenin yüzey sıcaklığı artmaktadır.

-Sol üst taraftaki desen için kanala kanatçık eklenmesi akışkanı sol üst taraftaki tümsek şekilli elemana yönlendirirken, kanatçık açısının artırılarak 60° 'ye çıkarılması nesne üzerindeki yeniden dolaşım bölgelerini hareketlendirerek hızlanmasını sağladığından hem su akışkanı hem de Al_2O_3 -su nanoakışkanı için her iki Ri^* sayısı durumunda da Nu_m sayısının daha yüksek olmasını sağlamaktadır.

- $Ri^*=50$ ve $Re=150$ 'de 60° açılı kanalda Al_2O_3 -su nanoakışkanı için su akışkanına göre Nu_m sayısında %36,23 artış elde edilirken, bu değer $Ri^*=200$ 'de %35,68'e kadar çıkabilmektedir.

- Sol alt tümsek nesne ile kıyaslandığında her iki nesne arası oluşan yeniden dolaşım bölgeleri nedeniyle sol üst nesne için karışık taşınım akımları engellenmediğinden daha yüksek Nu_m sayılarına ulaşmaktadır.

- Genel itibariyle sol üst taraftaki nesnenin yüzey sıcaklıkları, Re sayısının artışına bağlı olarak kanaldaki karışık taşınım akımlarının artışıyla kanalda oluşan yeniden dolaşım bölgeleri nedeniyle artarken, nanoakışkanı için artış daha sınırlı olmaktadır.

- Sol alt taraftaki nesneye göre yüzey sıcaklık değerleri daha düşüktür. Bunun yanı sıra, $Ri^*=200$ değerinde doğal taşınım akımları arttığından oluşan yeniden dolaşım bölgeleri yüzeyden olan ısı transferini sınırladığından sıcaklık değerleri $Ri=50$ 'ye göre daha yüksektir.

- Her iki Ri^* sayısı değeri için de su akışkanıyla kıyaslandığında Al_2O_3 -su nanoakışkanın Nu_m değerleri daha yüksek olmakla birlikte, Re sayısının artışıyla artan zorlanmış taşınım akımlarıyla karışık taşınım etkisinin artmasına bağlı olarak Nu_m değerleri artmaktadır.

- $Ri^*=200$ için elde edilen Nu_m değerleri $Ri^*=50$ 'ye göre daha yüksektir. Ayrıca, 60° kanatçık açısında akışkanın nesneler arasından daha homojen olarak yönlendirilebilme kabiliyeti, 30° kanatçık açısına göre Nu_m sayısında daha fazla artışlar elde edilmesini sağlamıştır.

Ulaşılan bu sonuçlara göre, kanatçıkların akışı ısınmış nesnelere yönlendirebilme kabiliyetinin kanatçık açısına bağlı olduğu kadar kanal içerisindeki doğal ve zorlanmış taşınım akımlarının oluşturduğu karışık taşınım etkilerine de bağlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, geleneksel ısı transferi akışkanı olan su haricinde Al_2O_3 -su nanoakışkanının kullanılmasının ısı transferinde iyileşme sağladığı görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) birimi tarafından STBMYO-2024-005 proje numarası ile desteklenmiştir.

REFERANSLAR

- Algehyne, E.A., Alamrani, F.M., Alrabaiah, H., Ahmad Lone S., Yasmin H., Saeed A. (2024). Comparative analysis on the forced and mixed convection in a hybrid nanofluid flow over a stretching surface: a numerical analysis. J Therm Anal Calorim. (Article in Press)
- Alnak, D.E., Karabulut, K. (2024). Investigation of heat transfer increment in electronic system surfaces by different air jet impingement applications. Journal of Engineering Thermophysics, 33(1), 161-185.
- Al-Obaidi, A.A., Salman, A.J., Yousif, A.R., Al-Mamoori, D.H., Mussa, M.H., Gaaz, T.S., Kadhum, A.A. Takriff, M.S., Al-Amiery, A.A. (2019). Characterization the effects of nanofluids and heating on flow in a baffled vertical channel. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 14, 11.
- Auletta, A., Manca, O., Morrone, B., Naso, V. (2001). Heat transfer enhancement by the chimney effect in a vertical isoflux channel. International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (22), 4345–4357.
- Ghasemi, S.E., Ranjbar, A.A. (2025). Entropy generation study on natural and forced convection of nanofluid flow in vertical channels. Engineering Reports, 7, e13096.
- Karabulut, K., Alnak, Y. (2024). Dikey bir kanalda bulunan farklı şekilli elektronik eleman çiftinden olan taşınım ısı transferinin değerlendirilmesi. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 204, 1-10.
- Kılıç, M. (2018). Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(3), 121-132.

- Moukalled, F., Doughan, A., Acharya, S. (2000). Parametric study of mixed convection in channels with concave and convex surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 1947-1963.
- Mozafari, B., Akbar, A., Arani, A., Sheikhzadeh Nooshabadi, G.A., Salimi, M. (2024). Brownian motion models effect on the nanofluid fluid flow and heat transfer in the natural, mixed, and forced convection. *Journal of Thermal Engineering*, 10(1), 88-100.
- Özdemir, S., Kılıç, M., Çalışır, T., Başkaya, Ş. (2023). Numerical investigation of enhancing mixed convection heat transfer by using semicylindrical obstacles in a vertical channel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(3), 1805-1820.
- Papanicolaou, E., Jaluria, Y. (1993). Mixed convection from a localized heat source in a cavity with conducting walls: a numerical study. *Numerical Heat Transfer Part A*, (23), 463-484.
- Rao, G., Narasimham, G. (2007). Laminar conjugate mixed convection in a vertical channel with heat generating components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 3561-3574.
- Rosas, I.Y., Treviño, C., Suástegui, L. (2017). Experimental study of mixed convection heat transfer in a vertical channel with a one-sided semi-cylindrical constriction with prescribed heat flux. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 67, 155-167.
- Young, T., Vafai, K. (1999). Experimental and numerical investigation of forced convective characteristics of arrays of channel mounted obstacles. *ASME Journal Heat Transfer*, 121, 34-42.
- You, X., Li, S. (2021). Fully developed opposing mixed convection flow in the inclined channel filled with a hybrid nanofluid. *Nanomaterials*, 11, 1107.

Gri Ajan Tabanlı Simülasyon Yöntemi İle Tahliye Anında Bireylerin Davranış Analizi

Mustafa Emrah BURHAN¹
Erdal AYDEMİR²

1. Arş. Gör.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü. mustafaburhan@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6913-707X
2. Doç. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü erdalaydemir@sdu.edu.tr ORCID No: [0000-0003-4834-725X](https://orcid.org/0000-0003-4834-725X)

ÖZET

Bu çalışma, kapalı alanlarda meydana gelen yangınlar sırasında bireylerin tahliye sürecindeki davranışlarını modellemek amacıyla, Gri Sistem Teorisi (GST) ile Ajan Tabanlı Modelleme ve Simülasyon (ABMS) yöntemlerini bir araya getiren hibrit bir yaklaşım sunmaktadır. Model, Isparta Müzesi özelinde kurgulanan yangın senaryosuna dayalı olarak geliştirilmiş ve NetLogo ortamında uygulanmıştır. Geliştirilen sistemde, bireylerin kapılara olan mesafe tahminleri, kalabalık algıları ve yönelim kararları gri sayılar ve Gri İlişki Analizi (GİA) ile modellenmiştir. Modelde bireyler, çevresel değişimlere tepki verebilen dinamik ajanlar olarak ele alınmış, davranışlarındaki belirsizlik gri aralıklarla ifade edilmiştir. Uygulama sonuçları, Gri Ajan Modeli'nin, klasik kural bazlı modellere kıyasla %15 daha yüksek tahliye başarımları ve daha düşük yaralı oranı sağladığını göstermektedir.

Ayrıca, GİA'nın çok kriterli karar yapısı sayesinde bireylerin sadece mesafe değil, kalabalık yoğunluğunu da dikkate alan daha esnek yönelim davranışları sergilediği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, afet senaryolarında daha güvenilir ve gerçekçi simülasyonlar geliştirmek adına, GST ile ABMS'nin entegrasyonunun önemini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Ajan Tabanlı Modelleme, Tahliye Simülasyonu, Gri Sistem Teorisi, Gri Ajan, Gri İlişki Analizi.

GİRİŞ

Yangınlar, hem birey sağlığı hem de kamu güvenliği açısından ciddi tehditler oluşturan ve etkileri sıklıkla geri döndürülemez sonuçlara yol açan afet türleridir. Özellikle kapalı alanlarda meydana gelen yangınlar, duman birikimi, görüş kısıtlılığı, ısı yoğunluğu ve karmaşık tahliye koşulları nedeniyle can kayıplarının en yüksek düzeyde yaşandığı olaylar arasında yer almaktadır. Literatürde, geçmişte yaşanan büyük yangın facialarının çoğunun, yetersiz tahliye planlamaları ve uygun olmayan yapı tasarımlarından kaynaklandığı görülmektedir. Bu bağlamda, yangın anında etkin ve güvenli tahliye süreçlerinin modellenmesi, yalnızca mimari ve yapısal unsurların değil, aynı zamanda insan davranışlarının da dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. İnsan davranışı ise doğası gereği karmaşık, öngörülemez ve çeşitli psikososyal değişkenlere bağlıdır. Bu nedenle geleneksel deterministik ya da kural tabanlı modelleme teknikleri, bireylerin gerçek hayattaki tepki biçimlerini tam olarak yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir.

Son yıllarda, bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla geliştirilen Ajan Tabanlı Modelleme ve Simülasyon (ABMS) yöntemleri, bireyleri bağımsız, karar alabilen ajanlar olarak modellemekte ve bu sayede daha gerçekçi tahliye simülasyonları oluşturulmasına imkân tanımaktadır. Bununla birlikte, birey davranışlarında var olan belirsizliklerin ABMS içinde temsil edilmesi hâlâ

önemli bir araştırma konusudur. Bu noktada Gri Sistem Teorisi (GST), sınırlı veya eksik bilgi altında karar verme süreçlerini modelleyebilme yeteneğiyle dikkat çekmektedir.

Bu çalışmada, ABMS'nin güçlü yönleri ile GST'nin belirsizlik yönetimi becerileri bir araya getirilerek, kapalı alan tahliyelerinde karşılaşılan en büyük problemlerden biri olan davranışsal belirsizliklerin modellenmesi amaçlanmıştır. Isparta Müzesi'ni temel alan bir senaryo çerçevesinde geliştirilen modelde, bireylerin yön tercihleri, kapılara olan mesafe tahminleri ve kalabalık algıları gri sayılarla temsil edilmiş; karar süreçleri Gri İlişki Analizi (GRA) ile yönetilmiştir. Modelin performansı, klasik kural bazlı yapılarla karşılaştırılmış ve GST destekli ABM'nin daha etkili ve esnek bir tahliye planlaması sunduğu ortaya konmuştur.

YANGIN ve TAHLIYE SÜRECİ MODELLEME

Yangın

Yangın, kontrolsüz bir yanma süreci olarak tanımlanmakta olup; yüksek ısı, yoğun duman, zehirli gazlar ve yoğun ışık gibi insan sağlığına zararlı yan ürünler üretmektedir. Yangınlar, hem bilimsel değerlendirmeler hem de neden oldukları ciddi can ve mal kayıpları nedeniyle, bireyler ve toplumlar açısından kritik bir konudur. Yaralanmalar, kalıcı sağlık problemleri ve ölümlerle sonuçlanabilen bu olaylar, devletler ve ilgili teknik-bilimsel otoritelerce afet olarak kabul edilmektedir. Geçmişte, bu tür yangın afetlerinin dünya genelinde ağır etkiler bıraktığı birçok olay yaşanmıştır. Tablo 1'de, son yüzyılda meydana gelen en yıkıcı yangın afetlerine yer verilmiştir.

Benzer şekilde ülkemizde de, yangın afetlerini sıklıkla yaşamaktadır. Son zamanlarda yaşanan birkaç büyük yangın felaketi nedeniyle, yangından korunma ve tahliye konuları önemini artırmıştır. Tablo 2'de Türkiye'de son 10 yılda gerçekleşen büyük yangın afetleri yaşanan can kaybının büyüklüğüne sıralanarak gösterilmiştir.

Tablo 1 ve Tablo 2'de yer alan bilgilere göre, can kaybının en büyük olduğu yangınlar; kapalı alan yangınlarıdır. Yangın sürecinin bina, oda veya benzeri fiziksel olarak sınırlandırılmış mekânlar içerisinde meydana gelmesi, "kapalı alan yangını" olarak adlandırılır. Kapalı alanlar, yangının yayılma şeklini, dumanın hareketini ve tahliye süreçlerini doğrudan etkilemektedir.

Kapalı alanlarda yangın, başladığı nokta ve çevresinde bulunan maddelerin yanıcı veya patlayıcı olmasına göre hızlıca yayılmaktadır. Bu durum kapalı alan yangınlarının üç temel niteliğinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 1: Son 100 Yılın En Büyük Yangın Afetleri

<i>Tarih</i>	<i>Yer (Şehir, Ülke)</i>	<i>Can Kaybı</i>	<i>Yangının Nedeni</i>	<i>Kapalı Alan Türü</i>
13 Şubat 1937	Nantong, Çin	658	Belirsiz	Sinema Salonu
30 Aralık 1903	Chicago, ABD	602	Elektrik arkı (sahne lambası)	Tiyatro (Iroquois Theatre)
23 Aralık 1995	Mandi Dabwali, Hindistan	540	Sentetik çadırın tutuşması	Okul (geçici yapı)
28 Kasım 1942	Boston, ABD	492	Kibritle tutuşturulan dekorasyon	Gece Kulübü (Cocoanut Grove)
21 Nisan 1930	Columbus, ABD	320	Muhtemel kundaklama	Cezaevi (Ohio State Penitentiary)
18 Mart 1937	New London, ABD	294	Doğalgaz patlaması	Okul (Consolidated School)
5 Aralık 1876	Brooklyn, ABD	285	Gaz lambası patlaması	Tiyatro (Brooklyn Theatre)
23 Nisan 1940	Natchez, ABD	209	Kibritle tutuşturulan dekorasyon	Gece Kulübü (Rhythm Club)
4 Mart 1908	Collinwood, ABD	175	Muhtemelen ısıtma sistemi arızası	Okul (Lake View School)
12 Aralık 1908	Boyertown, ABD	170	Gaz lambası patlaması	Tiyatro (Rhodes Opera House)

Tablo 2: Son 10 Yılda Türkiye de Yaşanan Büyük Yangın Afetleri

<i>Tarih</i>	<i>Yer (Şehir)</i>	<i>Can Kaybı</i>	<i>Yangının Nedeni</i>	<i>Kapalı Alan Türü</i>
21 Ocak 2025	Bolu (Kartalkaya)	78	Mutfak Ekipmanı (soruşturma sürüyor)	Otel (Grand Kartal Oteli)
1 Nisan 2024	İstanbul (Beşiktaş)	29	Yangın güvenlik sistemlerinin yetersizliği	Gece kulübü (Masquerade)
29 Kasım 2016	Adana (Aladağ)	12	Elektrik kontağı	Kız öğrenci yurdu
28 Kasım 2019	İstanbul (Büyüçekm ece)	5	Elektrik panosundan kaynaklanan kısa devre	Otel

- *Sınırlı Alan*: Kapalı mekanlar, yangının yayılmasını fiziksel olarak sınırlandırabilir, ancak bu durum dumanın ve ısıнын birikmesine yol açar (Gönüllüoğlu, 2008).

- *Duman Hareketi*: Kapalı alanlarda duman genellikle yukarı doğru yükselir ve tavanda birikerek görüş mesafesini azaltır (Sevindi, 2006).
- *Tahliye Zorlukları*: Duman ve ısı, kaçış yollarını engelleyerek tahliye süreçlerini karmaşık hale getirebilir (Aksoy, 2019).

Bu niteliklerden dolayı kapalı alan yangın afeti öncesinde önleyici tedbirlerin alınması ve afet sırasında doğru ve hızlı tahliye, yangına erken ve etkili müdahale çok önemlidir.

Tahliye Süreci ve ASET – RSET Kavramları

Tahliye, bireylerin tehlike oluşturan bir ortamdan güvenli bir alana yönlendirilmesi sürecidir. Yangın, deprem, kimyasal sızıntı, sel veya terör saldırısı gibi çeşitli acil durum senaryolarında devreye giren bu süreç, yalnızca fiziksel altyapının (örneğin bina çıkışları, merdivenler, acil yönlendirme işaretleri) etkinliğine değil, aynı zamanda insan davranışlarının doğru şekilde anlaşılmasına ve yönetilmesine de dayanmaktadır. Başarılı bir tahliye, önceden yapılmış ayrıntılı planlamayı, sürekli eğitimleri, işlevsel yönlendirme sistemlerini ve insan faktörlerini dikkate alan kapsamlı bir modellemeyi zorunlu kılmaktadır (Shen, 2005).

Tahliye sürecinden önce, başarılı bir tahliye ve yangın önleyici sistemlerin sağlanabilmesi için hem ulusal hem de uluslararası düzeyde düzenlenmiş çeşitli mevzuatlar bulunmaktadır. Yangın anında kapalı alanlardan tahliyenin etkinliğini doğrudan etkileyen en önemli unsurlardan biri, mimari yapıların ve bina sistemlerinin yürürlükteki yönetmeliklere uygunluğudur. Bu bağlamda, kaçış yolları; yapının herhangi bir noktasından başlayarak, binanın dışındaki güvenli bir bölgeye kesintisiz ve engellenmemiş biçimde ulaşan güzergâhlar olarak tanımlanmalıdır. Yapıda yeterli sayıda, uygun konumda ve yeterli kapasitede çıkışların bulunması, yangın güvenliğinin temel prensiplerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Aynı prensipler uyarınca kaçış yolları ile merdivenlerin yangın ve duman geçişine karşı korunaklı alanlara açılacak şekilde tasarlanması zorunludur. Özellikle çok katlı ya da bodrum katlı binalarda, basınçlandırma sistemlerinin kullanımı bu alanların dumanla dolmasını engellemek açısından kritik bir öneme sahiptir (Sevindi, 2006).

Bu prensipler birey ve kamu güvenliği için mevzuatlara dönüştürülmüştür. Mevzuatlar önlemleri zorunlu kılmaktadır. Buna rağmen yangın afeti nedeniyle hala yüksek sayıda can ve mal kaybı yaşanmaktadır. Can kayıplarının temel nedenini ise, iyi planlanmamış ve yönetilememiş başarısız tahliye süreçleri oluşturmaktadır.

Tahliye güvenliğinin değerlendirilmesinde iki temel kavram ön plana çıkmaktadır. Bu kavramlar ASET (Available Safe Egress Time) ve RSET (Required Safe Egress Time) göstergeleridir. ASET, ortamın insan yaşamına elverişli olduğu süreyi, RSET ise kişilerin binayı güvenli şekilde terk etmesi için gereken süreyi ifade eder. Güvenli bir tahliye için $ASET > RSET$ koşulu

sağlanmalıdır. RSET; alarm gecikmesi, karar süreci, hareket süresi ve olası yığılmalar gibi birçok bileşenden oluşur. Bu karşılaştırma, mimari tasarımlarda ve performans tabanlı tahliye analizlerinde kritik bir rol oynamaktadır.

Kapalı Alan Yangınları Tahliye Süreci ve Örnek Tahliye Yaklaşımları

Yangınlar ve bu süreçte kapalı alanlardan gerçekleştirilen tahliyeler, yalnızca can güvenliği açısından değil; aynı zamanda afet yönetimi, yapı tasarımı ve insan davranışlarının modellenmesi gibi disiplinler arası alanlarla yakından ilişkilidir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, başarılı bir tahliye sürecinin hem grup hem de birey düzeyindeki davranışsal faktörler üzerinden analiz edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, yapıların tasarım aşamasından itibaren afetzedelerin davranış kalıplarının dikkate alındığı çok boyutlu yaklaşımlar geliştirilmektedir. Bu çalışmalar, etkili tahliye modellerinin oluşturulmasına zemin hazırlamaktadır.

Kapalı alan yangınlarında tahliye genellikle yaya hareketliliği ile sağlanmaktadır. Bu durum, yaya davranışlarını yangın güvenliği literatüründe başlı başına bir araştırma nesnesi haline getirmiştir. İlk sistematik yaklaşımlar, tahliye sürecini akış temelli fiziksel bir süreç olarak ele almıştır. Örneğin Helbing ve Molnár (1998), bireyler arası sosyal kuvvetleri kullanarak şerit oluşumu, kapıdan geçiş salınımı gibi olguları açıklamışlardır.

Benzer şekilde, Okazaki ve Matsushita (1993) tarafından geliştirilen manyetik alan temelli modelde, yayaların hedef noktalarına doğru çekildiği; buna karşın engeller ve diğer bireyler tarafından itildiği varsayılmıştır. Bu model, yayaların çevre ile etkileşimlerini fiziksel kuvvetler üzerinden temsil eden özgün bir yaklaşımdır. Devam eden süreçte geliştirilen SGEM (Lo et al., 2004) ve ESM (Shen, 2005) gibi modeller, yalnızca fiziksel planlama verilerini değil, aynı zamanda kalabalık yoğunluklarına bağlı hız değişimlerini de dikkate alarak, tahliye sürecini daha gerçekçi biçimde simüle edebilmiştir.

Bu alana katkı sunan güncel çalışmalardan biri olan Senanayake ve arkadaşları (2024), tahliye modellerine ilişkin literatürde yer alan 134 çalışmayı analiz etmiş ve bu modelleri dört temel başlık altında sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırma, farklı modelleme yaklaşımlarının temel özelliklerini ve birbirlerine göre avantaj-dezavantajlarını sistematik biçimde ortaya koymakta ve Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3: Tahliye Çalışmalarının Model Tipine Göre Sınıflandırılması ve Örnek Çalışma

<i>Model Tipi</i>	<i>Tanım</i>	<i>Avantajlar</i>	<i>Zayıflıklar</i>	<i>Örnek Çalışmalar</i>
Makroskopik	Kalabalıklar akış olarak modellenir	Hızlı hesaplama	Bireysel karar modeli yok	Zia et al. (2013), Wagner & Agrawal (2014)
Sosyal Kuvvet (SF)	Fiziksel kuvvet benzetimiyle yaya davranışı	Şerit oluşumu gibi olgular temsil edilir	Grup dinamiği sınırlı	Lovreglio et al. (2016), Ronchi et al. (2013)
Hücreyel Otomat (CA)	Grid-tabanlı geçiş ve yön kuralları	Hesaplaması kolay, yoğunluk uyumlu	Gerçek yön tayini zayıf	Chu et al. (2015), Mao et al. (2019)
Ajan Tabanlı Modelleme (ABM)	Karar alabilen bireyler tanımlanır.	Esnek davranış modellemesi, sosyal etkileşim	Hesaplama maliyeti yüksek	Haghani & Sarvi (2019), Zhu et al. (2023), Oliveira (2024)

Tablo 3'te yer alan bu sınıflandırma tahliye modellemesinin teknik altyapısının ve simülasyon gücünün hangi temeller üzerine oturduğunu göstermesi açısından oldukça değerlidir. Özellikle Ajan Tabanlı Modelleme (ABM) yaklaşımı son dönemde akademik ilgiyi üzerine çekmiştir.

Tahliye Modelleme Yöntemleri: Ajan Tabanlı Modelleme

Ajan Tabanlı Modelleme Simülasyonu (ABMS), bireyleri birbirinden bağımsız ve otonom ajanlar olarak tanımlayarak, her bir ajanın özgün davranış ve karar mekanizmalarına sahip olmasına olanak tanıyan güçlü bir modelleme yaklaşımıdır. Özellikle bireysel farklılıkların, sosyal etkileşimlerin ve çevresel geri bildirimlerin belirleyici olduğu tahliye senaryolarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Kasereka et al., 2018). Bu yaklaşım, bireyler arası etkileşimlerin sistem düzeyinde ortaya çıkardığı davranış kalıplarını analiz etmeye imkan vermektedir.

ABMS, karmaşık sistemlerin davranışlarını anlamaya yönelik olarak birey ya da varlıkların çevreleriyle ve birbirleriyle olan etkileşimlerini simüle etmektedir. Ajanlar genellikle çevresel girdilere, geçmiş deneyimlere ve belirlenmiş kurallara göre karar alabilen otonom yapılar olarak modellenmektedir. Bu özellik, araştırmacılara heterojen birey davranışlarını mikro düzeyde modelleme ve bu modeller aracılığıyla makro düzeyde "ortaya çıkan" (emergent) sistem davranışlarını gözlemleme fırsatı sunmaktadır. ABMS'nin bu yeteneği, onu özellikle karmaşık ve kendi kendini uyarlayabilen sistemlerin modellenmesinde öne çıkarmaktadır.

Klasik kesikli olay simülasyonu (DES), sistemin zaman içinde ardışık olaylarla nasıl evrildiğini analiz etmeye yönelik geleneksel bir yaklaşımdır. Özellikle operasyonel süreçlerin modellenmesinde tercih edilmektedir. Ancak birey davranışlarının kritik rol oynadığı senaryolarda yetersiz kalabilmektedir.

Tablo 4'te ABMS yönteminin denklem tabanlı yöntemlerden farkı özetlenmiştir.

Tablo 4: ABM Yönteminin Denklem Tabanlı Yöntemlerden Farkları

<i>Özellik</i>	<i>Denklem Tabanlı Modelleme</i>	<i>Ajan Tabanlı Modelleme (ABM)</i>
Heterojenlik	Genellikle homojen varsayılır	Her ajan özgün olabilir
Eylem Kararı	Merkezi ya da toplu çıktıya dayalı	Yerel bilgi ve bireysel kurallarla
Adaptasyon	Sınırlı	Yüksek, öğrenme yeteneğiyle
Ortaya Çıkış	Sınırlı ya da öngörülü	Spontan, yeni örüntüler
Simülasyon Karmaşıklığı	Nispeten düşük	Orta - Yüksek

ABMS'nin karmaşık sistemleri temsil etme kapasitesi, onu klasik kesikli olay simülasyonlarına kıyasla daha avantajlı hale getirmektedir. DES, zaman tabanlı olaylar dizisini kullanarak sistem davranışını analiz ederken; ABM, mikro düzeyde bireysel ajan davranışlarından yola çıkarak makro düzeydeki sistem çıktıları üzerinde odaklanmaktadır. DES genellikle depo operasyonları gibi daha statik ve öngörülebilir süreçlerin modellenmesinde kullanılırken; ABMS, bireylerin karar alma süreçleri, sosyal etkileşimleri ve çevresel tepkileri gibi dinamik faktörleri içeren senaryolarda daha esnek ve gerçekçi modeller sunmaktadır. Bu nedenle ABMS, özellikle kompleks sistemlerin modellenmesinde daha yaygın bir tercih haline gelmiştir.

Kompleks sistemlerin temelinde, çevreyle etkileşim halinde olan ve bağımsız kararlar verebilen otonom bireyler yer almaktadır. İnsan davranışlarını modellemek, geleneksel yöntemlerin sıklıkla yetersiz kaldığı bir alandır. Bireylerin psikolojik, sosyal ve çevresel faktörlere bağlı olarak farklı tepkiler verebilmesi, heterojen karar yapılarını ve öğrenme davranışlarını dikkate almayı gerektirir. ABMS, bu ihtiyaca yanıt veren en esnek modelleme yaklaşımlarından biridir. Kompleks sistem perspektifiyle değerlendirildiğinde, bireyler arası etkileşimler sonucu kendiliğinden ortaya çıkan yapılar ve desenler, merkezi olmayan ve dağıtık karar alma süreçleri şeklinde organize olmaktadır. İşte ABMS, özellikle tahliye gibi stresli, çok ajanlı ve hızla değişen sistemlerde, birey davranış kalıplarını gerçekliğe oldukça yakın bir biçimde temsil etme potansiyeline sahiptir.

ABMS, karmaşık sistemlerin mikroskobik düzeyde modellenmesi konusunda çığır açan bir yöntemdir. Özellikle tahliye gibi çok faktörlü, zamana duyarlı ve insan davranışına bağlı durumlarda, bireylerin mikro düzeydeki karar ve eylemleri sonucunda oluşan makro desenlerin analiz edilmesi için ideal bir araçtır. ABMS sayesinde, panik anındaki bireysel kaçış davranışları, yön tercihleri, grup içi etkileşimler ve çevresel etkiler detaylı şekilde modellenenebilir. Bu da acil durumlara yönelik politika ve yapı tasarımlarında daha gerçekçi ve etkili senaryolar geliştirilmesine katkı

sağlamaktadır. Tablo 5’te ise, ABMS kullanılarak gerçekleştirilmiş çeşitli tahliye simülasyonlarına ait örnek çalışmalar yer almaktadır.

Tablo 5: ABM ve Tahliye Uygulamalarına Dair Yayınlar

Çalışma	Amaç	Yöntem	Sonuç
Zhou et al. (2016)	Sosyal kuvvet ve kural tabanlı modelleri entegre ederek yaya tahliyesi simüle etmek	Agent-based + sosyal kuvvet	Etkileşimli model tahliye sürelerini azalttı
Li & Han (2020)	Farklı bina çıkış düzenlerinin etkisini analiz etmek	NetLogo + bina planı	Merkezi çıkışlar tıkanma yaratıyor
Senanayake et al. (2024)	ABM ile tahliye literatürünü sistematik taramak	Literatür incelemesi (134 çalışma)	ABM doğrulama eksikliklerine işaret ediyor
Chen & Zhan (2008)	Simültane ve aşamalı tahliye stratejilerini karşılaştırmak	Paramics; senaryo testi	Aşamalı tahliye yoğunlukta avantajlı
Kasereka et al. (2018)	Yangın senaryolarında bina tahliyesini optimize etmek	GAMA platformu	Çıkış sayısı arttıkça tahliye verimi artar
Chu et al. (2015)	Grup davranışını modelleyerek bina tahliyesi	ABM + davranış kuralları	Grup çatışmaları tahliyeyi etkiler
Na & Banerjee (2019)	Bildirimsiz tahliye planlaması	ABM + discrete event simülasyon	Gerçek zamanlı planlamaya uygun
Manley et al. (2015)	Havalimanı tahliyesi senaryosu	ABM; panik seviyesi ve çıkış stratejileri	Panik düzeyi çıktıları dramatik etkiler
Hassanpour & Rassafi (2021)	Affordance temelli yaya karar davranışı	NetLogo; 3 ajan tipiyle görsel skorlama	Çıkış genişliği ve yerleşimi başarımlı etkiler
Oliveira (2024)	Farklı bilgi seviyelerine sahip ajanların tahliye stratejilerini karşılaştırmak	NetLogo; lider takibi, tam bilgi, kalabalık takibi	Lider takibi stratejisi en etkili çıktı
Hardiansyah et al. (2022)	Deprem senaryosunda fakülte binasında tahliye davranışı	NetLogo; bina planına dayalı simülasyon	Tıkanmalar merdiven ve koridorlarda yoğunlaştı
Nilsson & Schüssler (2024)	Stadyum düzenlerinde çıkış sayısı ve genişliği etkisi	NetLogo; A* yön algoritması	Çıkış sayısı tahliye süresini %83 azaltabilir
Young & Aguirre (2021)	Sosyal bağların (grup, aile) tahliyeye etkisi	NetLogo; Station yangını örneğiyle simülasyon	Grup bağlılığı ölüm oranını doğrudan etkiler
Joo et al. (2013)	Affordance temelli insan-algı modellemesi	AnyLogic; FSA + floor field + ANOVA	Çıkış düzeni ölüm oranlarını etkiliyor
Ibrahim et al. (2019)	Davranış temelli oyun teorili kalabalık modeli	ABM + evrimsel oyun teorisi	Risk-severlik baskı ve yaralanmayı artırır
Delcea & Cotfas (2023)	Uçak binişinde risk ve maliyet minimizasyonu	NetLogo + grey clustering	Dengeli gruplar (8-8-8) en iyi sonuç verir

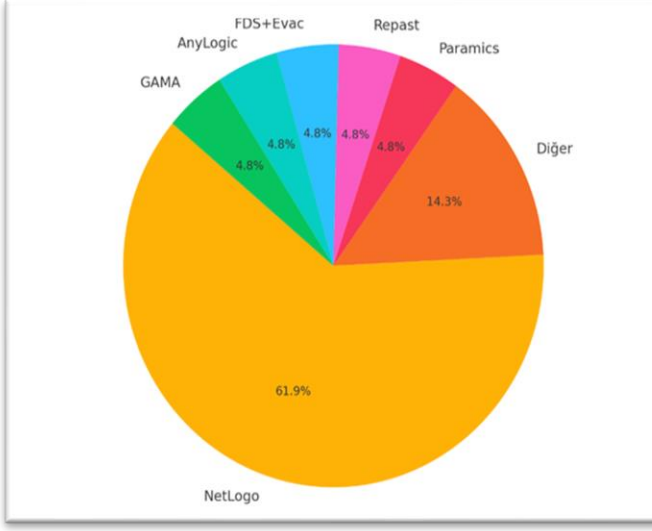
Örneğin, Kasereka ve arkadaşları (2018), GAMA platformu aracılığıyla Kinshasa'daki bir süpermarkette yangın tahliyesi senaryosunu başarıyla modellemiş; duman yayılımı, çıkış tercihleri ve panik gibi unsurları içeren kapsamlı bir senaryo oluşturmuştur. Benzer şekilde, Nilsson ve Schüssler (2024), stadyum ortamlarında çıkış sayısı ve genişliğinin tahliye süresi üzerindeki etkilerini NetLogo yazılımı ile analiz ederek, uygun çıkış tasarımının tahliye verimliliğini büyük ölçüde artırdığını göstermiştir.

Oliveira (2024), ajanların bilgi düzeylerine göre tahliye stratejilerini karşılaştırarak, “lider takibi” stratejisinin en güvenli sonuçları verdiğini ortaya koymuştur. Hardiansyah ve ekibi (2022), bir mühendislik fakültesi binasında deprem sonrası yapılan tahliye simülasyonunda, yoğun tıkanıklıkların merdiven ve koridor bölgelerinde oluştuğunu belirlemiştir.

Bu çalışmaların ortak noktası, ABMS'nin gerçek dünyadaki karmaşık tahliye senaryolarını yüksek doğrulukla temsil edebilme potansiyelidir. ABMS'nin sunduğu mikro düzeyde davranış analizi, makro düzeyde anlamlı sistem çıktıları üretmeye olanak tanımaktadır.

ABMS'nin gelişimi, bu alana özgü yazılımların yaygınlaşmasını da beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda NetLogo, Northwestern Üniversitesi'nin CCL birimi tarafından geliştirilen, açık kaynaklı ve ücretsiz bir çoklu ajan modelleme platformudur. R, Python, MATLAB, Prolog ve SQL gibi dillerle entegre çalışabilmesi, onu esnek ve güçlü bir araştırma aracına dönüştürmüştür. Özellikle akademik çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu esnek yapısı sayesinde NetLogo, bilimsel araştırmalarda giderek daha fazla tercih edilmektedir. Araştırmacıların bir kısmı, özel ihtiyaçlarına yönelik kendi yazılımlarını geliştirmeyi tercih ederken; bazıları ise geniş kütüphaneler, kullanıcı toplulukları ve teknik destek imkanları nedeniyle ücretli ticari yazılımlara yönelmektedir. Ancak yine de esnek, farklı dillerle entegre olabilen ve ücretsiz platformlar çok daha yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

NetLogo'nun güçlü yönlerinden biri de çoklu yazılım dili entegrasyonu sunmasıdır. Bu özellik, model çıktılarının dış sistemlerle paylaşılmasını ve analiz edilmesini kolaylaştırarak yazılıma büyük bir avantaj kazandırmaktadır. Sonuç olarak, NetLogo günümüzde en yaygın kullanılan ABMS aracı olarak literatürde öne çıkmaktadır. Bu çalışmada incelenen ABMS tabanlı yayınlarda kullanılan yazılımların dağılımı aşağıdaki Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Ajan Tabanlı Modelleme ve Simülasyon (ABMS) Yazılımları Kullanım Oranları

YÖNTEM

Gri Sistem Teorisi (GST)

Simülasyon tekniklerinin temel amaçlarından biri, belirsizlikle etkili bir şekilde başa çıkmak ve karar destek sistemlerine daha güvenilir çıktılar sağlamaktır. Özellikle kesikli olay simülasyonları (DES) gibi klasik tekniklerde belirsizlik genellikle olasılık dağılımları üzerinden modellenir. Bunun yanı sıra, araştırmacı tarafından belirlenen deterministik denklem ve fonksiyonlar da sistemin davranışını şekillendirmede kullanılabilir.

Bu tür simülasyonlarda belirsizlik; örneğin, bir iş istasyonunun bir parti iş parçasını işleme süresi gibi deterministik olmayan zamanlama problemleri üzerinden temsil edilmektedir. Yani, daha çok operasyonel seviyedeki karar noktalarında ve kaynak kullanım senaryolarında öne çıkmaktadır.

Ancak, Ajan Tabanlı Modelleme ve Simülasyon (ABMS) tekniği ile çalışılan sistemlerde durum çok daha karmaşıktır. Bu sistemlerde odak noktası, bireysel düzeyde karar veren otonom ajanlardır. Bu nedenle, sistemin sahip olduğu toplam belirsizlik aslında bu mikro bileşenlerin (yani bireylerin) karar, algı ve davranışlarındaki belirsizliklerin birikimli sonucudur.

Bir başka deyişle, klasik bir üretim hattındaki işleme süresinin değişkenliğiyle sınırlı olan belirsizlik, ABMS kapsamında çok daha geniş ölçekli bir hal alır. Örneğin, bir ülkenin ekonomik davranışlarını modellemek

veya toplu tahliye gibi sosyal etkileşim gerektiren olayları simüle etmek gibi senaryolarda, bireylerin psikolojik, çevresel ve sosyal etkileşimleri sistemin sonucunu doğrudan etkilemektedir. Bu da belirsizliği hem niceliksel hem de niteliksel olarak derinleştirmektedir. Sistem büyüdükçe, belirsizlik de karmaşıklıkla orantılı olarak artar. Bu durum, yalnızca mühendislik sistemleri değil, aynı zamanda toplum temelli, biyolojik ve ekonomik sistemler gibi alanlarda da karşılaşılan evrensel bir sorundur. Bu nedenle, belirsizlik ile başa çıkabilmek hem bilimsel anlamda hem de ekonomik karar alma süreçlerinde kritik öneme sahiptir.

Bu bağlamda, belirsizlikle başa çıkmak amacıyla geliştirilen yöntemlerden biri de Gri Sistem Teorisi (GST)'dir. Gri Sistem Teorisi, 1982 yılında Julong Deng tarafından geliştirilmiş olup, özellikle kısmi bilgiye sahip sistemlerin modellenmesi amacıyla tasarlanmıştır (Liu, 2023). GST, bilgiyi “beyaz” (tam bilgi), “siyah” (bilgi yok) ve bu iki uç arasında yer alan “gri” (kısmi bilgi) olarak sınıflandırır. Bu yaklaşım, klasik istatistiksel ya da olasılıksal modellere kıyasla farklı bir yol izlemektedir.

Günümüzde karşılaşılan birçok sosyal, ekonomik ve fiziksel sistem, tamamen beyaz ya da tamamen siyah değil, gri alanlara sahiptir. Örneğin, bir yangın tahliyesi sırasında bireylerin hangi kapıyı seçeceği, ne kadar sürede karar vereceği gibi değişkenler, çoğunlukla tam olarak gözlemlenemeyen ve kestirilemeyen faktörlerdir. Bu nedenle, gri sistemler, gerçek dünyadaki karar verme problemlerine daha uygun bir yaklaşım sunmaktadır. GST'nin avantajlarından bazıları şunlardır:

- Eksik veriyle çalışabilme: Geniş örneklemeler gerektirmeden sistem analizi yapılabilir.
- Deterministik olmayan sistemleri modelleyebilme: Tam bilgiye dayanmayan, ancak yönlendirici sonuçlar verebilen ilişkiler kurar.
- Yorumlanabilirlik: Gri ilişki dereceleri, değişkenler arasındaki benzerlik düzeyini açıkça ortaya koyar.

Bu yönüyle GST, istatistiksel modelleme yaklaşımlarından farklılaşır. İstatistiksel modeller genellikle büyük veri setleri ve rastgelelik varsayımlarına dayanırken, GST daha küçük, düzensiz ve eksik veri setleriyle etkili analizler gerçekleştirebilir. Bu nedenle; afet yönetimi, insan davranış modelleme, ekonomik tahminler ve tahliye senaryoları gibi karmaşık ve veri sınırlı uygulama alanlarında önemli bir alternatif haline gelmiştir. Tablo 6'da GST ve diğer belirsizlik yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 6: Belirsizlikle Başa Çıkma Yöntemleri

<i>Yöntem</i>	<i>Veri Gereksinimi</i>	<i>Eksik Veriyle Baş Edebilir</i>	<i>Odak Noktası</i>
Gri Sistem Teorisi	Düşük	Evet	Kısmi Bilgi
Bulanık Mantık	Orta	Kısmen	Belirsizlik (Muğlaklık)
Olasılık Teorisi	Yüksek	Hayır	Rastgelelik
İstatistiksel Modeller	Yüksek	Hayır	Büyük Veri Setleri

Gri sistem yaklaşımı, ABMS ile birlikte kullanıldığında, bireylerin karar alma davranışlarındaki kestirilemezliği temsil etme konusunda güçlü bir araç haline gelmektedir. Böylece hem mikro düzeydeki belirsizliği sistematik biçimde modellemek hem de makro düzeyde daha güvenilir senaryolar üretmek mümkün olmaktadır.

Ajan Tabanlı Modelleme Simülasyon ile Gri Sistem Teorisi Entegrasyonu

Karmaşık sistemlerin modellenmesinde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, sistemin yapısı, girdileri ve bireysel davranışları kaynaklı belirsizliklerin simülasyon çıktılarının güvenilirliğini etkilemesidir. Özellikle insan etkileşimine dayalı sistemlerde, bireylerin davranışsal değişkenlikleri ve çevresel faktörlerin kestirilemezliği modelleme sürecini oldukça karmaşık hale getirmektedir. Bu noktada, Ajan Tabanlı Modelleme (ABM) ile Gri Sistem Teorisi (GST)'nin entegrasyonu önemli avantajlar sunmaktadır. Gri Sistem Teorisi, eksik ya da kısıtlı bilgiye sahip sistemlerde gri sayılar ve gri ilişkiler aracılığıyla belirsizliği doğrudan modelin içine entegre etmeyi mümkün kılar. Bu yaklaşım sayesinde, özellikle bilgi boşluğu ya da veri eksikliği bulunan durumlarda, modelin girdileri ve çıktıları gri aralıklarla ifade edilerek daha gerçekçi ve esnek analizler yapılabilmektedir (Alvisi et al., 2013).

ABM, bireylerin mikro düzeydeki karar ve etkileşimlerini simüle ederken, bu bireylerin davranışları genellikle öngörülemez ve değişkendir. Özellikle panik anında verilen kararlar, gecikmeler, yönelim tercihleri gibi faktörler sistemin genel işleyişini etkilemektedir. Bu tür davranışsal belirsizlikler, GST'nin sunduğu gri sayılarla temsil edilerek modellenabilmektedir (Lovreglio et al., 2014). Böylece, bireylerin davranışlarına ilişkin tahminler daha esnek bir matematiksel yapı ile modellenmiş olur.

Ayrıca, Gri İlişki Analizi (GİA) gibi teknikler, çok kriterli karar problemlerinde davranışsal değişkenlerin etkilerini ölçmek ve karşılaştırmak için etkili bir araç sunmaktadır (Xie & Liu, 2011). Örneğin, bir tahliye senaryosunda yön tercihleri, kalabalık yoğunluğu, panik seviyesi gibi değişkenler gri sayılarla tanımlanarak, bireylerin hangi çıkışlara yöneleceği daha esnek ve gerçekçi biçimde simüle edilebilmektedir. ABMS ve GST entegrasyonu, özellikle veri eksikliğinin ve bilgi belirsizliğinin yoğun olduğu

sistemlerde model performansını artırmaktadır (Stepanov & Ferson, 2024). Bu yaklaşım, sadece tahliye simülasyonlarıyla sınırlı kalmamakta; ekonomi, epidemiyoloji, sosyal davranış analizi gibi pek çok alanda başarıyla uygulanmaktadır. Örneğin:

- Ekonomik modellerde, piyasa aktörlerinin belirsiz kararları gri aralıklarla temsil edilerek sistem davranışı daha güvenilir biçimde simüle edilebilir.
- Salgın yayılımı modellerinde, bireylerin belirsiz hareketleri (örneğin, sosyal mesafe uyumu, temas sıklığı) gri sayılarla modellenerek, hastalık yayılımının daha esnek tahminleri yapılabilir (Li, Zhang, & Yu, 2023).

Bu entegrasyonun en çarpıcı uygulama alanlarından biri ise, insan hayatını doğrudan etkileyen tahliye senaryolarıdır. Birey davranışlarının daha yalın ama bir o kadar da kritik olduğu bu sistemlerde, panik gibi kontrol edilemeyen değişkenlerin gri sayılarla modellenmesi, karar vericilere daha güvenilir senaryolar ve önlemler sunmaktadır.

SENARYO TABANLI MODEL ve UYGULAMA

Bu uygulama çalışmasında, Kültür ve Turizm Bakanlığı'na bağlı Isparta Müzesi temel alınarak geliştirilen bir yangın senaryosu doğrultusunda, ziyaretçilerin tahliye süreçleri analiz edilmiştir. Çalışma, yangın anında bireylerin davranışlarını modellemek üzere GST ile ABMS yöntemlerinin entegrasyonunu esas almaktadır. Bu bağlamda geliştirilen model NetLogo ortamında iki farklı senaryo ile test edilmiştir:

- (1) Belirsizlik temelli Gri Ajan Modeli ve
- (2) Kural Bazlı Model.

Bu senaryo çerçevesinde mevcut araştırma, aşağıdaki soruları yanıtlamayı amaçlamaktadır:

- Yangın anında ziyaretçilerin çıkışlara uzaklığı GST ile nasıl modellenebilir ve bu model gerçek duruma ne kadar yakındır?
- Çıkışlar önünde oluşan kalabalığın tahmini GST ile nasıl gerçekleştirilebilir ve modelin gerçeklikle uyumu nasıldır?
- Ziyaretçilerin çıkış tercihleri GST kullanılarak nasıl temsil edilebilir ve gerçeğe yakınlığı ne ölçüdedir?

- Gri ajanlarla kural tabanlı ajanların sonuçları arasında ne gibi farklar ortaya çıkar?
- RSET (Gerekli Güvenli Tahliye Süresi) nedir ve gri ajanlar kullanılarak RSET için güvenilir bir tahmin yapılabilir mi?

Müze ve Yangın Senaryosu Özeti

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı'na bağlı Isparta Müzesi'nde, ziyaretçi yoğunluğunun bulunduğu bir anda, eser aydınlatmasında kullanılan lambaya ve PVC elektrik kablosuna aşırı akım gelmesi sonucu yangın çıktığı varsayılmıştır. Bu senaryo özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Mekân Özellikleri: 2.068 m³ hacminde kapalı alan, 2 çıkış kapısı
- Yangın Nedeni: Aşırı akım nedeniyle PVC kablonun tutuşması
- Çıkış Kapasitesi: Teorik akış hızı: 1.3 kişi/m/s (NIST, 2008)
- Mekânsal avantaj: Müzeler, yüksek tavanları ve geniş holleri sayesinde ofis binalarına kıyasla tahliye açısından daha elverişlidir.

İki kapının bulunması, toplam çıkış kapasitesini artırarak olası tıkanıklıkları azaltır ve tahliye süresini kısaltır. Literatüre göre kapı genişliği başına en yüksek kişi akış hızı yaklaşık 1,3 kişi / m / s'dir (NIST, 2008).

Gerekli Güvenli Tahliye Süresi (RSET) Hesabı

RSET, başarılı bir tahliyenin üst sınırı olarak kabul edilmekte olup; yapı, bu süre içinde can güvenliği riski oluşmadan boşaltılabilmelidir. Hesaplamalar genellikle insan davranışındaki korku veya panik etkilerini dışlamaktadır.

Tablo 7: RSET Hesaplama Tablosu

<i>Süre Türü</i>	<i>Değer</i>	<i>Açıklama</i>
Teorik Tahliye Süresi	26 s	2 çıkış kapısına göre
Alarm + Karar + Hareket	96 s	Alarm anından kapıya ulaşana kadar
Tehlikeli Aşamaya Ulaşma	70 s	Yangının tehdit oluşturma süresi

Tablo 7'ye göre; RSET = 96 sn, güvenli tahliye için bu sürenin aşılmaması gerekecektir. Modelleme ve simülasyonda bu duruma dikkat edilmelidir.

Model Yapısı: Ajan Tanımı ve Hareket Dinamikleri

Modeldeki her birey (ajan), rastgele yerleştirilmiş ve benzersiz bir direnc_puani ile tanımlanmıştır (25–45 arası). Bu değer, bireyin hem fiziksel

dayanıklılığını hem de kütleli büyüklüğünü temsil etmektedir. Ajanlar saniyede 0.9 yolu (patch) hızla ilerler; ancak önündeki alanda yer alan toplam direnç kendi değerini aşıyorsa, hızı yarıya düşmektedir (0.45 patch/sn). Duman yayılımı her adımda sabit hızla gerçekleşir ve dumanla karşılaşan ajanlar "yaralı" kabul edilerek simülasyondan çıkarılır.

Gri Sayılar ile Belirsizlik Temsili: Uzaklık Tahmini ve Kalabalık

Uzaklık Tahmini: Ziyaretçilerin her iki kapıya olan gerçek uzaklığı ($dk1x$, $dk2x$) sistem tarafından bilinmektedir. Ancak bireyler, bu bilgiyi doğrudan bilmek yerine gri sayı aralıklarıyla tahmin ederler:

- *Alt sınır:* $dk1n = random - normal(dk1x, 0.3 * dk1x)$
- *Üst sınır:* $dk1f = random - normal(dk1x, 0.3 * dk1x)$

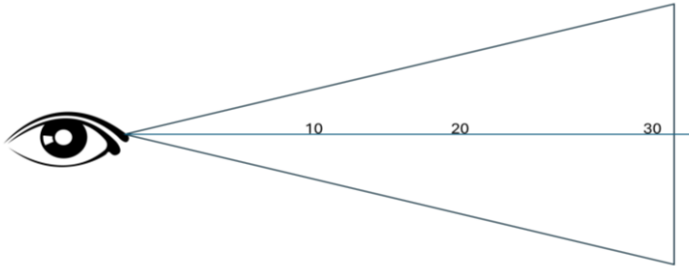
Bu şekilde üçgensel bir dağılım ile gri sayı (belirsizlik aralığı) oluşturulmakta ve beyazlatma fonksiyonu yardımıyla tek bir tahmini uzaklık değeri ($gd1$, $gd2$) elde edilmektedir.

Kalabalık Yoğunluğu Değerlendirmesi: Ziyaretçilerin görüş konisi (90° açı, 30 patch) üç bölgeye ayrılmış ve her bölgeye düşen kişi sayısına göre kalabalık sınıfı belirlenmiştir.

Tablo 8: Görüş Konisi Kalabalıklık Değerlendirme Yöntemi

<i>Görüş Alanı Toplam Ziyaretçi Sayısı</i>	<i>Gri Sayı Aralığı</i>	<i>Kalabalıklık Sınıfı</i>
0–3 kişi	[1, 4]	Kalabalık değil
4–17 kişi	[4, 16]	Kalabalık
8 kişi ~ 0–20 patch	[16, 36]	Çok kalabalık
3 kişi ~ 0–10 patch	[36, 56]	Aşırı kalabalık

Bu skorlar sınıflandırılarak gri aralıklarla kalabalık düzeyleri tanımlanmış ve beyazlatma katsayısı (0.5) ile sayısal bir değer üretilmiştir.



Şekil 2: Netlogo Ajan Görüşü Temsili

Karar Verme: Gri İlişkisel Analiz (GİA) ile Kapı Seçimi

Gri İlişkisel Analiz (GİA), 1982’de Prof. Deng Julong tarafından ortaya konulmuştur. Gri Sistem Teorisi’nin temel bileşenlerinden biridir; eksik, belirsiz ya da kısmen bilinen verilerle tanımlanan sistemleri “gri” sistemleri modellemek ve analiz etmek için kullanılır (Deng, 1985). GİA, referans (ideal) dizi ile karşılaştırma dizileri arasındaki benzerlik veya ilişkisel yakınlığı gri ilişki katsayılarını hesaplayarak nicel bir şekilde belirler. Bu örüntü benzerliği yaklaşımı, kısıtlı ya da belirsiz verilere rağmen her alternatifin ideal davranışa ne kadar yaklaştığını gösterir. Yöntemin adımları aşağıda yer alan çalışmada verilmiştir. (Deng, 1985; Zhao vd., 2020).

Gri ABMS çalışmasında her birey (ajan), binayı terk etmek için iki kriter (uzaklık ve kalabalık) üzerinden iki kapıyı karşılaştırmak için aşağıdaki GRA adımlarını izlemiştir:

- Karar matrisi oluşturulur: Yangın başlangıcında, her ziyaretçi için; gri sayılardan oluşan karar matrisi oluşur.

Tablo 9: Gri Ajan GİA Karar Tablosu

	Uzaklık	Kalabalıklık
Kapı-1	$gd1$	$gri_kalabalik1$
Kapı-2	$gd2$	$gri_kalabalik2$

- Veriler normalize edilir: Uzaklık ve kalabalıklık kriterleri için ideal olan kriterin küçük değer taşıması olduğu için normalizasyon:

$$x_i^* = \frac{\min x_i(j)}{x_i(j)}$$

Eğer dumana olan uzaklık gibi büyük değer almasını ideal olan bir kriter yer alsaydı, normalizasyon:

$$x_i^* = \frac{x_i(j)}{\max x_i(j)}$$

- Referans seri belirlenir: Referans seri, her kriter için en iyi değerden oluşur:

$$X0 = [1.0, 1.0]$$

- Gri ilişki katsayıları hesaplanır: Katsayı $\delta=0.5$ (genellikle 0.5 alınır)

$$\delta_{oi}(j) = \frac{\Delta_{min} + \delta\Delta_{max}}{\Delta_{oi}(j) + \delta\Delta_{max}}$$

- Gri ilişki dereceleri hesaplanır: Eğer kriterler farklı ağırlıklandırmalara sahip değilse, 4.adımda yer alan işlemlerin her alternatif ve her kriter için yapılarak, sonuçların toplanması ile her alternatife ait gri ilişki dereceleri hesaplanır.

$$\Gamma_{kapı1} \text{ ve } \Gamma_{kapı2}$$

Sonuçta, ajan tarafından en yüksek gri ilişkisi derecesine sahip kapıya yönelim kararı verilir.

Dinamik Karar Değişimi

Modelde yalnızca başlangıç kararı değil, yön değişimi de simüle edilmektedir. Ajanlar, çevresel değişimleri (ör. dumanın geliş yönü veya yangına yakınlık) algıladıklarında kapı tercihini değiştirebilir. Bu özellik, simülasyonun gerçek hayattaki tepkilere daha yakın olmasını sağlamaktadır. Örnek dinamik karar koşulları aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- $EYx < dk1x \rightarrow$ Duman ajandan önce kapıya ulaşacaksa yön değiştirilir.
- $dk1y < dyx \rightarrow$ Seçilen kapı yangına çok yakınsa diğer kapıya geçilir.

Karşılaştırmalı Model Performansı

Gri Sistem Tabanlı Model ile Kural Bazlı Model arasındaki temel farkları ve başarı oranlarını Tablo 9’da özetlemektedir.

Tablo 9: Model Özelliklerinin Karşılaştırması

<i>Özellik</i>	<i>Gri Sistem Tabanlı Model</i>	<i>Kural Bazlı Model</i>
Bilgi Türü	Belirsiz (Gri Sayılar)	Kesin
Karar Modeli	GRA – Çok kriterli	Mesafe karşılaştırma
Görsel Algı	Vision cone ile	Yok
Dinamik Yön Değişimi	Var	Yok
Tahliye Performansı	%87 başarılı	%72 başarılı
Ortalama Tahliye Süresi	60.32 sn	44.87 sn
RSET Eşik Değeri	96 sn	96 sn
Yaralı Oranı	Düşük	Yüksek
Toplam Yaralı Sayısı	1	16

BULGULAR VE SONUÇ

Simülasyon koşulları sonucunda Gri Sistem Tabanlı Model’in belirsizlik ortamlarında daha esnek, gerçekçi ve kabul edilebilir sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Kural Bazlı Modeller davranışsal belirsizliği modellemek için oldukça ilkel kalmaktadır, bu nedenle simülasyon tekniği

etkin kullanılamamaktadır. Karar sürecinde sadece mesafeye değil, kalabalık yoğunluğuna da duyarlı olan GRA tabanlı yaklaşım, klasik kural bazlı modellemeye göre daha yüksek tahliye başarı oranı sağlamıştır. Ayrıca, çevresel değişimlere duyarlılık özelliği, modelin uyum yeteneğini artırmış ve dinamik yön değişimi sayesinde yaralı oranının dikkate değer şekilde azalmasını sağlamıştır.

Kural Bazlı Model, sabit karar yapısıyla tahliye başarımında belirli senaryolarda yeterli olsa da; ani duman yayılımı, kalabalık yığılmaları gibi beklenmeyen durumlara karşı esneklik gösterememiştir. Bu durum yaralanma oranlarını artırmış ve tahliye karmaşasını tam olarak yansıtamamıştır.

Bu bulgular, afet yönetimi, yapı güvenliği ve insan davranışı modellemesi alanlarında belirsizlikle başa çıkma konusunda Gri Sistem Teorisi'nin ABMS ile entegre edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Özellikle kapalı alanlarda ve gerçek zamanlı tahliye senaryolarında bu yaklaşım, daha güvenli ve etkin karar destek sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, araştırma konusu geliştirilmeye açık çok sayıda alanı barındırmakta ve araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

KAYNAKÇA

- Aksoy, E. (2019). Yangın ve dumanın yapılar üzerindeki etkileri. *Yangın Güvenliği Dergisi*, 4 (2), 45–58.
- Alvisi, S., Franchini, M., ve Marinelli, A. (2013). A grey-based model for uncertainty analysis in water distribution systems. *Expert Systems with Applications*, 40 (2), 709–720.
- Chen, X., ve Zhan, F. B. (2008). Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: Relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies. *Journal of the Operational Research Society*, 59(1), 25–33.
- Chu, M., Law, K. M., ve Wong, W. Y. (2015). A grid-based cellular automata model for pedestrian evacuation with route choice. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 61, 197–214.
- Delcea, C., ve Cotfas, L. A. (2023). Chapter 4: Optimizing aircraft boarding using grey clustering and agent-based simulation. In *Innovative Simulation Techniques* (pp. 87–104). Springer.
- Gönüllüoğlu, B. (2008). Kapalı alan yangınlarında güvenlik stratejileri. *Yangın ve Güvenlik Dergisi*, 3 (1), 22–31.
- Haghani, M., ve Sarvi, M. (2019). Simulating pedestrian crowds: A review of agent-based modelling approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 107, 253–294.
- Hardiansyah, A., Sudibyo, A., ve Tjahjono, B. (2022). Modeling evacuation behavior in educational buildings during earthquakes using NetLogo. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 73, 102888.

- Hassanpour, S., ve Rassafi, A. A. (2021). Agent-Based Simulation for Pedestrian Evacuation Behaviour Using the Affordance Concept. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(4), 1433–1445. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0206-7>
- Helbing, D., ve Molnár, P. (1998). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51 (5), 4282–4286.
- Ibrahim, A., Saeed, T., ve Rashid, A. (2019). An evolutionary game theory-based evacuation model of panic and risk-seeking behavior. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 526, 120882.
- Joo, J., Oh, H., Lee, S., ve Kang, H. (2013). Affordance-based human behavior modeling in building evacuation. *Automation in Construction*, 30, 193–199.
- Kasereka, S. M., Mutombo, S., ve Toma, M. (2018). Optimization of evacuation plans in case of fire in public buildings using GAMA platform. *Procedia Computer Science*, 130, 934–941.
- Li, X., ve Han, R. (2020). Simulating emergency evacuation under different building exit layouts using NetLogo. *Journal of Building Engineering*, 29, 101145.
- Li, Y., Zhang, C., ve Yu, Y. (2023). Modeling uncertain human mobility during epidemics with agent-based grey systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 26 (2), 4.
- Liu, S. (2023). Grey system theory and its applications in uncertainty modeling: A comprehensive review. *Grey Systems: Theory and Application*, 13(1), 1–25.
- Lo, S. M., Fang, Z., Lin, P., ve Zhi, G. (2004). A simulation model for the performance-based fire safety design of buildings. *Fire Safety Journal*, 39 (7), 539–565.
- Lovreglio, R., Ronchi, E., ve Nilsson, D. (2014). A model of the decision-making process during evacuation. *Fire Safety Journal*, 78, 168–179.
- Lovreglio, R., Fonzone, A., ve Dell’Olio, L. (2016). A simulation model of choice behaviour during building evacuation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69, 588–599.
- Manley, E., Addison, J. D., ve Cheng, T. (2015). Simulating airport evacuation strategies using agent-based modeling. *Journal of Transport Geography*, 48, 43–52.
- Mao, Z., Sun, H., ve Li, X. (2019). A cell-based pedestrian simulation model considering congestion and time-dependent characteristics. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 93, 187–202.
- Na, Y., ve Banerjee, S. (2019). Integrating agent-based and discrete-event simulation for real-time emergency evacuation planning. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 95, 148–163.
- Nilsson, D., ve Schüssler, D. (2024). Modeling stadium evacuations using agent-based simulation: Exit configurations and pedestrian routing. *Safety Science*, 172, 106023.
- NIST. (2008). Engineering guide: Human behavior in fire (NIST Special Publication 1017). *National Institute of Standards and Technology*. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1017>
- Okazaki, S., ve Matsushita, S. (1993). A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing. *Proceedings of the International Conference on Engineering for Crowd Safety*, London, 17-18 March 1993.
- Oliveira, T. R. (2024). Information levels and evacuation behavior: A NetLogo-based agent simulation study. *International Journal of Disaster Risk Science*, 15 (1), 33–49.

- Ronchi, E., Lovreglio, R., ve Nilsson, D. (2013). Calibrating agent-based models of evacuation using empirical data. *Fire Technology*, 49 (2), 411–431.
- Senanayake, R., Wijesundara, W., ve Pathirana, A. (2024). Systematic review of agent-based evacuation modeling. *Simulation*, 100 (1), 87–103.
- Sevindi, S. (2006). Kapalı alan yangınlarında duman hareketinin tahliye süreçlerine etkisi. *Afet Yönetimi Dergisi*, 2 (1), 19–29.
- Shen, W. (2005). An intelligent evacuation model based on emergency decision-making. *Journal of Safety Research*, 36 (3), 307–314.
- Stepanov, I., ve Ferson, S. (2024). Incorporating epistemic uncertainty into complex system simulations: A grey approach. *Complexity*, 2024, Article ID 123456.
- Wagner, G., ve Agrawal, R. (2014). Modeling pedestrian behavior in evacuation scenarios using macroscopic flow models. *Safety Science*, 62, 50–56.
- Xie, N., ve Liu, S. (2011). Grey relational analysis model based on entropy. *Systems Engineering and Electronics*, 33 (2), 295–298.
- Young, M. E., ve Aguirre, B. E. (2021). The impact of social ties on evacuation behavior during fire emergencies: An agent-based modeling approach. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 29 (3), 201–211.
- Zia, H., Zare, M., ve Patel, H. (2013). Modeling pedestrian flow in evacuation scenarios using macroscopic models. *Transportation Research Record*, 2390 (1), 1–9.
- Zhou, Y., Chen, L., ve Wang, X. (2016). Integrated modeling of pedestrian evacuation using social force and agent-based approaches. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 60, 1–16.
- Zhu, J., Yan, H., ve Liu, J. (2023). Behavior-based evacuation simulation using agent-based modeling: A case study in urban areas. *Journal of Safety Science and Resilience*, 4 (2), 87–100.

Osmaniye İlinin Doğa Sporları Potansiyelinin SWOT Analiziyle Değerlendirilmesi

Nuri ERDEM¹

- 1- Doç. Dr.; Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü. nurierdem@osmaniye.edu.tr ORCID No: orcid.org/ 0000-0002-1850-4616

ÖZET

Doğa sporları dünya genelinde her geçen gün daha da yaygınlaşmakta ve aynı yoğun ilgi Türkiye’de de görülmektedir. Osmaniye ili de önemli bir doğa sporları potansiyeline sahiptir. Bölgede yazlar uzun ve sıcak geçmesine rağmen, bazı dağ zirvelerinde kış aylarında kayak yapabilecek lokasyonlar da mevcuttur. Bu çalışmanın amacı, Osmaniye ilinin doğa sporları potansiyelinin güçlü-zayıf yönleri ile fırsat-tehditlerinin belirlenerek bu alanın geliştirilmesine yönelik öneriler ve yöntemler sunmaktır. Bu amaçla konuyla ilgili çok sayıda literatür taraması yapılarak elde edilen verilerden bir (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) SWOT analizi yapılmıştır. Analizler sonucunda Osmaniye ilinin doğa sporları açısından güçlü olan en önemli yönlerinin kışların ılıman iklimde geçmesi, spor yapmaya uygun doğası ve çok sayıda lokasyonların bulunması olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Doğa Sporları, Swot Analizi, Osmaniye.

GİRİŞ

Dünyada sanayileşmenin başlamasıyla birlikte buna bağlı olarak şehirleşmenin artması insanoğlunu gün geçtikçe doğadan uzaklaştırmış, kendi sağlığı için gerekli olan hareketli yaşamını kaybetmeye başlamış durumdadır. Şehirdeki yaşam ise fiziksel aktivitenin hiç olmadığı ya da düzensiz olduğu bir yaşam tarzının sonucunda stresli bir ortam insanlığa sunmuştur. Bu yaşam biçimi insanları mecburen egzersize yapmaya ve spora yönlendirmiştir. Bunun sonucunda özellikle doğada yapılan spor branşları ve çeşitli egzersiz organizasyonları ile insanların boş zamanlarını fiziksel aktivitelere ayırmalarına olanak tanıyan faaliyetler ortaya çıkarmıştır (Doğaka Bülten, 2021).

Spor, kişilerin bedensel ve ruhsal yeteneklerini kullanarak kendisine veya rakibi olan bir başka kişiye karşı, önceden genel çerçevesi ve kuralları belirlenmiş olan bir düzen içinde, başarılı olmaya ve mücadele etme heyecanını yaşatmaya yönelik yaptıkları hareketlerin tümü olarak tanımlanabilir (Yıldırım, 2014; Karadeniz ve Güdük, 2020).

Doğa sporları ise, heyecan arayışıyla açık havada yapılan ve doğayla baş başa olma arzusu, ekip olarak hep birlikte hareket etme, sosyalleşme, rutinlerin dışına çıkabilme, çeşitli doğal güzellikleri keşfetmek isteği gibi nedenlerle kişilerin tercih sebepleri olmaktadır. Doğa sporları olarak; paraşütle atlama, dağcılık, kaya tırmanışı, yürüyüş, kamp, kayak, kanoculuk, base-jump atlama ve rafting gibi çeşitli branşlar yer almaktadır (Tokat, 2023).

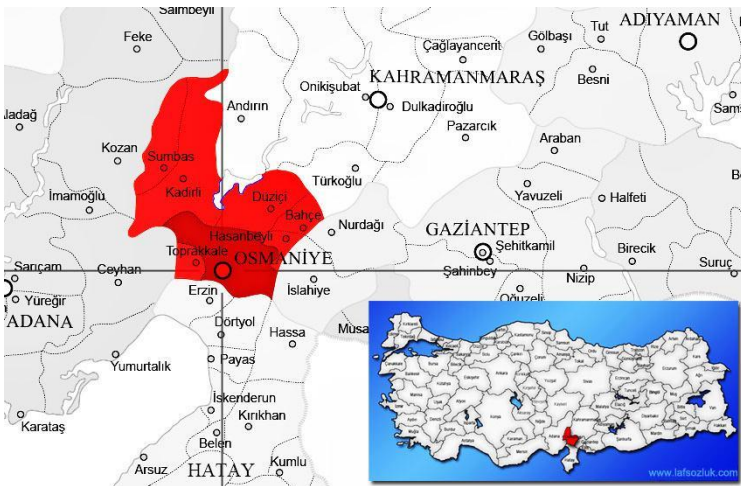
Doğa sporlarını genel olarak; kaya tırmanışı, dağcılık, kamp kurma, doğa yürüyüşü, mağara keşifleri, kayalara tırmanış, kanyon geçişi yapma,

yamaç paraşütü ile uçuş, paramotor, yelkenli veya motorlu delta kanat, nehir veya göl kanosu, su altı veya serbest dalış, rafting, doğa fotoğrafçılığı, buzul veya donmuş şelaleye tırmanış, dağ bisikleti sürme, harita kullanımına dayalı yapılan oryantiring sporu, base jumping, yelkenli, rüzgar veya uçurtma sörfü ve bunlar gibi aktivitelerin tümü doğa sporları olarak örnek gösterilebilir (Doğaka Bülten, 2021).

Türkiye coğrafi ve jeopolitik konumu, meteorolojik ve topografik yapısı nedeniyle doğa sporları alanında önemli bir potansiyele sahiptir (Zorba vd., 2004; Tokat, 2023). Türkiye'nin hemen hemen her köşesinde olduğu gibi Osmaniye ilinde de çeşitli doğa sporları faaliyeti yürütülebilecek potansiyel alanlar mevcuttur.

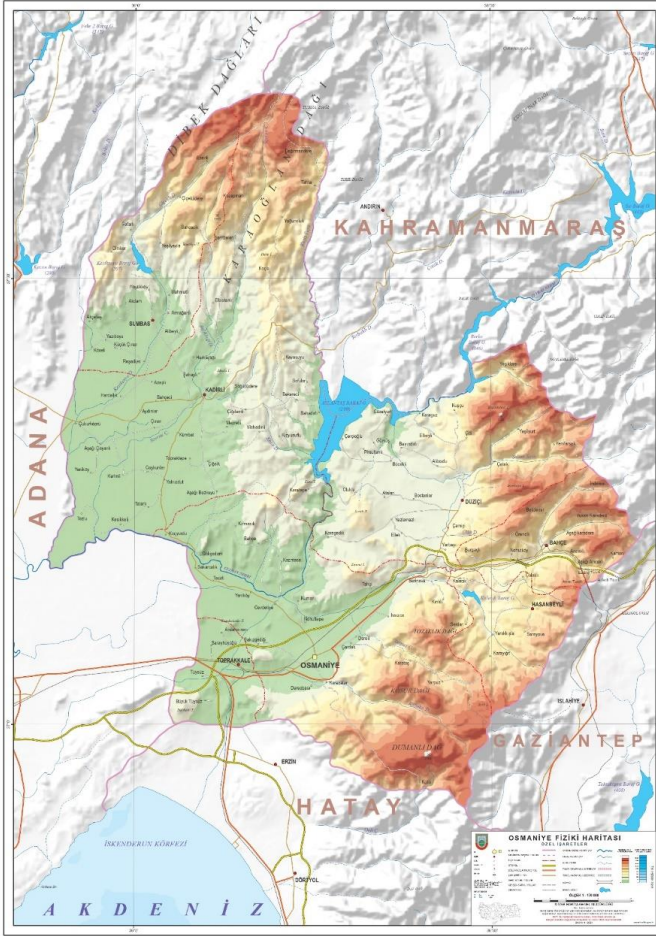
Çalışma bölgesi hakkında genel bilgi

Osmaniye İli; Türkiye'nin güneyinde, Akdeniz Bölgesinin doğusunda yer alan Çukurova'nın doğusunda bulunmaktadır. Doğusunda Gaziantep, güneyinde Hatay, batısında Adana ve kuzeyinde ise Kahramanmaraş illeri ile çevrilidir (Şekil 1). İlin batı kesimlerinde Adana ovasının doğuya doğru uzanan düzlükleri vardır. Osmaniye'nin güneyinde ise İskenderun körfezinden itibaren doğuya doğru uzanan Amanos Dağları, kuzeybatıdan kuzeydoğuya doğru uzanan Toros Dağları, doğusunda ise Dumanlı Dağı ile Düldül ve Tırtıl Dağları vardır (Şekil 2). Batısında ise Çukurova topraklarının olduğu İl, Doğu Akdeniz Bölgesinin doğusunda yer almaktadır. 1933 yılında ilçe yapılmış ve Adana'ya bağlanmıştır. Şehir, 1996 yılında Türkiye'nin 80. ili olmuştur (OİKT, 2017). Osmaniye; 35 52'-36 42' Doğu boylamları ile 36 57'-37 45' Kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. Güneydoğudan Akdeniz'e ulaşımın kapısı konumunda olması ve iklim şartlarının uygunluğundan dolayı sürekli göç almıştır (Koç, 2008, Tıraş ve Besnek, 2017).



Şekil 1: Osmaniye'nin konumu

İl 3222 km² lik yüzölçümüne sahip olan ilin rakımı (yüksekliği) 121 m. ve denize 20 km. mesafededir. Osmaniye'nin coğrafi alan büyüklüğü, Türkiye'nin 67. büyük ili seviyesindedir. İl'in güneyi ve kuzeyi arasındaki kuş uçuşu mesafe 88 km., doğusu ile batısı arasındaki kuş uçuşu mesafe ise 74 km.'dir. Osmaniye ulaşım açısından doğu ve batı illerimiz arasındaki ana yollar üzerinde uygun bir konumda olup, Akdeniz Bölgesini Doğu ve Güneydoğu Bölgelerine bağlayan karayollarının geçiş güzergâhı üzerindedir (Koç, 2008).



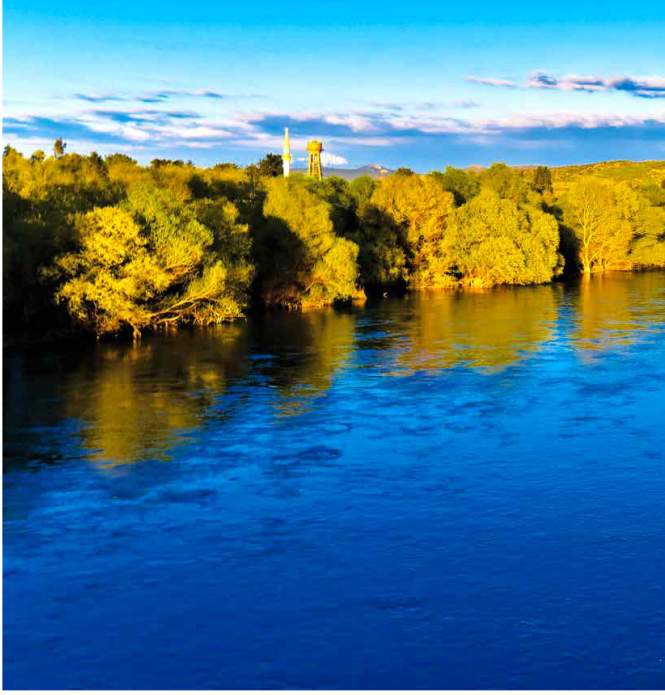
Şekil 2: Osmaniye'nin fiziki haritası (HGM, <https://www.harita.gov.tr/>)

Osmaniye'de Yapılan Doğa Sporları Çeşitleri

Osmaniye ilinde doğa sporları ile ilgili branşların birçoğu yapılmaktadır. Genel olarak yapılan branşlar şunlardır:

Kano-Rafting

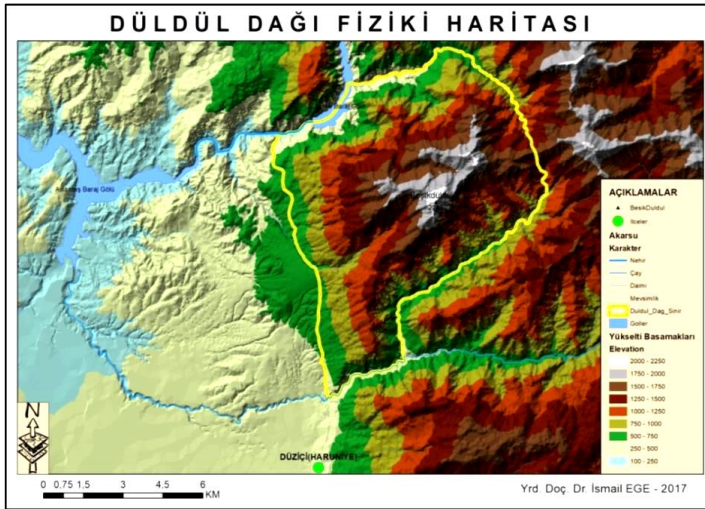
İl sınırları içerisinde geçen Ceyhan nehri üzerinde çok hızlı olmasa da düşük modda kano sporu imkânı vardır. Burada bazı düzenlemelerle parkurlar heyecan seviyesi yüksek parkurlara dönüştürülebilir (Fotoğraf 1).



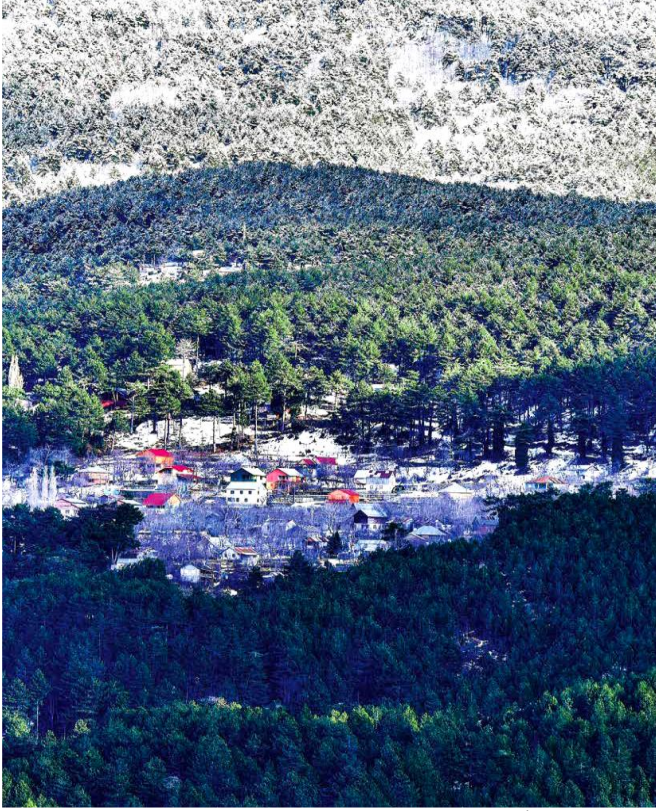
Fotoğraf 1: Kırmıtlı köyü kuş cenneti ve kano sahası. (Kaynak: Osmaniye İl Gelişim Planı 2019).

Dağcılık

İlin Düziçi ilçesinde bulunan Düldül dağının yüksekliği 2246 m. dir ve bu yüksekliği ile Çukurova'nın zirvesi sayılır. Düldül Dağı'nda yükseltisi ve sahip olduğu özelliklerden dolayı birçok doğa sporu türü için elverişli ortamlar sahiptir (Şekil 3). Bu nedenle Düziçi Belediyesi tarafından yörenin doğa sporu potansiyelini geliştirebilmek amacıyla “Düldül Dağı Doğa ve Kış Sporları Teleferik Tesisi” projesini başlatmıştır. Projenin bir sonraki aşamasında doğa sporu türleri için altyapının geliştirilebilmesi ve aynı zamanda kayak merkezi yapımı planlanmaktadır (İHA, 2022; Düziçi Belediyesi, 2014; Türkseven, 2023).



hava akımları sonucunda yamaç paraşütü de farklı yörelerde yapılabilmektedir. Bu nedenle Zorkun Yaylasının Şenliktepe mevkiinde (Fotoğraf 3) ve Düldül Dağında uygun pistlerinde mevsimine göre farklı yönlerde uçuşlar yapılabilmektedir. Kalkış alanı yolları son derece bakımlı ve asfalt yoldur. İniş alanları ise şehre yakın olan bölgede yer alan çim futbol sahasının olduğu yerdir. Bunun yanında acil durumlarda ulaşımı kolay olan geniş ve düz alanlar mevcuttur. Mevsim durumuna göre yılın büyük bir periyodu uçuşlara uygundur (Doğaka Bülten, 2021).



Fotoğraf 3: Osmaniye zorkun yaylası (Kaynak: Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr)

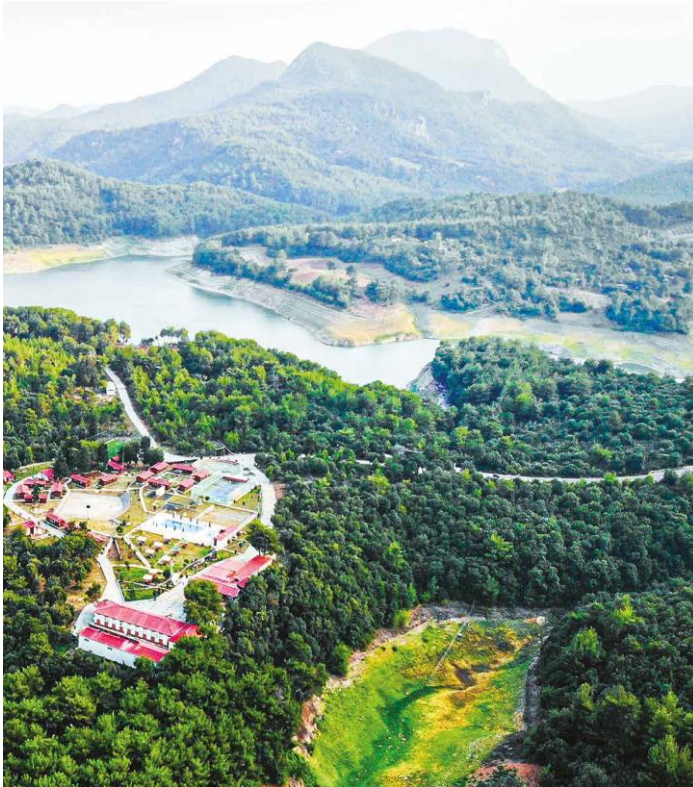
Dağ Bisikleti

Zorkun ve Cebel Yaylaları ile Keldaz Zirvesi ormanlık ve dağlıktır. Hemen hemen her mevsimde doğa yürüyüşü yapmaya elverişlidir. Dağ bisikletinin yanı sıra off road ve motokros yapmaya da uygundur. Bölgede doğa fotoğrafçıları için eşsiz manzaralar da bulunmaktadır. Orman yangınlarını önleyebilmek amacıyla açılan boşluk alanlar dağ bisikleti yapmak için çok güzel doğal parkurlar şeklindedir. Yürüyüş rotalarının bulunduğu Zorkun Yaylası etrafındaki dağlar ve Düldül Dağı'nın Kayak

Merkezindeki güzergahlarda dağ bisikleti için de uygun rotalar vardır. Düziçi ilçesi Yeşilyurt köyü Kısık Kanyonu ve Deve Mağarası bölgesinde kolay- orta-çok zor etaplardan oluşacak ve içerisinde şelalelerin de olduğu doğa yürüyüş alanları mevcuttur (Doğaka Bülten, 2021).

Kanyoning

Merkeze bağlı olan ve Çona köyü üzerinde bulunan eski Osmaniye şeklinde bilinen şimdiki adıyla Cebel Yaylası'na kadar uzanmış olan vadide, yükseklikleri 7 m. başlayıp 25 m. ye kadar olan 6 adet şelale bulunmaktadır. İncebel diye bilinen kanyonun çok dar olan geçişleri ve şelaleleri son derece zor olan doğa sporlardan Kanyoning branşına uygundur. Ceyhan nehrinde de heyecanı düşükte olsa 2 saatlik kano faaliyeti imkânı vardır. Ancak burada oluşturulacak yeni alternatif parkurlar sayesinde kano faaliyeti için aksiyonu yüksek parkurlar da oluşturulabilir. Düziçi ilçesine 26 km uzaklıkta bulunan Yeşilyurt köyünde Kısık Kanyonu ve Deve Mağarası doğal oluşumları vardır (Doğaka Bülten, 2021). Kadirli İlçesi, Kızıyusflu Köyü, Aslantaş Baraj Gölü kıyısında su sporları merkezi bulunmaktadır (Fotoğraf 4).



Fotoğraf 4: Osmaniye Aslantaş Gençlik Kampı (Kayıkhan Tesisleri), (Kaynak: Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr)

Doğa yürüyüşü ve fotoğrafçılığı

Özellikle sonbahar aylarında çok sayıda doğa yürüyüşü ve fotoğraf sanatçısı Dumanlı Yaylasına akın eder. Sonbahardaki o eşsiz güzellikteki renk cümbüşünü fotoğraflamak isteyen doğa fotoğrafçıları bu ayları dört gözle beklemektedir. Kolay–orta ve zor şeklindeki parkurların bolca yer aldığı yaylada hemen hemen her mevsim değişik faaliyetler düzenlenmektedir. Ağcadağ ve Gezit Dağı eteklerinde çok güzel doğa yürüyüş parkurları, doğa fotoğrafçılığı için eşsiz manzaralar, dağ bisikleti ve kaya tırmanışı faaliyetlerine son derece uygun alanlar mevcuttur (Fotoğraf 5).



Fotoğraf 5: Osmaniye Dumanlı yaylası (Kaynak: Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr)

Ayrıca yöreye özgü çok çeşitli kelebek türleri bulunduğundan kelebek gözlemine uygun alanlar vardır. Toklu Yaylasındaki kayın ormanlarını gezmek için her yıl sonbahar aylarında binlerce doğasever gelmektedir. İlin 2264 m. Yüksekliğindeki Düldül Dağı'nın olduğu bölge Başkonuş Yaylası zirvenin kuzeyinde kalmaktadır. Hemen hemen her mevsimde doğa

yürüyüşü için uygun parkurlar mevcuttur. Amanos Dağları da gerek rakımları ve gerekse üzerinde barındırdığı doğa güzellikleri ve canlılarıyla ekoturizm açısından çok büyük bir potansiyele sahiptir (Fotoğraf 6).



Fotoğraf 6: Bahçe ilçesi yukarı Karadere köyü (Kaynak: Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr)

Off-Road

Dereobası Köyü Karaçay deresi kenarında her yıl her yıl Osmaniye Belediyesi tarafından organize edilen Off-Road yarışları düzenlenmektedir (Fotoğraf 7-8).



Fotoğraf 7-8: Dereobası Köyü Karaçay deresi kenarı (Kaynak: <https://osmaniye-bld.gov.tr/25999.html>)

MATERYAL VE METOD

Bir kuruluşun veya bir kişinin rakiplerine kıyaslandığında nasıl bir performans sergilediğini değerlendiren ve güçlü-zayıf yönleri ile fırsat-tehditlerin kısaltılmış şekli olan SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) analizi bir iş geliştirme aracıdır. Bu analiz metodu, bir nesnenin durumunu rakiplerine kıyasla daha fazla ve daha iyi değerlendirmek amacıyla uygulanabilir (Türkseven; 2023). Yapılan SWOT analizi Osmaniye ilindeki doğa sporları potansiyeline etkisi olan veya bir şekilde olabilecek güçlü ve zayıf yönler ile fırsat ve tehditlerin ortaya konulması amacını taşımaktadır (Tokat, 2023).

BULGULAR

Osmaniye ilinin doğa sporları açısından SWOT analizi sonuçları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur (Doğaka Bülten, 2021):

Güçlü yönler

- Kışları ılık geçen iklim koşullarının doğa sporları yapımı için çok uygun olması.
- Bu alanda yetkin ve tecrübeli yeteri kadar personele sahip olunması.
- Çok sayıda doğa sporları branşları için uygun doğal altyapıya sahip olunması,
- Karar almada ve uygulamadaki süreçlerin hızlı oluşması.
- Konum itibari ile doğu ve batı bölgelerine ulaşım kolaylığı olması,
- Doğa sporları lokasyonlarının ve buna uygun spor tesisleri altyapısının neredeyse tüm branşlarda hizmet sunabilecek durumda olması.
- Uygulanabilen doğa sporları çeşitlerinin lokasyonlarının ulaşımının kolay ve yakın bölgelerde olması,
- Eğitimin her seviyesindeki ihtiyacı olan ve sporla ilgilenen öğrencilere burs ve kredi imkânı sunulabilmesi.
- Doğa sporlarını yapan spor kulüplerinin ve uzman eğitmenlerinin bulunması,
- Genç nüfusa kolay ve hızlıca ulaşma imkânının olması.
- Akarsular, göl, dağ, şelale ve orman vb. doğal kaynakların kullanılabilirlik bakımından zengin olması,
- Öğrenci yurtları kapsamında sunulabilen faaliyetlerdeki çeşitlilik.
- İldeki eğitim seviyesinin yüksek ve suç işleme oranının düşük olması,
- Öğrenci yurtlarının ve spor altyapısı tesislerinin güvenlik, temizlik, teknik alt yapı ve kullanıma uygun ortam sunabilmesi.
- Halkın doğa sporları konusuna aşina olması ve yoğun ilgisinin bulunması,
- Aslantaş Baraj gölü kıyısındaki Kayıkhane tesislerinde gençlik kamplarının yapılabilmesi.
- Doğa sporlarında bazı branşlarda ulusal ve uluslararası müsabakalar önceki yıllarda ev sahipliği yapılmış olunması,
- Osmaniye Korkut Ata Üniversitesinde Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulunun kurulmuş olması.
- İlin Adana, Kahramanmaraş ve Gaziantep gibi büyük şehirlere komşu veya yakın olması,

Zayıf yönler

- İl içi ve dışından ulaşım konusunda müsabakalarda yaşanan taşıma sorunları.
- Sporcular için hazırlanan barınma ve konaklama imkanlarının düşük olması,
- Uzmanlaşmış teknik personel konusunda yaşanan eksiklik.
- İlin deprem riski yüksek olan bir bölgede yer alması,
- Doğa sporları konusunda teorik eğitim ve tanıtım seminerlerinin verilebileceği Gençlik Merkezlerinin ve salonların sayıca az olması ve mahalle düzeyinde hedef kitlenin kolayca ulaşabileceği yerlerde olmaması.
- En yakın havalimanının Adana'da olması,
- Öğrenci yurtlarında sportif faaliyetler için gerekli tesis, eğitimler ve seminerler için konferans salonlarının bulunmaması.
- İlin önceki yıllardaki başarılı olan bu konudaki tanıtım faaliyetlerinin sürdürülemediği olması.

Fırsatlar

- Mevcut durumda çok çeşitli doğa sporları faaliyetlerinin yapılabilmesi,
- Gençlere yönelik doğa sporları konusundaki politikaların artması.
- Mevsim koşullarının elverişli olmasından kaynaklı yıl boyunca uygulanabilecek farklı doğa sporları branşının yapılabilmesi,
- Son zamanlarda gençlerde görülmeye başlayan rekreatif faaliyetlerde yer alma isteğindeki önemli artış.
- İlin farklı coğrafi ve topografik koşullara sahip olması,
- Gençlerin aktif olarak sportif faaliyetleri organize etme ve yönetime yardımcı olma noktasındaki katılımların artması.
- Çeşitli doğal güzelliklere ve zengin yaban hayatına sahip olunması,
- Devletin sporculara yönelik destekleyici yaklaşımları ve uygulamalarının artması.
- Doğa sporlarına ilginin dünya genelinde oldukça artmış olması,
- Osmaniye Korkut Ata Üniversitesinde çeşitli (ön lisans, lisans, yüksek lisans) seviyesinde doğa sporları ile ilgili derslerin veriliyor olması ve bu konuda akademik çalışmaların da yapılması,

Tehditler

- Toprak, hava, su gibi doğal kaynakların giderek kirlenmesi,
- Gençler arasındaki teknoloji kullanımı ve madde bağımlılığının önemli ölçüde yaygınlaşması.
- İlin Ülkemizin güneyinde yer almasından dolayı İstanbul, Ankara, İzmir gibi büyük şehirlere nispeten uzak olması,

- Özellikle 6 Şubat depremlerinden sonra bu alanda rehberlik yapacak ve eğitimlik hizmeti verecek genç nüfusun çok az olması,
- Şehir dışından gelecek olan sporculara için konaklama imkânlarının yeterli düzeyde olmaması.
- İlin Adana, Kahramanmaraş ve Gaziantep gibi büyükşehirlerle yakın veya komşu olması,
- Bu alandaki Bakanlık etkinlikleri için yeterli şekilde tanıtımın yapılamaması,
- İldeki doğa sporları ve aktivitelerine yönelik hizmet altyapı kalitesinin oldukça düşük bir seviyede olması,
- Osmaniye İli kalkınma bölgesinde olmasına rağmen gençliğin doğa sporlarına yönlendirilmesi ile ilgili bölgesel plan ve programların olmaması.
- 6 Şubat depremlerinden sonra ildeki nüfusun bir kısmının göç etmesi,
- İldeki ormanlık alanların bir kısmının tarım ve hayvancılık gibi amaç dışı kullanılıyor olması,

SONUÇ

Osmaniye İli, sahip olduğu doğal güzellikleri, çok sayıda bitki ve hayvan çeşitliliği ile zengin bir coğrafyaya sahiptir. Dağlık ve ormanlık alanların çok olması da ilin doğa sporları yönünden potansiyelinin artmasına neden olmuştur. Güney Doğu ve batı illerine ulaşımı sağlayan demiryolu ve karayolları geçiş güzergahında olması ve ayrıca Mersin bölgesel havalimanına da yakın olması ulusal ve uluslararası organizasyonlara ev sahipliği yapabileceğini göstermektedir. Ayrıca yıl boyunca mevsim koşullarının farklı doğa sporlarının yapılabilmesine imkân vermesi ildeki bu kültürün devamlılığına katkı sağlayabilecektir.

REFERANSLAR

- Doğaka Bülten, T.C. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, 3 aylık dergi, Mart 2021, sayı 24, TR63 bölgesi, Hatay-Kahramanmaraş-Osmaniye.
- Düziçi Belediyesi (2014, 19 Mayıs). *Düziçi Düldül Dağı teleferik tesisi fizibilite çalışması nihai raporu* (Proje No: TR63/13/DFD/0025). <https://www.dogaka.gov.tr/dokuman-merkezi/arastirma-ve-planlama/duzici-duldul-dagi-teleferik-tesisi-fizibilite-calismasi/>
- Ege, İ. (2017). Düldül Dağı'nın doğal ortam özellikleri ve turizm potansiyeli (kuzey Amanoslar), Düziçi/Osmaniye. Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi/UUSBD, 10(4), 586-617.
- İhlas Haber Ajansı (2022, 3 Ağustos). Vali Yılmaz: "Düldül Dağı'na yapılan teleferik 1 ay sonra yolcu taşımaya başlayacak" <https://www.ihb.com.tr/osmaniye-haberleri/-3842266>
- Karadeniz, E., Güdük, T. (2020). Mersin ili spor turizmi potansiyelinin SWOT analiziyle değerlendirilmesi. Journal of Tourism Theory and Research, 6(2), 115-129. <https://doi.org/10.24288/jtr.696503>
- Koç, E. (2008). *Osmaniye'nin Sosyo-Ekonomik ve Kültürel Yapısı*, Osmaniye Valiliği, İl Özel İdaresi, ISBN: 978-9944-0426, Osmaniye.
- OİKTİM (Osmaniye İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü) <http://www.osmaniyekulturturizm.gov.tr> (Erişim: 14/01/2025).
- Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr
- Tıraş, M. ve Besnek, F., (2017). Osmaniye İli'nin Turizm Potansiyeli, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Haziran 2017 21(2): 757-777
- Tokat, F. (2023). Erzincan İlinin Doğa Sporları Potansiyeli: Swot Analizi, Anatolia Sport Research, 4(3): 1-7.
- Türkseven, Y. Ç. (2023). Düldül Dağı'nın (Osmaniye/Düziçi) alternatif turizm potansiyeli üzerine nitel bir araştırma, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 62, 74-95
- Zorba, E., Micoogullari, B. O., Zorba, E., & Tekin, A. (2004). Sports tourism in Turkey. Journal of Sport & Tourism, 9(4), 325-329.
- Yıldırım, O. (2014). Ankara'daki Özel Spor Merkezlerine Devam Eden Bireylerin Spor Ekonomisine Katkısı. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Yazılım Geliştirmede Kodun Yeniden Yapılandırılması Prensipleri

Ömer KASIM¹

1- Doç. Dr. Ömer KASIM;Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Elektronik Anabilim Dalı Adı, Kütahya, Türkiye; ORCID: 0000-0003-4021-5412; Omer.kasim@dpu.edu.tr

ÖZET

Bir yazılım geliştirme projesinde kodun yeniden yapılandırılması kod işlevselliğinin ötesinde kodun yapısal olarak iyileştirilmesine olanak tanımaktadır. Yapısal olarak iyileştirilen kodlar kullanılarak kodun akışı anlaşılır hale gelmektedir. Bu durum yazılımın yaşam döngüsündeki bakım süreçlerini kolaylaştırmaktadır ve performans artışı sağlamaktadır. Bu gibi avantajların temelinde kodlardaki hataların hızlıca tespit edilmesi ile yeni özelliklerin kolayca eklenmesi gelmektedir. Ancak kodun yeniden yapılandırılması işlemini dikkatlice yapmak önemlidir. Hatalı yapılacak kod yeniden yapılandırma işlemleri yazılımın akış düzenine zarar vererek yeni hataların meydana gelmesi ile sonuçlanabilmektedir. Bu çalışmada kodların yeniden yapılandırılması gerçekleştirilirken kullanılan kod yeniden yapılandırma işlemine ait prensiplere değinilmiştir. .

Anahtar Kelimeler – Yazılım Geliştirme, Kodun Yeniden Yapılandırılması, Kodun Yeniden Yapılandırılması Prensipleri, Kod İyileştirme.

GİRİŞ

Bir yazılım geliştirme çerçevesinde sınıflar, nesneler, koleksiyonlar, fonksiyonlar, değişkenler, açıklamalar gibi çeşitli araçlar yer almaktadır(Schiewe vd., 2022: 30743-30747). Bu araçlar kullanılarak yenilenen ve türetilen işlevler kolaylıkla yönetilebilir. Programlama dillerinin içerisinde yer alan bu mimariler ile mobil, masaüstü gibi uygulamalar geliştirilirken programlama temel yapılarına ait işlevsel özellikler doğrudan kullanabilmektedir (Shamsujjoha vd., 2021:12-15). Bu araçları da kullanılarak yazılan kodların ilerleyen zamanlarda bakımının yapılması ve kodların sürdürülebilirliğinin sağlanması gerekmektedir (Tkachenko vd., 2025:138,143). Özellikle geliştirilen yazılıma yeni işlevler eklenmesi ve koddaki özelliklerde değişiklik yapılması bu süreçleri ortaya çıkarmaktadır (Martins vd., 2025:25-28). Dolayısıyla yazılımın içerisindeki kod miktarı arttıkça yazılımın mimarisi karmaşıklaşır. Bu karmaşıklığın ele alınması için yazılımdaki kod bloklarının ya da koda ait modüllerin incelenmesi gerekmektedir (Pandiyavathi ve Sivakumar, 2025:1-4). Bu inceleme sonucu bazı düzenlemelerin yapılarak kodun iyileştirilmesi süreci ise kodun yeniden yapılandırılmasıdır (Zhang vd., 2025:2,3).

Kodun yeniden yapılandırılması sürecinde genellikle geliştirilen yazılımın çalışma sistematigi değiştirilmemektedir. Yazılımı oluşturan kod bloklarının ya da koda ait modüllerin anlaşılır, verimli ve sürdürülebilir olması hedeflenmektedir. Bu işlemler yapıldığında bakım ve geliştirmeler kolaylıkla yapılabilir. Ayrıca yazılım projesinin genişlemesi

durumunda yeni özelliklerin eklenmesi süreci iyi yönetilmiş olacaktır (Pezze vd., 2025:4,7,18).

Bu yazıda Kodun Yeniden Yapılandırılmasına ait temel prensipler ve yazılım geliştirme sürecinde Kodun Yeniden Yapılandırılması yönteminin nasıl uygulanacağına dair stratejiler incelenmiştir..

KODUN YENİDEN YAPILANDIRILMASI

Bir yazılımın geliştirilmesi, güncellenmesi ya da yayınlanması sürecinde geliştirilen kodların anlaşılır olması sürdürülebilirlik açısından gereklidir. Karmaşık bir biçimde geliştirilen kodlamada geliştiriciler için önemli bir zorluk olmaktadır (Roobini vd.,2025:133-170). Kodun yeniden yapılandırılması prensipleri kullanıldığında kod bloklarının ya da modüllerinde yer alan kodlar okunabilir hale getirilebilmektedir. Kodun yeniden yapılandırılması ile bir modülün ya da kod bloğunun güncellenmesinde diğer kod bölümleri etkilenmemektedir (Ivers vd.,2024:142-147). Bu süreç sayesinde yazılım üzerindeki hata ayıklama, bakım çalışmaları ve geliştirme çabaları daha çevik bir biçimde ele alınabilmektedir (Binboga ve Gumussoy, 2024: 95622).

Kodun yeniden yapılandırılması kodun yapısını iyileştirmenin yanında performans artışı içinde çözümler sunmaktadır. Tasarımda yer alan gereksiz olan kod tekrarlarının ekarte edilmesi ve verimsiz çalışan kodların güncellenmesi yazılımın daha hızlı çalışmasını sağlar. Bu durum yazılımın daha az bilgisayar kaynağı tüketmesine sebep olacağından enerji tüketiminden verimliliğe kadar birçok alanda faydalı bir model elde edilmiş olmaktadır (AlOmar vd., 2024:5-7).

KODUN YENİDEN YAPILANDIRILMASI PRENSİPLERİ

1. Kodun Fonksiyonel Prensip İle Yeniden Yapılandırılması

Yazılım geliştirmede fonksiyonel prensip ile kodun yeniden yapılandırılması süreçlerinin kullanılması yazılımın işlevsel yapısını güçlendirmektedir. Bu güçlendirme yazılımdaki modülerliğin artırılması ile sağlanmaktadır. Modülerliğin artmasındaki temel gerekçe ise kodun içerisinde kullanılan fonksiyonların küçük ve anlamlı bölgelere ayrılmasıyla yapılır (Shahidi vd., 2022:3092). Bu işleme tek sorumluluk prensibi ismi verilmektedir (Duong, 2021:63). Fonksiyonların küçük parçalara ayrılması ile temelde yazılımda yer alan kodların okunabilirliği artmaktadır. Bu durum

hataların izlenmesini daha basit hale getirir ve kodun tekrar kullanılabilirliğinin elde edilmesine olanak tanır. Bölünen her fonksiyon belirli bir sorunu çözmek için daha net bir sorumluluğa sahip olur (Shirafuji vd., 2023:152).

Şekil 1’de yer alan kod örneğinde bir fonksiyonu yüklenmiş çeşitli görevler yer almaktadır. Bu görevler arasında sorgulama, raporlama ve veri işleme yer almaktadır. Her üç görevinde tek bir fonksiyon ile yapılması yazılım tasarımındaki problemleri çözebilmektedir. Ancak yeni bir özellik koda kazandırılacağı zaman bu hayli zaman alıcı ve meşakkatli bir dönem gerektirmektedir.

```
def veri_isle_rapola(veri):  
    # Veritabanından veri çekme  
    db_veri = veritabaninden_veri_getir (veri)  
  
    # Veriyi işleme  
    Islenmis_veri = veriyi_isle (db_veri)  
  
    # Raporlama  
    rapola(islenmis_veri)
```

Şekil 1. Çeşitli görevleri içeren Fonksiyon Örneği

```
def veritabaninden_veri_getir (veri):  
    return veritabaninden_veri_getir (veri)  
  
def veriyi_isle(veri):  
    return veriyi_isle (veri)  
  
def rapola(veri):  
    rapola (veri)
```

Şekil 2. Herbir göreve özgü bölütlenmiş fonsiyonlar örüntüsü

Şekil 2’de yer alan kod örneğinde ise her bir görevi ihtiva etmek üzere fonksiyonların küçük parçalara ayrılmış hali verilmiştir. Her bir fonksiyon kendine özgü görevi yerine getirdiği için yeni bir özellik ekleneceği zaman yeni bir fonksiyon olarak yazılıma eklenmesi oldukça etkindir. Tek sorumluluk prensibi ile bakım, güncelleme ve performans gibi etmenler kontrol edilebilmektedir.

Kodun fonksiyonel prensip ile yeniden yapılandırılmasındaki bir diğer yöntem ise fonksiyon birleştirme prensibidir. Bu prensip ile benzer işlevleri yapan fonksiyonlar bir araya getirilmektedir. Fonksiyonların bir araya getirilmesi ile yazılımdaki kodların tekrara düşmesi engellenebilmektedir. Bu durum yazılımın daha verimli çalışmasını

sağlamakla kalmaz bakım sürecini de daha basit hale getirilmesini sağlar (Liu vd., 2021:576). Kodun bu şekilde yeniden yapılandırılması yeniden tekrarlama prensibi olarak karşımız çıkar.

Şekil 3’de iki farklı fonksiyon yer almaktadır. Bu iki fonksiyon farklı parametreleri alarak aynı işlemi yapmaktadır.

```
def heaplama_tamzaman(saat, oran):  
    return saat * oran
```

```
def heaplama_yarizaman (saat, oran):  
    return saat * oran * 0.5
```

Şekil 3. Aynı işlevi farklı parametrelerle yerine getiren fonksiyonlar

Şekil 4’de bu iki fonksiyon kod yeniden yapılandırma kapsamında tek bir fonksiyon altında birleştirilmiştir. Bu birleşim ile kod tekrarı engellenmiştir.

```
def odeme_hesapla(saat, oran, tamzaman =True):  
    if tamzaman:  
        return saat * oran  
    else  
        return saat * oran * 0.5
```

Şekil 4. Kod yeniden yapılandırma ile birleştirilen fonksiyon örneği

Bu örnekte, iki farklı fonksiyon birleştirilerek daha genel ve esnek bir fonksiyon oluşturulmuştur. Böylece kodun tekrarı ortadan kaldırılmış ve bakım süreci daha verimli hale gelmiştir.

2. Kodun Sınıflar Ve Nesnelerle Yeniden Yapılandırılması

Nesneye yönelik programlama mimarisinde kullanılan sınıf ve nesne yapıları ile yazılım daha modüler ve anlaşılır olarak tasarlanabilmektedir. Nesneler ve sınıflar üzerinde yapılacak kod yeniden yapılandırma ile yazılımın daha başarılı modüler bir yapıya dönüşmesini sağlamak adına bir fırsat sunmaktadır. Doğru olarak yapılacak kod yeniden yapılandırma ile sınıfların işlevleri iyi bir şekilde dağıtılarak sınıflar ve nesneler arasındaki ilişki daha anlamlı hale getirilir. Bu durum yazılıma yeni bir özellik ekleneceği zaman ya da yazılıma bakım yapılacağına atılacak adımları kolaylaştırır (Al Dallal,2015:242-244).

Kodun Sınıflar ve Nesnelerle yeniden yapılandırılması prensiplerinden ilki sınıfın küçültülmesini içermektedir. Genellikle yazılım geliştirirken büyük ve karmaşık sınıflar yazılmaktadır. Böyle bir durumda bakım ve test gibi süreçler gerçekleştirilirken anlam karmaşası gibi zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bunun önüne geçmek amacıyla sınıflar her biri belirli bir

sorumluluğa ait sınıflara bölünmesi gerekmektedir. Her biri bir sorumluluğu yerine getiren sınıflar sayesinde yazılım sürdürülebilir ve esnek hale dönüşmektedir (Almogahed vd.,2022:114).

Şekil 5’de yer alan UserProfile sınıfı veri tabanı ile ilgili bazı işlemleri yaparken kullanıcı ara yüzü ile ilgili başka görevlerde de kullanılmaktadır. Farklı amaçlara hizmet eden bu iki işlev aynı sınıfta kodlanmıştır.

```
class kullaniciprofili:
    def __init__(self, isim, eposta):
        self.isim = isim
        self.eposta = eposta
    def veritabani_kaydet(self):
        # Veritabanına kaydetme işlemi
    def hosgeldin_epostasi(self):
        # E-posta gönderme işlemi
```

Şekil 5. Farklı amaçlara hizmet eden sınıfa ait kod tasarımı

Şekil 6’da farklı işlemleri çözmek amacıyla kodları oluşturulmuş sınıf 3 ayrı sınıf olarak yeniden kodlanmıştır. Bu yeniden yapılandırılan kodlar sayesinde sorumluluk ayrı sınıflara dağıtılmıştır. Dolayısıyla her bir sınıfın görevi tekilleştirilmiştir. Kullanıcı sınıfı ile kullanıcı bilgileri ile ilgili işlemler yaparken Veritabani sınıfı ile veritabanı işlemleri gerçekleştirilir. Epostaservisi sınıfı kullanılarak sadece e-posta işlemleri yönetilmektedir.

```
def __init__(self, isim, eposta):
    self.isim = isim
    self.eposta = eposta

class Veritabani:
    def save_kullanici(self, kullanici):
        # Veritabanına kaydetme işlemi

class Epostaservisi:
    def hosgeldin_epostasi(self, kullanici):
        # E-posta gönderme işlemi
```

Şekil 6. Kod yeniden yapılandırma Tekilleştirilen Sınıflar

Nesne İlişkilerinin Düzenlenmesine yönelik yapılan kod yeniden yapılandırmada ise yazılımda yer alan nesnelerin arasındaki ilişkiler ele alınmaktadır. Bu ilişkilerin düzenlenmesi yazılımın modülerliğini ve esnekliğini doğrudan etkilemektedir. Özellikle hataların azaltılması ve çakışmaların kontrol edilmesinde önemli bir etmendir. Ayrıca nesne

ilişkilerinin iyi olması bağımlılık problemlerini üstesinden gelmede önemli bir parametredir. Bu işlem ile karmaşık, iç içe geçmiş ve birbirine çok bağımlı nesne ilişkileri kontrol altına alınabilmektedir (Halepmollasi ve Tosun, 2024: 12-14).

Şekil 7’de e-ticarete yönelik geliştirilen bir örnek ödeme işlemi ve kullanıcı bilgilerini içeren bir kod yapısı sunulmuştur. Her iki nesne arasında oluşturulan ilişkiler oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir.

```
class Siparis:
    def __init__(self, musteri):
        self.musteri = musteri
        self.odeme = Odeme()

    def odeme_islemi(self):
        self.odeme.process(self.musteri)

class Odeme:
    def process(self, musteri):
        # Ödeme işlemi
```

Şekil 7. Karmaşık bir nesne ilişkisine sahip kod mimarisi

Şekil 8’de ise her iki nesne arasındaki ilişkiler net bir şekilde tanımlanmıştır. İlk olarak Siparis sınıfı Odeme sınıfına bağımlı bir şekilde tasarlanmıştır. Kod yeniden yapılandırma ile Nesne ilişkileri düzenlendikten sonra ödeme işlemi Odeme_islemi nesnesi ile sağlanır hale dönüştürülmüştür. Bu mimaride Siparis sınıfı, ödeme işlemi için dışarıdan bir bağımlılığa sahip olmaktadır. Nesneler arası ilişkiler Odeme_islemi nesnesi ile daha anlaşılır hale gelmektedir. Bu tasarım ile kodun esnekliğine katkı sağlanır. Ayrıca bağımlılıklar daha anlaşılır bir biçimde yönetilebilmektedir (Podduturi,2025,:2,3).

```
class Siparis:
```

```
def __init__(self, musteri, odeme_processor):
    self.musteri = musteri
    self.odeme_process = odeme_processor
```

```
def process_odeme(self):
    self.odeme_process.process(self.musteri)
```

```
class OdemeProcessor:
    def process(self, musteri):
        # Ödeme işlemi
```

Şekil 8. Kod yeniden yapılandırmada nesne ilişkilerini düzenleme sonrasındaki kod mimarisi

3. Kod Yeniden Yapılandırmada İsimlendirme Düzenlemeleri

Geliştirilen yazılıma ait kod bloklarında bulunan sınıflar, nesneler, fonksiyonlar, değişkenler ve dosya isimleri belirli bir perspektifte seçilmelidir. Bu anlaşılır perspektif ile yazılımda yapılacak güncelleme ve test süreçleri daha kolay yönetilebilmektedir. Ayrıca ekip çalışması dönemlerinde kullanılacak anlamlı isimlendirme ile kodun okunabilirliği artırılır (Tsybulka, 2024:9,13,22). Bir değişkenin isminin ‘a’ gibi bir karakter yerine ‘kullanici yasi’ gibi bir açıklayıcı ile belirtilmesi bu değişkenin kullanım amacını belli eder. Kod bloklarında kullanılan fonksiyon ismi için ‘kullanici bilgisi’ bir açıklayıcı kullanılması fonksiyonun hangi amaçla kullanıldığını belli edecektir. Özellikle projenin büyümesinin ardından bu problemler daha çok yaşanmaktadır. Şekil 9’da anlamlı isimlendirme perspektifine uymayan bir örnek kod bloğu sunulmuştur.

```
def topla(a, b):
    return a + b
```

Şekil 9. Anlamlı isimlendirme perspektifine uymayan kod bloğu

Şekil 10’da kod yeniden yapılandırma ile yeniden organize edilen kod bloğu verilmiştir. Bu kod bloğunda fonksiyon ismi ve değişken isimleri uygun anlamlı söz dizilimlerine sahip olacak şekilde yeniden yapılandırılmıştır.

```
def toplami_hesapla(birinci_sayi, ikinci_sayi):
    return birinci_sayi + ikinci_sayi
```

Şekil 10. Kod yeniden yapılandırmayla anlamlı isimlendirme örneği

Anlamlı değişken ve fonksiyon gibi bloklara isimlendirme yapılması esnasında bazen oldukça uzun ve karmaşık açıklayıcılar da kullanılmaktadır.

Belirli bir gelişim sürecinin ardından büyüyen projelerde dikkat dağınıklığında sorun teşkil etmektedir (Guerra vd.,2024:2,3). Özellikle tekrarlayan kelimeler kullanılması kodun üzerinde gezinilmesini zorlaştırmaktadır. Bundan ötürü isimlendirmede kısa ve öz isimler seçilmesi de önemlidir. Örneğin ‘kisi_yasi’ yerine ‘yas’ gibi bir değişken ismi daha doğru bir tercih olacaktır.

Şekil 11’de oldukça açıklayıcı ve uzun bir fonksiyon ismi kullanılmıştır. Bu çok açıklayıcı yapısından dolayı hatalı isimlendirme ile karşı karşıya kalınmaktadır.

```
def kullanıcıci’den onun_yas_hakkında_bilgi_al():  
    return input("Lütfen yaş bilginizi giriniz: ")
```

Şekil 11. Hatalı isimlendirme Örneği

Şekil 12’de kod yeniden yapılandırma ile fonksiyon isminin belirlenmesinde gereksiz uzunluktaki açıklayıcı ‘get_kullanici_yas’ ile değiştirilmiştir. Böylece fonksiyonun hangi işlemi yaptığını kısa ve öz bir şekilde ifade edilmiştir.

```
def get_kullanici_yas():  
    return input("Lütfen yaş bilginizi giriniz: ")
```

Şekil 12. Kod yeniden yapılandırma ile kısa ve öz isimlendirme örneği

4. Tekrarlanan Kodun Azaltılması

Yazılım geliştirme süreçlerinde belki de en çok karşılaşılan hadise kodların tekrar edilmesidir. Tekrar eden kodlar kodların yeniden yapılandırılmasında bakım ve sürdürülebilirlik problemlerinin çözümünde önem arz etmektedir. Kod yeniden yapılandırma sürecinde tekrar eden kodlar merkezi hale getirilir. Bu sayede kodu gereksiz yere genişleten yapı ortadan kaldırılır. Özellikle tekrar eden kodlarda yapılacak güncellemenin tam bir felaket senaryosuna dönüşmesi engellenir (Jesse vd., 2023:5011,5024).

Yazılımdaki kod bloklarının merkezi bir mimariye dönüştürülmesinde aynı amaç için tasarlanan kod parçalarının birleştirilir. Bu birleştirme sonrası bu kodlar tek bir yerde toplanır. Kodların tek bir yerde toplanması ile fonksiyonlar ya da sınıflar bir kez yazılır ve gerektiğinde çağrılarak işlemler yapılır. Bu strateji ile kodun okunabilirliği artırılır ve yazılımın sürdürülebilirliğine katkı sağlanır (Tosi, 2024:6).

Şekil 13’de sunulan kodlarda kullanıcıdan alınan veriler doğrulanmaktadır. Ancak bu doğrulama işlemi farklı yerlerde yeniden yapılmaktadır.

```
def veritabani_kullanici_ekleme(isim, yas):
    if len(isim) > 0 and yas > 18:
        # Kullanıcıyı veritabanına ekleme işlemi
    else
        print("Geçersiz kullanıcı bilgileri bulunmaktadır.")

def veritabani_kullanici_guncelleme(isim, yas):
    if len(isim) > 0 and yas > 18:
        # Kullanıcıyı güncelle işlemi
    else
        print("Geçersiz kullanıcı bilgileri bulunmaktadır")
```

Şekil 13. Başlangıçta tekrarlanan kod Örneği

Şekil 14’de kod yeniden yapılandırma ile tekrarlanan kod bloğu merkezi bir fonksiyon haline dönüştürülmüştür. Bu tekrarlanan kod, merkezi bir fonksiyon haline getirilebilir.

```
def gecerli_kullanici_bilgisi(isim, yas):
    if len(isim) > 0 and yas > 18:
        return True
    else:
        print("Geçersiz kullanıcı bilgileri bulunmaktadır.")
        return False

def veritabani_kullanici_ekleme(isim, yas):
    if gecerli_kullanici_bilgisi(isim, yas):
        # Kullanıcıyı veritabanına ekleme işlemi
def veritabani_kullanici_guncelleme(isim, yas):
    if gecerli_kullanici_bilgisi(isim, yas):
        # Kullanıcıyı güncelleme işlemi
```

Şekil 14. Kod yeniden yapılandırma ile kod tekrarının engellenmesi örneği

5. Karmaşıklığı Azaltma

Yazılım geliştirirken yazılan kodların karmaşık olarak tasarlanması yazılımın büyümesi ile problemlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Kod bloklarındaki karmaşıklık bakım ve hata tespiti gibi problemleri ortaya çıkarmaktadır. Kodun karmaşıklığı genelde koşul ifadelerinde yaşanmaktadır. Dolayısıyla koşul ifadelerinin daha sade yazılması ve tekrarlanan koşulların düzenlenmesi ile bu problem giderilebilir (Ouni vd.,2023:8).

Kod bloklarında yer alan if-else koşul kodları hatalara ve kodun okunabilirliğini zorlaştırmaktadır. Özellikle kod bloklarında yer alan birçok if-else yapısı tek bir fonksiyonla ya da daha basit mantıksal çözümlerle daha

kolay yönetilebilir (Zhang vd., 2024:2834,2842). Şekil 15’de yer alan kod tasarımında karmaşık koşul ifadeler kullanılmıştır. Bu yapılar birden fazla koşuşu birbirine bağlamaktadır. Bu durum koşulların kontrol edilmesi ve koşula bağlı işlem yapılırken uygun işlemin ne olduğu konusunda dikkatli takibi gerektirir.

```
if (yas > 18 and yas < 60) or (yas > 80 and yas < 100):  
    print("Gecerli yas bilgisi ")  
else  
    print("Geçerli olmayan yas bilgisi bulunmaktadır.")
```

Şekil 15. Karmaşık koşul ifadesinin olduğu kod tasarımı

Şekil 16’da kod yeniden yapılandırma ile yeniden tasarlanan koşul ifadesi yer almaktadır. Daha sade olarak tasarlanan koşul ifadesi daha sade bir kod yapısı elde edilmiştir. Bu işlem ile yazılımda kullanılan kodun karmaşıklığı azaltılarak kodun okunabilirliğini artırılmıştır.

```
if (18 < yas < 60) or (80 < yas < 100):  
    print("Gecerli yas bilgisi ")  
else  
    print("Geçerli olmayan yas bilgisi bulunmaktadır.")
```

Şekil 16. Kod yeniden yapılandırma ile sadeleştirilmiş koşul ifadesi

Kod karmaşıklığına sebep olan bir diğer unsur ise yenilenen koşul ifadeleridir. Yenilene koşul ifadeleri hata oranını artıran bir parametredir. Dikkatli takip edilmediğinde çeşitli problemlere sebep olabilmektedir. Bu koşul ifadeleri yerine fonksiyonlar tasarlamak kod yeniden yapılandırma açısından daha faydalıdır. Bir diğer çözüm ise merkezi kontrol kodlarıdır (Geist vd.,2024:45).

Şekil 17’de yinelenen koşul ifadelerine ait bir kod yapısı verilmiştir. Bu kod mimarisinde elif ile bağlanan yenilenen koşullar kullanılmıştır. Koşullarda yer alan yaş değişkeni 18 ile 60 arasında veya 60 ile 100 arasında gibi kontroller yapılmaktadır. Bu durumda her iki koşulda tekrara düşmektedir.

```
if yas > 18 and yas < 60:  
    print("Gecerli yas")  
elif yas > 60 and yas < 100:  
    print("Gecerli yas bilgisi")  
else  
    print("Geçerli olmayan yas bilgisi bulunmaktadır.")
```

Şekil 17. Yinelenen koşul kontrollerinin kullanıldığı kod yapısı

Bu tür kod tekrarlarından kurtulmak amacıyla Şekil 18’de görüldüğü gibi kod yeniden yapılandırmada bir fonksiyon tasarlanmalıdır. Bu durumda

elseif yapısı ortadan kaldırılarak kod tekrarının önüne geçilmiştir. Oluşturulan fonksiyonda yaş değişkenine atanan değere göre bir kontrol yapılmaktadır. İki koşul bir arada tutularak kod tekrarının önüne geçilebilmiştir.

```
def gecerli_yas(yas):  
    return (18 < yas < 60) or (80 < yas < 100)  
if gecerli_yas(yas):  
    print("Gecerli yas bilgisi")  
else  
    print("Geçerli olmayan yas bilgisi bulunmaktadır.")
```

Şekil 18. Kod yeniden yapılandırma kapsamında oluşturulan fonksiyon

SONUÇ

Yazılım geliştirmede çeşitli ekipler farklı alanlardaki problemleri çözmek adına kod geliştirmektedir. Proje belirli bir büyüklüğe ulaştıktan sonra yazılım üzerinde güncelleme yapmak ve bakım sürecini yönetmek zorlaşmaya başlamaktadır. Bu problemlerin üstesinde gelmede kod yeniden yapılandırma kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntemlerin kodlara uygulanması başlangıçta zor bir süreç olmasına karşın kod mimarilerinin daha az karmaşık olmasını sağlamaktadır. Basit bir mimaride olan kodlar üzerinde güncelleme ve bakım yapmak ise daha yönetilebilir bir sonuç ortaya koymaktadır. Bu çalışmada beş farklı kod yeniden yapılandırma prensibi üzerinde durulmuştur. Her bir prensibin kod bloklarına uygulanması ile kod yeniden yapılandırma süreçlerinin nasıl yapılacağı örneklerle desteklenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda kod yeniden yapılandırma prensiplerinin uygulanmasının ardından test kodları ile sürecin tamamlanması ele alınabilir.

KAYNAKÇA

- Al Dallal, J. (2015). Identifying refactoring opportunities in object-oriented code: A systematic literature review. *Information and software Technology*, 58, 231-249.
- Almogahed, A., Omar, M., & Zakaria, N. H. (2022). Refactoring codes to improve software security requirements. *Procedia Computer Science*, 204, 108-115.
- AlOmar, E. A., Peruma, A., Mkaouer, M. W., Newman, C. D., & Ouni, A. (2024). Behind the scenes: On the relationship between developer experience and refactoring. *Journal of Software: Evolution and Process*, 36(1), e2395.
- Binboga, B., & Gumussoy, C. A. (2024). Factors affecting agile software project success. *IEEE Access*.
- Duong, N. (2021). Work Diary Thesis-Working as a software developer.
- Geist, V., Moser, M., Pichler, J., & Schnitzhofer, F. (2024). Innovating industry with research: eknows and sysparency. *IEEE Software*, 41(3), 41-48., V., Moser, M., Pichler, J., & Schnitzhofer, F. (2024). Innovating industry with research: eknows and sysparency. *IEEE Software*, 41(3), 41-48.
- Guerra, E. M., Ivo, A. A., Pereira, F. O., Robbes, R., Janes, A., & Silveira, F. F. (2024). Impermanent identifiers: Enhanced source code comprehension and refactoring. *Journal of Systems and Software*, 216, 112137.
- Halepmollasi, R., & Tosun, A. (2024). Exploring the relationship between refactoring and code debt indicators. *Journal of Software: Evolution and Process*, 36(1), e2447.
- Ivers, J., Ghammam, A., Gaaloul, K., Ozkaya, I., Kessentini, M., & Aljedaani, W. (2024, October). Mind the Gap: The Disconnect Between Refactoring Criteria Used in Industry and Refactoring Recommendation Tools. In *2024 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME)* (pp. 138-150). IEEE.
- Jesse, K., Kuhmuench, C., & Sawant, A. (2023). RefactorScore: Evaluating refactor prone code. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 49(11), 5008-5026.
- Liu, H., Tao, Y., Huang, W., & Lin, H. (2021). Visual exploration of dependency graph in source code via embedding-based similarity. *Journal of Visualization*, 24, 565-581.
- Martins, L., Pontillo, V., Costa, H., Ferrucci, F., Palomba, F., & Machado, I. (2025). Test code refactoring unveiled: where and how does it affect test code quality and effectiveness?. *Empirical Software Engineering*, 30(1), 1-39.
- Ouni, A., AlOmar, E. A., Hamdi, O., Cinnéide, M. Ó., Mkaouer, M. W., & Saied, M. A. (2023). On the impact of single and co-occurrent refactorings on quality attributes in android applications. *Journal of Systems and Software*, 205, 111817.
- Pandiyavathi, T., & Sivakumar, B. (2025). Software Refactoring Network: An Improved Software Refactoring Prediction Framework Using Hybrid Networking-Based Deep Learning Approach. *Journal of Software: Evolution and Process*, 37(2), e2734.
- Pezzè, M., Abrahão, S., Penzenstadler, B., Poshyvanyk, D., Roychoudhury, A., & Yue, T. (2025). A 2030 Roadmap for Software Engineering. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*.
- Podduturi, S. (2025). AI-Driven Code Optimization: Leveraging ML to Refactor Legacy Codebases. *North American Journal of Engineering Research*, 6(1).

- Roobini, S., Kavitha, M., Deenadayalan, H., & Muthusamy, A. (2025). AI-Powered Tools to Enhance the Styass of Software Development.
- Schiewe, M., Curtis, J., Bushong, V., & Cerny, T. (2022). Advancing static code analysis with languyas-agnostic component identification. *IEEE Access*, 10, 30743-30761.
- Shahidi, M., Ashtiani, M., & Zakeri-Nasrabadi, M. (2022). An automated extract method refactoring approach to correct the long method code smell. *Journal of Systems and Software*, 187, 111221.
- Shamsujjoha, M., Grundy, J., Li, L., Khalajzadeh, H., & Lu, Q. (2021). Developing mobile applications via model driven development: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 140, 106693.
- Shirafuji, A., Oda, Y., Suzuki, J., Morishita, M., & Watanobe, Y. (2023, December). Refactoring programs using large languyas models with few-shot examples. In *2023 30th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC)* (pp. 151-160). IEEE.
- Tkachenko, O., Chechet, A., Chernykh, M., Bunas, S., & Jatkiewicz, P. (2025). Scalable Front-End Architecture: Building for Growth and Sustainability. *Informatica*, 49(1).
- Tosi, D. (2024). Studying the quality of source code generated by different ai generative engines: An empirical evaluation. *Future Internet*, 16(6), 188.
- Tsybulka, K. (2024). Enhancing code quality through automated refactoring techniques (Doctoral dissertation, ETSI_Informatica).
- Zhang, J., Li, Z., Liang, J., & Huang, Z. (2025). Boosting Identifier Renaming Opportunity Identification via Context-Based Deep Code Representation. *IEEE Transactions on Reliability*.
- Zhang, Z., Xing, Z., Zhao, D., Xu, X., Zhu, L., & Lu, Q. (2024). Automated Refactoring of Non-Idiomatic Python Code With Pythonic Idioms. *IEEE Transactions on Software Engineering*.

Yazılım Tasarımında Farklı Bir Bakış Açısı: Alan Odaklı Tasarıma Giriş

Ömer KASIM¹

1- Doç. Dr. Ömer KASIM;Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Elektronik Anabilim Dalı Adı, Kütahya, Türkiye; ORCID: 0000-0003-4021-5412; Omer.kasim@dpu.edu.tr

ÖZET

Alan Odaklı Tasarım karmaşık olarak oluşturulan kod yapısını modellemeyi amaçlamaktadır. Bu modellemede Evrensel Dil kullanılmaktadır. Bu yapı ile oluşturulan kodlamada geliştirilen uygulamaya yönelik olarak test kodlarının yazılması kolay hale gelmektedir. Veri tabanına veri yazma ve okuma gibi işlemlerin ötesinde iş mantığı ile verilere ait işlemlerin süreçlerin yönetilmesi ön plandadır. Bu model anemik domain modeli mimarisi ile sağlanmaktadır. Ancak bu modelde sistem oldukça karmaşık hale gelerek kod takibi yapmanın ve bakım süreçlerinin oldukça zor olduğu bir durum ortaya çıkmaktadır. Alan odaklı tasarım mimarisinde ise domain nesneleri veriler ve iş süreçleri olarak tasarlanmaktadır. Bu düzenleme ile geliştirilen uygulamadaki kod yapısı anlaşılır, sürdürülebilir ve test edilebilir hale dönüşmektedir. Bu çalışmada bu süreçlere ilişkin genel bilgiler verilerek alan odaklı tasarıma geçişinin önemi anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Alan Odaklı Tasarım, Evrensel Dil, Anemik Domain Modeli, Sınırlı Bağlam, Modüler Ve Sürdürülebilir Sistemler.

GİRİŞ

Yazılım geliştirme sürecinde şelale ve çevik yaklaşımlar gibi yöntemler kullanılmaktadır (Natarajan ve Pichai, 2024: 49345,49346). Bu geliştirme yöntemleri kullanılan uygulamalarda başlangıçta oldukça basit bir kod yapısı bulunmaktadır (Hagal vd.,2024:14,15). Ancak uygulamadaki çeşitli eklemeler ve güncellemeler ile kod yapısı oldukça karmaşık hale gelmektedir (Meckenstock, 2024:4,17,18).

Son dönemlerde bu gibi problemleri önlemek adına katmanlı mimari tercih edilmektedir (Shrestha,2024:6-8). Ancak bu mimaride oluşturulan klasörler, nesneler gibi araçlarda bağımlılıkların yönetilmesi gerekmektedir (Spray vd.,2021:4398-4400). Bu bağımlılıklar yeni özellik ekleme veya olan özelliğin yapısını değiştirme gibi bir noktada içinden çıkılmaz hale gelmektedir. Alan Odaklı Tasarım (AOT) olarak isimlendirilen yaklaşım tam da bu aşamada bir çözüm olarak yazılım geliştirme süreçlerine katkı sağlamaktadır (Le vd.,2025:1-4). Yazılım geliştiriciler, domain uzmanları ve yöneticilerin ekseninde kurgulanan AOT ile stratejik ve taktiksel tasarım kalıpları kullanmak önemlidir. Bu tasarım kalıpları ile yazılım geliştirme süreci daha verimli hale dönüşebilmektedir (Sangabriel-Alarcón vd.,2024:763-765).

AOT stratejisinde iş mantığı ve yazılım geliştirme ilkeleri bir araya getirilmektedir (Beeraka,2025:442)). Bu iki farklı iş akışının birlikte olması iş mantığının ihtiyaçlarına uygun ve verimli yazılımlar oluşturmasını sağlanmaktadır. Yazılım geliştirme sürecinde yazılan kodlar hâlihazırda

oldukça karmaşık yapılara sahiptir. Bunu bir de iş mantığı ile beraber planlamanın karmaşıklığı daha da artıracaktır (Özkan vd.,2023:14-16). Bu sebeple tercih edilen AOT stratejisi, iş mantığı ve yazılım geliştirme süreçleri kullanılarak en basit şekilde modellenmektedir. Bu modelde her iki sürece ait iş ve işlemler birlikte geliştirilmektedir. Burada ise evrensel dil durumunu karşılayan bir programlama dili kullanılmaktadır. Bu sayede geliştirilen uygulamadaki kodlardaki hatalar daha kolay ayıklanabilir ve geliştirilen yazılıma uygun test kodları yazılabilir (Zhong vd.,2024:598-600). Burada dikkat edilmesi gereken en temel husus ise AOT tasarımına gerçekten ihtiyaç olup olmadığıdır. Eğer geliştirilen yazılım veri tabanına okuma, yazma, silme ve güncelleme işlemleri içeriyorsa AOT stratejisine gerek kalmamaktadır (İraç vd.,2025:15,16). Bu gibi işlemlerin çözümünde veri tabanı çözüm metodları yeterli olmaktadır. Bu tür uygulamalarda iş mantığı ve kullanıcı etkileşimi gibi süreçlere gerek yoktur.

Bir diğer tasarım modeli ise Anemik Domain Model (ADM) olarak isimlendirilmektedir. Bu tasarım stratejisinde iş mantığı servis sınıfında barındırılmaktadır. Bir de verilerle ilgili veri tabanı işlemleri bu modelde yer almaktadır. Ancak bu tasarımda bazı problemler bulunmaktadır (Singjai vd.,2021:3,4). Bu problemlerin en başında domain nesnelerinin kendi verileri üzerinde işlem yapamaması gelmektedir. Bu durum yazılımı oldukça karmaşık hale getirmektedir. Bunu çözmek için ise domain nesnelerinin hem veri hem de iş mantığını kapsayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ancak bu adımdan sonra yazılım test edilebilir ve sürdürülebilir hale dönüşebilmektedir (Tian vd.,2023:36-39).

AOT yazılım geliştirme ve iş mantığı süreçlerinin yönetilmesini sağlayan bir stratejidir. Bu stratejinin yürütülmesine çeşitli araçlar yardım etmektedir. Bu araçlar sırasıyla sınırlı bağlam, varlıklar, değer nesneleri, birbiriyle ilişkili nesneleri tek bir mantıksal bütün olarak yöneten bir bütünleyici, kod, belge, resim veya herhangi bir dijital içeriği depolamak ve yönetmek için kullanılan bir depo, uygulama servisleri ve olay kaynağıdır (Özkan vd.,2023:10-18). Bu araçlar kullanılarak yazılım modüller bir mimariye dönüştürülmektedir. Bu sayede geliştirilen yazılım sürdürülebilir, okunabilir ve bakımı kolay hale gelmektedir (Abdelfattah vd. 2024:6-19).

ALAN ODAKLI TASARIM TASARIMINI UYGULAMADA GEREKENLER

AOT tasarımını oluşturmak için bazı temel bileşenler gerekmektedir. Bu bileşenler sırasıyla iş mantığı ile ilgili süreçler ve problemler ile kararlı yazılım geliştirmedir. Kararlı yazılım geliştirmeden kasıt ise yazılım desenlerini doğru şekilde uygulamayı kapsamaktadır. İş mantığı ve yazılım geliştirme olmak üzere iki sürecin bir araya gelmesi ise sürekli bir geliştirmeyi gerektirmektedir. Bu iki sürecin bir araya gelmesi ile ancak verimli bir çözüm elde edilebilmektedir. Dolayısıyla AOT tasarımı teknik bilgiye ek olarak iletişimi de kapsamaktadır (Oyeniran vd.,2024:96-99). Bu durum sürekli değişimin ve yeniliğe açıklığın anahtarıdır.

Yazılım geliştirme süreçlerinde deneyim önemli bir yer tutmaktadır. Ancak AOT tasarımına geçişte bazı zorluklar yaşanmaktadır. Bu zorlukların ilki bu tasarımın öğrenilmesidir. Genellikle AOT'yi tercih edenler bazı motivasyon zorlukları ile karşılaşmaktadır. Bunun nedeni ise AOT sürecinin tasarım aşamasının oldukça dik bir eğriye sahip olmasıdır. Bu sebepten dolayı AOT tasarımını uygulamak belirli bir zaman periyodu gerektirmektedir. İş uzmanlarıyla doğru iletişim kurmak, onların bilgilerini anlamak ve bu bilgileri yazılım geliştirme sürecine entegre etmek gerekmektedir. İş mantığı içerisinde yazılım geliştiricilerle ortak bir dil oluşturulması ile etkileşim problemi çözülmektedir. Özellikle etkileşim problemi aşıldıktan sonra tasarım süreci daha verimli bir hale dönüşmektedir. Bu çözümde en önemli parametre teknik kelimeler kullanımıdır. Dolayısıyla teknik kelimeler kullanmayan Domain uzmanları ile daha kolay iletişim kurulabilmektedir. Bu durum teknik süreçlerle birlikte iş ve iş süreçlerini anlamaya yardımcı olmaktadır (Kassab ve Fernandes, 2025:101,103).

AOT tasarımının sağladığı avantajlardan en bariz olanı domain uzmanlarıyla birlikte çalışmaktır. Bu uzmanlar iş mantığı çerçevesinde işin akışını günlük operasyonlarla yönlendirmektedirler. Hem yazılım geliştirici hem de domain uzmanlarının birlikte çalışması her iki tarafın etkileşimi ile sürecin daha anlaşılır olmasını sağlamaktadır. Ancak bazı iş mantığı akışlarında domain uzmanı bulunmamaktadır. Bu durumda iş operasyonlarını bilen ürün tasarlayan veya pazarlama alanındaki uzmanlarla süreç yürütülebilmektedir. Bu kişiler domain uzmanı olmasalar da gereksinimlere hâkimdirler. Dolayısıyla doğru bir iletişimle yazılım geliştirme süreçleri iş ihtiyaçlarına göre biçimlendirilebilir (Oukes vd., 2021:3).

Yazılım geliştirme açısında bakıldığında ise yazılım geliştirme desenlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu desenler ile tasarlanan yazılım iş alanının modellenmiş haline dönüşmektedir. Elde edilen bu domain modeli genellikle nesne tabanlı olmaktadır. Bu tasarımda nesneler hem veriyi hem de davranışı temsil etmektedir.

AOT içerisinde büyük ve karmaşık modeller bulunmaz. Bu modeller yerine küçük ve işlevsel domain modelleri kullanılmaktadır. Sonrasında bu modeller iş mantığı çerçevesindeki gereksinimlere göre özelleştirilmektedir. Böylece yekpare bir yapı yerine mikro düzeyde bağımsız çalışan modeller ile yazılım geliştirilmiş olur. Bu durum yazılımın bakımını kolaylaştırır. Yeni özellik ekleme ve güncelleme işleri daha kolay hale gelir. Ek olarak test kodlarının yazımı da sağlanmaktadır (Pereira ve Silva,2025:2-4).

AOT sürecinde yazılım geliştiriciler düşünme becerilerini geliştirmektedirler. Bu durum ekiplerin etkili yönlendirilmesini sağlamaktadır. Domain uzmanları, AOT ile yazılım geliştirme süreçlerine aktif katılım sağlamaktadır. Bu durum ise uyuma yönelik çözümlere katkı sağlamaktadır. Yönetici tarafından bakıldığında ise ekipler arasında aktif işbirliği elde edilmektedir. Bu üçü bir araya geldiğinde ise yazılım projelerinde uzun vadeli başarı sağlanabilmektedir (Wang vd., 2023:3492-3494).

Eğer birlikte hazırlanacak proje sadece okuma, yazma, güncelleme ve silme gibi veri tabanı işlemlerine sahipse bu gibi durumlarda AOT tasarımına ihtiyaç bulunmamaktadır. Bu gibi ihtiyaçlar veri tabanı yönetim araçlarıyla kolayca çözülebilmektedir. Diğer taraftan geliştirilen proje 30 ile 40 arasında kullanıcı hikâyesine sahipse süreç karmaşık hale gelmeye başlayacaktır. Böyle bir durum fark edilirse AOT kullanımı doğru bir seçenek haline dönüşebilmektedir. Bir projenin AOT tasarımına uygun olup olmadığını belirlemek adına AOT skor tablosu kullanılmaktadır. Örnek bir AOT skor tablosu Çizelge 1’de sunulmuştur. Projeniz için toplam puan 7 veya daha fazla ise, AOT tasarımına geçiş sağlanabilir (Zhao vd., 2024:2085,2086).

Çizelge 1. AOT Skor Tablosu

Kriter / Rol	Açıklama	Puan (1-3)
AOT Temel Kavramları	Varlık, değer nesnesi, bütünlük ve depo gibi temel kavramlar bilinip uygulanıyor mu?	2
İş Süreci Modelleme Yeteneği	İş mantığı yazılım geliştirme süreçlerine katkı sağlıyor mu?	2
Domain Uzmanlarıyla İş Birliği	Yazılım geliştiricileri domain uzmanları ile çalışıyor mu?	1
Sınırlandırılmış Bağlam	Sınırlandırılmış bağlam tanımlandı mı?	1
Stratejik Tasarım Uygulamaları	Domain, uygulama ve altyapı katmanları var mı?	1
Teknik Altyapı Uygunluğu	Teknik altyapı AOT için uygun mu?	2

AOT tasarımına geçerken genellikle ADM çözümleri gündeme gelmektedir. ADM düzeninde anemik veri nesneleri, verileri taşımaktadır. Bu tasarımda iş mantığına yer verilmez. Böyle bir domain modelinin anlaşılması ve yönetilmesi zor bir sistem tasarımına yol açmaktadır. ADM modeli için 4 temel adım bulunmaktadır. Bunlardan ilki sadece veri nesneleridir. Bu gibi nesneler yazılım tasarımında var ise bu bir ADM sonucudur. İkinci adımda servisler incelenmelidir. İş mantığı genellikle servis sınıfına yazıldıysa bu takip edilir. Bu takipte domain nesnesinin sadece veri tutması ya da iş mantığının başka sınıflara dağıtılması yine ADM sonucudur. Üçüncüsü kod tekrarıdır. Bir iş mantığına ait kural birden fazla yerde uygulanıyor ise bu durum ADM sonucudur. Sonuncusu ise test edilebilirliktir. Domain nesnemiz kendi başına test edilebilmelidir. Eğer bu yapılamıyorsa iş mantığı dağıtılmış anlamına gelmektedir. Bu da yine ADM sonucudur (Méndez Valladares, 2021:2-36).

ADM ile tasarlanan bir yazılım modelinde bir banka hesabı Şekil 1’de ele alınmıştır. Modelde *hesap* sınıfı tanımlanmıştır. Ayrıca bu sınıfa ait bakiye ve hesap numarası özelliklerine yer verilmiştir. Ancak mimaride bu özellikleri işleyen metotlar yer almamaktadır. Bu sorunu çözmek için servis sınıfı oluşturularak para çekme, bakiye kontrolü ve para transferi metotları yazılmaktadır. Bu durum, tasarımda kod tekrarlarına neden olmaktadır.

```

class Hesap:
    def __init__(ozel_sinif, Bakiye, Hesap_islemi):
        ozel_sinif.Bakiye = Bakiye
        ozel_sinif.Hesap_islemi = Hesap_islemi

class Hesap_Servis:
    def hesap_istemi(ozel_sinif, Hesap, _miktar):
        if Hesap.Bakiye >= _miktar:
            Hesap.Bakiye -= _miktar
        else:
            artir_deger("Yetersiz Bakiye")

    def mevduat(ozel_sinif, Hesap, _miktar):
        Hesap.Bakiye += _miktar

    def transfer(ozel_sinif, from_Hesap, to_Hesap, _miktar):
        ozel_sinif.hesap_istemi(from_Hesap, _miktar)
        ozel_sinif.mevduat(to_Hesap, _miktar)

```

Şekil 1. ADM Örneği

Şekil 2’deki kod bloklarında *Hesap* sınıfı veriyi tutmaktadır. Aynı zamanda ilgili sınıf bu veriyi işleyen iş mantığını da içermektedir. Bu durumda para çekme, para yatırma ve transfer işlemleri doğrudan *Hesap* sınıfı içinde tanımlanmıştır. Bu tasarım AOT mimarisine uygundur.

```

class Hesap:
    def __init__(ozel_sinif, Bakiye, Hesap_islemi):
        ozel_sinif.Bakiye = Bakiye
        ozel_sinif.Hesap_islemi = Hesap_islemi

    def hesap_istemi(ozel_sinif, _miktar):
        if ozel_sinif.Bakiye >= _miktar:
            ozel_sinif.Bakiye -= _miktar
        else:
            artir_deger("Yetersiz Bakiye")

    def mevduat(ozel_sinif, _miktar):
        ozel_sinif.Bakiye += _miktar

    def transfer(ozel_sinif, to_Hesap, _miktar):
        ozel_sinif.hesap_istemi(_miktar)
        to_Hesap.mevduat(_miktar)

```

Şekil 2. Zengin domain modeli çözümü

ALAN ODAKLI TASARIMIN PRENSİPLERİ

AOT tasarımında genel anlamda üç katman bulunmaktadır. Bu katmanlar sırasıyla uygulama, domain ve altyapı katmanlarıdır. Her üç katman birbirinden farklı görevlere sahiptir. Uygulama katmanı, geliştirilen uygulamanın kullanıcı ile kodlar arasındaki iletişimini sağlamaktadır. Kullanıcı ara yüzü uygulamanın verilere, sunucu yazılımına veya diğer programlara ulaşabilmek için kullandığı bağlantı ara yüzü (API), istemcilerden gelen istekler bu katman ile yönetilmektedir. Ek olarak ilgili bir istek gerektiğinde bu istek domain bileşenlerine yönlendirilmektedir. Diğer taraftan uygulama katmanı iş kurallarını içermemektedir. Dolayısıyla iş mantığı ile ilişkili olan domain katmanı ile iletişimde etkindir. İkinci katman Domain katmanıdır. Bu katman iş mantığını içermektedir. Bu katmanda varlıklar, değer nesneleri, bütünlükler ve domain servisleri gibi araçlar bulunmaktadır. Üçüncü katman ise altyapı katmanıdır. Bu katmanda veri tabanı ile ilgili okuma, yazma, güncelleme ve silme gibi işlemler yapılmaktadır. Ayrıca dosya iş ve işlemleri, ağ ile olan iletişim ve üçüncü parti yazılımlara ait servislerle olan süreçler de bu katmanda yönetilmektedir. Domain katmanı tarafından oluşturulan ara yüzler kullanılarak oluşturulan istekler gerçekleştirilir. Bu durum bağımlılıkları tersine çevrilmesine sebep olmaktadır. Bu yapı ile daha esnek ve test edilebilir bir tasarım elde edilebilmektedir (Majumder ve Zoitl,2023:1-3).

AOT tasarımına geçişte ilk aşamada ortak dil ve sınırlı bağlam değerlendirilmelidir. Bu iki terim birbiri ile yakın ilişkiye sahiptir. Sınırlı bağlam geliştirilen uygulamadaki kavramsal bir sınır olarak değerlendirilmektedir. Böyle bir sınırın konulmasındaki temel neden ise her alt alanın kendi ortak dilini ve modelini kullanabilmesidir. Ortak dil ise çalışma ekipleri içerisinde kullanılan yapıdır. Bu dil domain uzmanları, yöneticiler ve yazılım geliştiriciler tarafından kullanılmaktadır. Dolayısıyla tüm tanımlanan rollerin bu dili kullanması gerekmektedir (Zhong vd.,2024:597-602).

Ortak dil yazılım geliştirilecek iş mantığına ait bir dil olmalıdır. Dolayısıyla bu dilde standart terimlere yer verilmektedir. Farklı rollerdeki geliştirici ve domain uzmanlarının birlikte iletişim amacıyla bu ortak dili kullanmaları önemlidir. Genellikle belirli bir uzmanlık alanına hitap edileceği için domain uzmanlarının bu dil üzerindeki etkisi daha geniş olmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken temel nokta iş mantığı çerçevesinde işlerin nasıl düşünüldüğüne ve bu işlerin nasıl yürütüldüğüne odaklanmaktır. Yol haritasında farklı fikirler ortaya çıkabilir. Bu gibi durumlar genelde iyi planlama yapılmamasından kaynaklıdır. Planlamada kavramlar, terimler ve anlamlar üzerinde anlaşılmalıdır. Ancak yine de böyle bir durum ortaya çıkarsa uzlaşa ile problem çözülebilmelidir. Dolayısıyla tüm çalışma ekibi ve ekipteki rolleri kapsayacak bir ortak dil olması AOT tasarımında önemlidir (Hoang,2024:3-26).

Ortak dili oluştururken fiziksel ve kavramsal domaini içeren Birleşik Modelleme Dili (BMD) izilmelidir. Sonrasında BMD çizimdeki her bir unsur etiketlenmelidir. Sonrasında diyagramdaki terimlerle ilgili bir doküman hazırlanmalıdır. Bu dokümanda terimlerin açıklamalarına yer verilmelidir. Son olarak bu dokümanlar ekip üyeleri tarafından incelenerek düzetme ve düzenlemeye gidilir. Bu yapılanları model geliştirme olarak değerlendirmemeliyiz (da Silva vd.,2022:419).

Sınırlı bağlamda ise domain üzerinde olması gereken alt domain yapıları arasındaki sınırlar belirlenmektedir. Bu sınırlar kullanılarak her alt domain için kendi ortak dilinin ve modelinin kullanılması sağlanmaktadır. Bu sınırlar, her alt alanın kendi dilini ve modelini kullanmasına olanak tanımaktadır. Şekil 3’de bir e-ticaret uygulamasına ait satış ve kargo olarak ayrılan alt domain mimarisi verilmiştir. Her üç alana ait sınırlı bağlamlar kullanılarak alt domainlere ait modeller tanımlanmaktadır.

```
class Sipraris_satis:
    def __init__(ozel_sinif, Siparis_id, Musteri_isim, total__miktar):
        ozel_sinif.Siparis_id = Siparis_id
        ozel_sinif.Musteri_isim = Musteri_isim
        ozel_sinif.total__miktar = total__miktar

class ShippingSiparis:
    def __init__(ozel_sinif, Siparis_id, _teslimat_adres,
izleme__islemi):
        ozel_sinif.Siparis_id = Siparis_id
        ozel_sinif._teslimat_adres = _teslimat_adres
        ozel_sinif.izleme__islemi = izleme__islemi
```

Şekil 3. Bir e-ticaret uygulamasına ait sipariş, satış ve kargo olarak ayrılan mimari

AOT için sonraki adım varlıklardır. Varlıklar, yazılım içerisinde benzersiz kimliği olan nesnelerdir. Bu nesneler kullanımda değişebilir bir yapıdadır. Şekil 4’de varlıkların sınıf kullanılarak modellenmesine ait bir örnek verilmiştir.

```
class Musteri:
    def __init__(ozel_sinif, Musteri_id, isim, eposta):
        ozel_sinif.Musteri_id = Musteri_id
        ozel_sinif.isim = isim
        ozel_sinif.eposta = eposta
```

Şekil 4. Varlıkların sınıf kullanılarak modellenmesi

Şekil 4’de verilen varlık mimarisine ait örnekte *Musteri* sınıfı üzerinden bir varlık temsil edilmektedir. *Musteri* sınıfı müşteriye temsil etmektedir. Aynı zamanda her müşteri için benzersiz bir *Musteri_id* elde edilmektedir.

AOT tasarımındaki bir sonraki adım ise değer nesneleridir. Değer nesnelerinin kimlikleri bulunmamaktadır. Bu nesneler sadece özellikleriyle tanımlanmaktadır. Yazılım tasarımı diğer varlıkların bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Şekil 5’de değer nesnelerinin kullanımına ait bir örnek kod bloğu verilmiştir.

```
class _adres:
    def __init__(ozel_sinif, posta_kodu, cadde, sehir):
        ozel_sinif.posta_kodu = posta_kodu
        ozel_sinif.cadde = cadde
        ozel_sinif.sehir = sehir
```

Şekil 5. Değer nesnelerinin kullanımına yönelik kod bloğu

Şekil 5’de tasarlanan *_adres sınıfı*, bir adres bilgisini temsil etmektedir. Bu bilginin bir kimliği bulunmamaktadır. Dolayısıyla sadece özellikleri ile tanımlıdır.

AOT tasarımıdaki bir diğer araç ise bütünlük olarak karşımıza çıkmaktadır. Bütünlük çeşitli varlıkların ve bu varlıklara bağlı değer varlıklarının bir araya getirilmesi ile elde edilen yapıdır. Bütünlük yapısının kullanılmasının temel nedeni iş mantığındaki kuralları tutarlı hale getirmektir. Şekil 6’da Bütünlük yapısına ait bir örnek kod bloğu sunulmuştur.

```
class Siparis:
    def __init__(ozel_sinif, Siparis_id, Musteri, oge):
        ozel_sinif.Siparis_id = Siparis_id
        ozel_sinif.Musteri = Musteri
        ozel_sinif.oge = oge

    def oge_ekle(ozel_sinif, item):
        ozel_sinif.oge.append(item)
```

Şekil 6. Bütünlük yapısına yönelik oluşturulan kod bloğu

Şekil 6’da sunulan kod bloğunda yer alan *Siparis sınıfı*, *müşteri* tarafından verilen siparişleri belirtmektedir. Bu sınıfta *Musteri* ve *oge* araçları da yer almaktadır. Bu araçlar da kullanılarak siparişle ilgili tüm bilgiler bir araya getirilmektedir.

AOT tasarımıda kullanılan bir diğer araç depo olarak karşımıza çıkmaktadır. Veri tabanı gibi yerlerde nesneler saklanmaktadır. Erişim ihtiyacında ise veri tabanı üzerinden erişim sağlanmaktadır. Bu gibi depolar kullanılırken yazılım diline özgü ara yüzler geliştiriciler tarafından tercih edilmektedir. Şekil 7’de depo kullanımı ile ilgili bir kod bloğu sunulmuştur.

```

from xxx import XXX, abstractmethod

class Musteri_depo(XXX):
    @abstractmethod
    def _kaydet(ozel_sinif, Musteri):
        pass
    @abstractmethod
    def find_by_id(ozel_sinif, Musteri_id):
        pass
class InMemoryMusteri_depo(Musteri_depo):
    def __init__(ozel_sinif):
        ozel_sinif._store = {}
    def _kaydet(ozel_sinif, Musteri):
        ozel_sinif._store[Musteri.Musteri_id] = Musteri
    def find_by_id(ozel_sinif, Musteri_id):
        return ozel_sinif._store.get(Musteri_id)

```

Şekil 7. Depo kullanımı ile ilgili oluşturulan kod bloğu

Şekil 7’de sunulan kod bloğunda *Musteri_depo* ara yüz olarak tasarlanmıştır. Bu ara yüz kullanılarak *InMemoryMusteri_depo* sınıfına erişim sağlanmıştır.

AOT mimarisinde kullanılan bir diğer araç ise uygulama servisleridir. Bu servisler kullanılarak domain nesneleri arasındaki iş akışları yönetilmektedir. Bu işlem ile kullanıcıya ait iş ve işlemler gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla uygulama servisleri ile iş mantığı aktif halde kullanılmaktadır. Şekil 8’de uygulama servislerine yönelik bir kod bloğu sunulmuştur.

```

class Siparis_Servis:
    def __init__(ozel_sinif, Siparis__depo):
        ozel_sinif.Siparis__depo = Siparis__depo

    def create_Siparis(ozel_sinif, Musteri, oge):
        Siparis = Siparis(Siparis_id=1, Musteri=Musteri, oge=oge)
        ozel_sinif.Siparis__depo._kaydet(Siparis)
        return Siparis

```

Şekil 8. Uygulama servislerine yönelik oluşturulan kod bloğu

Şekil 8’de sunulan kod örneğinde *Siparis_Servis* olarak isimlendirilen sınıf kullanılarak sipariş oluşturulmaktadır. Bu işlemin yönetilmesi ile *Siparis__depo* kullanılarak kullanıcının verdiği sipariş kaydedilmektedir.

AOT mimarisinde bir sonraki aşama olay kaynağıdır. Olay kaynağı geliştirilen yazılımdaki değişikliklerin kayıt edildiği bir ortamdır. Bu araç ile

yaşanacak aksaklıklarda sistem yeniden elde edilebilmektedir. Şekil 9’da olay kaynağına yönelik olarak bir kod bloğu sunulmuştur.

```
class Siparis_yer:
    def __init__(ozel_sinif, Siparis_id, Musteri_id, oge):
        ozel_sinif.Siparis_id = Siparis_id
        ozel_sinif.Musteri_id = Musteri_id
        ozel_sinif.oge = oge

class Siparis:
    def __init__(ozel_sinif, Siparis_id):
        ozel_sinif.Siparis_id = Siparis_id
        ozel_sinif._olay = []

    def place_Siparis(ozel_sinif, Musteri_id, oge):
        event = Siparis_yer(ozel_sinif.Siparis_id, Musteri_id, oge)
        ozel_sinif.apply(event)

    def apply(ozel_sinif, event):
        ozel_sinif._olay.append(event)
```

Şekil 9. Olay kaynağına yönelik oluşturulan kod bloğu

Şekil 9’daki kod mimarisinde *Siparis* sınıfı kullanılarak kullanıcının verdiği sipariş olayı kayıt altına alınmaktadır. Ayrıca bu olaylar bir liste halinde bu sınıf kullanılarak tutulmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada AOT tasarımının temel olarak nasıl bir mimaride olması gerektiği ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu tasarım kullanılarak her zaman karmaşık bir hale dönüşen yazılım geliştirme süreçlerinde iş mantığının da sürece dâhil edilmesi gerekmektedir. Bu sayede problem çözümü çevik olarak ele alınabilmektedir. Bu etkileşim için bir ortak bir dil düzenlenmektedir. Bu dil ile iletişim kuran domain uzmanları ile yazılım geliştiriciler sayesinde sağlam bir yazılım geliştirme temeli oluşturulmaktadır. AOT mimarisinde kullanılan sınırlı içerik aracı ile büyük sistemler daha küçük parçalara ayrılmaktadır. Bu işlem ile süreci yönetmek daha kolay hale gelmektedir. Ek olarak varlık, değer nesnesi, bütünlük, depo ve servis araçları ile hem iş mantığı hem de yazılımın teknik kısmı daha düzenli olmaktadır. Sonuç olarak AOT tasarımı kullanılarak kod yazma

süreci ve iş mantığı bir arada değerlendirilerek problemler daha çevik çözüme kavuşturulabilmektedir. Hızlı ve beraberce çözülen problemler iletişimi güçlendirirken geliştirilen yazılımın da kalitesini artırmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abdelfattah, A. S., Cerny, T., Yero Salazar, J., Li, X., Taibi, D., & Song, E. (2024). Assessing evolution of microservices using static analysis. *Applied Sciences*, 14(22), 10725.
- Beeraka, B. S. (2025). Modernizing enterprise architecture: A guide to microservices migration and hybrid cloud integration. *International Journal of Science and Research Archive*, 14(1), 440-447.
- da Silva, C. E., Gomes, E. L., & Basu, S. S. (2022). BPM2DDD: a systematic process for identifying domains from business processes models. *Software*, 1(4), 417-449.
- Hagal, M., Al-Awami, A. F., & Elakeili, S. (2024, May). A Framework for Improving Software Development Process Hybridization of Extreme Programming, Feature-Driven Development and Waterfall. In 2024 IEEE 4th International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA) (pp. 13-19). IEEE.
- Hoang, H. (2024). DealJunctions: Leveraging Microservices for Scalable and Flexible Promotion Platform.
- Iraqi, O., El Kadiri El Hassani, M., & Zouine, A. (2025). Microhooks: A Novel Framework to Streamline the Development of Microservices. *Computers*, 14(4), 139.
- Kassab, M., & Fernandes, J. P. (2025). The Forgotten Potential: Why Aspect-Oriented Programming Faded Away. *Computer*, 58(3), 100-104.
- Le, D. M., Dang, D. H., & Vo, H. D. (2025). Layered microservices architecture: A multitree-based domain-driven approach. *Information and Software Technology*, 183, 107720.
- Majumder, M., & Zoitl, A. (2023, September). A Domain-Driven Design Oriented OPC UA Server Development Methodology for CPPS. In 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (pp. 1-8). IEEE.
- Meckenstock, J. N. (2024). Shedding light on the dark side—A systematic literature review of the issues in agile software development methodology use. *Journal of Systems and Software*, 211, 111966.
- Méndez Valladares, Ó. (2021). Walkthrough the Domain-Driven Design for developing a microservices system: a case study (Doctoral dissertation, ETSI Informatica).
- Natarajan, T., & Pichai, S. (2024). Transition from Waterfall to Agile Methodology-An Action Research Study. *IEEE Access*.

- Oukes, P., Van Andel, M., Folmer, E., Bennett, R., & Lemmen, C. (2021). Domain-Driven Design applied to land administration system development: Lessons from the Netherlands. *Land use policy*, 104, 105379.
- Oyeniran, O. C., Adewusi, A. O., Adeleke, A. G., Akwawa, L. A., & Azubuko, C. F. (2024). Microservices architecture in cloud-native applications: Design patterns and scalability. *International Journal of Advanced Research and Interdisciplinary Scientific Endeavours*, 1(2), 92-106.
- Özkan, O., Babur, Ö., & Van Den Brand, M. (2023). Refactoring with domain-driven design in an industrial context: An action research report. *Empirical Software Engineering*, 28(4), 94.
- Pereira, P., & Silva, A. R. (2025). Microservices simulator: An object-oriented framework for transactional causal consistency. *Science of Computer Programming*, 239, 103181.
- Sangabriel-Alarcón, J., Ocharán-Hernández, J. O., Limón, X., & Cortés-Verdín, M. K. (2024). Domain-driven design in microservices-based systems development: a systematic literature review and thematic analysis. *Programming and Computer Software*, 50(8), 742-770.
- Shrestha, D. (2024). Navigating software architecture: evaluating monolithic architectures in modern development.
- Singjai, A., Zdun, U., Zimmermann, O., & Pautasso, C. (2021, July). Patterns on deriving apis and their endpoints from domain models. In *Proceedings of the 26th European Conference on Pattern Languages of Programs* (pp. 1-15).
- Spray, J., Sinha, R., Sen, A., & Cheng, X. (2021). Building maintainable software using abstraction layering. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 48(11), 4397-4410.
- Tian, Z., Yang, Y., & Cheng, S. (2023, May). Rm2dm: A tool for automatic generation of oo design models from requirements models. In *2023 IEEE/ACM 45th International Conference on Software Engineering: Companion Proceedings (ICSE-Companion)* (pp. 36-40). IEEE.
- Wang, B., Gong, S., & Yang, Y. (2023). Innovation capability, global cooperation, and sustainable development along the Belt and Road Initiative. *Sustainable Development*, 31(5), 3490-3512.
- Zhao, Z., Deng, S., Ma, Y., Gao, Q., & Zhao, N. (2024). Software project measurement based on the 5P model. *Soft Computing*, 28(3), 2083-2105.
- Zhong, C., Zhang, H., Huang, H., Chen, Z., Li, C., Liu, X., & Li, S. (2024). DOMICO: Checking conformance between domain models and implementations. *Software: Practice and Experience*, 54(4), 595-616.

Derin Öğrenme ile PV Arıza Tespiti

Raheleh GHADAMI

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul Topkapı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
melisarahebi@topkapi.edu.tr

ÖZET

Bu makale, fotovoltaik (PV) sistemlerde derin öğrenme temelli bir hata tespiti projesini ayrıntılı bir şekilde incelemektedir. Günümüzde artan fotovoltaik enerji kullanımı, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik talebin artmasıyla paralel olarak, fotovoltaik sistemlerin güvenilirliği ve performansı önemli bir odak noktası haline gelmiştir. Bu bağlamda, makalede sunulan proje, PV sistemlerinde meydana gelebilecek çeşitli hataları tanımlamak ve belirlemek amacıyla derin öğrenme yöntemlerini kullanmaktadır. Özellikle güneş panellerinin sayılarının artmasıyla birlikte, insan gözüyle bu tespitin karmaşık ve zorlu bir süreç haline gelmiştir. Derin öğrenme tabanlı hata tespit sistemi, bu zorlu süreci başarılı bir şekilde yöneterek, fotovoltaik enerji sistemlerinin güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir. Yapay sinir ağları ve derin öğrenme algoritmaları, PV sistemlerinde ortaya çıkabilen arızaları otomatik olarak tanımlamak ve sınıflandırmak için eğitilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Sistemler, Derin Öğrenme, Hata Tespiti, Yapay Sinir Ağları.

GİRİŞ

Son yıllarda, küresel ısınma ve fosil yakıtların azalması güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) olan ilgiyi arttırmıştır. Bu enerji kaynaklarının arasında, güneş enerjisi dikkat çeken YEK türlerinden biridir. Güneş enerjisi, muazzam potansiyel gücü ve güvenli enerji üretimi gibi özellikleri sayesinde daha kabul edilebilir ve gelecek vaat eden bir enerji kaynağı haline gelmiştir [1][2].

Günümüzde, fotovoltaik (PV) sistemler, temiz enerji üretiminde önemli bir role sahip olup, enerji sektörünü dönüştürmekte ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmaktadır [3]. Ancak, PV sistemlerinin performansını etkileyen çeşitli faktörler, arızalar ve hatalar meydana gelebilmektedir. Bu hataların erken tespiti ve doğru sınıflandırılması, sistem güvenilirliğini artırmak, bakım maliyetlerini azaltmak ve enerji verimliliğini optimize etmek açısından kritik öneme sahiptir.

Fotovoltaik hata tespiti, geleneksel yöntemlerle genellikle karmaşık ve zaman alıcı olabilir. Bu bağlamda, derin öğrenme teknikleri, büyük veri setleri üzerinde etkili bir şekilde öğrenme yeteneği ile öne çıkmaktadır [4]. Yapay sinir ağları, derin öğrenme algoritmaları ve makine öğrenimi

teknikleri, fotovoltaik sistemlerdeki hataları otomatik olarak tanımlama yeteneği ile dikkat çekmektedir.

Bu makalede, fotovoltaik sistemlerde hata tespiti için derin öğrenme yaklaşımını, yapay sinir ağlarının fotovoltaik hata tespiti üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde inceleyeceğiz. Ayrıca, geliştirilen modelin gerçek dünya uygulamalarındaki başarılarına odaklanarak, fotovoltaik sistemlerin güvenilirliğini artırmak için bu yeni yaklaşımın potansiyelini vurgulayacağız.

Bu bağlamda, önerdiğimiz derin öğrenme tabanlı fotovoltaik hata tespiti yönteminin, enerji sektöründe önemli bir kilometre taşı olabileceğine inanmaktayız. Öncü çalışmaların sunduğu başarı örneklerini inceleyerek, derin öğrenme tekniklerinin fotovoltaik sistemlerdeki hataların tespiti ve sınıflandırılmasında ne kadar etkili olduğunu anlamamız mümkündür [5][6].

Bu makale, fotovoltaik enerji sistemlerinin güvenilirliğini artırmak, bakım süreçlerini optimize etmek ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamak amacıyla yapılan bu yenilikçi araştırmayı daha geniş bir kitleyle paylaşmayı hedeflemektedir.

LİTERATÜR TARAMASI

Fotovoltaik (PV) sistemlerde hata tespiti, günümüzde enerji sektöründeki önemli bir araştırma alanını oluşturmaktadır. Bu bağlamda, derin öğrenme ve yapay zeka tekniklerinin fotovoltaik hata tespiti üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla yapılan çeşitli çalışmalar literatürde yer almaktadır.

Wang ve ekibi (2020) tarafından yapılan çalışmada, derin öğrenme tekniklerinin PV sistemlerinde hata tespiti konusundaki uygulanabilirliği incelenmiştir [5]. Yapılan bu çalışma, yapay sinir ağlarının PV sistemlerindeki arızaları tanıma yeteneklerini öne çıkarmaktadır.

Zhang ve diğerleri (2020), fotovoltaik grid-bağlantılı inverterlerde oluşabilecek arızaların teşhisi için yapay sinir ağlarının kullanımını ele alan bir çalışma gerçekleştirmiştir [6]. Bu çalışma, yapay sinir ağlarının PV sistemlerindeki inverter hatalarını etkili bir şekilde tanımlama yeteneğini vurgulamaktadır.

Gupta ve arkadaşları (2021), derin sinir ağlarını kullanarak fotovoltaiik sistemlerde hata tespit doğruluğunu artırmaya odaklanan bir çalışma yayınlamıştır [7]. Bu çalışma, derin öğrenme tekniklerinin PV sistemlerindeki hata tespiti performansını önemli ölçüde geliştirebileceğini göstermektedir.

Ayrıca, Chen ve ekibi (2021) tarafından yapılan karşılaştırmalı bir çalışma, farklı makine öğrenimi yaklaşımlarının fotovoltaiik sistemlerde hata tespiti üzerindeki etkilerini analiz etmektedir [8]. Bu çalışma, çeşitli makine öğrenimi yöntemlerinin avantajlarını ve zayıf yönlerini ortaya koymaktadır.

FV kapasitesinin 2030 yılında 3,518 TWh'lik enerji üretimini karşılayabileceği tahmin edilmektedir [9].

Çizelge 1. İki Veri Setinin Birleştirilmiş Hali

	Fault	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...	89999
0	1.0	14	14	14	15	16	17	17	17	17	...	4
1	1.0	29	29	29	28	28	29	29	29	28	...	10
2	1.0	29	29	30	30	30	30	30	30	30	...	0
3	0.0	35	35	35	36	36	36	36	36	37	...	0
4	1.0	39	39	40	40	40	40	41	41	41	...	0
....												

Kurulum sırasında panelin kırılması veya çatlaması, karlanma, böcek izleri, yanık izleri ve renk değişimi gibi farklı birçok arıza meydana gelebilir. Ayrıca, hatalı lehimleme veya bağlantı gibi üretim hataları da FV panellerin hasarlı olmasına sebep olabilir. Bu tür çeşitli problemler, FV sistemlerinin akım akışını engelleyerek üretim gücünü ve verimliliğini azaltır. Bu nedenle, güneş enerjisi üretim santrallerinde, maksimum verimi sağlamak için panellerin çalışma durumunu izlemek ve arızalı üniteleri değiştirmek veya onarmak gerekir [10][11].

Yapılan literatür taraması, derin öğrenme ve yapay sinir ağlarının fotovoltaiik sistemlerde hata tespiti alanında önemli potansiyellere sahip olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalar, fotovoltaiik enerji sistemlerinin güvenilirliğini artırmak ve bakım süreçlerini optimize etmek amacıyla geliştirilen inovatif yaklaşımları ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, bu makalede ele alınan derin öğrenme tabanlı fotovoltaiik hata tespiti yöntemi, literatürdeki benzer çalışmaların izinden gitmektedir.

MATERYAL & METOT

A. VERİ TOPLAMA

Bu çalışmanın veri toplama aşamasında, güneş panellerindeki arızaları analiz etmek üzere bir dizi güneş paneli resmini içeren bir klasör ve bu resimlere ait arıza yüzdelerini içeren bir CSV dosyası kullanılmıştır.

Toplamda 2624 adet resim içeren bu veri kümesi, gerçek dünya koşullarında maruz kalan güneş panellerinin çeşitli arızalarını yansıtmaktadır.

Veri kümesinin oluşturulması sürecinde, her bir resim 300x300 piksel boyutlarındadır. Bu pikseller, güneş panellerindeki detayları yakalamak ve arızaların doğru bir şekilde sınıflandırılabilmesi için kullanılmıştır. Her bir resmin ayrı bir kimlikle belirlendiği ve bu resimlere ait arıza yüzdelerini içeren bir CSV dosyasının bulunduğu bir veri tablosu oluşturulmuştur.

Çizelge 1'de gösterildiği gibi, bu veri tablosu 2624 satır ve 90001 sütundan oluşmaktadır. Her bir sütun, bir resmin piksellerini temsil ederken,

son sütun olan "fault" sütunu, her bir resmin arıza yüzdesini göstermektedir. Bu yapı, veri setinin detaylı bir şekilde temsilini sağlamakta ve derin öğrenme modelinin eğitilmesi için güçlü bir temel oluşturmaktadır.

Ayrıca, Çizelge 1'de gösterilen veri setinin tablolştırılmış hali, her bir resmin piksel değerlerini ve bu resimlere ait arıza yüzdeslerini içeren kapsamlı bir veri setini göstermektedir. Bu çizelge, projemizin veri toplama aşamasında elde ettiğimiz kapsamlı ve çeşitli veri kümesini daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır.

Bu veri toplama süreci, projemizin temelini oluşturan güçlü bir veri setinin elde edilmesini sağlamıştır, bu da derin öğrenme modelimizin etkili bir şekilde eğitilmesini ve güneş panellerindeki arızaların doğru bir şekilde sınıflandırılmasını hedeflemektedir.

B. VERİ ÖN İŞLEME

İlk adım olarak, güneş paneli resimlerinin bulunduğu veri setini projemize yüklüyoruz. Bu süreçte, resimleri bir liste içerisine ekliyoruz. Resimlerin listeye karışık bir şekilde eklenmiş olabileceği durumları önlemek için, liste üzerinde sort metodunu kullanarak resimleri alfabetik sıraya göre düzenliyoruz.

Daha sonra, resim listesini sırayla dolaşarak her bir resmi matrix formuna dönüştürüyoruz. Bu, resimleri sayısal verilere çevirerek bilgisayar tarafından işlenebilir hale getirme işlemidir. Elde ettiğimiz her bir matrixi, bir pandas DataFrame'e ekliyoruz.

Çizelge 2. Veri Setinin Normalize Edilmiş Hali

	Fault	0	1	2	3	4	5	6	...	89999
0	1.0	0.105263	0.105263	0.106061	0.113636	0.123077	0.13076	0.130769	...	0.030303
1	1.0	0.218045	0.218045	0.219697	0.212121	0.215385	0.223077	0.223077	...	0.075758
2	1.0	0.218045	0.218045	0.227273	0.227273	0.230769	0.230769	0.230769	...	0.000000
3	0.0	0.263158	0.263158	0.265152	0.272727	0.276923	0.276923	0.27692	...	0.000000
4	1.0	0.293233	0.293233	0.303030	0.303030	0.307692	0.307692	0.315385	...	0.000000
....										

Bu DataFrame, her bir güneş paneli resminin sayısal temsilini içerir ve modelin eğitimi için giriş verisi olarak kullanılacaktır.

C. VERİ NORMALİZASYONU

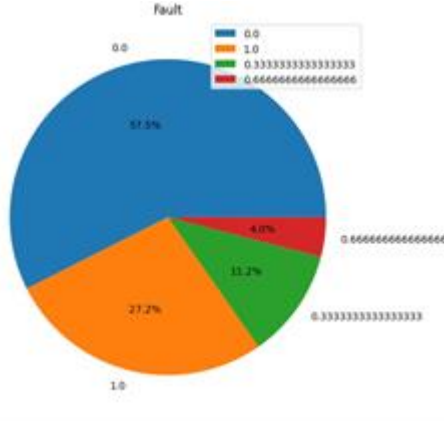
Derin öğrenme modelimizin daha etkili ve performanslı olabilmesi için, büyük boyuttaki veri kümesini daha küçük boyutlara dönüştürmek amacıyla normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Normalizasyon işlemi, projemizin derin öğrenme modelinin daha iyi öğrenmesini ve genelleme yapmasını desteklemek üzere başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu işlem, verileri 0 ile 1 arasında ölçekleyerek, piksel değerlerinin daha homojen bir dağılıma sahip olmasını sağlar. Çizelge 2, normalizasyon işlemi uygulanmış piksel değerlerini ve arıza yüzdelerini içeren tablolastırılmış bir veri setini göstermektedir.

Normalizasyon süreci, her bir piksel değerini (0 ile 255 arasında değişen) 0 ile 1 arasında bir değere dönüştürmektedir. Bu, modelin öğrenme sürecini stabilize eder ve aynı zamanda ağırlıkları daha etkili bir şekilde güncellemesine yardımcı olur.

Çalışmamız kapsamında, normalizasyon işlemi, projemizde kullanılan 300x300 piksel boyutundaki güneş paneli resimlerindeki piksel değerlerine uygulanmıştır. Bu sayede, derin öğrenme modeli, daha geniş bir öğrenme aralığına sahip olacak ve eğitim süreci daha hızlı ve kararlı bir şekilde gerçekleşecektir.

D. VERİ GÖRSELLEŞTİRME

Veri setimizin arıza yüzdelerini daha etkili bir şekilde anlamak ve sunmak amacıyla, şekil 1'de gösterilen pasta grafiğini oluşturduk. Bu grafikte her bir dilim belirli bir arıza yüzdesini görsel bir şekilde temsil etmektedir.



Şekil 1. Arıza Dağılım Grafiği

Şekil 1, her bir dilimin belirli ettiği bir pasta grafiği sunmaktadır. Örneğin, "0.33" etiketine sahip dilim, panellerin az hasarlı olduğunu, "0.66" etiketine sahip dilim ise biraz daha hasarlı olduğunu göstermektedir. Bu görselleştirme, projemizin sonuçlarını değerlendirmemize ve derin öğrenme modelimizin belirli arıza türlerini doğru bir şekilde sınıflandırıp sınıflandırmadığını anlamamıza yardımcı olacaktır.

Bu pasta grafiği, veri setimizin arıza yüzdelerini açıkça göstererek, modelimizin güneş panellerindeki farklı arıza türlerini ne kadar doğru bir şekilde tespit ettiğine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

E. MODEL SEÇİMİ

Bu çalışmada, güneş panellerindeki arıza tespiti için Convolutional Neural Network (CNN) tabanlı bir model kullanılmıştır. CNN, görüntü tanıma görevlerinde üstün performans sergileyen ve özellikle uzamsal özelliklerin çıkarılması konusunda etkili olan bir derin öğrenme mimarisidir. Modelimiz, evrişimli katmanlarla giriş görüntülerinden özelliklerin çıkarılmasını, pooling katmanları ile özellik haritalarının küçültülmesini ve tam bağlantılı katmanlar ile arıza yüzdesi tahminini gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Özellikle, 'relu' aktivasyon fonksiyonu ve 'softmax' aktivasyon fonksiyonu, modelin öğrenme yeteneklerini artırmak için kullanılmıştır. Bu özellikler, modelin güneş paneli arızalarını başarıyla tespit etme yeteneğini artırmaktadır.

F. EĞİTİM VE TEST VERİLERİ

Derin öğrenme modelimizin eğitimi ve değerlendirmesi için, projemizdeki veri kümesini eğitim ve test setlerine bölerek adım attık. Toplamda 2624 adet güneş paneli resmini içeren veri setimizi, eğitim verileri (%60) ve test verileri (%40) olarak oranlayarak modelimizin performansını objektif bir şekilde değerlendirdik. Eğitim süreci, normale dönüştürülmüş resim verilerini içeren x_{train} ve bu resimlere ait arıza yüzdelerini içeren y_{train} ile gerçekleştirildi. Aynı zamanda, modelin genelleme yeteneğini değerlendirmek üzere ayrılan test seti, x_{test} ve y_{test} olarak belirlendi.

Elde edilen veri setinin boyutları, CNN modelimizin eğitim sürecinin ve performansının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu adım, projemizin başarısını daha etkili bir şekilde değerlendirmemize olanak tanırken, derin öğrenme modelimizin güneş paneli arızalarını doğru bir şekilde sınıflandırma yeteneğini objektif bir şekilde ölçebilmemizi sağlar.

Oluşturulan Convolutional Neural Network (CNN) modelinin eğitimi tamamlandıktan sonra, test veri seti üzerinde yapılan değerlendirme sonuçları elde edildi. Modelin performansını ölçmek amacıyla kullanılan test seti, projenin başarısını değerlendirmek üzere ayrılmıştı. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir: Test Accuracy: 70.29%

Bu sonuç, CNN modelinin güneş panellerindeki arızaları doğru bir şekilde sınıflandırma yeteneğini temsil etmektedir. Yüksek bir doğruluk oranı, modelin genelleme yeteneğinin güçlü olduğunu ve eğitim sürecinde öğrendiklerini yeni verilere başarıyla uygulayabildiğini göstermektedir. Ancak, projenin daha geniş bir bağlamda değerlendirilmesi ve modelin performansının detaylı bir analizi, daha kapsamlı bir sonuç çıkarılmasını sağlayacaktır. Bu sonuç, güneş paneli arıza tespiti konusundaki derin öğrenme tabanlı yaklaşımın başarılı bir şekilde uygulandığını ve önemli bir başarı elde edildiğini göstermektedir.

BULGULAR & TARTIŞMA

Bu çalışma, güneş panellerindeki arızaların tespiti amacıyla derin öğrenme tabanlı bir yaklaşımın uygulanmasını incelemiştir. Veri setimizde yer alan güneş paneli resimleri ve bu resimlere ait arıza yüzdeleri kullanılarak oluşturulan Convolutional Neural Network (CNN) modeli, önemli sonuçlar elde etmiştir. Bulgular ve tartışmalar şu şekildedir:

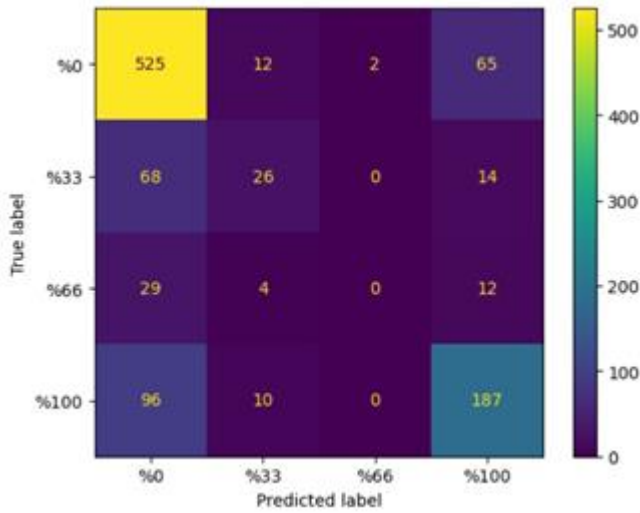
Eğitim ve Test Sonuçları:

CNN modelinin eğitimi sonucunda elde edilen Test Accuracy oranı %70.29 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, modelin genelleme yeteneğinin yüksek olduğunu ve yeni verilere uyum sağlayabildiğini göstermektedir.

Confusion Matrix Analizi:

Oluşturulan confusion matrix, modelin her bir sınıfı ne kadar doğru ve yanlış sınıflandırdığını görsel olarak ifade eder. Tablo, modelin gerçek değerlerine (satırlar) karşı tahminlerini (sütunlar) içerir. Her bir hücre, ilgili sınıfın doğru (köşegen hücreler) veya yanlış (köşegen dışındaki hücreler) bir şekilde sınıflandırılmasını temsil eder.

Örneğin, confusion matrix'de "%33" sınıfının gerçek değerleri ile modelin tahminleri karşılaştırılır. Köşegen hücre, doğru sınıflandırmaları gösterirken, köşegen dışındaki hücreler yanlış sınıflandırmaları temsil eder. Bu görselleştirme, modelin her bir arıza kategorisini ne kadar doğru sınıflandırdığını anlamamıza ve modelin güçlü ve zayıf yönlerini belirlememize yardımcı olacaktır. Confusion matrix, dört farklı arıza kategorisinin (0%, 33%, 66%, 100%) model tarafından nasıl sınıflandırıldığını gösterir. Her bir hücre, belirli bir gerçek değeri temsil ederken, hücre içindeki sayılar o sınıfa ait tahminlerin sayısını ifade eder.



Şekil 2. Confusion Matrix

Gerçek değeri %0 olan örneklerde, modelin %0 tahminiyle doğru sınıflandırdığı örnek sayısı 525'dir.

Gerçek değeri %33 olan örneklerde, modelin %33 tahminiyle doğru sınıflandırdığı örnek sayısı 26'dır.

Gerçek değeri %66 olan örneklerde, modelin %66 tahminiyle doğru sınıflandırdığı örnek sayısı 0'dır.

Gerçek değeri %100 olan örneklerde, modelin %100 tahminiyle doğru sınıflandırdığı örnek sayısı 187'dir.

Bu sayısal değerler, modelin her bir sınıf için ne kadar doğru ve yanlış tahmin yaptığını göstermektedir. Şekil 3, confusion matrix'in görsel bir temsilini sunarak, modelin performansını daha anlamlı bir şekilde değerlendirmemize olanak tanır. Bu görselleştirme, modelin belirli arıza kategorilerini ne kadar doğru sınıflandırdığını ve nerede hatalar yaptığını daha ayrıntılı bir şekilde anlamamıza yardımcı olur.

Sonuçların Genellenmesi:

Bu çalışma, derin öğrenme modeli ile güneş paneli arızalarının tespitini başarıyla gerçekleştirmiştir. Elde edilen bulgular, güneş enerjisi sistemlerindeki arızaların otomatik tespitinin gelecekte daha yaygın ve etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Gelecekteki Çalışma İmkanları:

Modelin performansının daha da artırılması için veri setinin daha genişletilmesi ve farklı ışık koşulları, hava durumu vb. faktörlerin dikkate alınması, modelin genelleme yeteneğini artırabilir. Farklı derin öğrenme mimarilerinin ve hiperparametrelerin test edilmesi, daha etkili modellerin oluşturulmasına olanak tanıyabilir.

Bu çalışmanın bulguları, güneş panellerindeki arızaların otomatik tespiti konusundaki derin öğrenme yaklaşımının potansiyelini ortaya koymaktadır. Ancak, bu alandaki çalışmaların daha da geliştirilmesi ve genişletilmesi gerekmektedir.

SONUÇLAR

Modelin eğitimi tamamlandığında elde edilen %79 train accuracy ve %70 test accuracy sonuçları, güneş panellerindeki arıza tespiti konusundaki başarıyı göstermektedir. Eğitim veri setinde elde edilen yüksek doğruluk oranları, modelin bu veri setine uygun bir şekilde öğrenme yeteneğini yansıtmaktadır. Ancak, test veri setindeki bir miktar düşük doğruluk oranı, modelin genelleme yeteneğinin belirli koşullarda sınırlı olabileceğini gösterebilir. Yüksek eğitim doğruluğuna rağmen, modelin test veri setindeki performansındaki bu farklılık üzerinde durmak önemlidir. Bu durum, modelin belirli özelliklere veya veri setinin özel koşullarına aşırı uyum sağlayabileceğini işaret edebilir. Modelin genelleme yeteneğini artırmak için, gelecekteki çalışmalarda daha çeşitli ve geniş kapsamlı bir veri seti kullanılabilir veya modelin hiperparametreleri daha fazla ayarlanabilir. Sonuç olarak, elde edilen doğruluk oranları, modelin güneş panellerindeki arızaları tanımlama konusundaki yeteneğini göstermektedir.

REFERENCES

- [1] Korkmaz D. SolarNet: A hybrid reliable model based on convolutional neural network and variational mode decomposition for hourly photovoltaic power forecasting. Appl Energy 2021;300:117410.

- [2] Acikgoz H. A novel approach based on integration of convolutional neural networks and deep feature selection for shortterm solar radiation forecasting. *Appl Energy* 2022;305:117912.
- [3] Smith, A. et al., "Renewable Energy and the Path to a Sustainable Future." *Energy Reports*, vol. 6, 2020, pp. 178-186.
- [4] LeCun, Y. et al., "Deep Learning." *Nature*, vol. 521, no. 7553, 2015, pp. 436-444.
- [5] Wang, J. et al., "Fault Diagnosis of Photovoltaic Systems Using Deep Learning Techniques." *Solar Energy*, vol. 212, 2020, p. 804-814.
- [6] Zhang, L. et al., "Application of Artificial Neural Network in Fault Diagnosis of Photovoltaic Grid-connected Inverter." *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 143348-143359.
- [7] Gupta, R. et al., "Enhancing Fault Detection Accuracy in Photovoltaic Systems through Deep Neural Networks." *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 13, 2021, p. 043456.
- [8] Chen, S. et al., "A Comparative Study of Machine Learning Approaches for Fault Detection in Photovoltaic Systems." *Solar Energy*, vol. 225, 2021, pp. 1-12.
- [9] Khezri R, Mahmoudi A, Aki H. Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: Review challenges and new perspectives. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;153:111763.
- [10] Naveen Venkatesh S, Sugumaran V. Machine vision based fault diagnosis of photovoltaic modules using lazy learning approach. *Meas J Int Meas Confed* 2022;191:110786.
- [11] Otamendi U, Martinez I, Quartulli M, Olaizola IG, Viles E, Cambarau W. Segmentation of cell-level anomalies in electroluminescence images of photovoltaic modules.

Cilt Lezyonu Görüntülerinde Derin Öğrenme Yaklaşımları: ISIC 2019 Veri Kümesi Üzerinden Transfer Learning Modellerinin ve Özel CNN Modelinin Karşılaştırılması

Berk Tolga ÇİFCİ^{1*}

Nihan ÖZBALTAN²

¹Bilgisayar Mühendisliği / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bakırçay Üniversitesi, Türkiye

²Bilgisayar Mühendisliği / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bakırçay Üniversitesi, Türkiye

* (6053027@bakircay.edu.tr)

ÖZET

Bu çalışma, cilt lezyonlarının sınıflandırılması amacıyla ISIC 2019 veri seti üzerinde derin öğrenme modellerinin karşılaştırmalı performansını analiz etmektedir. Veri seti 25.331 adet dermoskopik görüntü ve 8 sınıf içermektedir. Sınıflar arası ciddi bir dengesizlik mevcuttur. Bu açıdan model geliştirmelerine başlamadan önce sınıf dengesizliği ele alınarak azınlık olan sınıflar için daha adil bir temsil oluşturulmaya çalışıldı. Dengeli sınıf ağırlığı kullanılması durumunda azınlık sınıflar daha baskın hale geldiler. Buna karşılık normalize sınıf ağırlığı ile hem veri adedi fazla olan sınıflar hem de azınlık sınıflar arasında bir denge kuruldu. Çalışmada, bir adet özel olarak tasarlanmış CustomCNN mimarisine ek olarak VGG16, ResNet50, DenseNet121 ve InceptionV3 gibi yaygın olarak kullanılan transfer learning tabanlı modeller değerlendirilmiştir. Modellerin başarımı, eğitim ve doğrulama süreçlerindeki doğruluk ve kayıp değerlerinin yanı sıra test seti üzerinde sınıflandırma raporları, karışıklık matrisleri ve ROC–AUC eğrileri üzerinden analiz edilmiştir. DenseNet121 ve InceptionV3 modelleri, sınıf ayrımı gücü bakımından öne çıkarken; CustomCNN, sade yapısına rağmen test doğruluğu bakımından en yüksek değeri sağlamıştır (%57,94). ROC–AUC skorları incelendiğinde ise özellikle InceptionV3 modelinin küçük sınıflar üzerinde dengeli performans sunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm modellerin öğrenme eğrileri, erken epoch'lardan itibaren doğrulama doğruluğunda artış göstererek eğitim süreçlerinin tutarlılığını ortaya koymuştur. Bu kapsamlı analiz, cilt lezyonlarının otomatik teşhisi için derin öğrenme modellerinin avantaj ve sınırlılıklarını göstermekte ve ileri araştırmalara ışık tutmaktadır. Ayrıca farklı model türlerinin zayıf sınıf temsiliinde ne derece etkili olduğunu görselleştirmelerle ortaya koyarak klinik destekli karar sistemlerine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler – Cilt Lezyonu Sınıflandırması, Tıbbi Görüntü Sınıflandırma, Transfer Öğrenimi (Transfer Learning), Convolutional Neural Network (CNN), Derin Öğrenme Modelleri Performans Karşılaştırması.

GİRİŞ

Cilt kanserleri, dünya genelinde en sık görülen kötü huylu tümörler arasında yer almakta ve erken tanı hayati önem taşımaktadır. Ancak dermoskopik görüntüler üzerinden doğru ve hızlı teşhis koymak, uzmanlık gerektiren bir süreçtir. Bu noktada, yapay zekâ tabanlı otomatik sınıflandırma sistemleri, klinik karar destek araçları olarak giderek önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, ISIC 2019 yarışmasının üçüncü görevi kapsamında yayımlanan dermoskopik görüntüleri içeren veri kümesi kullanılarak, cilt lezyonlarının sınıflandırılması amaçlanmıştır. Derin öğrenme mimarileriyle

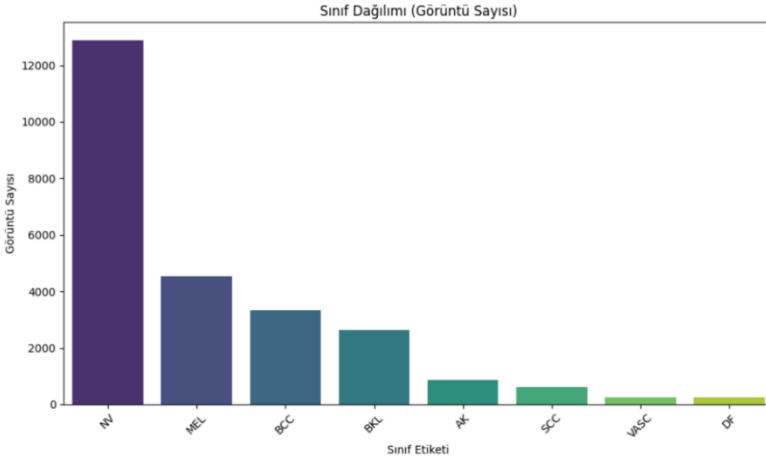
gerçekleştirilen bu sınıflandırma problemine yönelik olarak hem sıfırdan tanımlanan özelleştirilmiş CNN mimarisi hem de önceden eğitilmiş (pre-trained) modellerle oluşturulmuş transfer learning yaklaşımları kullanılmıştır. VGG16, ResNet50, DenseNet121, InceptionV3 gibi modern transfer learning tabanlı modeller değerlendirilmiştir. Model mimarilerinin tümü, sabitlenmiş temel katmanlarla ve normalize edilmiş sınıf ağırlıklandırılması stratejisiyle eğitilmiştir. Tüm modeller aynı eğitim-doğrulama-test oranları ile (64/16/20) çalıştırılmış ve karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

A. Kullanılan Veri Kümesi

Bu çalışmada kullanılan veri seti, ISIC 2019: *Skin Lesion Analysis Towards Melanoma Detection Challenge* kapsamında yayımlanmış açık erişimli bir dermoskopik görüntü koleksiyonudur. Veri seti; HAM10000 [1], BCN20000 [2] ve MSK [3] olmak üzere üç farklı kaynaktan derlenmiştir. ISIC 2019 veri seti, farklı cilt lezyonlarını temsil eden sekiz sınıftan oluşmaktadır. Bu sınıflar arasında; cilt kanseri türleri olan Melanoma (melanom) ve Basal Cell Carcinoma (bazal hücreli karsinom), iyi huylu bir ben türü olan Nevus (ben), yine iyi huylu bir deri tümörü olan Dermatofibroma (dermatofibrom), damarsal yapılar içeren Vascular Lesion (vasküler lezyon), yaşlılıkla birlikte görülebilen Pigmented Benign Keratoses (pigmente iyi huylu keratozlar) ve Actinic Keratoses / Bowen's Disease (aktinik keratoz / Bowen hastalığı) gibi kanser öncüsü olabilen lezyonlar yer almaktadır. Bu çeşitlilik, yalnızca malign (kötü huylu) lezyonların tespiti değil, aynı zamanda benign (iyi huylu) ve premalign (kanser öncüsü) yapılar arasında doğru sınıflandırma yapılmasını da gerektirmektedir. Toplam 25.331 adet JPEG formatında dermoskopik görüntü ve karşılık gelen tanı etiketleri mevcuttur. Bu çalışmada yalnızca Task 3 (Lesion Diagnosis) görevine ait görüntüler ve etiketler kullanılmıştır. Veri seti, Creative Commons CC-BY-NC lisansı altında sunulmaktadır. Etiketler one-hot encoding formatında olup, her görsel için yalnızca bir sınıf sütununda "1" olacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu yapı kullanılarak her görüntünün ait olduğu sınıf ismi çıkarılmıştır. Tüm görüntüler, model eğitimi öncesinde 224×224 piksel boyutuna yeniden boyutlandırılmıştır. Model eğitimi ve değerlendirmesi için veri, aşağıdaki oranlarla üç alt kümeye ayrılmıştır: %64 eğitim, %16 doğrulama ve %20 test. Sınıf dengesini koruyabilmek için stratified split yöntemi kullanılmıştır.

B. Sınıf Dengesizliği ve Ağırlıklandırma



Şekil 1. Sınıf dağılımı

Veri setinde yer alan dokuz sınıfın örnek dağılımı Şekil 1’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere Melanocytic Nevus (NV) sınıfı, 12.000’den fazla örnek ile veri setinin çok büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Buna karşın Dermatofibroma (DF), Vascular Lesion (VASC) ve Squamous Cell Carcinoma (SCC) gibi sınıflar oldukça az sayıda örnek içermektedir. Bu durum, sınıflar arası ciddi bir dengesizliğe işaret etmektedir.

Sınıf dengesizliğinin model eğitimi sırasında büyük sınıfların lehine önyargıya neden olmaması için sınıf ağırlığı yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, *dengeli sınıf ağırlığı (balanced class weighting)* uygulanmıştır. Bu yöntemde her sınıf, veri setindeki ters frekansına göre ağırlıklandırılmıştır. Ancak bu durumda Actinic Keratosis (AK) ve SCC gibi sınıflar 13.24 ve 12.51 gibi yüksek ağırlıklar almış, bu da modelin eğitim sürecinde stabilite sorunlarına yol açmıştır. Dengeli sınıf ağırlıkları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Dengeli sınıf ağırlıkları

Sınıf	Normalize Ağırlık
MEL	3.65
NV	0.95
BCC	1.20
AK	13.24
BKL	0.70
DF	0.25
VASC	5.04
SCC	12.51

Bu nedenle alternatif olarak normalize edilmiş sınıf ağırlığı yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde, dengeli sınıf ağırlıkları min-max ölçekleme ile normalize edilmiştir. Böylece aşırı uçurumlar azaltılarak modelin öğrenme süreci daha dengeli hale getirilmiştir. Normalize işlemi, Min-Max ölçeklendirme yöntemiyle [0.5, 5.0] aralığına çekilerek yapılmıştır. (1) numaralı denklemde gösterildiği gibi normalize edilmiştir.

$$\text{NormalizeAğırlık}_i = 0.5 + 4.5 \cdot \frac{w_i - \min(w)}{\max(w) - \min(w)} \quad (1)$$

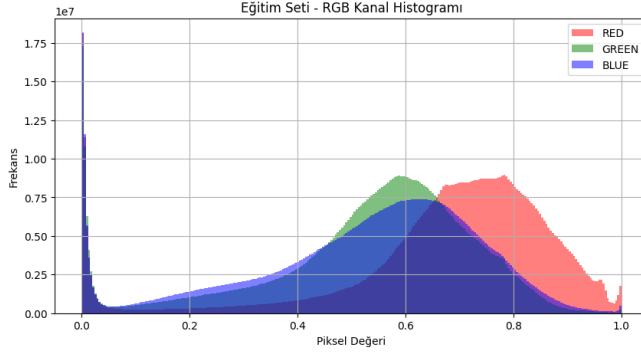
Burada w_i , i numaralı sınıfın ham ağırlığını, $\min(w)$ ve $\max(w)$ ise tüm sınıflar için minimum ve maksimum ağırlıkları ifade etmektedir. 0.5, normalize edilen ağırlıkların alt sınırını; 4.5 ise normalizasyon aralığının genişliğini ifade etmektedir. Bu katsayılarla, tüm ham ağırlıklar [0.5, 5.0] aralığına yeniden ölçeklendirilmiştir. Bu yöntemle, büyük sınıf farklarının modele etkisi azaltılarak daha dengeli bir öğrenme ortamı sağlanmıştır. Normalize edilmiş sınıf ağırlıkları Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Normalize sınıf ağırlıkları

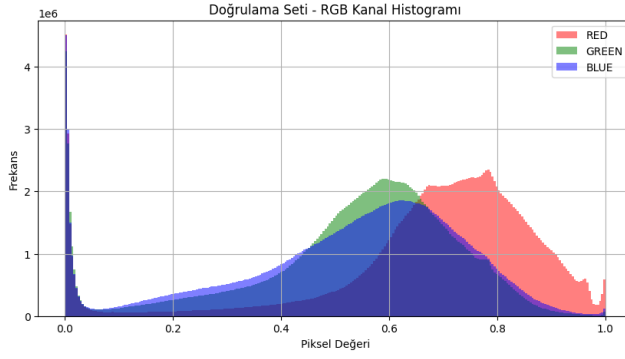
Sınıf	Normalize Ağırlık
MEL	1.679
NV	0.745
BCC	0.833
AK	5.000
BKL	0.657
DF	0.500
VASC	2.160
SCC	4.745

C. Görsel İstatistiksel Analizler

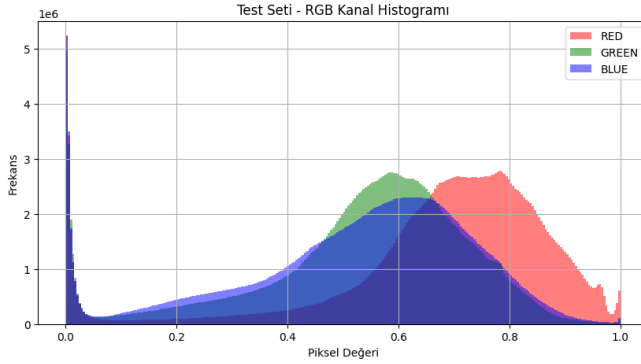
Veri setine ilişkin görsel özellikler ayrıca RGB kanal histogramları ile incelenmiştir (Şekil 2–4). Eğitim, doğrulama ve test setlerine ait bu histogramlar, tüm alt kümelerin piksel dağılımı açısından benzer özellikler taşıdığını göstermektedir. Bu, modelin eğitim ve değerlendirme evreleri arasında renk uzayında sistematik bir fark oluşmadığını göstermesi bakımından önemlidir.



Şekil 2. Eğitim seti RGB kanal histogramı



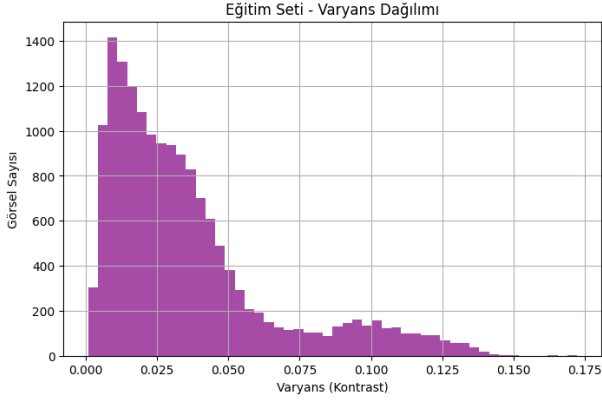
Şekil 3. Doğrulama seti RGB kanal histogramı



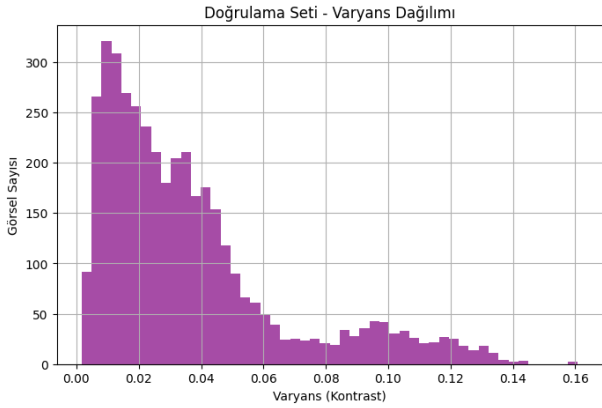
Şekil 4. Test seti RGB kanal histogramı

Şekil 5–7’deki varyans (kontrast) dağılım histogramları, görsellerin büyük çoğunluğunun düşük kontrasta sahip olduğunu göstermektedir. Görsel kontrastının düşük olması, özellikle benzer yapıda olan deri lezyonlarını

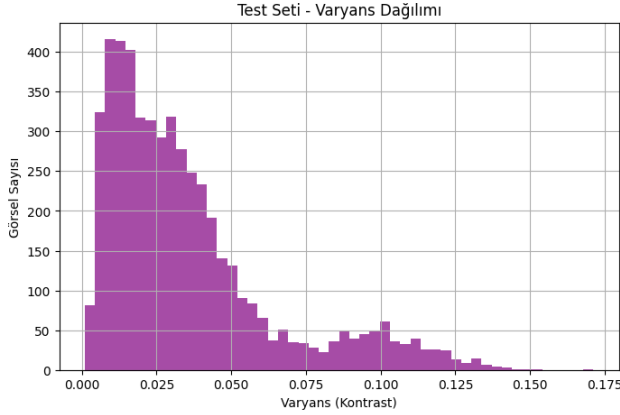
ayırt etmekte modelin zorlanması yol açabilir. Bu nedenle model mimarilerinde derin katmanlı ağ yapılarının kullanılması tercih edilmiştir.



Şekil 5. Eğitim seti varyans dağılımı



Şekil 6. Doğrulama seti varyans dağılımı



Şekil 7. Test seti varyans dağılımı

D. Önerilen Derin Öğrenme Mimarisinin Tanımı (CustomCNN)

Bu çalışmada, sıfırdan tanımlanmış bir evrişimli sinir ağı mimarisi geliştirilmiş ve “CustomCNN” adı verilmiştir. Model, ISIC 2019 veri setinin yapısal özellikleri göz önünde bulundurularak, özellikle düşük kontrast ve düşük frekans bileşenlerinin baskın olduğu dermoskopik görüntülerden anlamlı örüntüler çıkarabilmesi amacıyla tasarlanmıştır.

CustomCNN modeli, giriş olarak 224×224 boyutunda ve üç kanallı (RGB) görüntüleri kabul eden bir giriş katmanı ile başlamakta, ardından dört bloktan oluşan evrişimli yapı gelmektedir. Her blok, evrişim (Convolution), batch normalization ve ReLU aktivasyon işlemini takiben maksimum havuzlama (MaxPooling) katmanlarını içermektedir. Bu yapı, görsel verilerdeki temel ve orta seviye özelliklerin kademeli olarak çıkarılmasını sağlamaktadır.

Evrişimli blokların ardından gelen GlobalAveragePooling katmanı ile uzaysal boyutlar sadeleştirilmiş, böylece parametre sayısı azaltılarak aşırı öğrenmenin önüne geçilmiştir. Tam bağlantılı (Dense) katman yapısında ise, ilk katmanda 256 nöron bulunmaktadır. Bu katmanı, öğrenmenin düzenlenmesi amacıyla yüzde ellilik dropout işlemi izlemektedir. Son katman olarak, sınıf sayısı kadar nöron içeren ve softmax aktivasyonu kullanan bir çıkış katmanı yer almaktadır.

Bu modelin seçim nedeni, ISIC 2019 veri setindeki sınıf dengesizliği ve görsellerdeki kontrast eksikliği gibi zorluklara karşı daha kontrollü bir öğrenme süreci sağlamasıdır. Ayrıca transfer öğrenme yapılmayan bir taban model olarak, diğer büyük mimarilerle karşılaştırma açısından referans niteliğindedir.

E. Transfer Learning Tabanlı Model Yapıları

Bu çalışmada, transfer öğrenme yöntemi kullanılarak dört farklı önceden eğitilmiş evrişimli sinir ağı mimarisi yeniden yapılandırılmış ve eğitilmiştir. Kullanılan modeller VGG16, ResNet50, DenseNet121 ve InceptionV3'tür. Bu mimariler, geniş kapsamlı görüntü tanıma görevleri için ImageNet veri kümesi üzerinde önceden eğitilmiş ve yüksek başarı elde etmiş yapılardır.

ISIC 2019 veri setinin sınırlı örnek sayısı ve belirgin sınıf dengesizliği gibi zorlukları göz önünde bulundurulduğunda, transfer öğrenme ile bu modellerin güçlü özellik çıkarım yeteneklerinden faydalanmak önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu yaklaşımla hem öğrenme süreci hızlandırılmış hem de dengesiz veri setlerinde genelleme performansının artırılması hedeflenmiştir.

Tüm transfer öğrenme modelleri, aynı üst yapı (head) mimarisiyle tutarlı şekilde yapılandırılmıştır. Öncelikle, temel model (base model) bölümünde ilgili mimari, include_top=False parametresiyle sadece özellik çıkarıcı olarak kullanılmış ve ağırlıklar ImageNet veri kümesinden aktarılmıştır. Hesaplama maliyetlerini azaltmak ve eğitim süresini kısaltmak amacıyla bu temel katmanlar eğitime dahil edilmemiş ve trainable=False olarak belirlenmiştir.

Üst katmanlarda ise, GlobalAveragePooling2D ile öznitelik haritaları düzleştirilmiş; ardından sırasıyla 256 ve 128 nöronlu iki adet tam bağlantılı katman yapılandırılmıştır. Bu katmanlarda batch normalization ve ReLU aktivasyonu uygulanmış; aşırı öğrenmeyi önlemek için sırasıyla 0.5 ve 0.3 oranında dropout işlemleri eklenmiştir. Son katmanda, sınıf sayısı kadar nöron içeren ve softmax aktivasyon fonksiyonuna sahip bir çıkış katmanı yer almaktadır.

Tüm modeller, 10 epoch boyunca eğitilmiştir. Eğitim ve doğrulama aşamalarında doğruluk (accuracy) ve kayıp (loss) değerleri takip edilmiş; nihai performans değerlendirmesi test seti üzerinde sınıflandırma metrikleri, karışıklık matrisleri ve ROC-AUC analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu yapılandırma, tüm modellerin aynı koşullarda eğitilmesini sağlamış ve elde edilen sonuçların adil biçimde karşılaştırılmasına olanak tanımıştır.

BULGULAR

Bu çalışmada CustomCNN, VGG16, ResNet50, DenseNet121 ve InceptionV3 modelleri, ISIC 2019 cilt lezyonu veri seti üzerinde eğitilerek karşılaştırılmıştır. Eğitim süreci boyunca her modelin doğruluk ve kayıp değerleri izlenmiş, test seti üzerinde sınıflandırma raporları, karışıklık matrisleri ve ROC-AUC analizleri gerçekleştirilmiştir.

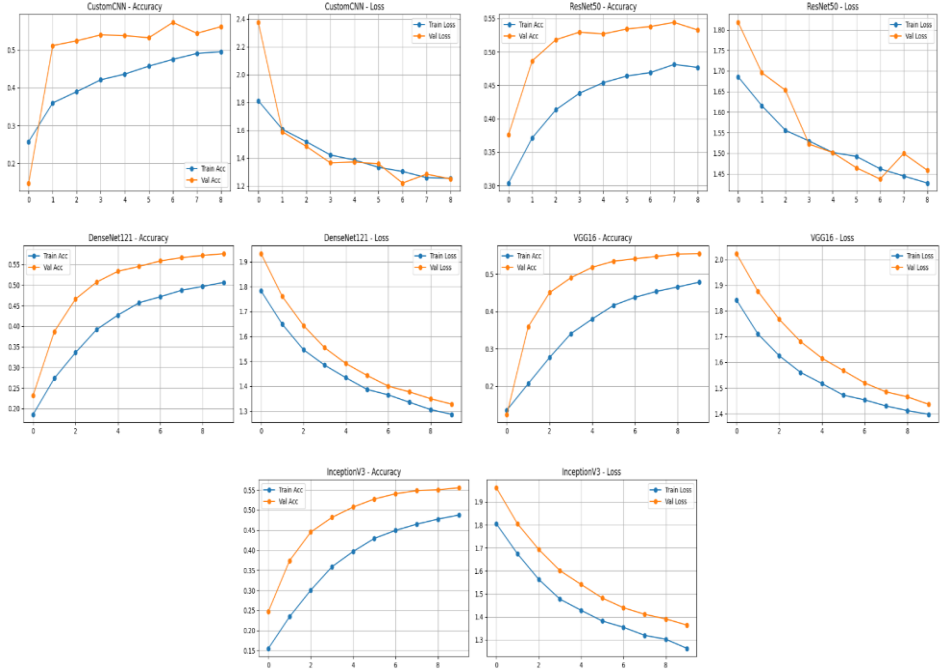
Epoch bazında değerlendirildiğinde, tüm modellerde hem eğitim hem de doğrulama doğruluklarında istikrarlı artışlar gözlenmiştir. Şekil 8’de görüldüğü üzere, tüm modeller eğitim süreci boyunca doğruluk değerlerinde artış göstermiştir. CustomCNN, basit yapısına rağmen test setinde %57,94 doğruluk ile en yüksek genel doğruluğa ulaşmıştır. DenseNet121 ise daha dengeli sınıf başarımları ile öne çıkmış; özellikle sınıflar arası farkları daha dengeli yakalayabilmiştir. InceptionV3, özellikle küçük sınıflar (örneğin VASC, AK, SCC) üzerinde yüksek ROC–AUC eğrileri ile dikkat çekmiş; genel doğruluğu (%55,93) nispeten daha düşük olsa da sınıf ayırt etme başarımı güçlü olmuştur.

VGG16 ve ResNet50 modelleri ise test doğruluğu ve F1-skorları açısından daha zayıf sonuçlar vermiştir. Bu iki modelde bazı azınlık sınıflar için F1-skorları sıfıra yakın çıkmış; ROC–AUC eğrileri de sınıf içi ayırt gücünün zayıf olduğunu göstermiştir.

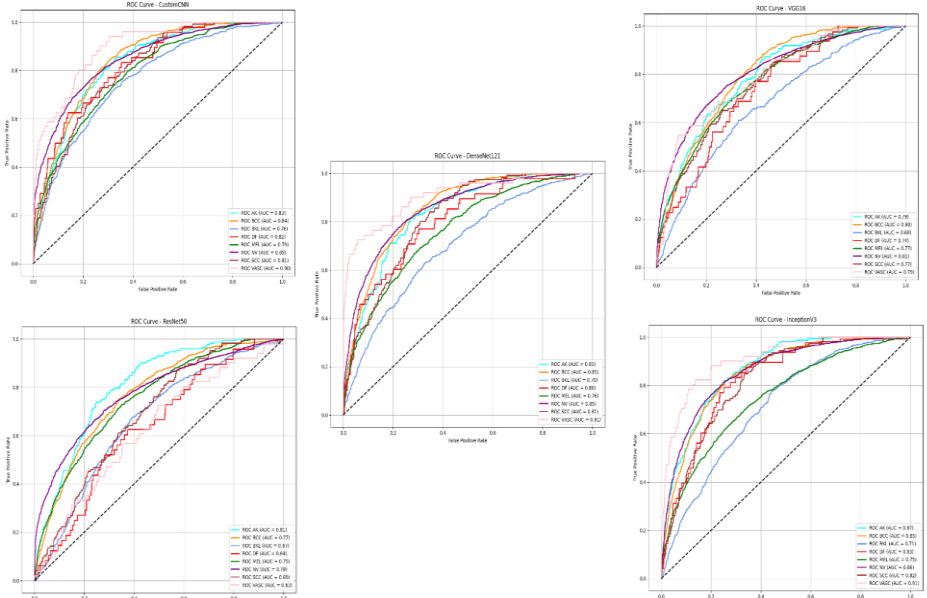
Karışıklık matrislerine göre, en fazla örneğe sahip olan NV sınıfı, tüm modellerde en yüksek doğrulukla sınıflandırılan sınıf olmuştur. Buna karşın azınlık sınıflarda, özellikle AK, DF ve SCC gibi sınıflarda yanlış sınıflandırma eğilimi devam etmiştir.

Şekil 9’da yer alan ROC eğrileri ve AUC değerleri, modellerin sınıf ayırt edici gücünü ortaya koymaktadır. ROC–AUC analizleri, modellerin sadece genel doğruluklarını değil, aynı zamanda pozitif sınıfları negatiflerden ayırt etme becerilerini de ortaya koymaktadır. Özellikle dengesiz sınıflar içeren veri setlerinde, AUC skorları modelin sınıf ayırım gücünü doğruluk metriklerinden daha iyi yansıtır. Bu kapsamda, DenseNet121 ve InceptionV3 modelleri ROC eğrileri altında kalan alan (AUC) açısından öne çıkmıştır.

Genel olarak, eğitim-doğrulama süreçlerinden elde edilen öğrenme eğrileri ile test aşamasındaki başarımlar birbirleriyle tutarlılık göstermiştir. Test doğruluğu, F1-skorları, karışıklık matrisleri ve AUC analizleri birlikte değerlendirildiğinde, farklı modellerin farklı yönlerden güçlü olduğu ancak sınıf dengesizliğinin tüm modeller üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 8. Tüm modellerin öğrenme eğrileri



Şekil 9. Tüm modellerin ROC eğrisi ve AUC değerleri

TARTIŞMA

Yürütülen bu çalışmada kullanılan derin öğrenme modelleri ile elde edilen sonuçlar, cilt lezyonlarının sınıflandırılması gibi klinik açıdan kritik bir probleme yapay zekâ tabanlı çözüm geliştirmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Kullanılan modellerin farklı başarı seviyeleri sunması, mimari tercihler ile veri yapısı arasındaki ilişkinin ne kadar belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Önceki çalışmalar, ISIC 2019 veri seti üzerinde genellikle transfer learning temelli yaklaşımların kullanıldığını ve özellikle ResNet50, DenseNet121 gibi derin yapılarla yüksek başarımlar elde edildiğini rapor etmiştir [1]–[3]. Bu çalışmada kullanılan yaklaşımlar da literatürde önerilen yöntemlerle paralellik göstermekte olup, model yapılarına göre performans farklarının belirgin olduğu bir tablo sunmaktadır.

Bununla birlikte, çalışmada yer alan özel tasarım bir CustomCNN modelinin, daha derin ve karmaşık mimarilerle karşılaştırılabilir bir başarı sergilemesi, veri kümesinin doğasına uygun optimize edilmiş basit ağ yapılarını da göz önünde bulundurmanın önemli olduğunu göstermektedir. Literatürde bu duruma benzer şekilde, küçük ve orta ölçekli veri kümelerinde fazla parametrelili modellerin aşırı öğrenme riski taşıdığı ifade edilmektedir [4].

Ayrıca, sınıf dengesizliği gibi veri setinin yapısal zorlukları, birçok modelin azınlık sınıflarda düşük başarı göstermesine neden olmuştur. Bu sorun, veri ön işleme aşamasında uygulanan normalize edilmiş sınıf ağırlığı yöntemiyle kısmen giderilmiş olsa da, sınıf bazlı başarımlar farklılıkları dikkat çekicidir. Bu durum, sağlık verisi gibi kritik uygulama alanlarında yalnızca genel doğruluğa değil, sınıf bazlı dengeye de odaklanılması gerektiğini bir kez daha vurgulamaktadır.

Bu çalışmanın bilime en önemli katkılarından biri, çeşitli mimarilerin aynı veri seti ve aynı eğitim koşulları altında kıyaslanarak modellenmesidir. Böylece veri yapısına, sınıf dengesine ve model mimarisine bağlı başarımlar eğilimleri daha bütüncül şekilde gözlemlenebilmiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, ISIC 2019 dermoskopik görüntü veri seti kullanılarak cilt lezyonlarının sınıflandırılmasına yönelik beş farklı derin öğrenme modeli (CustomCNN, VGG16, ResNet50, DenseNet121 ve InceptionV3) eğitilmiş ve kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Eğitim ve doğrulama süreçleri boyunca elde edilen doğruluk ve kayıp değerleri, ROC–AUC analizleri ve

karişıklık matrisleri yardımıyla modellerin genel başarıımı değerlendirilmiştir.

Sonuçlara göre, *CustomCNN* modeli en yüksek test doğruluğuna (%57,94) ulaşarak dikkat çekici bir performans göstermiştir. *DenseNet121* ise en istikrarlı eğitim süreci ve genel test dengesini sunarken, *InceptionV3* sınıf ayırt ediciliği ačíısından güçlü ROC–AUC skorları üretmiştir. Transfer learning yöntemleri dondurulmuş ağırlıklarla uygulanmasına rağmen, cilt lezyonu sınıflandırma görevinde dikkate değer başarılar göstermiştir. Bu, özellikle eğitim süresi ve kaynak kısıtlamaları olan ortamlarda yüksek doğruluklaalışan sistemler geliştirmenin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

Sınıf dengesizliği nedeniyle azınlık sınıflar için tüm modellerde düşük F1 skorları gözlenmiş, bu durum normalize edilmiş sınıf ağırlıkları ile kısmen dengelenmiştir. Bu yaklaşım, azınlık sınıflarda (örneğin AK, DF, SCC) daha adil bir temsil sağlamaktadır.

Model performanslarının ROC ve AUC skorları ile de desteklenmesi, sadece genel doğruluk üzerinden değil, her bir sınıfın ayırım gücünün detaylı olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Bu da daha bütünsel bir analiz yaklaşımı sunmaktadır.

Sonuç olarak, transfer öğrenimi kullanan modeller daha yüksek sınıf ayırt ediciliği sunarken; özelleştirilmiş yapıda olan *CustomCNN*, düşük kaynaklarla uygulanabilir başarılı bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Bu bağlamda, veri dengesi ve model sadeliği gibi faktörlerin cilt lezyonu sınıflandırmasındaki etkisi açıkça gözlemlenmiştir.

TEşEKKÜR

Bualışma, İzmir Bakırçay Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yürütölen “Yapay Zekâ ve Derin Öğrenme” yüksek lisans dersi kapsamında gerçekteştirilmiş olup, Dr. Öğr. Üyesi Nihan Özbaltan'ın akademik rehberliğinde şekillendirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] P. Tschandl, C. Rosendahl, and H. Kittler, “The HAM10000 dataset: A large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions,” *Scientific Data*, vol. 5, p. 180161, 2018. DOI: 10.1038/sdata.2018.161
- [2] C. Hernández-Pérez, C. Andreu-Sánchez, N. Codella, et al., “BCN20000: Dermoscopic lesions in the wild,” *Scientific Data*, vol. 11, no. 1, p. 641, 2024. DOI: 10.1038/s41597-024-03106-3
- [3] N. Codella, V. Rotemberg, P. Tschandl, et al., “Skin lesion analysis toward melanoma detection: A challenge at the 2018 ISIC workshop,” *arXiv preprint*, arXiv:1902.03368, 2019.
- [4] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.

BUSI Veri Seti Üzerinde Derin Öğrenme Tabanlı Meme Kanseri Sınıflandırma Modellerinin Karşılaştırılması

Sena ADATEPE¹

Nihan ÖZBAL TAN²

¹Bilgisayar Mühendisliği / Yüksek Lisans Enstitüsü, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Türkiye

²Bilgisayar Mühendisliği / Yüksek Lisans Enstitüsü, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Türkiye
6053014@bakircay.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, meme kanseri teşhisi amacıyla kullanılan BUSI (Breast Ultrasound Images) veri seti üzerinde farklı derin öğrenme tabanlı görüntü sınıflandırma modelleri karşılaştırılmıştır. BUSI veri seti, ultrason görüntülerinden oluşmakta ve normal, iyi huylu ve kötü huylu olmak üzere üç ana sınıf içermektedir. Bu kapsamda, sınıflandırma görevini gerçekleştirmek amacıyla aralarında Xception, InceptionV3, MobileNetV2, VGG16, ResNet50, DenseNet121, EfficientNet, LeNet, AlexNet ve NASNet gibi farklı mimari yapıların yer aldığı on farklı konvolüsyonel sinir ağı (CNN) kullanılmıştır. Tüm modeller, eşit koşullarda değerlendirilmek üzere aynı epoch sayısı boyunca Adam optimizasyon algoritması ve kategorik çapraz entropi kayıp fonksiyonu kullanılarak eğitilmiştir. Eğitim süreci boyunca modellerin hem eğitim hem de doğrulama başarı oranları ve kayıpları analiz edilmiştir. Modellerin performansı, doğrulama doğruluğu ve kaybı gibi temel metrikler çerçevesinde karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, kullanılan mimariler arasında Xception modelinin en yüksek başarıyı sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tıbbi görüntü işleme alanında derin öğrenme tabanlı yöntemlerin potansiyelini ortaya koymakta ve özellikle BUSI veri seti üzerinde hangi mimarilerin daha etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Derin Öğrenme, BUSI, Meme Kanseri, CNN, Sınıflandırma

GİRİŞ

Meme kanseri, dünya genelinde kadınlar arasında en sık teşhis edilen kötü huylu tümörlerden biri olup, kanser kaynaklı ölüm nedenleri arasında da üst sıralarda yer almaktadır. Erken tanı, hastalığın tedavi sürecindeki başarı oranını önemli ölçüde artırmakta ve hasta yaşam süresini uzatmaktadır. Bu çalışmada, meme kanseri teşhisinde kullanılan BUSI (Breast Ultrasound Images) veri seti üzerinde çeşitli derin öğrenme mimarilerinin sınıflandırma performansları karşılaştırılmıştır. Uygulanan modellerin başarımı; eğitim doğruluğu, doğrulama doğruluğu ve kayıp (loss) değerleri gibi metrikler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, tıbbi görüntü sınıflandırma alanında hangi model mimarilerinin daha etkili sonuçlar verdiğini belirlemek açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Bu kapsamda çalışmada; Xception, InceptionV3, MobileNetV2, VGG16, ResNet50, DenseNet121, EfficientNet, LeNet, AlexNet ve NASNet gibi farklı derin öğrenme mimarileri değerlendirilmiştir. Tüm modeller, aynı eğitim parametreleri ve eşit epoch sayısı kullanılarak, adil bir karşılaştırma yapılacak şekilde eğitilmiştir. Eğitim sürecinde elde edilen doğruluk ve kayıp değerleri dikkatle izlenmiş, modellerin aşırı öğrenme (overfitting) eğilimleri ve genelleme yetenekleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bazı gelişmiş modellerin yüksek eğitim doğruluğuna rağmen düşük doğrulama başarısı sergilediğini, bazı basit mimarilerin ise beklenenden daha dengeli sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Bu durum, model seçiminin sadece mimari karmaşıklığa değil, aynı zamanda veri setinin yapısal özelliklerine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, meme kanseri teşhisine yönelik olarak ultrason görüntülerinden oluşan BUSI (Breast Ultrasound Images) veri seti kullanılmıştır. Veri seti; normal, iyi huylu (benign) ve kötü huylu (malignant) olmak üzere üç farklı sınıftan toplam 1578 adet görüntü içermektedir. Görseller eğitim ve test olarak ayrılmış, sınıflandırma işlemi için çeşitli derin öğrenme modelleri kullanılmıştır.

A. Kullanılan Veri Seti

BUSI veri seti, kadın hastalara ait gerçek ultrason görüntülerinden oluşmakta olup kamuya açık bir kaynaktan elde edilmiştir [1]. Görseller .png formatında ve farklı boyutlardadır. Modellerin giriş boyutlarına uygun olarak tüm görseller yeniden boyutlandırılmıştır. InceptionV3 ve Xception modelleri için görsel boyutları 299x299, diğer modeller için ise 224x224 piksel olarak belirlenmiştir.

B. Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri

Karşılaştırmalı analizde farklı mimari yapıları sahip, literatürde sıkça kullanılan ve çeşitli veri setlerinde başarılı sonuçlar elde etmiş on farklı derin öğrenme modeli kullanılmıştır:

- **Xception:** Derinlik ayrıştırıcı konvolüsyonları kullanan bu model, parametre verimliliği ile yüksek doğruluk sağlar.
- **InceptionV3:** Katmanların paralel kombinasyonlarını kullanarak verimli hesaplama sunar; parametre sayısını artırmadan model derinliğini genişletir.
- **MobileNetV2:** Mobil ve gömülü sistemler için optimize edilmiş hafif bir modeldir; düşük bellek kullanımı ve hızlı çalışmasıyla öne çıkar.
- **LeNet:** Basit yapısıyla bilinen bu erken dönem CNN mimarisi, özellikle küçük boyutlu veri setlerinde temel karşılaştırmalar için kullanılır.
- **ResNet50:** Derin yapılarda karşılaşılan gradyan kaybı problemini “skip connection” yapısıyla çözen ve 50 katmandan oluşan güçlü bir modeldir.
- **DenseNet121:** Her katmanı önceki tüm katmanlarla bağlayarak bilgi akışını ve gradyan yayılımını iyileştirir, bu sayede parametre verimliliği sağlar.
- **EfficientNet:** Model derinliği, genişliği ve çözünürlüğü arasında denge kurarak daha az parametre ile yüksek doğruluk sunan ölçeklenebilir bir mimaridir.
- **VGG16:** Sıralı yapıda 16 katmandan oluşan bu klasik model, derinliğiyle güçlü öğrenme kapasitesi sunar ancak hesaplama açısından yoğundur.
- **AlexNet:** Derin öğrenmenin yaygınlaşmasına öncülük eden ilk modellerden biridir; ReLU aktivasyonu ve dropout gibi yeniliklerle dikkat çeker.
- **NASNetMobile:** Neural Architecture Search (NAS) yöntemiyle otomatik olarak tasarlanmış bu model, mobil cihazlar için optimize edilmiştir.

Tüm modeller, transfer öğrenme yöntemiyle önceden eğitilmiş ağırlıklar kullanılarak uygulanmıştır. Bu yöntem, sınırlı veri setlerinde bile yüksek doğruluk elde etmeyi ve eğitim süresini azaltmayı mümkün kılmaktadır. Her bir modelin sonuna, uygulamaya özgü sınıflandırma katmanları eklenmiş ve bu sayede modeller özelleştirilmiştir.

C. Eğitim Koşulları

Eğitim işlemi sırasında tüm modellerde aynı hiperparametreler kullanılarak adil bir karşılaştırma ortamı oluşturulmuştur. Bu sabit eğitim koşulları şunlardır:

- **Epoch:** 10
Modelin tüm veri kümesini yalnızca bir kez görmesi sağlanmıştır. Böylece, transfer öğrenme sonrası modellerin ilk öğrenme eğilimleri gözlemlenmiştir.
- **Optimizer:** Adam
Adaptif öğrenme oranı kullanan bu optimizasyon algoritması, genellikle hızlı yakınsama sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir.
- **Loss Function:** Categorical Crossentropy
Çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan bu fonksiyon, modelin hatasını ölçmek için uygundur.

Bu koşullar sabit tutularak farklı mimarilerin aynı başlangıç noktası altında nasıl performans gösterdiği daha objektif şekilde karşılaştırılabilmektedir.

D. Performans Değerlendirme

Modellerin başarımı, aşağıdaki üç temel metrik kullanılarak değerlendirilmiştir:

- **Eğitim Doğruluğu (Train Accuracy):** Modelin eğitim verileri üzerindeki sınıflandırma başarısını yansıtır.
- **Doğrulama Doğruluğu (Validation Accuracy):** Modelin daha önce görmediği doğrulama verileri üzerindeki genelleme yeteneğini gösterir.
- **Doğrulama Kaybı (Validation Loss):** Modelin doğrulama verisi üzerindeki hata oranını temsil eder; bu değerin düşük olması beklenir.

Tüm modeller aynı eğitim parametreleri altında, eşit sayıda epoch boyunca eğitilmiş ve ardından test veri seti üzerinde değerlendirilmiştir. Elde edilen sınıflandırma sonuçları detaylı analiz edilerek her bir modelin öğrenme kapasitesi, genelleme başarımı ve overfitting eğilimleri

karşılaştırılmıştır. Böylece, modellerin hem teorik öğrenme başarısı hem de pratik uygulamalarda karşılaşılabileceği zorluklara karşı dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Bu analiz, her bir mimarinin güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koyarak, tıbbi görüntü sınıflandırma alanında tercih edilebilirliğini belirlemede yol gösterici olmuştur.

BULGULAR

Tablo 1: Modellerin Eğitim ve Doğrulama Metrikleri

Model	Eğitim Doğruluğu	Doğrulama Doğruluğu	Eğitim Kaybı	Doğrulama Kaybı
AlexNet	0.6031	0.5810	0.6826	0.6829
DenseNet	0.6401	0.5778	0.7992	0.9624
ResNet50	0.7756	0.1683	0.5623	4.0693
Xception	0.8876	0.7968	0.2489	2.0392
VGGNet	0.2982	0.2667	1.1044	1.0990
NASNetMobile	0.9146	0.5651	0.2365	106.7462
MobileNetV2	0.9283	0.6794	0.2082	7.6795
LeNet	0.7203	0.6603	0.5761	0.7305
InceptionV3	0.8897	0.7905	0.2559	2.3392
EfficientNetB0	0.8954	0.4825	0.2373	4.5481

Bu çalışmada, farklı derin öğrenme mimarilerinin BUSI veri seti üzerinde meme kanseri teşhisine yönelik performansları karşılaştırılmıştır. Eğitim ve doğrulama doğrulukları göz önüne alındığında, en yüksek eğitim doğruluğuna %92.83 ile MobileNetV2 modeli ulaşmıştır. Ancak en yüksek doğrulama doğruluğu %79.68 ile Xception modeline aittir ve bu model genel denge açısından en başarılı performansı sergilemiştir.

En düşük doğrulama doğruluğu %16.83 ile ResNet50 modelinde görülmüş, bu durum modelin eğitim verisini ezberlediğini ve genelleme kapasitesinin zayıf olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, NASNetMobile modeli %91.46 eğitim doğruluğuna karşın yalnızca %56.51 doğrulama doğruluğu ile yüksek bir ezberleme belirtisi göstermektedir.

VGGNet modeli %29.82 eğitim doğruluğu ve %26.67 doğrulama doğruluğu ile en düşük genel başarıya sahip model olmuştur.

Tablo 1'de modellerin 10. epoch'taki eğitim ve doğrulama metrikleri özetlenmiştir.

TARTIŞMA

Elde edilen bulgular, derin öğrenme modellerinin meme kanseri teşhisi için farklı performanslar sergileyebileceğini göstermektedir. Xception modeli, yüksek doğruluk oranı ile öne çıkarken, EfficientNet gibi bazı modeller daha düşük doğruluklar göstermiştir. Bu, model mimarisinin seçiminin doğruluk üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu düşündürmektedir.

Bu çalışma, derin öğrenme modellerinin meme kanseri tanısı gibi önemli sağlık alanlarında etkili bir şekilde kullanılabileceğini desteklemektedir. Ancak, model performansları arasında önemli farklar gözlemlendiği için, daha büyük ve çeşitlendirilmiş veri setleriyle yapılan eğitimlerin bu modellerin doğruluğunu artırabileceği söylenebilir.

Elde edilen bulgular, derin öğrenme mimarilerinin meme kanseri teşhisinde farklı başarı düzeylerine sahip olabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle Xception modeli, hem eğitim hem de doğrulama verilerinde yüksek doğruluk oranları sergileyerek ön plana çıkmıştır. InceptionV3 ve ResNet50 gibi mimariler ise eğitim verisinde başarılı olmasına rağmen, doğrulama verisinde düşük başarı oranları göstermiş, bu durum modellerin aşırı öğrenme (overfitting) eğiliminde olduğunu düşündürmektedir. Bu durum, model mimarisi seçiminin doğruluk üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Bulgular, literatürde yer alan benzer çalışmalarla da örtüşmektedir. Örneğin De Marco ve arkadaşları [2] Xception, InceptionV3, DenseNet121, VGG16 ve ResNet50 gibi transfer öğrenme tabanlı CNN modellerini meme ultrason görüntüleri üzerinde test etmiş ve bu modellerin yüksek duyarlılık sağlayarak klinik karar destek sistemlerine entegre edilebileceğini vurgulamıştır. Ancak aynı çalışmada, modellerin genelleme yeteneği veri setine bağlı olarak değişiklik göstermiştir; bu durum da BUSI veri seti gibi farklı veri kümelerinde model performanslarının dikkatle değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, BUSI veri seti üzerinde farklı derin öğrenme modellerinin performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Xception modelinin en etkili sonuçları sunduğunu ortaya koymuştur. Xception modelinin yüksek doğruluk oranı, hem eğitim hem de doğrulama verilerinde tutarlı başarı sağlamasıyla dikkat çekmiştir. EfficientNet ve InceptionV3 modelleri ise, özellikle doğrulama verisinde daha düşük doğruluk oranları sergileyerek, bu modellerin genel performansının sınırlı olabileceğini göstermiştir. Ayrıca, LeNet gibi daha basit modellerin doğrulama doğruluğunda beklenmedik şekilde yüksek sonuçlar aldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, daha basit modellerin bazı veri kümeleriyle başarılı olabileceğini ancak daha karmaşık yapılarla karşılaştırıldığında genel başarıyı yakalamada daha zorlandığını ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, derin öğrenme modellerinin meme kanseri tanısı gibi tıbbi görsel sınıflandırma görevlerinde etkinliğini bir kez daha doğrulamaktadır. Ancak, model performansları arasında gözlemlenen farklar, model seçiminde dikkatli bir yaklaşım gerektirdiğini ve doğru modelin seçilmesinin doğruluğu büyük ölçüde etkileyebileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca, daha büyük ve çeşitlendirilmiş veri setleriyle yapılan eğitimlerin, bu modellerin genelleme kabiliyetini ve doğruluğunu artırabileceği söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde emeği geçen tüm araştırma ekibine teşekkür ederim. Ayrıca, BUSI veri setinin kullanımına izin veren tüm kurum ve kişilere teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- [1] Al-Dhabyani, W., Gomaa, M., Khaled, H., & Fahmy, A. (2020). Dataset of breast ultrasound images. Data in Brief, 28, 104863.
- [2] De Marco, P., Ricciardi, V., Montesano, M., Cassano, E., & Origgi, D. (2024). Transfer learning classification of suspicious lesions on breast ultrasound: is there room to avoid biopsies of benign lesions?. European Radiology Experimental, 8(1), 121.

Yalın Üretim Perspektifiyle Yapı Malzemeleri Üretiminde Toplam Ekipman Etkinliği Optimizasyonu SMED Uygulaması

İrem DÜZDAR^{1*}

Ebrar KÜTÜK¹

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü/ Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Türkiye
^{*}(iremduzdar@gmail.com) Başlıca yazarın mail adresi

ÖZET

Günümüzde yalın üretim sistemleri, israfların en aza indirilmesi ve müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verilebilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, inşaat sektöründe yapı malzemeleri imalatında üretim hattının verimliliğini artırarak genişletilebilir bir üretim yelpazesi sunmakta ve zamanında teslimat imkânı sağlamaktadır. Bu çalışma, yalın üretim tekniklerinin yapı malzemeleri imalat süreçlerine entegrasyonunu inceleyerek, üretim yelpazesinin genişletilmesine yönelik bir analiz sunmaktadır. Unigen Yapı Malzemeleri İmalat İşletmesi'nde yürütülen bu araştırmada, makinelerin ve ekipmanların performansı Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) yöntemi ile değerlendirilecek, yalın üretim prensipleri çerçevesinde öneriler geliştirilecektir. Veri analiz sürecinde balık kılçığı diyagramı ve histogram gibi araçlar kullanılarak temel sorunlar tespit edilecek, çözüm arayışları sunulacaktır. Ayrıca, üretim araçları ve sürdürülebilir üretim ilkeleri doğrultusunda iyileştirme önerileri geliştirilecektir. Özellikle kalıp ve ayar değişim sürelerini azaltmak amacıyla Tek Dakikada Kalıp Değişimi (SMED) yöntemi uygulanacaktır. Bu çalışma, yalın üretimin yapı malzemeleri imalatına entegrasyonunun verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından sağlayacağı katkıları ortaya koymayı hedeflemektedir. Elde edilen bulgular, üretim süreçlerinin etkin yönetimi, ekipman performansının artırılması ve zaman kayıplarının azaltılması açısından önemli fırsatlar sunacaktır.

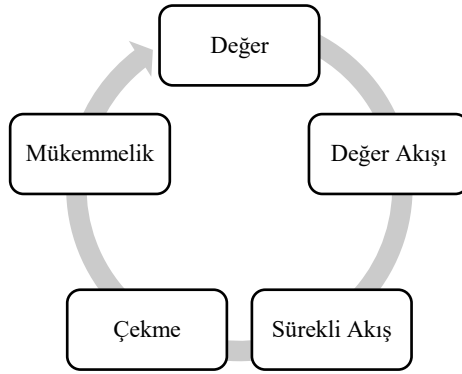
Anahtar Kelimeler – Toplam Ekipman Etkinliği, SMED, Yalın Üretim.

GİRİŞ

Yapı malzemeleri, ekonomik kalkınmaya katkı sağlarken toplumsal refahı artırır. Küresel inşaat sektörü son yıllarda %5 büyüme göstermiştir ve güvenli, yaşanabilir alanlar sunmak amacıyla kalite ve dayanıklılık önemlidir [1]. Ancak inşaat sektörü, sanayiye kıyasla verimlilikte geride kalmıştır; 1964-2004 yılları arasında sanayide %100 verim artarken inşaatte %20 verim kaybı yaşanmıştır. Ayrıca, pazarlama sistemindeki israf oranı %57'ye ulaşmaktadır. Enerji tüketiminin yüksek olması ve maliyetlerin artması gibi sürdürülebilirlik sorunları da sektörde önemli bir meydan okuma yaratmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için verimliliğin artırılması gerekmektedir [2]. Verimlilik, tüm sektörlerde sürdürülebilir üretim için kritik bir faktördür [3]. OEE (Toplam Ekipman Etkinliği), makinelerin verimli kullanımını ölçen bir yöntemdir ve darboğazlar ile israfı tespit eder. Kalıp ve ayar değişimleriyle oluşan hazırlık süreleri, verimliliği düşüren önemli bir faktördür. SMED (Tek Dakikada Kalıp Değişimi) yöntemi, bu süreleri kısaltmayı hedefler [4].

Bu çalışmada, yapı malzemesi üretiminde OEE ve SMED yöntemleri kullanılarak üretimin sürdürülmesi amaçlanmaktadır. 15 günlük üretim kaydında OEE'nin %62'yi aşamadığı tespit edilmiştir. OEE'yi artırmak için üretim kayıpları, plansız duruşlar ve hatalı ürün miktarları analiz edilerek iyileştirme yapılacaktır. Ayrıca, Yalın üretim yaklaşımı benimsenerek israf ortadan kaldırılacak ve süreçler optimize edilecektir

Yalın, değeri belirleyip israfı ortadan kaldırarak, değer yaratan süreçleri kesintisiz şekilde sunmayı hedefleyen bir üretim yaklaşımıdır [5]. Yalın üretimi benimsemek için öncelikle yalın düşünceye sahip olmak gerekir. Bu yaklaşım, müşteri memnuniyetini artırmak için israfı azaltarak maliyetleri düşürmeyi amaçlar [6].



Şekil 1. Yalın Üretim Prensipleri [7]

Görener (2012), mutfak aspiratörleri üreten bir işletmede yaptığı gözlemlerde OEE değerini %33 olarak hesaplamış ve uygunluk oranının artırılması için süreç planlaması ve SMED yöntemini önermiştir [8]. Akyurt & Eren (2019), otomotiv ve elektrik sektörlerinde faaliyet gösteren bir firmada 5S ve SMED yöntemleriyle hazırlık süresini 65,50 dakikadan 23,62 dakikaya indirmiştir. Faaliyet adımları 57'den 14'e düşürülerek süreç sadeleştirilmiştir [9]. Agung & Hasbullah (2019), enjeksiyon kalıp sektöründe 5S ve SMED uygulamalarıyla kalıp değişim süresinde %44'e varan iyileşme sağlamıştır [10]. Kara (2024), talaşlı imalat yapan bir işletmede ovalama tezgâhında SMED uygulayarak OEE değerini %45,09'dan %52,65'e çıkarmıştır [12].

MATERYAL VE YÖNTEM

A. Toplam Ekipman Etkinliği

Toplam Ekipman Etkinliği (OEE), ekipman performansını artırmak ve verimliliği sağlamak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. “Ölçmeden iyileştiremeyiz” sloganıyla 1988’de Nakajima tarafından geliştirilmiştir [13]. OEE, arıza, bekleme, hazırlık ve montaj gibi kayıplara odaklanarak makinelerin verimsiz zamanlarını azaltmayı hedefler [14]. OEE’nin hesaplanması; kullanılabilirlik, performans ve kalite bileşenlerine dayanır ve bu üç kavram arasındaki dengeyi esas alır.

$$OEE = \text{Kullanılabilirlik} \times \text{Performans} \times \text{Kalite} \quad (1)$$

Belirtilen bu formül ile yapıldıktan sonra yüzdelik oran ile hesaplanmaktadır. Literatürde yer alan bilgiler ile OEE oranının ideal seviyesi %85 ve üzeri olarak belirlenmiştir.

$$\text{Kullanılabilirlik} = \text{Net Üretim Süresi} / \text{Planlanmış Üretim Süresi} \quad (2)$$

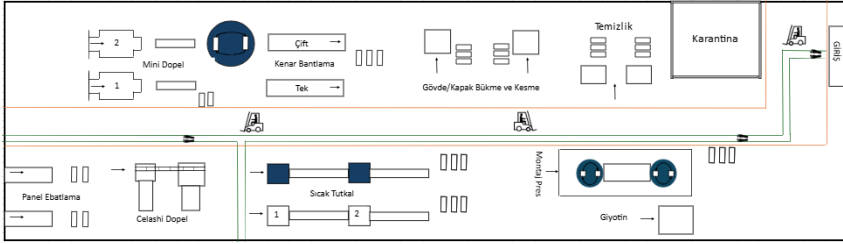
$$\text{Performans} = (\text{Üretilen Miktar} \times \text{Teorik Çevrim Zamanı}) / \text{Üretim Zamanı} \quad (3)$$

$$\text{Kalite} = (\text{Üretilen Miktar} - \text{Hatalı Miktar} - \text{Yeniden İşlenen Miktar}) / \text{Üretilen Miktar} \quad (4)$$

Üretim tesislerinde verimliliği artırmak amacıyla öncelikle çevrim süreleri azaltılmaya çalışılmış, ancak ayar ve bekleme süreleri göz ardı edildiği için istenilen verim artışı sağlanamamıştır [15]. Kalıp değiştirme sürelerinin verimsizliğe neden olması üzerine, 1950’lerde Shigeo Shingo tarafından SMED yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, müşteri taleplerine hızlı yanıt verilmesini sağlayarak esnek ve küçük partili üretime geçişi destekler [15]. SMED’in temelinde iç ve dış ayar kavramları yer alır. İç ayarlar, makine durduğunda yapılan işlemleri; dış ayarlar ise makine çalışırken yapılabilen faaliyetleri ifade eder [16]. Örneğin, kalıp değişimi iç ayar; malzeme taşıma ve hazırlama ise dış ayar olarak değerlendirilir [17].

BULGULAR

Unigen Yapı Malzemeleri Fabrikası, 20 yıldır Düzce’de faaliyet göstermekte olup, inşaat sektörüne yönelik yenilikçi yapı malzemeleri üretmektedir. Ürün yelpazesinde yükseltilmiş döşeme sistemleri, karo halı, örgü vinil, PVC ve LVT zemin kaplamaları yer almaktadır. Fabrika, panel üretim hattı ve ayak üretim hattı olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Panel hattında sunta ve kalsiyum sülfat özlü paneller üretilirken, ayak hattında bu panellere ait ayak mekanizmaları üretilmektedir.



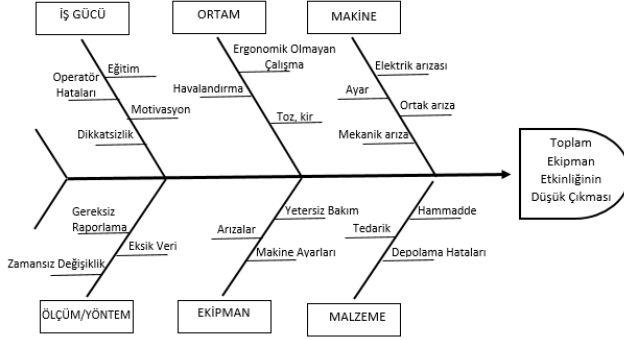
Şekil 2. Yerleşim Planı

Panel üretim hattının yerleşim planı Şekil 2’de sunulmuştur. Turuncu alanlar forklift, yeşil alanlar ise yaya yollarını göstermektedir. Yerleşimde panel ebatlama, doppel, kenar bantlama, sıcak tutkal, bükme, kesme, montaj pres ve giyotin makineleri yer almaktadır. Mavi döner tablalar kartezyen kolları temsil etmektedir. Mini doppel 1, sıcak tutkal 3-4 ve montaj pres olmak üzere toplam 3 makine bulunmaktadır. Verimlilik analizi için 1–21 Ekim tarihleri arasında, hafta içi 15 günlük veri toplanmıştır. OEE hesaplaması için kullanılabilirlik, performans ve kalite oranları hesaplanarak çarpılmıştır.

Tablo 1. 15 Günlük OEE Değerleri

Makineler	TOPLAM EKİPMAN ETKİNLİĞİ (OEE)														
	1. Ek i	2. Ek i	3. Ek i	4. Ek i	7. Ek i	8. Ek i	9. Ek i	10. Eki	11. Eki	14. Eki	15. Eki	16. Eki	17. Eki	18. Eki	21. Eki
CELASHI DOPEL	0,0 0	0,0 0	15, 85	0,0 0	0,0 0	11, 98	11, 00	2,5 3	0,0 0	0,0 0	37, 84	27, 48	5,9 9	0,0 0	31, 72
ÇİFT KENAR BANT	27, 05	28, 84	2,6 1	23, 96	0,0 0	8,5 9	43, 06	31, 55	27, 36	27, 28	24, 80	36, 65	2,3 4	9,1 9	11, 57
DELİK DELME MAK	12, 14	3,1 8	36, 22	52, 71	46, 63	44, 43	40, 67	48, 13	13, 49	0,2 6	64, 75	53, 78	56, 45	21, 21	65, 75
G.KAPAK KESME 80	1,4 3	51, 41	0,0 0	0,0 0	0,0 0	9,7 8	67, 69	72, 30	79, 01	91, 71	11, 06	0,0 0	26, 34	41, 81	86, 42
GİYOTİN MAK	0,0 0	0,0 0	11, 16	0,0 0	4,5 5	0,0 0	0,0 0	8,7 3	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	1,2 2
GÖVDE BÜKME PRES	69, 05	77, 24	76, 07	68, 39	66, 78	83, 27	86, 94	9,0 4	32, 54	88, 16	71, 15	65, 79	92, 54	84, 17	81, 10
KAPAK BÜKME PRES	80, 11	54, 00	0,0 0	17, 97	0,0 0	58, 95	67, 51	43, 18	26, 58	68, 02		26, 57	7,5 6	63, 83	74, 71
MİNİ DOPEL 1	57, 58	42, 10	2,1 7	45, 11	0,6 0	26, 74	57, 88	56, 26	41, 68	63, 63	65, 68	38, 24	60, 17	50, 17	40, 57
MİNİ DOPEL 2	41, 08	0,0 0	36, 56	50, 03	58, 97	55, 34	46, 52	56, 37	53, 56	69, 20	77, 05	65, 35	77, 57	42, 57	61, 51
MONTAJ PRES	20, 93	1,0 8	2,6 4	0,0 0	0,0 0	0,0 0	32, 50	0,0 0	3,1 1	0,0 0	0,0 0	12, 82	50, 07	53, 69	19, 89
OTO.MONTAJ PRES2	63, 45	61, 92	66, 09	54, 30	32, 56	41, 72	62, 34	59, 04	24, 26	15, 89	37, 12	40, 59	43, 53	70, 64	49, 13
PANEL EBATLAMA	0,0 0	1,3 3	0,0 0	0,0 0	3,2 3	0,8 5	0,0 0	0,0 0	4,4 9	4,9 7	0,0 0	0,0 0	0,0 0	2,2 8	0,0 0
S. TUT YAPŞTRM 1	45, 76	0,0 0	0,0 0	36, 60	51, 24	53, 68	42, 57	44, 58	51, 20	41, 49	56, 52	31, 56	71, 70	18, 02	47, 13
S. TUT YAPŞTRM 2	59, 94	72, 12	37, 35	37, 68	38, 54	52, 32	9,7 7	29, 07	55, 79	43, 43	57, 21	58, 80	72, 64	47, 25	47, 64
S. TUT YAPŞTRM 3	16, 72	88, 06	41, 27	46, 45	70, 22	70, 95	0,0 0	80, 93	67, 85	50, 89	80, 78	76, 28	69, 83	78, 21	86, 54
S. TUT YAPŞTRM 4	71, 34	89, 34	61, 43	50, 59	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	7,6 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	29, 32
TEK KENAR BANT	2,1 3	0,0 0	0,8 7	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,1 7	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Ortalama	31, 60	31, 70	21, 73	26, 88	20, 74	28, 81	31, 58	30, 10	27, 15	31, 39	34, 35	29, 66	35, 37	32, 36	40, 79
Aktif Makine Ortalaması	47, 10	62, 78	42, 54	43, 98	52, 13	49, 94	50, 79	52, 14	43, 03	55, 97	53, 09	44, 49	62, 08	51, 91	52, 36

Tablo 4’te gösterildiği gibi OEE değerleri %42,54 ile %62,78 arasında değişmektedir. En düşük oran %42,54 ile 3 Ekim iken onu takip eden %43,03 ile 11 Ekim günüdür. İdeal OEE değeri %85 veya üstü olması gerekmektedir. Bu da demek oluyor ki OEE değerleri ideal değerin altında kalmaktadır.



Şekil 3. Uygulanan Balık Kılçığı Diyagramı

Düşük OEE'nin temel nedenleri; malzeme, ekipman, yöntem, iş gücü, ortam ve makineler gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Makinelerle ilgili başlıca sorunlar; elektrik, mekanik ve ortak arızalar ile ayar değişiklikleridir. Uzun çalışma süreleri, bekleme, arıza ve iş kayıpları makinelerin verimliliğini düşürmektedir. Bu durum, kullanılabilirlik, performans ve kalite oranlarını etkileyerek ideal OEE seviyesi olan %85'in altına düşülmesine neden olur.

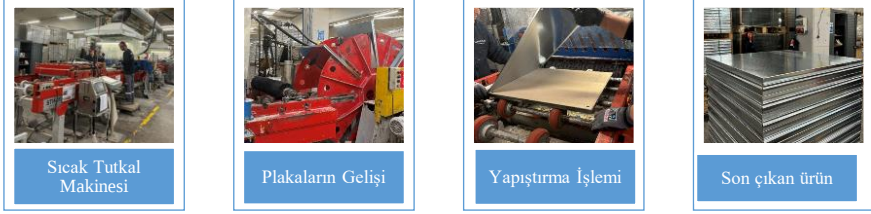
SONUÇ VE TARTIŞMA

Tablo 2. Sıcak Tutkal Makinesi Mevcut SMED Diyagramı

SMED SICAK TUTKAL GÖZLEM SAYFASI AYAR				
Sıra	İşlem Adımı	Ayar	Süre	Yetkinlik
1	14 mm bittiği için üretim durduruldu.	İç Ayar	15	Halil İbrahim
2	Önceki üretimden kalma tutkallar makineden temizlendi.	İç Ayar	75	Raif
3	Makinenin sağ tarafındaki 2 vida 14'er kez çevrilerek 14 mm aşağı düşürüldü.	İç Ayar	30	Eren Usta
4	Makinenin sol tarafına geçildi.	İç Ayar	30	Eren Usta
5	Sol tarafta kalan 2 diğer vidaya da aynı işlem uygulandı.	İç Ayar	57	Eren Usta
6	Baskı vidaları 2 mm aşağı düşürüldü.	İç Ayar	61	Eren Usta ve Recep
7	Makine ayarı kontrol edilmesi için test ürün makineye götürüldü.	İç Ayar	10	Halil İbrahim
8	Makine çalıştırıldı.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
9	14 mm'lik test ürün tutkallama alanını geçti.	Dış Ayar	7	Makine
10	İkinci test ürün makinenin dışından alınıp birinci ürüne yapıştırıldı.	Dış Ayar	20	Halil İbrahim
11	Baskı alanına gönderildi.	Dış Ayar	3	Makine
12	Makine durduruldu.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
13	Baskı alanından vidaları sıkarak hata payı 0'a indirilmeye çalışıldı.	İç Ayar	71	Hepsi
14	Makine tekrar çalıştırıldı.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
15	Nihai ürün baskı kısmından çıkarıldı.	Dış Ayar	4	Makine
16	Makine durduruldu.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
17	Kontrol edilip onay verildi.	İç Ayar	25	Eren Usta
18	Seri üretime geçilebilmesi için malzeme getirildi.	İç Ayar	120	Recep
19	Getirilen malzemeler paketlerden çıkarılıp makinenin üstüne konuldu.	İç Ayar	150	Recep ve Raif
20	Herkes yerine geçti.	İç Ayar	10	Hepsi
21	Makine çalıştırıldı.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
22	Üretime başlanıldı.	Dış Ayar	3	Makine
Toplam İç Ayar Süresi		666 sn.		
Toplam Dış Ayar Süresi		37 sn.		

Sıcak tutkal makinesinde yapılan zaman etütleriyle ayar değişimi adımları SMED diyagramında sıralanmıştır. İşlemler iç ve dış ayar olarak sınıflandırılmış, toplamda iç ayar süresi 666 saniye, dış ayar süresi ise 80 saniye olarak ölçülmüştür. İşlemler kimin tarafından yapıldığıyla birlikte personel yetkinliğiyle belirtilmiştir. Gereksiz adımlar kaldırılarak, mümkün

olanlar dış ayara dönüştürülecek ve iç ayarlarda iyileştirme yapılacaktır. Aşağıdaki şekillerde işlem adımları ve sıralaması gösterilmiştir.



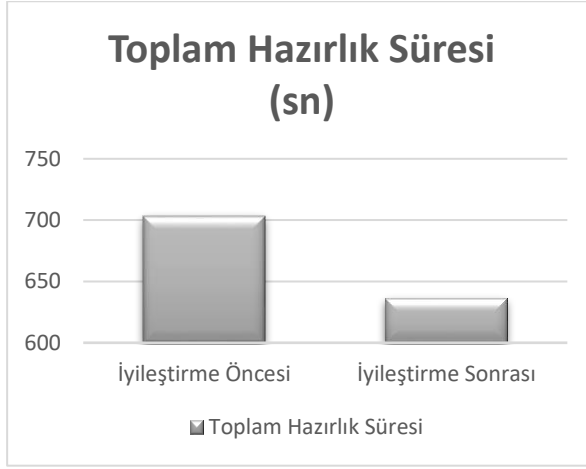
Şekil 4. Ürün Süreci

Fabrikada 4 sıcak tutkal makinesi bulunmaktadır, ancak gözlem yapılan makine sıcak tutkal 2'dir. Bu makinede 4 personel (Eren Usta, Halil İbrahim, Raif, Recep) çalışmaktadır. Ayar değişikliği sırasında gereksiz işlemler kaldırılacak ve iç ayarlar dış ayara dönüştürülecektir. 3-4-5. İşlemlerde Eren Usta, sağ taraftaki vidaları sıkarken, diğer personel sol taraftaki vidayı sıkarsa, geçiş süresi ortadan kalkacaktır. 18-19. İşlemlerde ise malzeme getirme ve paket açma işlemleri makine çalışmıyorken yapılmıştır, ancak makine çalışırken de yapılabilir. Bu sayede iç ayar dış ayara dönüştürülecektir. SMED tablosu yapılan düzenlemelerle birlikte aşağıda yer almaktadır.

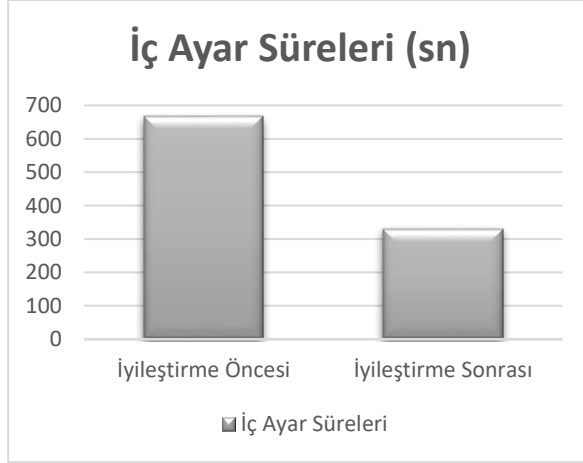
Tablo 3. Sıcak Tutkal SMED İyileştirme

SMED SICAK TUTKAL GÖZLEM SAYFASI AYAR				
Sıra	İşlem Adımı	Ayar	Süre	Yetkinlik
1	14 mm bittiği için üretim durduruldu.	İç Ayar	15	Halil İbrahim
2	Önceki üretimden kalma tutkallar makineden temizlendi.	İç Ayar	75	Raif
3	Makinenin sağ tarafındaki 2 vida 14'er kez çevrilerek 14 mm aşağı düşürüldü.	İç Ayar	30	Eren Usta
4	Sol tarafta kalan 2 diğer vidaya da aynı işlem uygulandı.	İç Ayar	17	Halil İbrahim
5	Baskı vidaları 2 mm aşağı düşürüldü.	İç Ayar	61	Eren Usta ve Recep
6	Makine ayarı kontrol edilmesi için test ürün makineye götürüldü.	İç Ayar	10	Halil İbrahim
7	Makine çalıştırıldı.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
8	14 mm 'lik test ürün tutkallama alanını geçti.	Dış Ayar	7	Makine
9	İkinci test ürün makinenin dışından alınıp birinci ürüne yapıştırıldı.	Dış Ayar	20	Halil İbrahim
10	Baskı alanına gönderildi.	Dış Ayar	3	Makine
11	Makine durduruldu.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
12	Baskı alanından vidaları sıkarak hata payı 0'a indirilmeye çalışıldı.	İç Ayar	71	Hepsi
13	Makine tekrar çalıştırıldı.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
14	Nihai ürün baskı kısmından çıkarıldı.	Dış Ayar	4	Makine
15	Makine durduruldu.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
16	Kontrol edilip onay verildi.	İç Ayar	25	Eren Usta
17	Seri üretime geçilebilmesi için malzeme getirildi.	Dış Ayar	120	Recep
18	Getirilen malzemeler paketlerden çıkarılıp makinenin üstüne konuldu.	Dış Ayar	150	Recep ve Raif
19	Herkes yerine geçti.	İç Ayar	10	Hepsi
20	Makine çalıştırıldı.	İç Ayar	3	Halil İbrahim
21	Üretime başlanıldı.	Dış Ayar	3	Makine
Toplam İç Ayar Süresi		329 sn.		
Toplam Dış Ayar Süresi		307 sn.		

Sonuç olarak 666 saniye olan iç hazırlık süresi 329 saniyeye düşürülmüştür. Birim ayar zamanında %50,6 oranında iyileştirme sağlanmıştır.



Şekil 5. SMED Hazırlık Süreleri



Şekil 6. SMED İç Ayar Süreleri

Vardiyada Üretilen Ürün Sayısı: 1558 adet

Hazırlık Süresi (SMED Öncesi): 666 saniye

Hazırlık Süresi (SMED Sonrası): 329 saniye

Net Çevrim Süresi: 9 saniye/ürün

Hazırlık süresinin kazancı (Denklem 1);

Mevcut iç ayar süresi- iyileştirme sonrası iç ayar süresi= hazırlık süresi kazancı (1)

666 saniye- 329 saniye =337 saniye

Kazanılan ürün sayısı (Denklem 2.);

$$\frac{\text{hazırlık süresi kazancı}}{\text{çevrim süresi}} \approx \text{üretilecek ürün miktarı} \quad (2)$$

$$\frac{337}{9} \approx 37.44 \text{ ürün}$$

Bu kazanılan sürede yaklaşık olarak 37 adet ürün üretilmektedir.

Bir ürün maliyetinin 1000 TL olduğunu varsayılmaktadır.

Kazanılan ürün değeri (Denklem 3);

$$\text{Üretilecek ürün miktarı} \times \text{ürün birim maliyeti} = \text{kazanılan ürün değeri} \quad (3)$$

$$37 \text{ adet} \times 1000 \text{ TL} = 37,000 \text{ TL}$$

Yüzdelik Kazanç (Denklem 4);

$$\frac{\text{üretilecek ürün miktarı}}{\text{üretilen ürün sayısı}} \times 100 \approx \% \text{yüzdelik kazanç}$$
$$\frac{37}{1558} \times 100 \approx \%2,37$$

SMED uygulaması sonucunda hazırlık süresi kısaltılarak üretim kapasitesi %2.37 oranında artırılmıştır. Bu artış, ek 37,000 TL değerinde maliyet avantajı sağladığı görülmüştür.

SONUÇLAR

Rekabetçi iş ortamında işletmelerin başarısı, verimlilikle doğrudan ilişkilidir. Arızalar, beklenmeyen duruşlar, kayıplar ve bakım problemleri verimliliği etkileyen başlıca faktörlerdir. İşletmelerin daha kaliteli ve kesintisiz üretim yapabilmesi için toplam ekipman etkinliği ve verimli bakım uygulamaları büyük önem taşır. Plansız duruşların analizi ve bakım süreçlerinin planlanması, sürdürülebilirliği artırarak kaliteyi iyileştirir.

Bu çalışmada, Unigen firmasının panel üretim hattı incelenmiş ve düşük OEE değerlerine sahip makineler analiz edilerek verimlilik artırma yolları aranmıştır. Çalışmada, mevcut makineler, fabrika düzeni ve iş akışları da göz önünde bulundurulmuştur. 15 günlük dönemde 1-21 Ekim tarihleri arasında makinelerden alınan verilerle kullanılabilirlik, performans ve kalite oranları hesaplanmıştır. En düşük OEE %42,54 ile 3 Ekim, en yüksek OEE ise %62,78 ile 2 Ekim tarihlerine aittir. İdeal OEE %85'in üzerinde olmalı iken, bu

sonuçlar idealin altında kalmaktadır. OEE'nin düşük çıkma nedenlerini analiz etmek için balık kılçığı diyagramı kullanılmıştır. Elektrik arızaları, bakım eksikliği, ayar değişikliği ve mekanik arızalar gibi faktörlerin etkili olduğu görülmüştür. Kalite seviyesi ideal olmasına rağmen, performans ve kullanılabilirlik düşük kalmıştır. Bu nedenle SMED uygulamasıyla, kalıp ve ayar değişimlerinde yaşanan hazırlık süresi kayıplarını azaltmak hedeflenmiştir. SMED ile gereksiz işlemler ortadan kaldırılacak, iç ayar ve dış ayar ayrılacak ve iç ayarlar dış ayara dönüştürülecektir. Amaç, makine çalışırken yapılabilen işlemleri dış ayar olarak belirleyip iç ayar süresini minimuma indirmektir.

Sıcak tutkal makinesindeki ayar değişiklikleriyle hazırlık iç ayar süresi 666 saniyeden 329 saniyeye düşürülerek %50,60 iyileştirme sağlanmış, 37 adet daha ürün üretilebilmiştir. Arıza duruşlarını azaltmak için düzenli ve detaylı bir bakım programı önerilmiş, elektrik ve mekanik arızalara yönelik bakım takvimi oluşturulması ve bakım personelinin eğitilmesi gerektiği belirtilmiştir. Hatalı ürünleri en aza indirmek için kalite kontrol süreçlerinin etkinleştirilmesi önerilmiştir. SMED yöntemi başarılı sonuçlar vermiş ve diğer üretim hattındaki makinelere de uygulanarak sürelerin azaltılması hedeflenmiştir. Çalışanlara OEE, SMED ve TPM eğitimleri verilmeli, enerji tasarrufu ve ekonomik hareket konularında pratik eğitimler düzenlenmelidir. Ayrıca, çalışanların performans verileri toplanarak insan odaklı analizler yapılabilir. SMED uygulamalarının kapsamı genişletilip yapay zeka destekli simülasyonlarla daha detaylı düzenlemeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Dixit, S. Analysing enabling factors affecting the on-site productivity in Indian Construction industry. *Periodica Polytechnica Architecture*, 2018; 49(2): 185–193.
- [2] Süzen, E., İsmailoğlu, A., & Kalyoncu (2017). Sürdürülebilirlik, Yalın Üretim, Verimlilik ve Yalınlık Kavramlarının Uygulamaları. *Uluslararası Hakemli Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*.
- [3] Aydemir, E. (2019). Akademik personel performans değerlendirmesinde bir karar destek sistemi önerisi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 12(1), 45-60.
- [4] Filiz, H. (2008). Yalın Üretim Tekniklerinden Hızlı Kalıp Değişimi ve Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, SBE.
- [5] Yılmaz, E. (2012). Siparişe Göre Üretim Yapan Sistemlerde Yalın Üretim Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, FBE.
- [6] Ayçin, E., & Özveri, O. (2016). Yalın üretim uygulamalarında israfın azaltılması ile performans ölçütleri arasındaki ilişkilerin ve etkileşimin dematel yöntemiyle analizi. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(35), 325-353.

- [7] Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation* (2nd ed.). New York: Free Press.
- [8] Görener, A. (2012). Toplam Verimli Bakım ve Ekipman Etkinliği: Bir İmalat İşletmesinde Uygulama. *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 2(1), 15-20.
- [9] Akyurt, İ. Z., & Eren, E. (2019). Hazırlık Süresinin Azaltılmasında SMED Yöntemi Uygulaması. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 15(3), 315-331.
- [10] Agung, D., & Hasbullah, H. (2019). Reducing The Product Changeover Time Using SMED & 5S Methods in The Injection Molding Industry. *Sinergi*, 23(3), 199-212.
- [11] Kara, M. (2024). Smed Metodolojisi: Talaşlı İmalat Firmasında Genel Ekipman Verimliliğinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi.
- [12] Temiz, İ., Atasoy, E., & Sucu, A. (2011). Toplam Ekipman Etkinliği ve Bir Uygulama. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12(4), 49-60.
- [13] Junker, B. (2009). Application of Overall Equipment Effectiveness to Biopharmaceutical Manufacturing. *BioPharm International*, 22(10), 52-57.
- [14] Tanık, M. (2010). Kalıp Ayar Sürelerinin SMED Metodolojisi ile İyileştirilmesi: Bir Yalın Altı Sigma Uygulaması. *Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 25, 117-140.
- [15] Hülügü, K. T. (2011). Çelik Boru İmalatında Yalın Üretim ve SMED Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, FBE.
- [16] Shingo, S. (1985). *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. Oregon: Productivity Press.
- Shingo, S. (1989). *A Study of the Toyota Production System*. Portland: Productivity Press.

Meme Ultrason Görüntülerinde Lezyon Segmentasyonu

Yasin YILMAZ^{1*}

Nihan ÖZBALTAN²

¹Bilgisayar Mühendisliği / Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Türkiye

²Bilgisayar Mühendisliği / Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Türkiye

*yilmazyasin@yahoo.com

ÖZET

Meme kanseri, dünya genelinde kadınlar arasında önde gelen ölüm nedenlerinden biridir ve erken teşhis, etkili tedavi için kritik öneme sahiptir. Ultrason görüntüleme, meme kanseri taramasında yaygın olarak kullanılan, non-invaziv ve maliyet etkin bir yöntemdir. Ancak, ultrason görüntülerinin yorumlanması özel uzmanlık gerektirir ve bilgisayar destekli teşhis (CAD) sistemleri, teşhis doğruluğunu ve verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Bu çalışma, son teknoloji bir derin öğrenme mimarisi olan YOLOv11 modelinin, Meme Ultrason Görüntüleri Veri Seti (BUSI) kullanılarak meme lezyonlarını segmentasyonunda uygulanmasını incelemektedir. Veri seti, 600 kadın hastadan alınan 780 görüntüyü içermekte olup normal, benign ve malign olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışma için 683 görüntü (benign ve malign) eğitim için kullanılmıştır. YOLOv11 modeli 50 epoch boyunca eğitilmiş ve 0.5 IoU eşiğinde, sınırlayıcı kutu tespiti için 0.7317 ve maske segmentasyonu için 0.72735 ortalama hassasiyet (mAP) değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, YOLOv11'in meme lezyonlarını doğru bir şekilde tespit etme ve segmentasyon yapma konusundaki etkinliğini göstermekte olup, meme kanseri teşhisinde tıbbi görüntü analizinde değerli bir araç olarak potansiyelini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Meme Kanseri; Ultrason Görüntüleme; YOLOv11; Lezyon Segmentasyonu; Derin Öğrenme.

GİRİŞ

Meme kanseri, dünya genelinde kadınları etkileyen en yaygın ve ölümcül kanser türlerinden biridir. 2022 yılında, yaklaşık 2.3 milyon yeni vaka ve 670.000 ölüm bildirilmiştir [1]. Erken teşhis, hayatta kalma oranlarını iyileştirmek için kritik öneme sahiptir, çünkü zamanında müdahale ve tedaviyi mümkün kılar. Yüksek İnsan Gelişmişlik Endeksi (HDI) olan ülkelerde, her 12 kadından biri yaşamları boyunca meme kanseri teşhisi alırken, düşük HDI ülkelerde bu oran her 27 kadında birdir [1]. Meme kanseri taramasında kullanılan çeşitli görüntüleme yöntemleri arasında ultrason görüntüleme, non-invaziv yapısı, maliyet etkinliği ve iyonlaştırıcı radyasyon içermemesiyle öne çıkmaktadır. Ancak, meme ultrason görüntülerinin yorumlanması, benek gürültüsü, düşük kontrast ve lezyon görünümündeki çeşitlilik gibi faktörler nedeniyle zordur. Bu karmaşıklık, radyologların meme lezyonlarını doğru bir şekilde tanımlamasına ve segmentasyonuna yardımcı olmak için gelişmiş bilgisayar destekli teşhis (CAD) sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir.

Derin öğrenme, özellikle nesne tespiti ve segmentasyonu gibi görevlerde tıbbi görüntü analizinde güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. U-Net, Mask R-CNN ve YOLO gibi modeller, meme ultrason segmentasyonu da dahil olmak üzere çeşitli tıbbi görüntüleme uygulamalarında umut verici sonuçlar göstermiştir. Bunlar arasında, YOLO (You Only Look Once) model serisi, gerçek zamanlı işleme yetenekleri ve nesne tespiti ile segmentasyon görevlerinde yüksek doğruluğuyla dikkat çekmektedir. En son sürüm olan YOLOv11, C3k2 bloğu, SPPF (Hızlı Uzamsal Piramit Havuzlama) ve C2PSA (Paralel Uzamsal Dikkat ile Konvolüsyonel Blok) gibi önemli mimari geliştirmeler sunarak özellik çıkarımını ve genel performansı iyileştirmektedir [2].

Bu çalışma, Meme Ultrason Görüntüleri Veri Seti (BUSI) kullanılarak meme lezyon segmentasyonu görevine YOLOv11 modelini uygulamaktadır. BUSI veri seti, 600 kadın hastadan alınan 780 ultrason görüntüsünden oluşan, halka açık bir koleksiyondur ve normal, benign ve malign sınıfları olarak kategorize edilmiştir [3]. Benign ve malign görüntülere odaklanarak, bu çalışma, meme kanseri teşhisinde kritik bir adım olan meme lezyonlarını ayırt etme ve segmentasyon yapma konusunda YOLOv11'in performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Son yıllarda, meme ultrason görüntü segmentasyonu için derin öğrenmenin uygulanması kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Çeşitli derin öğrenme mimarilerinin bu alanda etkinliği birçok çalışma ile gösterilmiştir.

Huang ve diğerleri [4], meme ultrason görüntülerinin anlamsal segmentasyonu için meme anatomisi kısıtlamalarına sahip bir bulanık derin öğrenme ağı önermiştir. Yaklaşımları, ultrason görüntülerinde belirsizliği ele almak için bulanık mantığı birleştirmiş ve segmentasyon sonuçlarını iyileştirmek için anatomik kısıtlamalar kullanmıştır. Yöntem, yüksek doğruluk elde ederek, alan bilgisinin derin öğrenme modellerine entegrasyonunun önemini vurgulamıştır.

Li ve diğerleri [5], meme ultrason görüntü segmentasyonu ve tanıma için genişletilmiş bir U-Net mimarisi geliştirmiştir. Modelleri, aşırı öğrenmeyi azaltmak ve genelleştirmeyi iyileştirmek için dropout katmanları içermektedir. Genişletilmiş U-Net, meme tümörlerinin doku detaylarını ve kenar özelliklerini koruyarak %90.5 ortalama Dice katsayısı ve %82.7 Kesişim Üzeri Birleşim (IoU) elde etmiştir.

Abbas ve diğerleri [6], meme ultrason görüntüleri için çok aşamalı bir segmentasyon yöntemi tanıtmıştır ve bu yöntem, sınıflandırma ve segmentasyon ağlarını birleştirmiştir. Yaklaşımları, önce bir topluluk ağı kullanarak görüntüleri tümör içeren veya normal olarak sınıflandırmış, ardından segmentasyon için bir artık özellik seçimi U-Net uygulamıştır. Bu yöntem, normal görüntülerdeki yanlış pozitiflerin zorluğunu ele alarak yüksek segmentasyon doğruluğu elde etmiştir.

Gomez ve Pereira [7], meme tümör segmentasyonu için sekiz köklü konvolüsyonel sinir ağı (CNN) üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yürütmüştür. U-Net, SegNet ve DeepLabV3+ gibi modelleri transfer öğrenme28 gibi modelleri transfer öğrenme ile ince ayar yapılmış, 3000'den fazla görüntü üzerinde sekiz köklü konvolüsyonel sinir ağı (CNN) üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yürütmüştür. U-Net, SegNet ve DeepLabV3+ gibi modelleri transfer öğrenme ile ince ayar yapılmış, 3000'den fazla görüntü üzerinde sekiz köklü CNN'yi segmentasyon için iki sınıfa (normal ve kanserli pikseller) ayırmak amacıyla eğitmiş ve doğrulamıştır. Çalışmaları, tam otomatik CAD sistemleri için ResNet18'in verimli bir model olarak önerilmesini sağlamıştır.

Yap ve diğerleri [8], meme ultrason görüntü segmentasyonu için U-Net tabanlı bir derin öğrenme çerçevesi geliştirmiştir. Bu çalışma, BUSI veri seti üzerinde %88.6 Dice katsayısı elde etmiştir ve sınıf dengesizliği sorununu ele almak için özel bir kayıp fonksiyonu kullanmıştır.

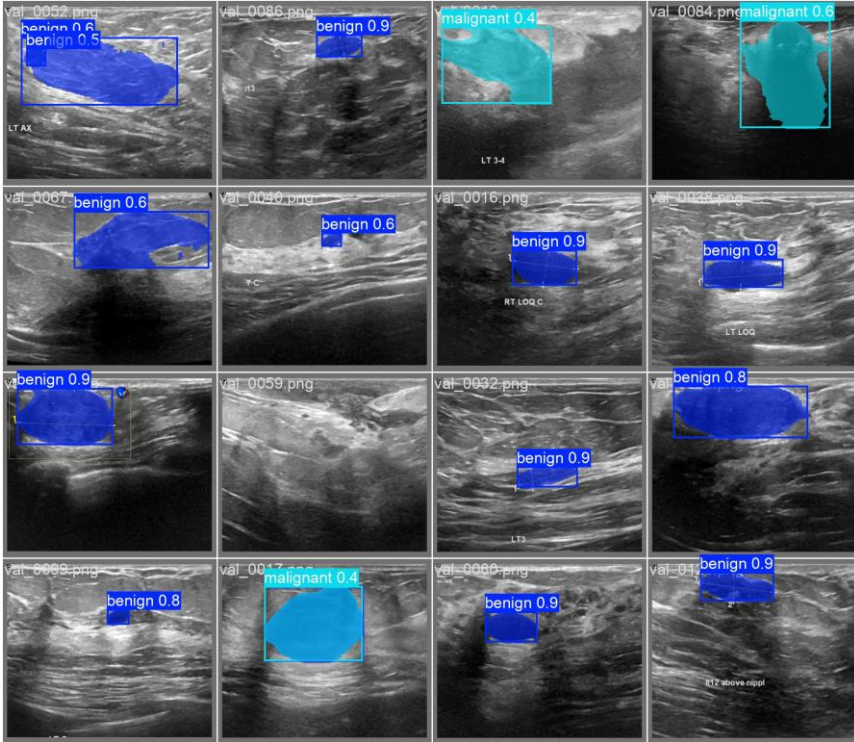
Zhang ve diğerleri [9], bulanık belirsizlik azaltma tekniklerini derin öğrenme ile birleştirerek meme ultrason görüntülerinde güvenilir segmentasyon yapmıştır. Yaklaşımları, lezyon sınırlarının bulanıklığını ele alarak %85.4 IoU skoru elde etmiştir.

Bu çalışmalar, ultrason görüntülerinden meme kanseri teşhisinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmada derin öğrenmenin potansiyelini vurgulamaktadır. Ancak, mevcut çalışmaların çoğu U-Net veya SegNet gibi daha eski derin öğrenme mimarilerine odaklanmaktadır. Bu çalışma, meme ultrason segmentasyonuna yeni tanıtılan YOLOv11 modelini uygulayan ilk çalışmalardan biri olup, gelişmiş mimari yeniliklerini daha iyi performans için kullanmaktadır.

YÖNTEM

A. Veri Seti

Bu çalışma için Meme Ultrason Görüntüleri Veri Seti (BUSI) kullanılmıştır [3]. Veri seti, 600 kadın hastadan 2018 ve 2019 yılları arasında Siemens ACUSON S2000TM Ultrason Sistemi kullanılarak toplanan 780 görüntüyü içermektedir. Görüntüler üç sınıfa ayrılmıştır: normal (419 görüntü), benign (174 görüntü) ve malign (90 görüntü). Bu çalışma için sadece benign ve malign görüntüler kullanılmış olup, toplam 683 görüntü içermektedir. Her görüntü, normal meme dokusunu siyah, benign lezyonları yeşil ve malign lezyonları kırmızı olarak gösteren bir temel gerçeklik segmentasyon maskesi ile birlikte sunulmaktadır. Görüntüler, ortalama 500x500 piksel boyutunda ve PNG formatındadır. Veri setinin toplanması, Baheya Hastanesi (Kahire, Mısır) tarafından gerçekleştirilmiş olup, uzman radyologlar tarafından anotasyonlar sağlanmıştır. Eğitim sırasında sadece benign ve malign sınıfları kullanılmıştır. Eğitim sırasında veri artırımı kullanılarak veriseti boyutu artırılmıştır. Örnek veriseti görselleştirmesi Şekil 1 de gösterilmektedir.



Şekil 1. Verisetindeki örnek eğitim resimleri

B. Model Mimarisi

Bu çalışma için, nesne tespiti ve segmentasyon görevlerinde son teknoloji performansı nedeniyle YOLOv11 modeli kullanılmıştır. YOLOv11, özellik çıkarımı ve performans optimizasyonu yeteneğini artıran birkaç mimari yenilik sunmaktadır [2]. YOLOv11'in temel bileşenleri şunlardır:

- **C3k2 Bloğu:** Farklı ağ aşamalarından özellikleri birleştirerek özellik çıkarımını iyileştiren, 2'lik bir çekirdek boyutuna sahip Çapraz Aşama Kısmi blok. Bu blok, daha az parametre ile yüksek doğruluk sağlar.
- **SPPF (Hızlı Uzamsal Piramit Havuzlama):** Çok ölçekli özellikleri verimli bir şekilde yakalayan hafif bir uzamsal piramit havuzlama sürümü. Bu, hesaplama maliyetini azaltırken performansı artırır.
- **C2PSA (Paralel Uzamsal Dikkat ile Konvolüsyonel Blok):** Görüntünün kritik bölgelerine odaklanmak için paralel uzamsal dikkat mekanizmalarını entegre eden bir modül. Bu, lezyonların doğru tespitini kolaylaştırır.

Bu yenilikler, YOLOv11'in önceki modellerine kıyasla daha az parametre ile yüksek doğruluk elde etmesini sağlayarak, hesaplama açısından verimli olurken güçlü performansını sürdürmesini sağlar. Ayrıca, YOLOv11'in gerçek zamanlı işleme yetenekleri, klinik ortamlarda hızlı teşhis için avantaj sağlar.

C. Eğitim Süreci

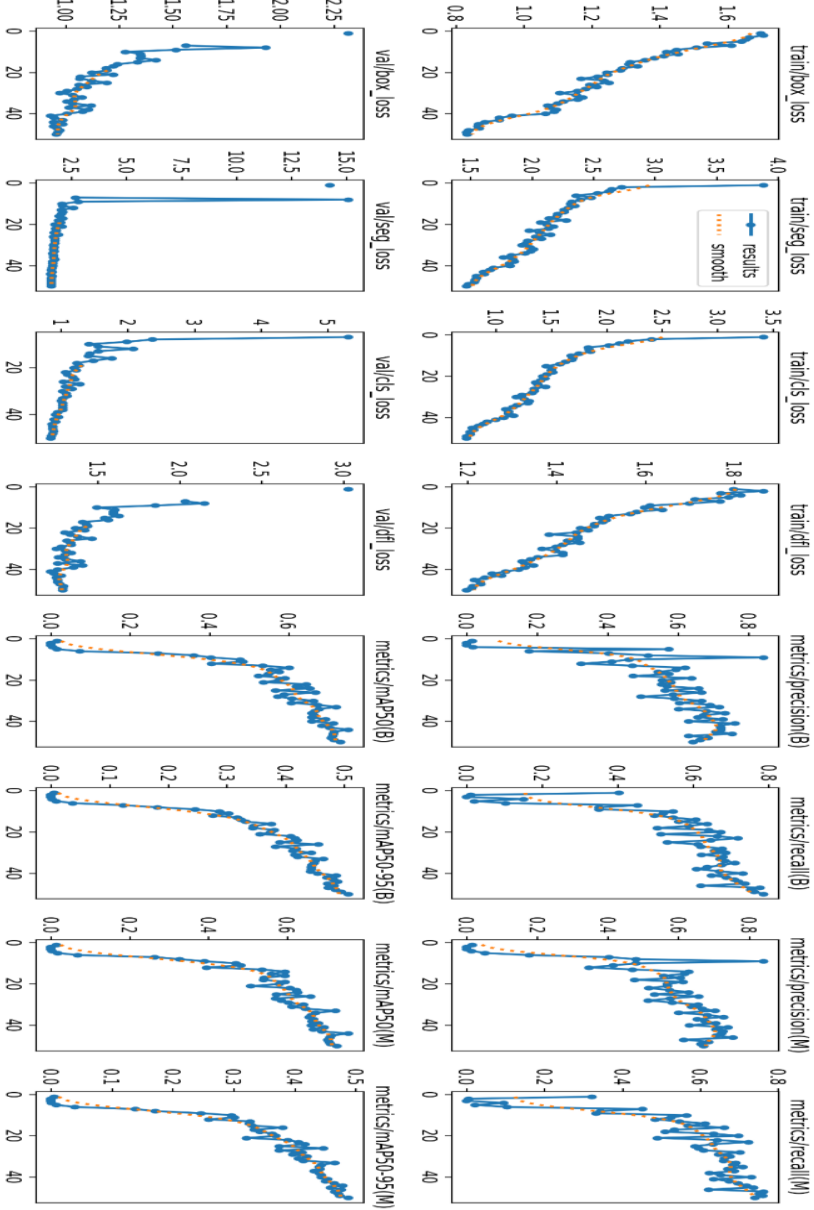
YOLOv11 modeli, BUSI veri seti üzerinde 50 epoch boyunca eğitilmiştir. Eğitim süreci aşağıdaki adımları içermektedir:

1. **Veri Ön İşleme:** Görüntüler standart bir boyuta yeniden boyutlandırılmış ve normalleştirilmiştir. Veri seti çeşitliliğini artırmak ve model genelleştirmesini iyileştirmek için rastgele çevirme, döndürme gibi veri artırma teknikleri uygulanmıştır.
2. **Model Başlatma:** YOLOv11 modeli, transfer öğrenmeden yararlanmak için COCO veri seti üzerinde önceden eğitilmiş ağırlıklarla başlatılmıştır.
3. **Eğitim:** Model, 16'lık bir toplu iş boyutu ile eğitilmiş, Adam optimize edici ve başlangıçta 0.00053344 öğrenme oranı kullanılmıştır. Öğrenme oranı, eğitim sırasında dinamik olarak ayarlanmıştır.
4. **Değerlendirme Metrikleri:** Modelin performansı, nesne tespiti ve segmentasyonu için standart metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir, bunlar:
 - Sınırlayıcı kutu (B) ve maske (M) tahminleri için Hassasiyet ve Geri Çağırma.

- 0.5 (mAP50) ve 0.5-0.95 (mAP50-95) IoU eşiklerinde sınırlayıcı kutular ve maskeler için Ortalama Hassasiyet (mAP).

D. Eğitim Sonuçları

Eğitim sonuçları Tablo I'de özetlenmiştir ve eğitim sırasındaki grafikler Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2. Eğitim sırasındaki metriklerin görselleştirilmesi

Tablo 1. YOLOv11'in BUSI Veri Seti Üzerindeki Eğitim ve Doğrulama Metrikleri

Metrik	Değer (Epoch 50)
Doğrulama Kutu Kaybı	95.877
Doğrulama Segmentasyon Kaybı	158.799
Hassasiyet (Benign - B)	64.308
Geri Çağırma (Benign - B)	78.741
mAP@50 (Benign - B)	73.170
mAP@50-95 (Benign - B)	50.695
Hassasiyet (Malignant - M)	67.083
Geri Çağırma (Malignant - M)	74.116
mAP@50 (Malignant - M)	72.735
mAP@50-95 (Malignant - M)	48.814

Bu sonuçlar, modelin eğitim süresince meme lezyonlarını tespit etme ve segmentasyon yapma yeteneğinde önemli bir iyileşme olduğunu göstermektedir.

TARTIŞMA

Bu çalışma, BUSI veri seti kullanılarak ultrason görüntülerinden meme lezyonlarının segmentasyonunda YOLOv11 modelinin etkinliğini değerlendirmiştir. YOLOv11, sınırlayıcı kutu tespiti için 0.7317 ve maske segmentasyonu için 0.72735 mAP50 puanları elde ederek hem tespit hem de segmentasyon görevlerinde güçlü bir performans sergilemiştir. Bu sonuçlar, YOLOv11'in meme kanseri için bilgisayar destekli teşhiste (CAD) yüksek doğruluk ve verimlilik sunan değerli bir araç olarak potansiyelini ortaya koymaktadır. YOLOv11'in hem sınırlayıcı kutu tespiti hem de maske segmentasyonu yapabilmesi, onu yalnızca semantik segmentasyon yapan modellerden (örneğin, U-Net) ayırmaktadır. Ayrıca, YOLOv11'in gerçek zamanlı işleme yetenekleri, klinik ortamlarda hızlı teşhis için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, çalışmanın bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Sınıf dengesizliği, yani benign ve malign görüntülerin sayısındaki fark, modelin performansını etkileyebilir. Ayrıca, BUSI veri

setinin sınırlı çeşitliliği, modelin genelleştirme yeteneğini kısıtlayabilir. Gelecekteki çalışmalar, YOLOv11'in performansını daha fazla doğrulamak için U-Net veya DeepLabV3+ gibi diğer son teknoloji modellerle karşılaştırmalı analizler içerebilir. Bunun yanı sıra, YOLOv11'in mamografi veya MRI gibi diğer tıbbi görüntüleme yöntemlerine uygulanmasının araştırılması, modelin klinik ortamlardaki faydasını genişletebilir.

SONUÇLAR

YOLOv11, BUSI veri seti üzerinde yapılan bu çalışmada, meme lezyonlarının ultrason görüntülerinden tespitinde ve segmentasyonunda yüksek performans göstermiştir. Sınırlayıcı kutu tespiti için 0.7317 ve maske segmentasyonu için 0.72735 mAP50 puanları, modelin hem doğruluk hem de etkinlik açısından güçlü bir potansiyele sahip olduğunu kanıtlamaktadır. YOLOv11'in gerçek zamanlı işleme yetenekleri ve çoklu görev kapasitesi, onu meme kanseri teşhisinde bilgisayar destekli sistemler için değerli bir araç haline getirmektedir. Modelin CAD sistemlerine entegrasyonu, teşhis süreçlerinin doğruluğunu ve hızını artırarak hasta sonuçlarını iyileştirme potansiyeline sahiptir.

KAYNAKLAR

- [1] World Health Organization. (2024). Breast cancer fact sheet. World Health Organization Newsroom. Retrieved from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/breast-cancer..>
- [2] Khanam, R., & Hussain, M. (2024). YOLOv11: An overview of the key architectural enhancements. arXiv preprint, arXiv:2410.17725. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2410.17725>.
- [3] Al-Dhabyani, W., Gomaa, M., Khaled, H., & Fahmy, A. (2020). Dataset of breast ultrasound images. Data in Brief, 28, 104869. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104869>.
- [4] Huang, K., Zhang, Y., Cheng, H. D., Xing, P., & Zhang, B. (2021). Semantic segmentation of breast ultrasound image with fuzzy deep learning network and breast anatomy constraints. Neurocomputing, 454, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.04.020>.

- [5] Li, X., Li, Y., Wang, M., Bi, L., & Feng, D. D. (2020). Segmentation and recognition of breast ultrasound images based on an expanded U-Net. *PLOS ONE*, 15(6), e0253202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253202>.
- [6] Abbas, S., et al. (2021). Deep learning-based multi-stage segmentation method using ultrasound images for breast cancer diagnosis. *Computers in Biology and Medicine*, 139, 104965. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2021.104965>.
- [7] Gomez, W., & Pereira, W. (2020). A comparative study of convolutional neural networks for breast tumor segmentation in ultrasound images. *Computers in Biology and Medicine*, 121, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2020.103781>.
- [8] Yap, M. H., et al. (2019). Development of a deep-learning-based method for breast ultrasound image segmentation. In 2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (pp. 2304–2308). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2019.8614204>.
- [9] Zhang, Y., et al. (2022). Trustworthy breast ultrasound image semantic segmentation based on fuzzy uncertainty reduction. *Healthcare*, 10(12), 2480. <https://doi.org/10.3390/healthcare10122480>.
- [10] Arnold, M., et al. (2022). Current and future burden of breast cancer: Global statistics for 2020 and 2040. *Breast*, 66, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.breast.2022.08.010>.

Sürdürülebilir Frenleme Yaklaşımı: Elektrikli Bisikletler için Akım Baskılı Manyetik Tozlu Fren Sistemi Uygulaması

Furkan GÜÇLÜ¹

Serdar HALİS^{1*}

Emre ARABACI¹

¹Otomotiv Mühendisliği / Teknoloji Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye

*shalis@pau.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde geleneksel fren sistemlerine alternatif olarak akım baskılı manyetik tozlu frenlerin (ABMTF) uygulanabilirliği araştırılmıştır. Disk ve kampana fren sistemlerinin aşınmaya bağlı partikül madde emisyonu ve yüksek bakım gereksinimleri gibi dezavantajları dikkate alındığında, ABMTF'ler kademesiz ve lineer tork kontrolü, düşük bakım ihtiyacı, sessiz çalışma ve mekanik titreşimlerin azaltılması gibi önemli üstünlükler sunmaktadır. Bu kapsamda, ABMTF'lerin otomotiv sektöründeki potansiyelini değerlendirmek amacıyla, sistem bir elektrikli bisiklete entegre edilerek frenleme performansı deneysel olarak incelenmiştir. Tasarım aşamasında, ABMTF ünitesi, elektrikli bisikletin 30 mm çapındaki Ön Rijit Maşasına, 3 mm kalınlığında lazer kesim braketler ve kaynaklı birleştirme yöntemiyle monte edilmiş; zincir aktarmalı bir sistemle fren kuvveti bisiklet miline iletilmiştir. Akım kontrolü ise bir DC motor hız kontrol devresi ve potansiyometre aracılığıyla sağlanmıştır. Değişken gerilim koşullarında sabit hızla ilerleyen sistemin fren mesafeleri ve dayanım performansı ölçülmüş; lineer tork artışının frenleme üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ABMTF'lerin elektrikli bisikletlerde etkili, kontrol edilebilir ve sürdürülebilir bir frenleme çözümü sunduğunu, ayrıca otomotiv uygulamaları için yenilikçi bir alternatif oluşturabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler – Fren Sistemi, Akım Baskılı Manyetik Tozlu Fren, Sürdürülebilirlik.

GİRİŞ

Günümüzde sürdürülebilir ulaşım çözümlerine olan ihtiyaç hızla artmakta, elektrikli bisikletler çevre dostu ve pratik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu araçların güvenlik ve performans özelliklerinin geliştirilmesi, özellikle fren sistemleri açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel fren sistemlerinin çevresel etkileri ve yüksek bakım gereksinimleri, alternatif teknolojilerin araştırılmasını gerekli kılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde potansiyel bir alternatif olarak değerlendirilen akım baskılı manyetik tozlu frenler (ABMTF), düşük aşınma oranı, partikül emisyonunun azalması ve bakım gereksiniminin minimize edilmesi gibi avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada ABMTF'lerin elektrikli bisikletlerdeki uygulanabilirliği deneysel olarak incelenmiş; fren performansı, dayanım testleri ve çevresel etkiler açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, ABMTF'lerin elektrikli taşıtlarda kullanımı ve otomotiv endüstrisindeki potansiyel katkıları tartışılmıştır [1]. Akım Baskılı Manyetik Tozlu Frenler (ABMTF),

elektrikli ve otomotiv sistemlerinde, özellikle hassas tork kontrolü gerektiren alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu fren sistemleri, dönen rotor ile sabit stator arasındaki boşluğa entegre edilen paslanmaz çelik metal tozu kullanarak frenleme işlemini gerçekleştirir. Rotor parçası, dönme hareketini rulman aracılığıyla sağlarken, metal tozunun hareketi rulmanı yavaşlatmaya yönelik çalışır. Sistem, dıştan gözlemlenemez yapılarla sabitlenmek zorunda olup, rotorun oluşturduğu moment etkisinden etkilenmemesi için bu sabitleme büyük önem taşır [2].

Akım Baskılı Manyetik Tozlu Frenin Yapı Elemanları:

- **Bobin (Elektromıknatıs):** Frenin temel manyetik alanını üreten bileşendir. Bobine uygulanan elektrik akımı, manyetik alanın şiddetini doğrudan etkiler.
- **Stator (Sabit Parça):** Bobini çevreleyen ve manyetik alanı yoğunlaştıran sabit parçadır. Genellikle manyetik geçirgenliği yüksek malzemelerden (örneğin, yumuşak demir) yapılır.
- **Rotor (Dönen Parça):** Statorun içinde dönen ve frenleme torkunun uygulandığı parçadır. Rotor ve stator arasında, manyetik toz olarak adlandırılan özel bir malzeme bulunur.

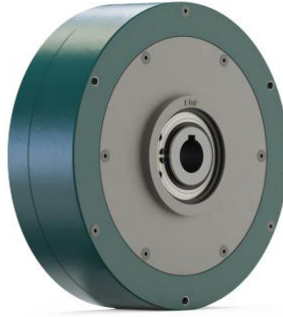
Çalışma Prensipleri: Akım Baskılı Manyetik Tozlu Frenler, manyetik alanın manyetik toz üzerindeki etkisiyle çalışır. Bobine uygulanan elektrik akımı, etrafında bir manyetik alan oluşturur ve bu alan, rotor ve stator arasındaki boşluğu etkiler. Manyetik alanın etkisiyle, rotor ve stator arasına yerleştirilen manyetik toz, mıknatıslanarak viskoz bir yapı oluşturur. Bu yapı, rotorun dönmeye karşı direnç oluşturur ve frenleme torkunu meydana getirir. Frenleme torku, uygulanan akım ile doğru orantılıdır; yani akım arttıkça tork da artar [3]. **Avantajları:** Kademesiz tork kontrolü, lineer tork-akım ilişkisi, düşük bakım gereksinimi, sessiz çalışma, hızlı tepki süresi gibi özellikleri ile dikkat çeker. **Dezavantajları:** Isınma, maliyet artışı ve tozlanma gibi olası sorunlar bulunabilir.

Kullanım Alanları: ABMTF'ler, hassas tork kontrolünün önemli olduğu birçok alanda kullanılır. Bu alanlar arasında tekstil makineleri, matbaa makineleri, robotik sistemler, test ekipmanları ve otomotiv endüstrisinde özel uygulamalar yer alır. Bu frenler, özellikle frenleme torkunun hassas bir şekilde ayarlanması gereken durumlarda yüksek performans gösterir.

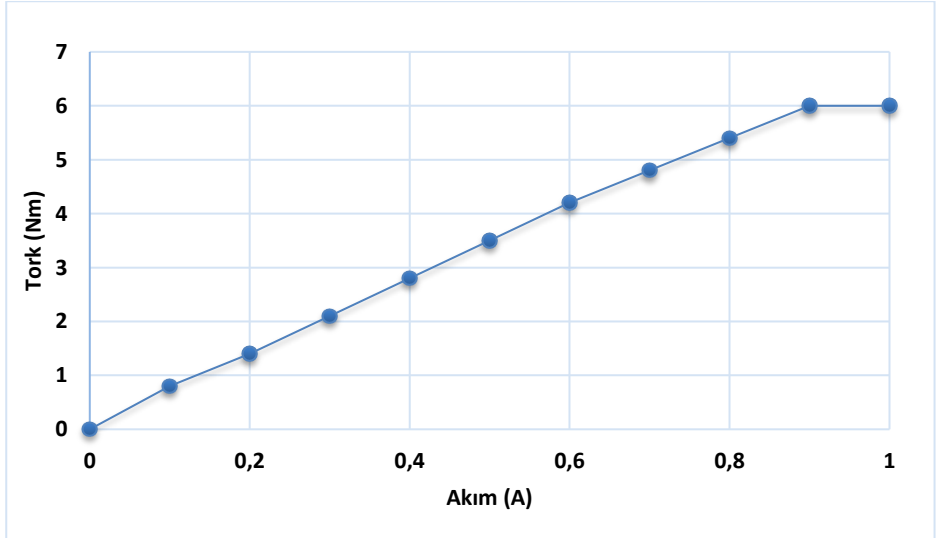
MATERYAL VE YÖNTEM

1. Akım Baskılı Manyetik Tozlu Fren Seçimi

Projenin bütçe kısıtları dikkate alınarak EMF Fren firmasının ABTF-01 serisi akım baskılı manyetik tozlu fren kullanımı uygun görülmüştür (Şekil 2.1). Bu frenin maksimum güç ve tork değerlerinde çalışabilmesi için gerekli akım 0.79 A olarak belirlenmiştir. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere, tork-akım karakteristiği doğrusal bir yapı sergilemektedir. Fren maksimum 5 Nm tork eldesi ile çalışmaktadır. Bu maksimum tork değerini 24V değerinde elde edebilmektedir.



Şekil 2.1. Akım baskılı manyetik tozlu fren



Şekil 2.2. ABTF-01 Tork-Akım ilişkisi

2. Tasarım (CAD) Aşaması

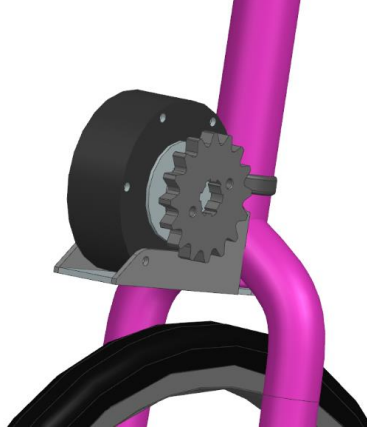
Fren gücünün aktarımı için 16T ön janta monte edilen dişliden, zincir aracılığıyla ABTF-01'e bağlı 13T dişliye güç iletimi hedeflenmiştir. Bunun için bisikletin ön çatal, gidon ve jant ölçümleri yapılmış ve Siemens NX Unigraphics programında CAD modeli oluşturulmuştur (Şekil 2.3). Frenin ön çatal bölümüne entegrasyonu amacıyla 3 mm kalınlığında M5 montaj delikli lazer kesim adaptasyon braketleri tasarlanmış ve kaynaklı bağlantı yöntemi öngörülmüştür.



Şekil 2.3. Siemens NX Programı üzerinden CAD tasarımı

3. Adaptasyon Braketlerinin Üretimi ve Montajı

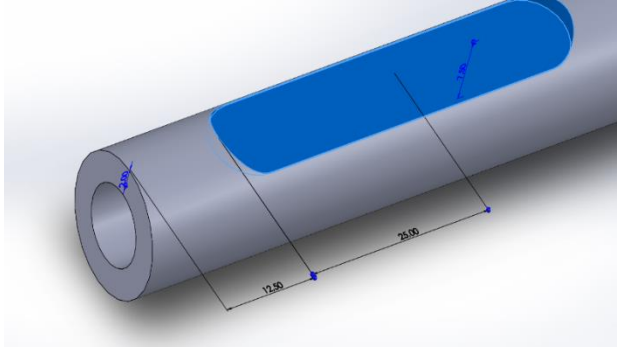
Tasarımı tamamlanan lazer kesim braketler, AutoCAD ortamında .dxf formatına çevrilerek CADCut.co üzerinden üretilmiştir. Ölçü kontrolleri sonrasında braketler bisikletin ön çatalına gaz altı kaynağı ile monte edilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Adaptasyon braketleri CAD görüntüsü

4. Mil Tasarımı ve Üretimi

Fren ve dişli sisteminin aksel hizalanması için 15 mm çapında, 100 mm uzunluğunda ve ± 0.02 mm toleranslı, 40mm x 2mm x 5mm kama yuvalı bir mil tasarlanmıştır (Şekil 2.5). SolidWorks programı kullanılarak üretilen mil, montaj sonrası aksel dengeyi sağlamış ve güç aktarımı için zincir montajına hazır hale getirilmiştir



Şekil 2.5. SolidWorks Programı üzerinden mil tasarımı.

5. Dişli Ölçülerinden Tork Eldesi

Dişli oranı 16/13 olarak belirlenmiş ve böylece frenden tekerleğe aktarılan tork 5 Nm'den 6.154 Nm'ye çıkarılmıştır.

6. Akım Kontrolü

Akım kontrolü için başlangıçta Arduino tabanlı bir sistem planlanmış, ancak proje süresi göz önünde bulundurularak DC motor hız kontrol devresi ve B100K potansiyometre tercih edilmiştir. Bu sistem, PWM sinyali ile akım değerinin hassas kontrolünü sağlamış ve frenleme torku istenilen seviyelerde ayarlanabilmiştir. İlave olarak, hall sensörlü parmak gazı kullanım düşüncesi gerilim uyumsuzluğu nedeniyle uygulanamamış ve potansiyometre ile kontrol sağlanmıştır (Şekil 2.6). Deneylerde güç kaynağı olarak 24V ayarlı adaptör kullanılmıştır. Final görseli Şekil 2.7’de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.6. DC motor hız kontrol devresi ile akım kontrolü



Şekil 2.7. Final Montaj Görseli

BULGULAR

Deneyler düz ve yatay bir zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bisiklet, 80 kg ağırlığındaki bir sürücü ile Şekil 3.1'de belirtilen başlangıç noktasından yaklaşık 2.5 metre mesafeden serbest bırakılarak yaklaşık 1 m/s hıza ulaşması sağlanmıştır. Frenleme noktasından itibaren, Akım Baskılı Manyetik Tozlu Fren (ABMTF) üzerine önceden belirlenen gerilim değerleri uygulanmış ve potansiyometre aracılığıyla frenleme gerçekleştirilmiştir. Frenleme mesafesi, frenlemenin başladığı noktadan bisikletin tamamen durduğu noktaya kadar ölçülmüştür. Deneyler değişken gerilim değerleri (8 V, 12 V, 16 V, 20 V, 24 V) için tekrarlanmıştır.



Şekil 3.1. Başlangıç ve frenleme noktası

Her bir gerilim değerinde, 80 kg ağırlığındaki sürücü ile birlikte bisikletin yatay ekseninde harekete başladığı andaki direnç kuvveti, el kantarı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler her bir gerilim seviyesi için üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler doğrulanarak değerlendirmeye alınmıştır.

Bu deneyde, ABMTF sisteminin durağan haldeki frenleme kuvvetini belirlemek amacıyla, frenleri sıkılı olan bisiklet yatay ekseninde el kantarı yardımıyla çekilmiş ve hareketin başladığı andaki çekme kuvveti ölçülmüştür. El kantarı kuvveti kilogram (kg) cinsinden ölçerken, elde edilen değerlerin Newton (N) cinsinden ifade edilebilmesi için okunan kilogram değerleri yerçekimi ivmesi ($g=9.81 \text{ m/s}^2$) ile çarpılmıştır.

Elde edilen ölçüm sonuçları ve hesaplamalar Çizelge 3.1'de sunulmuş olup, " $F=ma$ " eşitliği kullanılarak aşağıdaki değerlere ulaşılmıştır:

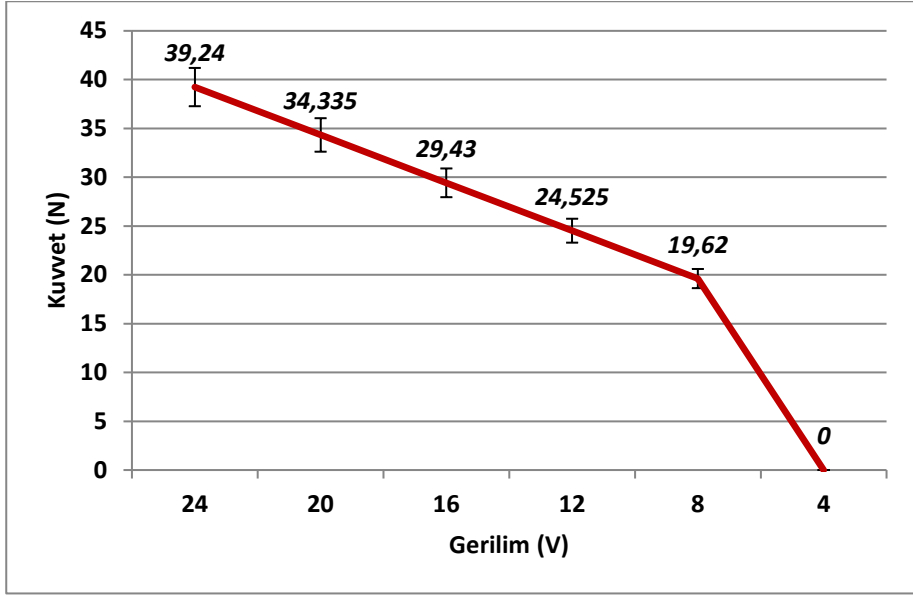
- 24 V sabit gerilimde bisikletin harekete başladığı andaki çekme kuvveti ortalama 4 kg (39.24 N) olarak,
- 20 V sabit gerilimde ortalama çekme kuvveti 3.5 kg (34.34 N) olarak,

- 16 V sabit gerilimde ortalama çekme kuvveti 3 kg (29.43 N) olarak,
- 12 V sabit gerilimde ortalama çekme kuvveti 2.5 kg (24.53 N) olarak,
- 8 V sabit gerilimde ortalama çekme kuvveti 2 kg (19.62 N) olarak ölçülmüştür.
- 4 V sabit gerilimde ise frenleme kuvveti çok düşük olduğundan veya sistem bu gerilim seviyesinde etkin bir şekilde çalışmadığından, el kantarı ile güvenilir ölçüm yapılamamıştır.

Çizelge 3.1. Gerilim - Kuvvet Ölçüm Değerleri

Gerilim (V)	Ölçülen Kütle (kg)	Uygulanan Kuvvet (N)
24	4	39.24
20	3.5	34.335
16	3	29.43
12	2.5	24.525
8	2	19.62
4	-	-

Şekil 3.2’de gösterilen grafiğe göre özellikle 4V ile 8V arasındaki gerilim değişiminde, kuvvetin belirgin bir artış gösterdiği, 8V’tan 24V’a kadar olan aralıkta ise kuvvet artışının daha yumuşak bir artış eğilimi izlediği görülmüştür. Bu durum, sistemin yüksek gerilim aralığında daha hassas bir şekilde kontrol edilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak 4V’ta kuvvet değerinin sıfır olması, akım baskılı manyetik tozlu frenin, bu gerilimde bisikleti harekete geçirecek yeterlilikte bir kuvvet üretmediğini, bunun da statik sürtünme kuvvetini aşamayıp ölçümün yapılamadığını göstermektedir. Bu bulgu, sistemin etkili bir şekilde çalışabilmesi için minimum bir gerilim gereksinimi olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.2. Gerilim ve Uygulanan Kuvvet İlişkisi

Çizelge 5.2’de fren mesafesi için ölçülen deneysel sonuçlar verilmiştir. 24 V uygulandığında elde edilen frenleme mesafesi ölçümleri 4.26 m, 4.34 m ve 4.42 m olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümlerin ortalaması 4.34 m ve standart sapması 0.08 m'dir. Bu sonuç, ABTF-01 serisinin maksimum güç ve gerilim altında (5 Nm fren torku ve dişli oranıyla 6.15 Nm tork eldesi) en etkili frenleme performansını sergilediğini göstermektedir. Kısa frenleme mesafesi, yüksek frenleme torkunun bir göstergesi olmuştur.

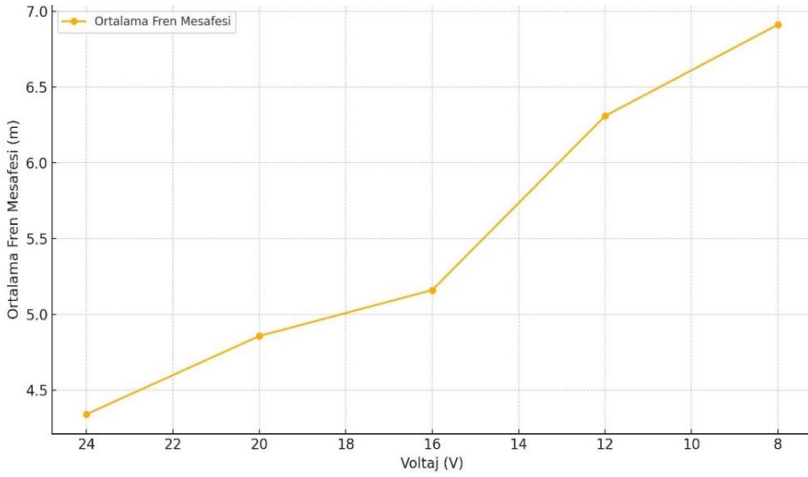
20 V uygulandığında elde edilen frenleme mesafeleri 4.79 m, 4.87 m ve 4.91 m'dir. Ölçümlerin ortalaması 4.86 m ve standart sapması 0.06 m'dir. Gerilimin düşmesi ile birlikte frenleme mesafesinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, uygulanan akımın ve dolayısıyla frenleme torkunun azaldığını göstermektedir. 16 V uygulandığında elde edilen frenleme mesafeleri 5.11 m, 5.16 m ve 5.21 m olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümlerin ortalaması 5.16 m ve standart sapması 0.05 m'dir. 20 V değerine kıyasla frenleme mesafesindeki artış eğilimi devam etmiştir. 12 V uygulandığında ise elde edilen frenleme mesafeleri 6.25 m, 6.31 m ve 6.37 m'dir. Ortalama frenleme mesafesi 6.31 m ve standart sapması 0.06 m olarak hesaplanmıştır. Bu gerilim seviyesinde frenleme mesafesinin belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. 8 V uygulandığında elde edilen frenleme mesafeleri 6.86 m, 6.92 m ve 6.96 m olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümlerin ortalaması 6.91 m ve standart sapması 0.05 m'dir. En düşük gerilimde en uzun frenleme mesafesi elde edilmiştir. Bu sonuç, düşük gerilim seviyelerinde bile ABMTF'nin sınırlı da olsa frenleme etkisi sağlayabildiğini göstermektedir.

Daha düşük gerilimlerde frenleme torkunun ciddi şekilde azalmasından dolayı etkili frenleme tespit edilememiştir.

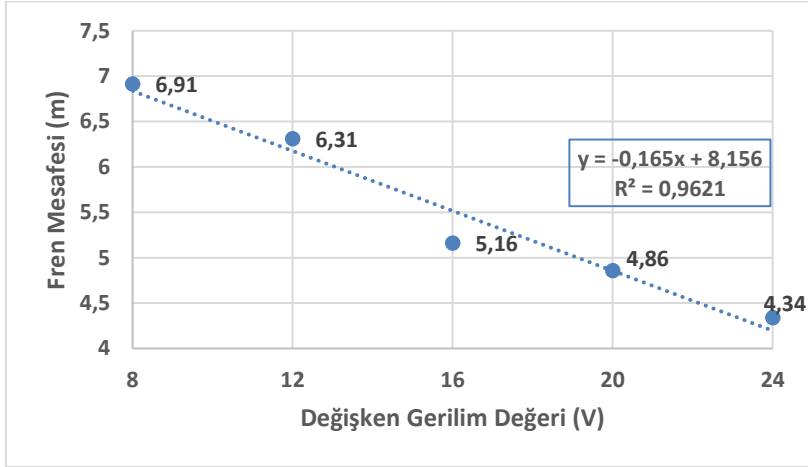
Çizelge 5.2. Fren Mesafesi Ölçüm Sonuçları

Gerilim (V)	Fren Mesafesi 1 (m)	Fren Mesafesi 2 (m)	Fren Mesafesi 3 (m)	Ortalama Fren Mesafesi (m)	Standart Sapma (m)
24	4.26	4.34	4.42	4.34	0.08
20	4.79	4.87	4.91	4.85	0.06
16	5.11	5.16	5.21	5.16	0.05
12	6.25	6.31	6.37	6.31	0.06
8	6.86	6.92	6.96	6.91	0.05

Şekil 3.3 ve 3.4'te gösterilen grafikler, gerilim ile frenleme mesafesi arasındaki ilişkiyi açıkça göstermektedir. Bu grafiklerde, gerilimin arttığı durumlarda fren mesafesinin kısaldığı ve 24V'da en kısa frenleme mesafesinin elde edildiği görülmektedir. Ancak, serbest itme deneyinde istenen hızın tam olarak elde edilememiş olması, erken veya geç yapılan frenlemeler nedeniyle bazı hata paylarını işaret etmektedir. Yine de, düşük standart sapmalar bu hata paylarının tolere edilebilir olduğunu göstermektedir. Bu da sistemin güvenilir ve verimli çalıştığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3.3. Gerilim ve Ortalama Fren Mesafesi İlişkisi [5]



Şekil 3.4. Değişken Gerilim Değerlerine Bağlı Fren Mesafesi Değişimi

SONUÇLAR

Deney sonuçlarına genel bir bakıldığında, uygulanan gerilim ile frenleme mesafesi arasında belirgin bir ters orantılı ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Gerilim arttıkça frenleme mesafesi kısalmakta, gerilim azaldıkça ise mesafe artmaktadır. Bu durum, ABMTF'nin (Akım Baskılı Manyetik Tozlu Fren) kademesiz tork kontrolü özelliğinin etkili bir şekilde çalıştığını ve uygulanan akımın frenleme performansı üzerinde doğrudan etkisi olduğunu

doğrulamaktadır [4]. Ayrıca, düşük standart sapma değerleri, ölçümlerin tutarlı ve güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuçlar, ABMTF sisteminin yüksek gerilimlerde verimli bir şekilde çalıştığını, ancak düşük gerilimlerde performans kayıpları yaşandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, sistemin potansiyel uygulamaları için önemli bir parametreyi işaret etmektedir. Özellikle, düşük gerilim seviyelerinin kullanılması gereken durumlarda, sistemin frenleme verimliliği ciddi şekilde düşebilir. Ancak, sistemin yüksek gerilimde sağladığı kısa frenleme mesafeleri ve yüksek direnç kuvvetleri, özellikle yüksek hızlı bisikletler veya güçlü frenleme kapasitesine ihtiyaç duyan araçlar için ideal bir çözüm sunmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, daha geniş gerilim aralıklarında sistemin performansı daha detaylı bir şekilde incelenebilir. Ayrıca, sistemin düşük gerilimlerde daha verimli çalışabilmesi için tasarım değişiklikleri veya yeni bileşenler kullanılması önerilebilir. Yüksek verimli akım regülasyon sistemleri veya enerji depolama çözümleri, ABMTF sisteminin düşük Gerilimlerde daha etkili çalışmasını sağlayabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, deney sürecinde laboratuvar alt yapısının kullanımı için destek olan Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ve Otomotiv Mühendisliği Bölümü yönetimlerine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Yavuzaslan, N. (2006). *Otomobillerde Fren Sistemleri ve İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [2] Arabacı, E., Kılıç, B. ve Akyüz, A.Ö. (2016). *Tek Silindirli İçten Yanmalı Motorların Performans Karakteristiklerinin Belirlenmesi İçin Düşük Maliyetli Basit Bir Motor Dinamometresi Tasarımı ve İmalatı*. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, Burdur.
- [3] Ergüneş, M. (2023). *Gergi Kontrol Sistemlerinde Kullanılan Elektromanyetik Frenlerin Tasarım Parametrelerinin Optimizasyonu*. Marmara Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- [4] İnternet: Tozlu Frenler, <https://emffren.com.tr/tr/urunler/frenler/tozlu-frenler>, (SET: 28/04/2025).

[5] İnternet: Tozlu Frenler Kataloğu, <https://emffren.com.tr/tr/kataloglar/emf-fren-tozlu-frenler-ve-kavramalar>, (SET: 28/04/2025).

Nanokristal Alaşımların Mekanik Alaşımlama Tekniği ile Üretilmesi

Musa GÖGEBAKAN

- 1- Prof. Dr. Musa GÖGEBAKAN; Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü. gogebakan@ksu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5104-2874

ÖZET

Alaşımlar bazı üstün özellikleri ile saf metallere farklı olan önemli bir malzeme türüdür. Nanokristal alaşımların özellikleri aynı kompozisyondaki kristal yapıdaki alaşımların özelliklerinden çok daha iyidir. Nanokristal alaşımlar birçok farklı yöntemle üretilebilmektedir. Bu yöntemlerden biri de mekanik alaşımlama tekniğidir. Mekanik alaşımlama tekniği ile ergime sıcaklıkları yüksek olan veya oldukça farklı ergime sıcaklıklarına sahip metallere de alaşım üretmek mümkündür. Bu teknik bir katı-hal reaksiyonu olduğu için alaşımı oluşturacak malzemelerin eritilmesine gerek yoktur. Bu çalışmada nanokristal malzeme üretmek için sıkça kullanılan mekanik alaşımlama tekniği ile alaşımların nasıl üretilebileceği detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanokristaller, Alaşım, mekanik alaşımlama, mikro yapı, malzemelerin özellikleri

1. GİRİŞ

Üstün özellikler sergileyen malzemeler birçok alanda kullanılmaktadır. Son yüzyılda teknolojiye meydana gelen hızlı gelişmeler, yeni nesil malzemelere olan ihtiyacın hızla artmasına neden olmuş ve bu durum daha üstün özellikler sergileyen yeni malzemelerin araştırılmasının ve geliştirilmesinin önemini ortaya koymuştur. Bu araştırmalar sonucunda kristal yapısı, normal kristallerden farklı olan ve ısı olarak yarı-kararlı olan yeni malzemeler keşfedilmiştir [1-4]. Bu malzemeler arasında, amorf alaşımlar, nanokristaller ve kuazikristaller ayrı bir önem arz etmektedir. Boyutları nanometre düzeyinde olan nanokristal yapıları alaşımlar, başta mekanik, elektrik ve magnetik özellikleri olmak üzere birçok özelliği kristal yapıdaki alaşımların özelliklerinden daha iyi olan yeni malzemelerdendir [5-7]. Bu alaşımlar, 100 nm' nin altında kristal boyutuna sahip tek fazlı ya da çok fazlı polikristallerden oluşmaktadır. Yüzey alanının büyük olması kimyasal reaktivitelerinin artmasına neden olur ve bu durum malzemenin özelliklerine olumlu katkı yapar. Oldukça yüksek mekanik dayanıklılığa sahip olan nanokristaller, boyutlarından dolayı çeşitli renklerde ışık yayabilmeleri bu malzemeleri optik ve mekanik uygulamalarında önemli hale getirmiştir. Özellikle son yıllarda bilim dünyasında büyük ilgi gören bu malzemeler nanoteknoloji alanında önemli bir yere sahiptir. Bir malzeme içerisinde homojen olarak dağılan nanoboyutlu kristaller malzemenin özelliklerini önemli ölçüde değiştirmekte ve genellikle malzemeye daha üstün özellikler kazandırmaktadır. Nanokristal malzemelerin fiziksel, kimyasal veya mekanik özellikleri, benzer kompozisyondaki kristal malzemelerin özelliklerinden oldukça iyidir. Sağlık sektöründe ve özellikler protez ve ilaç sanayinde kullanılan nanokristaller, güneş enerjisi

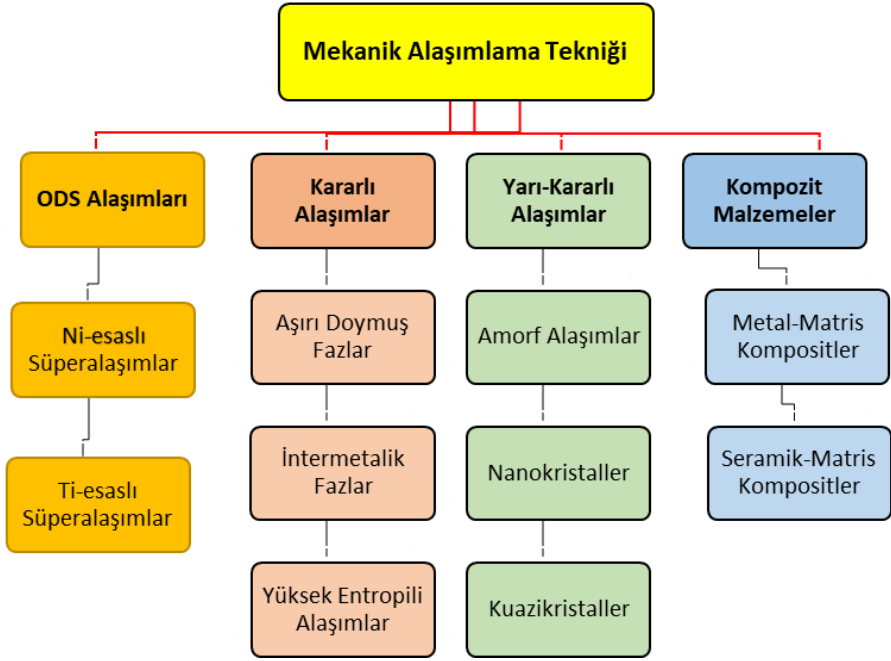
uygulamasında, güneş hücrelerinin üretimi ve verimliliği artırmak için de kullanılabilir [8-12]. Diğer taraftan yüksek performanslı transistörler ve hafıza cihazları gibi elektronik bileşenlerde, bilgisayar ve elektronik teknolojisinde, daha dayanıklı malzeme üretimi, sürtünme direnci gibi özellikleri iyileştirmede ve yüksek performanslı malzeme üretiminde de nanokristallerden yararlanılmaktadır. Dolayısıyla bu tür fonksiyonel yeni malzemelerin üretilmesi, özelliklerinin geliştirilmesi ve üretim maliyetinin düşürülerek daha uzun süre kullanılabilirliklerinin araştırılması bilimsel ve teknolojik öneme sahiptir. Son yıllarda yapılan araştırmalar neticesinde birçok alaşım grubu farklı metotlar kullanılarak nanokristal yapıda üretilmiştir. Dolayısıyla nanokristallerin kullanım alanı daha genişlemiştir. Özellikleri, mikro yapısı ve termal davranışları bilinen ve mikroskobik boyutlarda olan nano kristaller, uzay teknolojisinden ev eşyalarına kadar, otomotiv ve elektronik sanayisindeki çeşitli endüstriyel uygulamalardan tıp alanına kadar birçok alanda heyecan verici potansiyeller sunmaktadır. Nanokristal alaşımlar yarı-kararlı yapıdadır ve ısıtılma işlemi neticesinde enerjilerini kaybederek daha kararlı yapıya dönüşürler. Yüksek sıcaklıklarda ise tamamen kristal yapıya dönüşürler. Tamamen kristal hale dönüşen bir nanokristal alaşım, yumuşak manyetik davranış, yüksek sertlik ve mukavemet, süneklik ve korozyon direnci gibi birçok çekici özellikleri kaybeder. Dolayısıyla bu alaşımların ısıtılabilirliğinin ve termal davranışının bilinmesi oldukça önemlidir.

Bir malzemenin mikro yapısı, özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Bunun yanında malzemelerin üretim metotları ve üretim metotlarının parametreleri mikro yapıyı etkileyebilmektedir. Dolayısıyla uygun üretim metodu seçilerek, malzemelerin mikro yapısı ve hatta özelliklerinin dizayn edilebileceği birçok çalışmada rapor edilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen bulgular, bilim insanlarını, üretim sürecinde malzemelerin mikro yapılarının kontrol edilebildiği yeni üretim metotlarının geliştirilmesi konusunda araştırmaya yöneltmiştir. Son yıllarda bu konu ile ilgili ve özellikle nanokristal yapı malzemelerin üretilmesi ve özelliklerinin geliştirilmesi konusunda yoğun çalışmalar yapılmıştır. Buna bağlı olarak nanoyapılı alaşımların üretilmesi için yeni teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerden en çok kullanılan mekanik alaşımlama/öğütme tekniğidir [13-14].

1. Mekanik Alaşımlama Tekniği

Mekanik alaşımlama tekniği (MA), nanokristal malzeme üretmek için son yıllarda oldukça sık kullanılan önemli ve kolay bir tekniktir. Bu teknik aynı zamanda mekanik öğütme tekniği olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemle, farklı oranlarda hazırlanan elementlerin yüksek enerjili bir işlemle belli bir süre karıştırılarak istenile miktarda alaşımların üretilmesi sağlanır. Sadece nanokristal malzeme üretmek için değil, aynı zamanda amorf,

kuazikristal veya kristal bir malzemeyi homojen olarak üretmek için de kullanılmaktadır. Mekanik alaşımlama tekniğini diğer tekniklerden özgün kılan en önemli özellik, alaşımı oluşturacak elementlerin ergitilmesine ihtiyaç olmamasıdır. Bir katı hal toz işleme tekniği olan mekanik alaşımlama, yüksek enerjili bir bilyeli değirmende harmanlanmış toz halindeki parçacıkların soğuk kaynaklanması, kırılması ve yeniden kaynaklanmasının tekrarlanması içermektedir. Yani alaşımı oluşturan elementlerin ergitilmesine gerek olmaksızın, ısı veya kimyasal işlemlere gerek duyulmadan oluşan bir katıhal reaksiyonu neticesinde hızlı ve etkili bir şekilde alaşım oluşmaktadır. Ayrıca mekanik alaşımlama işlemi sürecinde mikro yapının kontrol edilmesi mümkün olduğundan hedeflenen mikro yapıya ulaşıldığında işlemin sonlandırılabilmesi bu tekniği önemli yapan diğer bir etkidir. Bu teknik, diğer tekniklerle üretilmesi olanaksız veya zor olan, ergime sıcakları yüksek veya ergime sıcaklıkları birbirinden oldukça farklı elementlerle alaşım üretimine olanak sağlar. Diğer taraftan bu teknik, yüksek mekanik özelliklere sahip, hafif, yüksek performanslı malzemelerin istenilen miktarda az malzeme sarfiyatıyla ve düşük maliyetle üretiminde tercih edilir. Alaşımı oluşturan başlangıç malzemeler tozlar halinde olduğundan mekanik öğütme süreci sayesinde üretilcek malzeme çok daha homojen bir şekilde elde edilir. Bu teknikle üretilen malzemeler, hafif ve dayanıklı malzemelerin tercih edildiği otomotiv endüstrisi başta olmak üzere, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı malzemelerin kullanıldığı uzay ve havacılık endüstrisi, yüksek ısı ve elektriksel iletkenliğine sahip malzemelerin ihtiyaç duyulduğu endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda enerji sektöründe ve özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde ve hatta nükleer enerji sistemlerinde kullanılacak malzemelerin üretimi de bu teknikle yapılabilmektedir. Dolayısıyla bu teknikle oldukça geniş ve her alanda kullanılabilecek malzeme türleri üretilmektedir. Şekil 1.1 de Mekanik Alaşımla tekniği ile üretilen malzeme türleri görülmektedir.



Şekil 1.1 Mekanik alaşımlama tekniği ile elde edilebilen malzeme türleri.

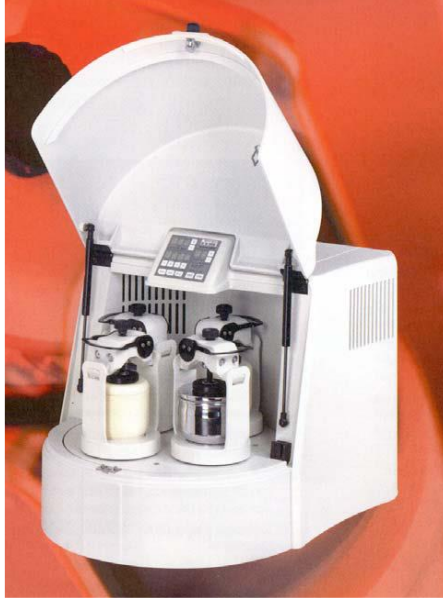
Bu teknik 1960' lı yılların sonlarına doğru Uluslararası Nikel Şirketi çalışanlarından Benjamin ve arkadaşlarının üstün özellikler sergileyen ve ileri teknolojinin ihtiyacı olan malzemeleri üretmek ve özellikle de uzay ve havacılık araçlarında gereksinim duyulan malzeme ihtiyaçlarına cevap vermek amacıyla geliştirilmiş yeni bir üretim metodudur [15-16]. Daha sonraki yıllarda bu teknik daha çok ticari olarak uygulama amaçlı Fe, Ni, Al, Mg, Cu esaslı alaşımların üretilmesi ve özelliklerinin araştırılması üzerine yoğunlaşmış ve istenilen mikro yapıda alaşım üretmek için bu tekniğin uygun bir teknik olduğu anlaşılmıştır. Takip eden yıllarda, mekanik alaşımlama yöntemiyle, oksitleyerek sertleştirilmiş ODS (Oxide Dispersion Strengthening=Oksit Dağılımı ile Sertleştirme) alaşımlar [15], amorf, nanokristal, kuazikristal malzemeler [18-23] intermetalik bileşikler ve yüksek entropili alaşımların [24-26] üretilmesi ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar hızla artmıştır. Her türlü alaşımı üretmek ve geliştirmek için oldukça uygun bir teknik olan mekanik alaşımlama günümüze kadar başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Bu tekniğin gelecekte de kullanımının artarak devam edeceği tahmin edilmektedir. Çizelge 1.1' de mekanik öğütme işleminin tarihsel gelişmesindeki bazı önemli dönüm noktaları verilmiştir.

Çizelge 1.1. Mekanik alaşımlama ile malzeme üretimindeki gelişimindeki önemli dönüm noktaları

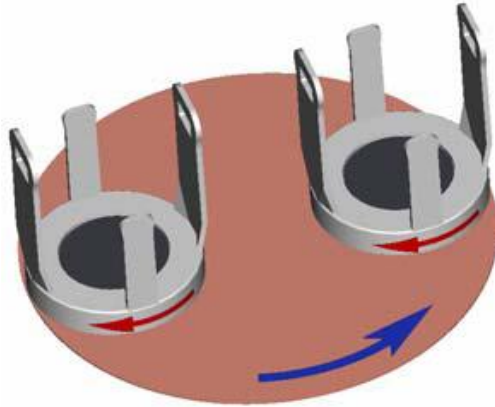
1966	ODS nikel-esaslı süper alaşımların geliştirilmesi
1981	Amorf alaşımların üretimi
1982	Kompozit malzemelerin üretimi
1983	Saf metal tozların amorf yapıda üretimi
1987	Nanokristal alaşımların üretimi
1988	Aşırı Doymuş Alaşımların Üretimi
1989	Kuazikristal fazların sentezi
2004	Yüksek entropili alaşımların üretimi

Mekanik alaşımlama ile malzeme üretmek için birçok farklı türde öğütme cihazı geliştirilmiştir. Bunlar; Speks Çalkalayıcı Değirmenler, Planeter (Gezegensel) Bilyeli Değirmenler, Atritör Tipi Değirmenler ve Ticari Tambur Bilyeli Değirmenlerdir. Bunlar içerisinde en yaygın olarak kullanılan Planeter (Gezegensel) Bilyeli Değirmenlerdir. Daha çok laboratuvar çalışmalarında bilimsel araştırma amaçlı kullanılan ve bir defada birkaç yüz gramlık toz öğütülebilen bu cihazla amorf malzemeler, kuazikristaller ve nanokristaller başta olmak üzere birçok farklı alaşım türü kolayca üretilabilmektedir. Fritsch Pulverisette- 5 marka Planeter (Gezegensel) Bilyeli Değirmen cihazının genel görünümü Şekil 1. 2 ve cihazın iç kısmı Şekil 1. 3 de görülmektedir. Bu cihaz, numune haznelerinin gezegene benzer hareketinden dolayı “planetary” ismini almışlardır. Bu cihaz içerisinde, cihazın çalışma süresi boyunca hem dönen ana taşıyıcı diskin hareketiyle ve hem de numune haznelerinin kendi eksenini etrafında dönme hareketleriyle meydana gelen kuvvetli merkezkaç kuvvetleri, alaşımı oluşturacak tozların, bilyelerle ve birbiriyle çarpışmasını sağlar. Bu çarpışma neticesinde ortaya çıkan enerji tozların reaksiyonuna neden olur. Bu cihazın, diğer cihazlardan daha avantajlı tarafı, bilye hızı daha yüksek olması, daha düşük enerji ile çalışması ve çarpışma frekansının daha düşük olmasıdır. Şekil 1.3 de görüldüğü gibi taşıyıcı disk ve numune hazneler ters yönlerde dönmektedir. Bu durum numune haznesi içinde bulunan bilyelerle tozların sürekli çarpışmasına neden olur. Sürekli çarpışma neticesinde alaşımı oluşturacak olan tozlar deformasyona maruz kalarak morfolojik yapıları değişmeye başlar ve toz boyutlarında sürekli küçülmeler gözlenir. Devam eden öğütme işlemi nedeniyle toz boyutlarının küçülmesi devam eder ve belli bir seviyeden sonra sabitleşir. Mekanik alaşımlama işleminin bundan sonraki ikinci devresinde; belli bir seviyeye kadar küçülen tozlar, cihazın

Çalışma suresince devam eden bu çarpışma sonucu, birbirleriyle reaksiyona girerler ve tozların birbirleri içine difüze olması ile alaşım oluşmaya başlıyor. Hedeflenen mikro yapıdaki alaşımın oluşması durumunda alaşımlama işlemine son verilerek işlem tamamlanmış olur.



şekil 1.2. Planeter bir tc, Fritsch Pulverisette- 5



şekil 1.3. Cihazın iç kısmı, altlık ve haznelerin hareket yönleri oklarla gösterildiği gibi birbirlerine terstir.

Mekanik alaşımlama tekniği ile alaşım üretilirken hedeflenen ürün malzemenin elde edilebilmesi için bu tekniğin izelge 1.2’ de verilen

parametrelerinin; alaşımları oluşturacak tozların fizikse, kimyasal ve mekanik özellikleri de dikkate alınarak belirlenmeli ve öğütme işlemi süresince değiştirilmemesi gerekli ve önemlidir. Bu tekniğin bazı önemli ve sıkça tercih edilen parametreleri Çizelge 1.2 de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Mekanik alaşımlama tekniği ile alaşım üretmek için kullanılan parametreler.

Parametre	En çok kullanılan (tercih edilen)
Cihaz Türü	Planeter bir öğütücü
Alaşımlama hızı	100-300 devir/dakika
Alaşımlama süresi	0-200 saat arası
Bilye-numune oranı	10/1, 15/1, 20/1
Deneysel atmosfer	Argon, helyum
İşlem kontrol elemanı	Sterik asit, etanol, metanol, hekzan
Alaşımlama sıcaklığı	Oda sıcaklığı

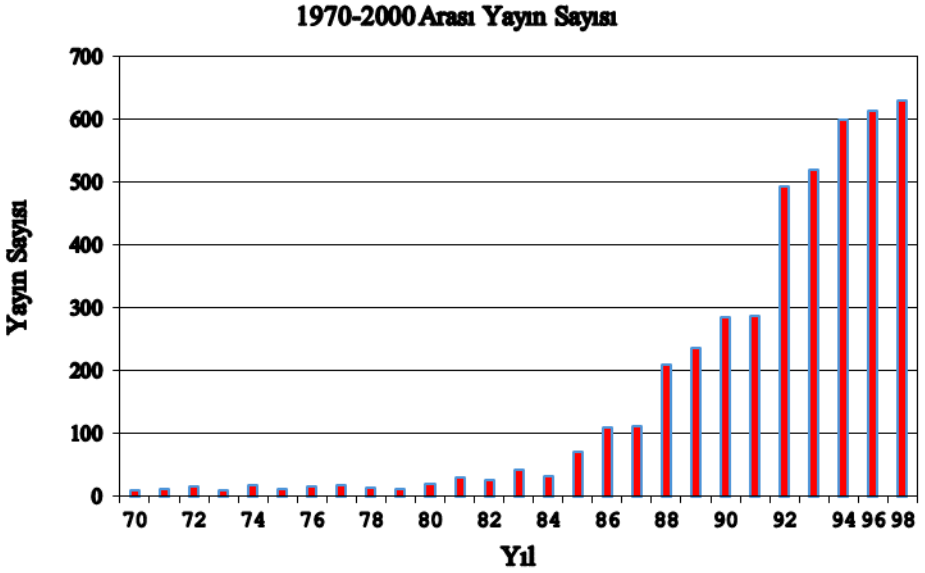
3. Mekanik Alaşımlamanın Avantajları ve Uygulama Alanları

Endüstriyel amaçlı malzeme elde etmek için kullanılan öğütme işlemleri içerisinde Mekanik alaşımlama, en başarılı yöntemlerdendir. Bu teknik, 1966'da, döküm sırasında çökme sertleşmesiyle oluşan oda sıcaklığı kuvvetini, sert parçacıklardan oluşan ikinci fazların malzeme boyunca homojen dağılması neticesinde oluşan dispersiyon sertleşmesinin yüksek sıcaklık kuvvetiyle birleştiren nikel esaslı süper alaşımları elde etmek için endüstriyel bir zorunluluktan geliştirilmiştir. Sonraki yıllarda, tekniğin avantajları keşfedilerek geniş bir alanda başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Özellikle, malzeme sarfiyatının az olması, ergitme işlemine ihtiyaç duyulmaması, işlem sırasında mikro yapının kontrol edilebilmesi gibi önemli avantajlarından dolayı kompozit ve yarı-kararlı malzeme üretmek için yoğun bir şekilde kullanılmıştır.

Mekanik alaşımlama tekniği, ilk geliştirildiği 1966'dan günümüze kadar geçen zaman zarfında ihtiyaç duyulan birçok alandan kullanılmıştır. Özellikle son 50 yıldaki tarihsel gelişimini üç farklı ana döneme ayırmak mümkündür. 1966-1985 arası ilk dönem, genellikle uzay ve havacılık endüstrisindeki uygulamalar için ihtiyaç duyulan ve çoğunlukla yüksek dayanımlı oksit dispersiyonlu (ODS) süper alaşımların üretilmesi ve özelliklerinin daha da geliştirilmesine odaklı araştırmalarla ilgiliydi. Bunun için yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve mekanik özellikleri iyi olan Ni ve Fe-esaslı alaşımlar üretilmiş ve kullanılmıştır. Bunlar arasında ABD'deki Uluslararası Nikel Şirketi (INCO) laboratuvarlarda geliştirilen ve askeri jet motorlarında kullanılan MA754, MA760, MA956, MA957, MA6000 vb sayılabilir. Diğer taraftan mekanik alaşımlamayla üretilen ferritik ODS (Oksit Dağılımı ile Sertleştirme) malzemelerin yüksek sıcaklıkta oksitlenme

ve korozyon dirençleri ile metal yüzeylerinin sertleştirilmesi olarak bilinen nitrürleme dayanımları yüksektir. Bu nedenle bu alaşımlar gaz türbinleri gibi yüksek sıcaklıklı ortamlarda kullanılmaktadır. Bunların yanında mekanik alaşımlama ile üretilen malzemeler için bazı küçük ölçekli pratik uygulama da bu ilk dönemde geliştirilmiştir. Bu uygulamayla ilgili ilginç bir örnek Körfez savaşında ABD ordusu tarafından hazır yemeklerin ısıtılması amacı ile kullanılan Mekanik alaşımlanmış hazır yemek ısıtıcılarıdır. Her ortamda kullanılabilmesi ve kullanımın kolay olması nedeni ile bu tekniğin önümüzdeki yıllarda daha yaygın bir alanda kullanılacağı tahmin edilmektedir.

1986'dan 2000 yılına kadar olan ikinci periyotta mekanik alaşımlama tekniği daha çok bilimsel araştırma amaçlı kullanılmıştır. Bu periyotta oldukça fazla bilimsel çalışma ve konferanslar düzenlenmiş ve adeta bir bilimsel yayın faaliyeti patlaması olmuştur. Şekil 1.4 de 1970-2000 yılları arasında mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak yapılan yayınların sayısı görülmektedir. Ayrıca bu dönemde deneysel verilerden faydalanarak birçok modellemeler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modellemeler sayesinde mekanik alaşım sürecinde alaşım oluşum mekanizması ve mekanik alaşımlama cihazının parametrelerinin ürün malzemenin mikro yapısına olan etkisi kısmen de olsa açıklanabilmiştir. Bu periyotta birçok yeni ve oldukça çeşitli maddeler sentezlenmiş, bu metot kullanılarak elde edilen yeni fazların, mikro yapıların ve bu fazlarla mikro yapının alaşımın özelliklerine etkisini teorik olarak tahmin etmek için çeşitli modelleme çalışmaları artarak devam etmektedir.



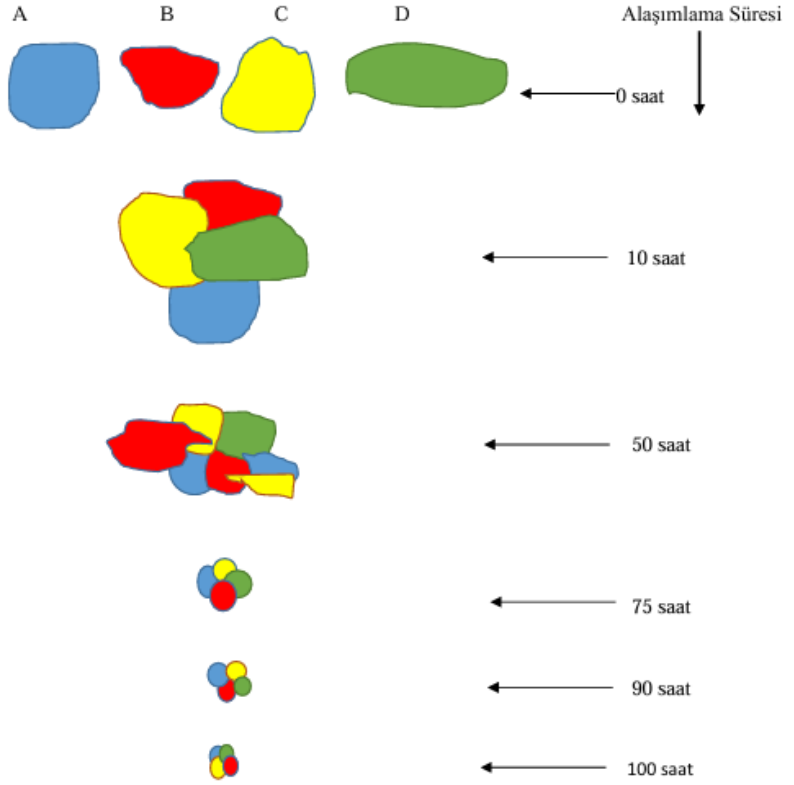
Şekil 1. 4 1970-2020 yılları arasında mekanik alaşımlama ile yapılan yayınların artış hızı.

2001 yılından itibaren başlayan üçüncü dönem, mekanik alaşımlama ile elde edilen malzemelerin yeni kullanım alanları kazanması ve alaşımların tam istenilen mikro yapıda ve özelliklerde olması için yenilikçi teknikler geliştirilmesiyle sürmüştür. Bu üçüncü periyotta mekanik alaşımlama ile yapılan yayın sayısı artarak devam etmiş ve özellikle amorf alaşımlar, nanokristal malzemeler, kuazikristaller gibi yarı-karal alaşımlar ile tek fazlı olan yüksek entropili alaşımlar bu teknik kullanılarak üretilmeye başlanmıştır. Ayrıca bu teknik; başta manyetik malzemeler ve süper iletkenler olmak üzere fonksiyonel seramiklerin, çeşitli kompozit malzemelerin, tek veya çok fazlı intermetaliklerin, hidrojeni katı olarak depolayabilen malzemelerin, gaz absorbe edebilen malzemelerin vb. sentezlenmesi ve işlenmesi gibi oldukça fazla endüstrilerde uygulama alanı bulmaktadır.

4. Mekanik Alaşımlama ile Nanokristal Alaşımların Oluşum Mekanizması

Mekanik alaşımlama tekniği ile nanokristal yapıları alaşımların oluşum mekanizmasını anlayabilmek için, bu tekniğin bir katı-hal reaksiyonu olduğunun ve alaşımların oluşturan toz elementlerin ergitilmesine gerek olmadığını bilmesi önemlidir. Bu teknikle alaşımların oluşum sürecinde, alaşımların oluşturan tozların belirlenen oranlarda alınarak harmanlanması ve

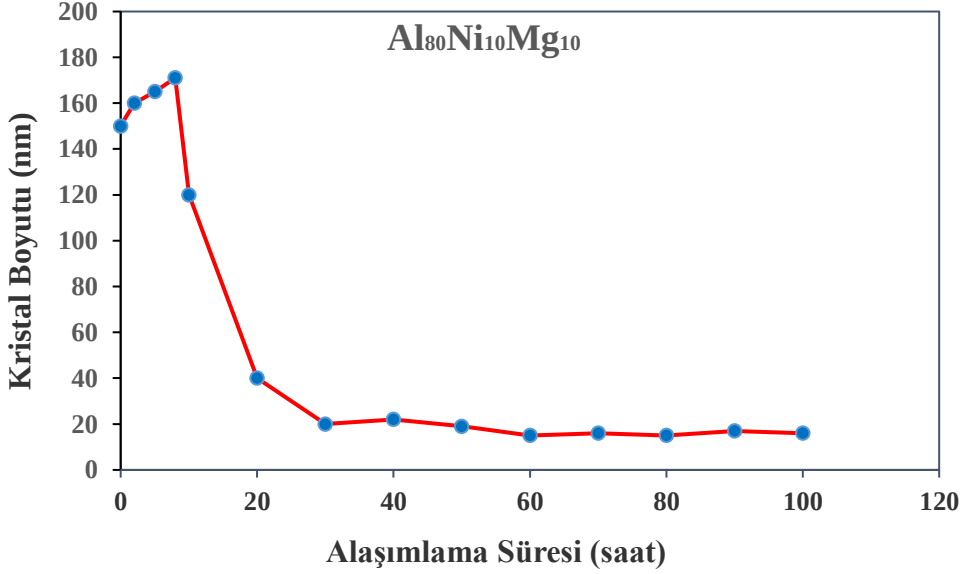
oksitlenmeye meydan vermeden argon atmosferi altında cihaza yerleştirilmesi gerekmektedir. Alaşımlama işlemi, tüm hazırlıklar yapıldıktan ve Çizelge 1.2 de verilen uygun parametreler seçildikten sonra başlatılmalıdır. Bu parametreler seçilirken element tozlarının; sünek-sünek, sünek-gevrek ve gevrek-gevrek gibi hangi element karakterine girdiğine dikkat edilmesi oldukça önemlidir. Böylece en uygun parametrelerin tercih edilmesi, hedeflenen alaşımın elde edilmesinde kolaylık sağlar. Alaşımlama işleminin başlangıç safhasında farklı büyüklükte ve geometrik yapıdaki elementsel tozların birbirleriyle ve bilyelerle çarpışması neticesinde tozlar deforme olmaya başlar ve geometrik şekilleri değişmeye başlar. Böylece tozların morfolojik yapılarında öğütme süresine bağlı olarak bozulmalar meydana gelir ve tozlar belli bölgelerde kümeleşmeye başlarlar. Alaşımlama işleminin bu safhasında sıkça gözlenen bu duruma soğuk kaynaklanma (cold welding) denir [16-17]. Mekanik alaşımlama işleminde devam eden öğütme sırasında tozların bilyelerle ve birbirleriyle çarpışması neticesinde ortaya çıkan enerji tozların deforme olmasına, levhalamasına, birbirleri ile kaynaklanmasına, kırılarak boyutlarının küçülmesine ve tekrar kaynaklaşmaya sebep olur. Bu aşamada, toz bileşenlerinden en az birinin süneksi özelliğe sahip olması veya sünek-sünek, sünek-gevrek olması durumunda toz boyutlarında belli bir büyüme gözlenir. Alaşımlama süresinin artmasıyla ortaya çıkan enerjinin arması nedeniyle tozlar daha fazla parçalanmaya başlar ve boyutlarında önemli ölçüde azalmalar görülür. Eğer toz bileşenleri gevrek-gevrek ise toz boyutlarında küçülme daha hızlı olur. Bu durum ise toz parçacıklarının kırılması ve parçalanması (fracturing) olarak bilinir [16-17]. İşlem devam ettikçe sertleşme ve boyutta küçülme devam eder. Toz parçacıklarının boyutlarındaki küçülmeler parçacıkların kırılması ile beraber belli bir değere kadar sürer, parçacık boyutu belli küçüklüğe ulaşıncaya kadar devam eden parçacık kırılmaları parçacık boyutu belli bir küçüklük değerine ulaştığında daha fazla kırılma olmadığında tozların boyutları sabitleşir. Bu aşamada toz parçacıklarının boyutunda meydana gelen azalma mikro yapının oluşması ile neticelenir. Homojen ve kararlı mikro yapı gerçekleştiğinde toz boyutunda değişme olmaz ve kararlı mikro yapı oluşmuş olur. Bu aşamadan sonra sıcaklığın artması ile tanecikler arasındaki boşluklar azalırken alaşımlanma başlar. Artık bu kademedен sonra daha fazla öğütme, mikro yapıda herhangi bir değişikliğe neden olmayacaktır. Dolayısıyla alaşımlama işlemi sonlandırılır. Elemental tozlarının yapısında mekanik alaşımlama sürecince meydana gelen değişimlerin şematik gösterimi Şekil 1. 5'te sunulmuştur.



Şekil 1.5. A, B, C ve D gibi element tozlarının yapısında mekanik alaşımlama sürecinde meydana gelen değişimlerin şematik gösterimi.

Mekanik alaşımlama işlemi süresince element tozlarının kristal boyutunda meydana gelen değişimlere tipik bir örnek Şekil 1. 6' da görülmektedir. Şekil 1. 6' da mekanik alaşımlama ile nanokristal yapıda üretilen $Al_{80}Ni_{10}Mg_{10}$ alaşım tozlarının alaşımlama süresine bağlı olarak tozlarının kristal boyutundaki azalmalar belirgin bir şekilde görülmektedir. Alaşımlama işleminin başlangıç safhasında kristal boyutunda bir artış gözlenmiştir. Bu artışın nedeni alaşımı oluşturan ve süneksi bir özelliğe sahip olan Alüminyum (Al) elementinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Artan öğütme işlemi ile kristal boyutu azalmaya başlamış ve 20 saatlik öğütmeden sonra 20 nm'nin altına düşmüştür. 30 saatten sonra alaşımlama sürecinin ilerlemesiyle birlikte parçacık boyutundaki değişim hızı azalmış, 50 saatlik alaşımlama sonrasında ise kristal boyutu neredeyse sabit kalarak yalnızca küçük dalgalanmalar göstermiştir. 100 saat sonunda

kristal boyutunun 15 nm' civarında olduğu belirlenmiştir. Mekanik alaşımlama ile üretilen birçok alaşım grubunda kristal boyutundaki değişim alaşımı oluşturan elementlere bağlı olarak benzer sonuçlar vermiştir.



Şekil 1.6. Mekanik alaşımlama süresinde $Al_{80}Ni_{10}Mg_{10}$ tozlarının alaşımlama süresine bağlı olarak kristal boyutundaki değişimler.

5. Sonuç

- Mekanik alaşımlama, alaşım üretmek için kullanılan önemli ve kolay bir tekniktir.
- Bu teknik bir hatı-hal reaksiyonu olduğu için alaşımı üretmek için malzemelerin ergitilmesine ihtiyaç yoktur. Bu nedenle ergime sıcaklıkları birbirlerinden oldukça farklı olan elementler kullanılarak da alaşım üretmek mümkündür.
- Diğer tekniklerle üretilemeyen alaşımların mekanik alaşımlama tekniği ile üretilmesi mümkündür.
- Amorf, nanokristal ve kuazikristal gibi yarı-kararlı alaşımlar ve yüksek entropili tek fazlı alaşımlar mekanik alaşımlama tekniği ile üretilmektedir.
- Mekanik alaşımlama tekniği ile işlem esnasında mikro yapının kontrolü mümkün olduğundan istenilen mikro yapıda alaşım üretim olasılığı yüksektir.

- Başlangıç malzemeleri element tozlar olduğundan malzeme sarfiyatı az olmakta ve üretim maliyeti diğer tekniklere göre daha düşük olmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Koch, C.C. (2007). Structural nanocrystalline materials: an overview. *Journal of Materials Science*. 42, 1403-1414.
- [2] Wang, Y., Chen, M., Zhou, F., & Ma, E. (2002). High tensile ductility in a nanostructured metal. *Nature*. 419, 912-914.
- [3] Inoue A., Kimura H. (2001). Bulk amorphous, nanocrystalline and nanoquasicrystalline aluminium alloys. Institute of Physics Publishing. London, UK, 150-169.
- [4] Wang, T., Sun, Z., Zhang, L. & Wang, Y. (2016). Glass formation and thermal stability of mechanically alloyed $Al_{75}Ni_{10}Ti_{10}Zr_5$ amorphous composites with graphene addition. *Mater. Sci. Forum*. 849, 58-63.
- [5] He, G., Eckert, J., Dai, Q.L., Sui, M.L., Löser, W., Hagiwara, M. (2003). Nanostructured Ti-based multi component alloys with potential for biomedical applications. *Biomaterials*. 245,115–200.
- [6] Kulik, T. (2001). Nanocrystallization of metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 287, 145-161.
- [7] Nayak, S.S., Pabi, S.K. ve Murty, B.S. (2010). Al-(L12)Al3Ti nanocomposites prepared by mechanical alloying: synthesis and mechanical properties. *J. Alloys Comp.*, 492, 128-133.
- [8] Bornapour M., Celikin M., Cerruti M., Pekgülyüz M. (2014). Magnesium implant alloy with low levels of strontium and calcium: The third element effect and phase selection improve bio-corrosion resistance and mechanical performance. [Mater. Sci. Eng. 35](#), 267-282.
- [9] Kalinichenka S., Röntzsch L., Riedl T., Gemming T., Weißgöbner T., Kieback B. (2011). Microstructure and hydrogen storage properties of melt-spun Mg-Cu-Ni-Y alloys, *International Journal of Hydrogen Energy*. 36, 1592–1600.
- [10] Chen Y., Xu Z., Smith C., Sankar J. (2014). Recent advances on the development of magnesium alloys for biodegradable implants. *Acta Bio mater.* 10, 4561–4573.
- [11] Alshahrani B., Olarinoye I.O., Mutuwong Sriwunkum C., Yakout H.A., Tekin H.O. & Al-Buriah M.S. (2021). Amorphous Alloys with High Fe Content for Radiation Shielding Applications, *Radiat. Phys. Chem.*, 183, 109386.
- [12] Kumar A., Mucalo M., Bolzoni L., Li Y., Kong F. & Yang F. (2022). Fabrication, Microstructure, Mechanical, and Electrochemical Properties of NiMnFeCu High Entropy Alloy from Elemental Powders. *Metals*. 12, 167-172.

- [13] Suryanarayana C. (1995). Bibliograph on mechanical alloying and milling. Cambridge International Science Publishing, Cambridge, UK. 439.
- [14] Koch C.C. (2007). Structural nanocrystalline materials: an overview. *Journal of Materials Science*, 42, 1403-1414.
- [15] Benjamin J.S., (1970). Dispersion Strengthened Superalloys by Mechanical Alloying, *Metallurgical Transactions*, 1 1970-2951.
- [16] Suryanarayana C. (2001). Mechanical alloying and milling, *Progress in Mater. Sci.* 46, 1-184.
- [17] Suryanarayana, C. (2004). Mechanical alloying and milling. Marcel Dekker, New York, USA. 466s.
- [18] Benjamin J.S., Volin T E. (1974). The mechanism of mechanical alloying. *Metallurgical Transactions*. 5 (8) 1929-1934.
- [19] Enayati M. H., Mohamed F. A. (2014). Application of mechanical alloying/milling for synthesis of nanocrystalline and amorphous materials. [International Materials Reviews](#). 59(7), 453-459.
- [20] Gogebakana M., Kursuna C., Eckertb J. (2013). Formation of new Cu-based nanocrystalline powders by mechanical alloying technique. *Powder Technology*. 247, 172-177.
- [21]. Koster U., Liu W., Liebertz H., Michel M. (1993). Mechanical properties of quasicrystalline and crystalline phases in Al-Cu-Fe alloys. *J. Non-Cryst. Solids*. 153-154, 446-452.
- [22] Suryanarayana C., Klassen T., Ivanov E. (2011). Synthesis of nanocomposites and amorphous alloys by mechanical alloying. *J Mater Sci*. 46,6301–6315
- [23] Avar B., Gogebakan M. (2009). Synthesis of the quasi-crystalline phase in Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂ powders prepared by mechanical alloying. *J.of Optoelec. and Advan. Mater.* 11 (10) 1460 -1463.
- [24] Eskalen H., Aslan M., Yaykas H., Gögebaka M. (2021). Synthesis and characterization of Co–B–Fe–Ti nanosized alloyed powders. *Int. J. Mater. Res.* 112, 35-41.
- [25] Yaykas H., Eskalen H., Kavun Y. Gogebakan M, & Kaya A.H. (2024) Microstructure and Thermal and Radiation Shielding Properties of CoCrFeNiAg High Entropy Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 33(18), 9686-9698.
- [26] Yaykaşlı H., Eskalen H., Kavun Y., Gögebakan M., Kaya AH, Yorulmaz N. (2023). [CoCrFeNiSi high entropy alloy: Synthesis, structural and radiation shielding properties](#). *Progress in Nuclear Energy*. 165, 104930

Polipropilen Polimeri; Yapısı, Çeşitleri ve Özellikleri

Hüseyin ÜNAL¹

Kemal ERMiŞ²

- 1- Prof. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. unal@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-0521-6647
- 2- Prof. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü. ermis@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3110-2731

ÖZET

Bu çalışma, endüstride hafiflik, kimyasallara direnç ve düşük maliyet gibi özellikleri ile ön plana çıkan ve endüstride yaygın olarak kullanılan plastiklerden birisi olan Polipropilen'in kimyasal yapısı, fiziksel, mekanik, çevresel, tribolojik ve kimyasal özellikleri hakkında bilgiler içermektedir. Buna ilaveten endüstride kullanım alanına göre parça üretiminde PP malzeme/ve/veya kopolimer seçimi açıklanmıştır. Ayrıca polipropilen polimerinin en çok kullanılan şekillendirme yöntemlerinden birisi olan enjeksiyonla şekillendirme yöntemi ile imalatla proses şartlarını açıklayan konuları içermektedir. Piyasada polipropilen polimeri ile parça üretimi yapan enjeksiyon ustaları, ustabaşı, mühendisler ile satın alma hatta pazarlama personeli, mühendislik eğitimi alan öğrenciler ile mühendisler için temel bilgileri kapsamaktadır. Endüstride amaca uygun malzeme seçimi oldukça önemlidir. Seçilen polimer malzeme, çalışma alanında gerekli olan şartları (yük, sıcaklık, basınç, hız, aşınma, sürtünme, UV direnç, yorulma vb. gibi) sağlayacak özellikleri karşılayabilmelidir. Ancak bazen zorlu çevre şartlarına maruz olma kaynaklı az da olsa nem alma eğilimi olabilir. Bu durum ise üretilen ürünün kalitesini düşürmektedir. Performans üçgeninde yaygın kullanılan polimerler sınıfında yer alan polipropilen polimeri mühendislik polimerlerine göre düşük/makul mukavemet ve rijitlik özellikleri göstermektedir. Fakat düşük olan özelliklerini daha yüksek seviyelere çıkarabilmek için aynı zamanda bazı elyaf gibi mukavemet artırıcılarla veya bazı dolgu malzemeleri ile kompozitler üretilmektedir. Böylece PP esaslı kompozitlerin mukavemet, rijitlik, aşınma direnci, UV direnci, tokluk, darbe direnci gibi özellikler geliştirilebilmektedir. Saf polipropilen polimerinin enjeksiyonla kalıplanmasında proses şartları ile takviyeli/dolgulu PP kompozitlerin proses şartları değişiklik göstermektedir. Bu sebeple enjeksiyonla parça üretimi esnasında doğru enjeksiyon proses parametrelerinin ayarlanması gerekir. Bu konularda pratik bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Polipropilen, PP, mekanik, termal, fiziksel, polimer

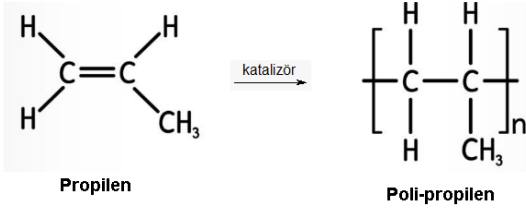
GİRİŞ

Polipropilen polimeri yaygın kullanılan polimerler sınıfında yer alan 0.90 g/cm^3 yoğunluğa sahip en hafif termoplastiklerden birisidir. Yüksek kimyasal dirence sahip olup birçok asit, baz ve organik çözücüye karşı dayanıklıdır. Ergime sıcaklığı 175°C civarında olup oldukça iyi elektriksel özelliklere sahiptir. Hidrofobik bir malzeme olduğu için suyu emmez ve şişme yapmaz. Bu yüzden dış mekân kullanımları için avantaj sağlar. Deniz

suyuna ve çoğu sulu çözeltiye karşı dayanıklıdır. Polipropilen polimerinin yapısı biyolojik olarak çözünmez ve küf, mantar gibi mikroorganizmalar tarafından kolayca parçalanmaz. Bu sebeple bakteri ve küfe karşı dayanıklıdır. Biyo-bozunur değildir doğada yavaş çözündüğü için çevre açısından dezavantaj oluşturabilir. Ancak biyo-bozunur katkıları ilave edilerek PP esaslı biyo-bozunur kompozitler üretilebilir ve böylece çevreye zararlı etkisi azaltılabilir. Polipropilenin temel kimyasal formülü $(C_3H_6)_n$ şeklindedir. Yapısında, her bir propilen birimi aşağıdaki gibi tekrarlanan bir yapıdadır:

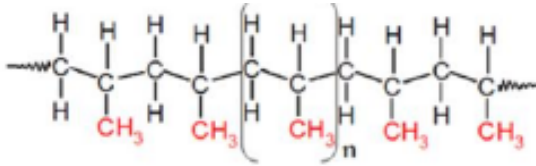


veya



Burada:

- **CH₂** grubu, ana karbon zincirinin bir parçasıdır.
- **CH(CH₃)** grubu, polimer zincirine bağlı bir metil (-CH₃) yan grubuna sahiptir. (Maier and Calafut, 1998).



Şekil 1. Polipropilenin kimyasal yapısı (Maddah,2016)

Polipropilen, genellikle katyonik polimerizasyon veya radikal polimerizasyon yöntemleriyle sentezlenir. Ticari üretimde en yaygın kullanılan yöntem Ziegler-Natta katalizörü veya metallocene katalizörleri ile gerçekleştirilen polimerizasyon reaksiyonudur.

Kristalin yapı ve izomerler:

Polipropilenin farklı kristalin yapıları sahip üç ana izomeri bulunur:

1- **İzotaktik Polipropilen (i-PP):** Metil grupları düzenli bir şekilde aynı tarafta bulunur, yüksek kristallliğe sahiptir ve mekanik dayanımı yüksektir.

2- Sindiotaktik Polipropilen (s-PP): Metil grupları düzenli ama alternatif yönlerde sıralanmıştır, orta derecede kristallik gösterir.

3- Ataktik Polipropilen (a-PP): Metil grupları düzensizdir, amorf yapıdadır ve elastomerik özellikler gösterir.

PP çeşitleri ve Özellikleri

Polipropilen (PP), kristal yapısına ve üretim yöntemine bağlı olarak farklı türlerde sınıflandırılabilir. Üç ana çeşidi vardır. Homopolimer (PP-H), Blok Kopolimer (PP-B) ve Rastgele (Random) Kopolimer (PP-R). Ayrıca özel modifiye edilmiş PP çeşitleri de mevcuttur (Maier and Calafut, 1998; Kutz, 2011).

Homopolimer Polipropilen (PP-H): sadece propilen monomerlerinden oluşur, en saf ve sert polipropilen çeşididir. Sertlik ve rijitliği yüksektir. Ayrıca kimyasallara karşı mükemmel direnç gösterir.

Blok Kopolimer Polipropilen (PP-B): Blok yapıda Propilen+Etilen monomerlerini içerir. Daha esnek ve dayanıklılık özellikleri gösterir. Aynı zamanda özellikle düşük sıcaklıklarda daha iyi darbe dayanım özelliği gösterirken orta düzeyde sertlik ve rijitlik özelliği gösterir.

Random Kopolimer Polipropilen (PP-R): Propilen düşük oranda etilen monomerleri içerir, rastgele dağılım gösterir. Yüksek şeffaflık gösterir ve optik uygulamalar için uygundur. Ayrıca düşük sertlik ve daha elastik yapıya sahiptir. Özellikle düşük sıcaklıklarda esneklik ve iyi darbe dayanım özelliği gösterir.

Her PP türü farklı endüstriyel ihtiyaçlara uygun olarak tercih edilmektedir. Uygulama alanına göre en uygun PP çeşidi seçilebilir. Bunun için yukarıda açıklanan PP homopolimer, PP Blok kopolimer ve PP random kopolimer çeşitlerinin özelliklerinin kıyaslanması aşağıda verilen Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. PP homopolimer, PP Blok kopolimer ve PP random kopolimer çeşitlerinin özelliklerinin kıyaslanması

PP türü	Sertlik	Darbe dayanımı	Şeffaflık	Kimyasal direnç	Sıcaklık dayanımı
PP-H	Yüksek	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
PP-B	Orta	Yüksek	Düşük	Yüksek	Orta
PP-R	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek	Orta

Özel Modifiye Edilmiş PP Çeşitleri: Bu çeşit PP malzemelerin özellikleri ve kullanım alanları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 2. Özel modifiye edilmiş PP çeşitlerinin özellikleri ve kullanım alanları

PP türü	Özellikler	Kullanım alanları
Ataktik PP (APP)	Amorf yapı, düşük yoğunluk, esneklik yüksek	Yapıştırıcılar, kaplamalar
İzotaktik PP (iPP)	Kristalin yapı, yüksek mukavemet, ısı dayanımı yüksek	Endüstriyel plastikler, otomotiv parçaları
Metaloksen Katalizörlü PP	Özel düzenlenmiş moleküler yapı, daha iyi darbe dayanımı ve şeffaflık	Yüksek performanslı ambalaj, film üretimi
Anti-statik PP	Toz çekmeyi önleyen yüzey özellikleri	Elektrik-elektronik muhafazaları
Yanmaz PP	Alev geciktirici katkı	Elektrikli ev aletleri, bina iç kaplamaları

Polipropilen polimeri birçok kimyasallara dayanıklı olmasına rağmen dayanamadığı veya hassas olduğu kimyasallar da vardır. Aşağıda verilen Tablo 3’ de polipropilen polimerinin kullanıldığı uygulamalarda doğru kimyasal malzeme seçimini yapmakta faydalı olabilir. Daha detaylı uygulamalarda malzeme güvenlik bilgi formlarına bakılması daha faydalı olabilir.

Tablo 3. Polipropilenin dayanabildiği ve dayanamadığı bazı kimyasallar

Kimyasal Türü	Dayanıklı olduğu kimyasallar	Dayanısız (Hassas) olduğu kimyasallar
Asitler	Zayıf asitler: Hidroklorik asit (HCl, düşük konsantrasyon), Sülfürik asit (H ₂ SO ₄ , düşük konsantrasyon), Fosforik asit (H ₃ PO ₄)	Güçlü asitler: Sülfürik asit (%50’den fazla), Nitrik asit (HNO ₃ , konsantre)
Bazlar	Sodyum hidroksit (NaOH, çeşitli kons.), Potasyum hidroksit (KOH)	-
Organik Çözücüler	Alkol (Etanol, Metanol), Eterler, Esterler, Düşük konsantrasyonlu ketonlar	Halojenli çözücüler (Diklorometan, Kloroform, Karbon tetraklorür), Güçlü aromatik çözücüler (Benzen, Toluen)
Yağlar ve Yakıtlar	Mineral yağlar, Bitkisel yağlar, Düşük aromatik içeriğe sahip yakıtlar	Benzin (uzun süreli temas), Aromatik hidrokarbonlar (ksilen, naftalin)
Oksitleyici Maddeler	Hidrojen peroksit (düşük kons.), Potasyum permanganat (zayıf çözeltide)	Ozon, kuvvetli oksitleyiciler (klor gazı, brom, fuming nitrik asit)
Tuz Çözeltileri	Çoğu inorganik tuz çözeltisi (NaCl, KCl, CaCl ₂)	-

Çevre ve Dış Hava Şartlarına Direnç

Polipropilen, birçok kimyasal maddeye ve fiziksel etkilere karşı dayanıklı olmasına rağmen, çevresel faktörler ve dış hava koşulları bazı olumsuz etkilere neden olabilir. İşte polipropilenin UV ışınları, sıcaklık, nem, oksidasyon ve diğer çevresel faktörlere karşı dayanıklılık özellikleri detaylı olarak incelendiğinde, doğrudan güneş ışığına uzun süre maruz kaldığında foto-degradasyona uğradığı görülür. UV ışınları polimer zincirlerini parçalayarak malzemenin renginin solmasına, kırılğan hale gelmesine ve mekanik özelliklerinin bozulmasına neden olur. Ancak, UV stabilizatörleri (örneğin karbon siyahı, HALS (Hindered Amine Light Stabilizers) katkıları, UV emiciler vb. gibi) ilave edilerek polipropilenin dış hava koşullarına karşı dayanıklılığı artırılabilir. HALS katkılar UV ışınlarının polimer zincirlerini kırmasını önlerler ve malzemenin mekanik özelliklerini korumaya yardımcı olurlar. Benzofenon, benzotriazol türevi stabilizatör gibi UV emici katkılar UV ışınlarını absorbe ederek bozulmayı azaltır. Yaklaşık %2-3 oranında karbon siyahı en etkili ve ekonomik UV stabilizatörüdür. UV ışınlarını emer ve malzemeyi korur. Polipropilen polimerine etilen-propilen dien kopolimerleri (EPDM, EPR) eklenerek UV ve hava koşullarına karşı esneklik artırılabilir. Buna ilave olarak fluoro-polimer veya akrilik esaslı kaplamalar da PP'nin UV ışınlarına karşı direncini artırır. Ayrıca polipropilen, -10°C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda kırılğan hale gelebilir. Düşük sıcaklıklarda darbe dayanımı azalır. Ergime sıcaklığı yaklaşık 175°C olduğundan 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süreli maruziyeti, malzemenin oksidatif bozulmasına sebep olabilir. Düşük sıcaklıklardaki darbe dayanıklılığını artırmak için çözüm olarak polipropilen polimeri bünyesine kauçuk ilavesi (örneğin, etilen-propilen-dien kauçuğu yani kısaca EPDM) yapılabilir (Mitsuhiro vd., 1998). Aynı zamanda polipropilen oksijene karşı dayanıklılığı orta derecede olup yüksek sıcaklıkta oksijenle temas ettiğinde polipropilenin yapısı bozulur ve renk değişimi görülür. Hatta güçlü oksitleyicilere karşı dayanaksız olup klor ve brom gibi maddeler ile ozon PP'nin bozunmasına bozabilir. Oksidatif bozunmayı önlemek için fenolik ve fosfitler gibi antioksidantlar katkılar kullanılır. Fenolik antioksidantlar birincil antioksidanlar olup serbest radikalleri engelleyerek termal bozunmayı yavaşlatırken fosfit ve tiyodifosfitler ise ikincil antioksidanlar olup polimerin yapısını ısı kaynaklı bozunmaya karşı korur. Kalsiyum stearat ve magnezyum stearat gibi kaydırıcılar ise polipropilenin sıcaklık dayanımını artırmaya yardımcı olan stabilizatörler olup aynı zamanda oksidatif bozunmaya karşı stabiliteyi artırır. Polipropilen hidrofobik bir malzeme olduğu için suyu emmez ve şişme yapmaz. Bu yüzden dış ortamlarda veya mekânlarda kullanımları için avantaj sağlar. Deniz suyuna ve birçok sulu çözeltiye karşı dayanıklıdır. (Maier and Calafut, 1998; Harper, 1996). Nano-kil ve grafen gibi katkılar zincir kırılmasını yavaşlatarak kompozitlerin oksidasyonunu azaltır. Ayrıca

bakteri ve küfe karşı dayanıklı olup polipropilenin yapısı biyolojik olarak çözünmez ve küf, mantar gibi mikroorganizmalar tarafından kolayca parçalanmaz. Yukarıda sayılan özellikler kısaca Tablo 4’de özetlenebilir.

Tablo 4. Polipropilen polimerinin çevresel özellikleri ve özellik iyileştirme yöntemleri

Çevresel Faktör	Polipropilenin Direnci	İyileştirme Yöntemleri
UV ışınları	Zayıf	UV stabilizatör (karbon siyahı, HALS) ilavesi
Düşük sıcaklık	Kırılgan hale gelir	Kauçuk ilavesi (EPDM, elastomerler)
Yüksek sıcaklık	100°C üstünde bozulma başlar	Termal stabilizatör ilavesi
Oksidasyon (hava, ozon ve klor)	Dayanaksız	Antioksidant katkı ilavesi
Su ve nem	Çok dayanıklı	Katkı ilavesine gerek yok
Bakteri ve küf	Dayanıklı	Özel katkı ilavesine gerek yok
Biyobozunurluk	Doğada yavaş çözünür	Biyobozunur katkılar ilave edilebilir.

Tablo 5. Polipropilenin bozunma şartları ve çözüm önerileri

Problem	Çözüm	Örnek Katkı Maddeleri
UV Bozunması	UV Stabilizatörleri, UV Emiciler, Karbon Siyahı, Kaplamalar	HALS, Benzofenon, Benzotriazol, Karbon Siyahı
Sıcaklık Bozunması	Termal Stabilizatörler, Cam elyaf, Kopolimerler	Fenolik Antioksidanlar, Fosfitler, EPR, PTFE, Poliamid
Oksidatif Bozunma	Antioksidanlar, Metalik Sabunlar, Ko-polimerler	Fenolik Antioksidanlar, Fosfitler, EPR, Çinko Stearat, Nano-kil

Polipropilene ilave Edilen Katkılar ve Özelliklere Etkileri

Polipropilen polimeri bazı katkı maddeleri ile modifiye edilerek mekanik, termal, kimyasal ve çevresel dayanımı artırılabilir. Bu katkılar, polipropilenin işlenebilirliğini, dayanıklılığını ve performansını önemli ölçüde iyileştirir (Maier and Calafut, 1998; Shubhra, Quazi vd., 2011; Karian, 1999; Gachter. and Muller, 1993). Aşağıda Tablo 6’da polipropilen

polimerine ilave edilen katkı maddeleri ve özelliklere etkileri detaylı olarak incelenmiştir:

Tablo 6. Polipropilene ilave edilen bazı katkıları ve özelliklere etkisi

Katkı Malzemesi	Özelliklere Etkisi
UV Stabilizatörleri	Güneş ışığına karşı koruma
Antioksidanlar	Oksidasyon ve ısı bozunmasını önler
Antistatik katkıları	Elektrik yükünü azaltarak toz birikimini engeller.
Kaydırıcı ve işlemeyi kolaylaştırıcı katkıları	Plastik parçaların kalıptan kolay çıkmasını sağlar ve yapışmayı önler. Daha iyi yüzey kalitesi sağlar. İşleme sürecini hızlandırır.
Cam elyaf takviyesi	Mukavemet ve sertliği artırır
Talk, CaCO ₃ katkı ilavesi	Sertlik ve rijitliği artırır. Boyutsal stabiliteyi iyileştirir. Sıcaklık dayanımını hafif artırır.
Nano-kil/grafen ilavesi	Mekanik mukavemeti artırır. Kimyasal direnci artırır. Gaz bariyer özelliği kazandırır.
Kauçuk ve TPE ilavesi	Esnekliği ve darbe direncini artırır
Alev Geciktiriciler	Yanmayı geciktiricilik özelliği sağlar

Polipropilen polimerine ilave edilen mukavemet artırıcı ve dolgu maddeleri polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine farklı etkiler. Aşağıdaki Tablo 7’de cam elyaf, talk, kaolin ve kalsiyum karbonat (CaCO₃) gibi dolgu maddelerinin PP polimerinin özelliklerine etkileri detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 7. Farklı katkıların PP kompozitin mekanik özelliklerine etkisi

Katkı cinsi	Cam elyaf	Talk	Kaolin	Kalsiyum Karbonat
Oran (%)	10-40	10-40	5-40	5-30
Yoğunluk (g/cm ³)	1.05-1.40	0.96-1.10	0.98-1.15	0.95-1.10
Mukavemet, (MPa)	30-150	25-40	25-50	20-35
Elastiklik Modülü (GPa)	1.5-4.0	1.0-2.5	1.0-2.8	Çok az değişir
Darbe Dayanımı (kJ/m ²)	azalır	azalır	azalır	artar
Sertlik (Shore D)	artar	artar	artar	artar

Farklı mineral ve fiber katkıları ile modifiye edilmiş polipropilen esaslı kompozitler birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Aşağıda Tablo 8’de, katkı tipine bağlı olarak genel kullanım alanları ve öne çıkan avantajları verilmiştir (Washabourg, 1987). Polipropilenin hafifliği, dayanıklılığı, kimyasal direnci ve uygun maliyeti nedeniyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri Tablo 9’da verilmiştir. Beyaz eşya sektöründe kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri Tablo 10’da verilmiştir. PP polimeri suya ve deterjanlara dayanıklıdır, ayrıca korozyona uğramaz. Deterjan ve sıcak suya karşı dirençli olması, alternatif polimerlere göre ekonomik olup enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile kompleks tasarımlar yapılması mümkündür (Mascia, 1982). Buna ilaveten PP polimeri mükemmel elektrik yalıtkanlık özelliği, birçok kimyasallara direnç ve nem dayanımı ile yanmazlık katkıları ile yanmazlık özelliği geliştirilir ve birçok alanda güvenle kullanılabilir. Benzer özellikler Havacılık/uzay sektöründe kullanım için de uygundur. Elektrik/elektronik sektöründe kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri, Tablo 11’de verilmiştir. Havacılık/uzay sektöründe kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri, Tablo 12’de verilirken ev aletleri ve küçük elektronik cihazlarda kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri, Tablo 11’de verilmiştir (Kutz, 2011).

Tablo 8. Farklı katkılı polipropilen esaslı kompozitlerin genel kullanım alanları ve öne çıkan avantajları

Katkı Çeşidi	Endüstriyel Kullanım Alanları	Öne Çıkan Avantajları
Cam elyaf takviyeli PP	Otomotiv: Gösterge panelleri, tamponlar, kaput altı parçalar Beyaz Eşya: Çamaşır makinesi tamburları, iç gövdeler Elektrikli El Aletleri: Matkap, testere gövdeleri - İnşaat Malzemeleri: Yapısal paneller, borular	-Yüksek mukavemet ve rijitlik -Isı ve aşınma dayanımı -Hafif ancak mukavemetli yapı
Talk katkılı PP	Otomotiv: İç trim parçaları, gösterge panelleri Ev Eşyaları: Tencere kulpları, mutfak gereçleri Ambalaj: Sert kaplar, şişeler İnşaat: Yalıtım panelleri, borular	-Yüksek rijitlik ve sıcaklık dayanımı -Yüzey düzgünlüğü -Maliyet avantajı
Kaolin katkılı PP	Elektrik/elektronik: Yalıtkan parçalar, kablo kaplamaları	-Gaz ve nem bariyeri -Elektriksel yalıtkanlık

	Ambalaj: Gıda saklama kapları, özel bariyer filmler Medikal Ürünler: İlaç ambalajları, tıbbi aletler	-Kimyasal direnç
Kalsiyum karbonat katkı PP	Ambalaj: Film, poşet, torba üretimi Tüketici Ürünleri: Plastik mobilyalar, oyuncaklar Boru Üretimi: Basıncsız borular, sulama sistemleri	-Maliyet avantajı -Darbe dayanımı hafif iyileştirilmiş -İşlenebilme kolaylığı

Tablo 9. Otomotiv sektöründe kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri

Parça adı	PP çeşidi	Özellik
Tamponlar	PP-Blok kopolimer	Darbe dayanımı ve düşük sıcaklıklarda esneklik
Gösterge Panelleri	Cam elyaf takviyeli PP	Rijitlik, ısıl dayanım
Kapı Panelleri ve Konsollar	PP-talk katkı	Sertlik, aşınma dayanımı
Havalandırma Izgaraları	PP-Homopolimer	Kimyasal dayanım, hafiflik
Yakıt Tankı İç Kaplamaları	PP-Nano kil takviyeli	Gaz bariyeri, kimyasal direnç
Akü Kutuları	PP-Blok kopolimer	Darbeye dayanıklı, ısıya dirençli

Tablo 10. Beyaz eşya sektöründe kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri

Parça adı	PP çeşidi	Özellik
Çamaşır makinesi kazanı	PP-Homopolimer	Deterjanlara dayanım, hafiflik
Bulaşık makinesi iç gövdesi	PP-Blok Kopolimer	Sıcak su dayanımı, darbe dayanımı
Buzdolabı İç Kaplamaları	PP-talk katkı	Yüksek rijitlik, düşük maliyet
Su Sebili Parçaları	PP-Random Kopolimer	Gıda uyumu, darbe dayanımı
Havalandırma Kanalları	PP-Homopolimer	Hafiflik, aşınma direnci
Akü Kutuları	PP-Blok kopolimer	Darbeye dayanıklı, ısıya dirençli

Tablo 11. Elektrik/Elektronik sektöründe kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri

Parça adı	PP çeşidi	Özellik
Elektrik Prizleri ve Anahtar Kutuları	PP-Mika katkılı	Yalıtkanlık, sıcaklık dayanımı
Kablo Kaplamaları	PP-Homopolimer	Elektriksel yalıtkanlık, esneklik
Sigorta Kutuları	Cam elyaf takviyeli PP	Yüksek mekanik dayanım, ısıya direnç
Pil ve Akü Muhafazaları	PP-Blok Kopolimer	Darbe dayanımı, kimyasal direnç
Fan Gövdeleri ve Soğutma Sistemleri	PP-talk katkılı	Rijitlik, hafiflik

Tablo 12. Havacılık ve Uzay Sanayinde kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri

Parça adı	PP çeşidi	Özellik
İç Kabin Panelleri	Cam elyaf takviyeli PP	Yüksek mekanik mukavemet
Havalandırma Kanalları	PP-Homopolimer	Hafiflik, aşınma direnci
Koltuk Parçaları ve Kolları	PP-Talk Katkılı	Darbe dayanımı, rijitlik
Yanmaz Kompozit Kaplamalar	PP-Nano Kil Takviyeli	Alev geciktirici, hafif
Bagaj bölmeleri iç yüzeyleri	PP-Blok Kopolimer	Dayanıklılık, hafiflik

Tablo 13. Ev aletleri ve küçük elektronik cihazlarda kullanılan bazı parçalar, PP çeşidi ve özellikleri

Parça adı	PP çeşidi	Özellik
Mikser ve Blender Gövdeleri	PP-Blok Kopolimer	Darbeye dayanıklı, hafif
Elektrikli Süpürge Gövdeleri	Cam elyaf takviyeli PP	Sertlik, dayanıklılık
Su Isıtıcı (Kettle) Gövdesi	PP-Random kopolimer	Sıcak suya dayanım, gıda uyumluluğu
Mutfak Gereçleri (Kapak, Kaşık, Spatula)	PP-Homopolimer	Kimyasal direnç, hafiflik
Çay ve Kahve Makineleri İç Kaplamaları	PP-talk katkılı	Sıcaklığa dayanıklı, sert

SONUÇ

Polipropilen termoplastik polimeri genel amaçlı polimerler sınıfında yer alan bir plastik malzemedir. Genellikle ortam şartlarında nem alma eğilimi yoktur. Ancak zorlu ortam şartlarına maruz kaldığında nem alabilir. Bu durumlarda polipropilen granüllerinin 80°C bir (1) saat kurutulması gerekir. Özellikle oda sıcaklığında PP polimeri birçok kimyasala dayanıklı olup darbe direnci istenen uygulamalarda PP-B kopolimeri, sıcaklık istenen uygulamalarda PP-H homopolimeri, şeffaflık istenen uygulamalarda ise PP-R rindom kopolimer seçilmelidir. PP polimeri 0.90 g/cm³ yoğunluğa sahip olup en hafif termoplastiklerden birisidir. Bu sebeple endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. PP polimerinin oksijen indeksi (OI) 18 olup kolayca yanabilen bir polimerdir. Ancak, yanmayı geciktirici katkılarla yanmaz özellik kazandırılabilir. Yüksek mukavemet ve yüksek Elastik Modülü için cam elyaf, karbon elyaf, yüksek darbe direnci için bazı elastomerler (EPDM ve TPE gibi) ilave edilebilir. Enjeksiyonla proses aşamasında, parçalarda çökmeleri azaltmak veya önlemek için elyafı veya mineral esaslı katkıları kullanılırken bunu desteklemek için şişirici ajanlarda kullanılabilir. PP esaslı kompozit malzemeyi ucuzlatmak için kalsiyum karbonat, talk ve kaolin gibi katkıları ilave edilirken malzeme isteklerine göre UV stabilizatörleri, anti-oksidantlar, anti-statik katkıları, ısı stabilizatörleri, kaydırıcı ve işlemeyi kolaylaştırıcıları ve renklendiriciler ilave edilebilir. PP polimeri enjeksiyonla şekillendirilirken katkılı ve katkısız olmasına bağlı olarak proses şartları değişebilir. Ancak kabaca enjeksiyon sıcaklıkları 170-225 °C arasında, enjeksiyon basıncı ise 100 bar civarında, ütüleme basıncı ise 60 bar olarak ayarlanması durumunda daha kaliteli ve iyi görünümlü parçalar üretebilmek mümkün olabilecektir.

REFERANSLAR

- Brazel, C.S. (2012). *Fundamental Principles of Polymeric Materials*, 3rd ed.; John Wiley & Sons: New Jersey, USA. pp. 46–60
- Gachter, R. and Muller, H. (1993). *Plastics Additives Handbook*, Hanser/Gardner Publications Inc., Cincinnati: USA
- Garcia, P., (2016), Polypropylene, Properties, Uses and Benefits, Polymer Science and Technology, Series,
- Harper, C.A. (1996). *Handbook of Plastics, Elastomers and Composites*, McGraw-Hill, New York: USA.
- Karian, Harutun G., 1999. Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites. New York: Marcel Dekker.
- Kutz M., (2011). Applied Plastics Engineering Handbook, Processing and Materials, A volume in Plastics Design Library, Elsevier Inc.
- Maddah H.A., (2016). Polypropylene as a Promising Plastic; A Review, American Journal of Polymer Science 6(1):pp.1-11.
- Maier C. and Calafut T., (1998). The definitive User's Guide and Databook. A volume in Plastics Design Library, William Andrew Inc.

Mascia, L. (1982). *Thermoplastic Materials Engineering*, Applied Science Publishers Ltd., London.

Mitsuhiro S, Xiaochuan Z., and Yosomiya R. (1998). Impact properties of the polymer blend of polypropylene and thermoplastic elastomer, *Journal of Macromolecular Science-Pure and Applied Chemistry*, 35(7), pp.1207-1215.

Moore E.P., *Polypropylene Handbook: Polymerization, Characterization, Properties, Processing, Applications*,

Shubhra, Quazi TH, Alam A. K. M. M, and Quaiyyum M. A. (2011), Mechanical properties of polypropylene composites: A review." *Journal of thermoplastic composite materials*, (2011): 0892705711428659.

Washabourg FJ, (1987). Surface Treated Kaolins for Engineering Thermoplastics, 42nd Annual Conference, pp. 2–6.

Doymamış Polyester Kompozit Özelliklerine Mika Katkının Etkisi

Cihat ARDA¹

Hüseyin ÜNAL²

- 1- Makine Müh.; Subor Boru Sanayi ve Tic. AŞ, Karapürçek, Sakarya. cihat.arda@subor.com.tr
ORCID No: 0000-0002-0677-2568
- 2- Prof. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Serdivan/Sakarya. unal@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-0521-6647

ÖZET

Bu çalışma, endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılan doymamış polyester polimerinin fiziksel, mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini açıklayan konularını içermektedir. Piyasada doymamış polyester polimeri ile üretim yapan usta, ustabaşı ve mühendisler ile mühendislik eğitimi alan öğrenciler için temel bilgileri kapsamaktadır. Doymamış polyester reçineler, yüksek mekanik dayanımı, kimyasal direnci ve hızlı kürleşme özelliğiyle endüstride yaygın kullanılan termoset polimerlerdir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde (CTP) matris malzemesi olarak tercih edilir ve tekne, otomotiv parçaları, yapı panelleri, su depoları ile mobilya üretiminde kullanılır. Nemli ortamlarda su emme oranı %0,5-2 arasında değişir; bu, reçine formülasyonuna ve katkı maddelerine bağlıdır. Metil etil keton peroksit (MEKP) başlatıcı olarak %1-2,5 oranında kullanılarak polimerizasyon reaksiyonunu başlatır, kobalt oktoat ise %0,1-0,5 oranında promotör olarak kürleşmeyi hızlandırır. Genel katkılar arasında kalsiyum karbonat, talk gibi dolgular maliyet düşürürken, cam elyaf ve karbon fiber gibi mukavemet artırıcılar kompozitlerin mukavemetini artırır. UV stabilizatörleri, özellikle TiO_2 veya organik UV emiciler, güneş ışınlarının neden olduğu zincir kırılmalarını önleyerek dış ortam ömrünü uzatır. Yanmayı geciktiriciler, klorlu parafinler veya fosfor bazlı bileşikler, alev ilerlemesini yavaşlatır ve yangın güvenliğini artırır. Antistatik katkılar, gliserin esterleri gibi nem çekici maddeler, statik elektrik birikimini %0,1-2 oranında azaltarak tozlanmayı önler. Mika katkısı, levha veya pul yapısıyla mekanik dayanımı ve eğilme modülünü artırır, termal genleşme katsayısını düşürür ve 200-300°C'ye kadar termal kararlılık sağlar. Elektriksel olarak, mikanın yalıtkanlığı iyileştirir, ancak yüksek oranda kullanılırsa kırılkanlık artabilir. Fiziksel olarak, mika yüzey parlaklığını ve boyutsal kararlılığı destekler, ancak dispersiyon sorunları mukavemeti düşürebilir. Bu özellikler, doymamış polyesterin otomotivden denizcilik sektörüne kadar geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmesini sağlar; ancak katkı oranları, nihai ürünün kullanım amacı ve çevresel koşullarına göre optimize edilmelidir.

Anahtar Kelimeler – doymamış polyester, polimer, mika, mekanik, termal, fiziksel, termoset.

GİRİŞ

Doymamış polyester reçineler, çok yönlü kullanım alanlarına sahip termoset polimer malzemelerdir ve genellikle kompozit malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Bu reçineler, doymamış dikarboksilik asitler (örneğin, maleik anhidrit veya fumarik asit) ile dioller (örneğin,

propilen glikol) arasındaki esterleşme reaksiyonuyla sentezlenir. Doymamış bağlar, reçinenin kurlenme sırasında çapraz bağlar oluşturmalarını sağlar, bu da malzemenin mekanik dayanımını ve kimyasal direncini artırır. Doymamış polyesterlerin en belirgin özelliklerinden biri, düşük maliyetli olmaları ve kolay işlenebilmeleridir; bu, onları otomotiv, denizcilik, inşaat ve rüzgar türbini gibi endüstrilerde popüler kılar. Mekanik özellikleri, cam elyafı veya karbon elyafı gibi takviye malzemeleriyle birleştirildiğinde önemli ölçüde iyileşir, böylece yüksek mukavemet-ağırlık oranı sunar. Kurlenme işlemi genellikle stiren gibi reaktif bir monomerle ve peroksit başlatıcılarla gerçekleştirilir, bu da reçinenin sertleşmesini ve son şeklini almasını sağlar. Kimyasal direnç açısından, doymamış polyesterler su, zayıf asitler ve bazlara karşı iyi bir direnç gösterir, ancak güçlü asitler veya organik çözücüler karşısında sınırlı dayanıklılık sergileyebilir. Termal özellikleri, reçinenin bileşimine bağlı olarak değişir; genellikle 100-150°C'ye kadar ısıya dayanabilirler, ancak yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinde kayıp yaşanabilir. Elektriksel yalıtım özellikleri, bu malzemeleri elektrik ve elektronik uygulamalarda kullanışlı hale getirir. İşlenebilirlik açısından, doymamış polyesterler döküm, lamine etme, püskürtme veya el yatırması gibi çeşitli yöntemlerle kolayca şekillendirilebilir. Ancak, stiren emisyonları nedeniyle üretim sırasında uygun havalandırma gereklidir, çünkü bu emisyonlar sağlık ve çevre açısından risk oluşturabilir. Çevresel etkileri azaltmak için biyobazlı doymamış polyesterler ve düşük stiren içerikli formülasyonlar üzerine çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca, bu reçineler geri dönüştürülebilirlik açısından sınırlıdır, ancak kimyasal ve mekanik geri dönüşüm yöntemleri üzerine araştırmalar sürmektedir. Genel olarak, doymamış polyesterler, ekonomik olmaları, çok yönlü uygulama olanakları ve yüksek performanslı kompozit malzemeler üretme kapasiteleriyle endüstride önemli bir yere sahiptir.

Metil Etil Keton Peroksit (MEKP), doymamış polyester reçinelerin kurlenme sürecinde başlatıcı (katalizör) olarak kullanılır. Doymamış polyester reçineler, stiren gibi reaktif monomerlerle karıştırıldığında, MEKP'nin eklenmesiyle serbest radikal polimerizasyonu başlatılır. MEKP, peroksit yapısı sayesinde yüksek reaktiviteye sahip serbest radikaller üretir ve bu radikaller, reçinedeki doymamış bağlarla reaksiyona girerek çapraz bağlar oluşturur. Bu süreç, reçinenin sıvı halden sert, dayanıklı bir katı malzemeye dönüşmesini sağlar. MEKP'nin kullanımı, kurlenme süresini ve sıcaklığını kontrol etme imkânı sunar, bu da üretim süreçlerinde esneklik sağlar. Genel olarak, MEKP'nin kullanım oranı reçine ağırlığının %0,5 ila %2'si arasında değişir, ancak bu oran, reçinenin formülasyonuna, istenen kurlenme hızına ve çevre koşullarına (örneğin, sıcaklık) bağlıdır. Yaygın olarak %1-1,5 oranında kullanılması tercih edilir, çünkü bu miktar, uygun kurlenme hızı ile malzemenin mekanik özelliklerini optimize eder. Ancak, fazla MEKP kullanımı aşırı hızlı kurlenmeye, iç gerilimlere veya malzemenin kırılma hızına yol açabilirken, yetersiz kullanım kurlenmeyi

tamamlayamayabilir. Bu nedenle, MEKP oranı dikkatle ayarlanmalı ve üretici tavsiyelerine uyulmalıdır.

Kobalt oktoat, doymamış polyester reçinelerin kürlenme sürecinde hızlandırıcı (promoter) olarak kullanılan önemli bir kimyasal bileşiktir. Doymamış polyester reçineler, kompozit malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılır ve kürlenme işlemi, reçinenin sıvı halden sert, dayanıklı bir katıya dönüşmesini sağlar. Kobalt oktoat, özellikle metil etil keton peroksit (MEKP) gibi peroksit başlatıcılarla birlikte çalışarak serbest radikal polimerizasyonunu başlatır ve hızlandırır. Bu süreçte, kobalt iyonları (Co^{2+} ve Co^{3+}) ve karboksilat radikalleri üreterek polimer zincirlerinin çapraz bağlanmasını teşvik eder, böylece reçinenin mekanik dayanımı artar ve sertleşme süresi kısalır. Isatis tarafından sunulan bilgiler, kobalt oktoatın, özellikle saydam veya renksiz kompozit parçaların üretiminde tercih edildiğini ve reçinenin rengini minimal düzeyde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, kürlenme sürecini oda sıcaklığında etkin bir şekilde gerçekleştirebilmesi, endüstriyel uygulamalarda kullanımını cazip hale getirir.

Kobalt oktoatın kullanım oranları, çözeltinin kobalt metal içeriğine, reçine formülasyonuna, çevre sıcaklığına ve istenen kürlenme süresine bağlı olarak değişir. Bazı kaynaklarına göre, %6 kobalt içeren bir çözelti için genellikle reçine ağırlığının %0,1 ila %1'i arasında (yani 100 gram reçine için 0,1-1 gram çözelti) kullanılır. Bu, reçineye eklenen kobalt metal miktarının %0,006 ila %0,06'sına (60-600 ppm) karşılık gelir. Örneğin, 100 gram reçineye 1 gram %6'lık çözelti eklendiğinde, 0,06 gram kobalt metal eklenmiş olur. %10 kobalt içeren bir çözelti için ise aynı kobalt metal miktarını sağlamak amacıyla reçine ağırlığının %0,06 ila %0,6'sı (100 gram reçine için 0,06-0,6 gram) kullanılır. Bazı uygulamalarda %0,5 ila %3 oranında kullanım önerse de, bu oranlar genellikle daha düşük konsantrasyonlu çözeltiler için geçerli olabilir veya özel reçine formülasyonlarına işaret edebilir. Kesin oranlar, reçine üreticisinin talimatlarına ve uygulama koşullarına göre belirlenmelidir. Kobalt oktoatın farklı konsantrasyonlardaki kullanım oranları aşağıdaki Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo1. Kobalt oktoatın farklı konsantrasyonlardaki kullanım oranları

Çözelti konsantrasyonu (% kobalt)	Tipik Kullanım Oranı (% Reçine Ağırlığı)	Eklenen Kobalt Metal (% Reçine Ağırlığı)
% 6	%0,1 - %1	%0,006 - %0,06
% 10	%0,06 - %0,6	%0,006 - %0,06
% 12	%0,05 - %0,5	%0,006 - %0,06

Kobalt oktoatın güvenli kullanımı için bazı önemli noktalar dikkate alınmalıdır. Kompozit üreticilerine göre, kobalt oktoat reçineye eklenmeden önce iyice karıştırılmalı ve asla doğrudan peroksit başlatıcılarla temas

ettirilmemelidir, çünkü bu, şiddetli patlayıcı reaksiyonlara yol açabilir. Ayrıca, kobalt oktoat'ın cilt ve göz tahrişine neden olabileceği, toksik olduğu ve yanıcı özelliklere sahip olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, üretim ortamında yeterli havalandırma sağlanmalı ve uygun kişisel koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır. Kobalt oktoatın yüksek kaliteli, beyaz veya açık renkli reçinelerde kullanıldığında parlaklık sağladığını ve donma eğilimini azalttığını belirtir, bu da estetik açıdan önemli uygulamalarda tercih edilmesini sağlar.

Mika Katkı

Mika, katmanlı bir yapıya sahip bir mineraldir ve ince, esnek levhalara ayrılabilir. Araştırmalar, mikanın elektriksel yalıtım, termal direnç ve mekanik dayanıklılık gibi özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bu özellikleri ile mika, boya, plastik, kauçuk ve inşaat gibi çeşitli endüstrilerde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Mika Yapısı

Mika, fillosilikat grubu minerallerine aittir ve katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu yapı, mikanın ince, şeffaf ve esnek levhalara ayrılabilmesini sağlar. En yaygın türleri muskovit ve flogopittir, muskovit daha yaygın olarak bulunur. Mika, düşük özgül ağırlığa (yaklaşık 2.8-3.0 g/cm³) sahiptir ve su, asit, baz gibi maddelere karşı dirençlidir.

Mika, katkı malzemesi olarak birçok avantaja sahiptir:

- **Elektriksel Özellikler:** Mükemmel dielektrik dayanımı sayesinde elektrik yalıtkanı olarak kullanılır.
- **Termal Özellikler:** Yüksek sıcaklıklara (500-600°C) dayanıklıdır ve yanmaz.
- **Mekanik Özellikler:** Mekanik dayanıklılığı artırır, kırılmayı önler ve sertliği iyileştirir.

Yukarıda belirtilen özelliklerinden dolayı mika, elektriksel yalıtım gerektiren elektronik cihazlarda, boyalarda dayanıklılık artırmak için, plastikte termal özellikler iyileştirmek için ve inşaatta yangına dayanıklılık sağlamak için kullanılır. Araştırmalar, mika eklenmesinin doymamış polyester kompozitin elektriksel yalıtım özelliklerini artırabileceğini göstermektedir. Mika oranı arttıkça, malzemenin ark direnci, yüzey direnci ve hacim direnci gibi özellikler genellikle iyileşir, ancak kesin etkiler kompozisyon ve koşullara bağlıdır.

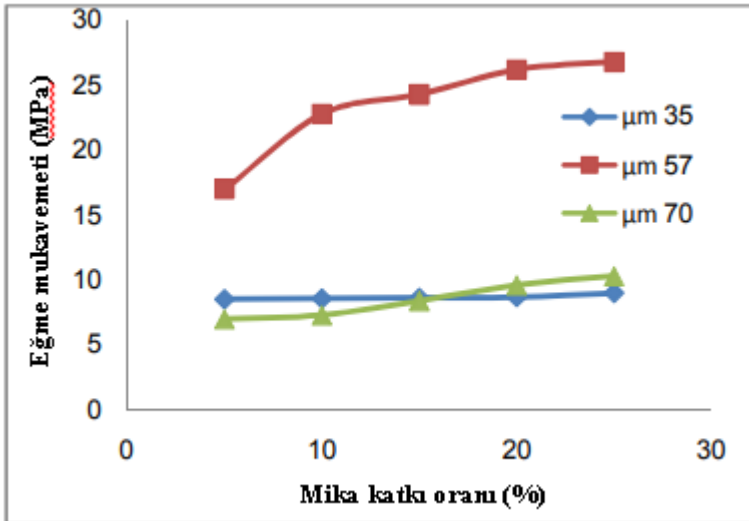
Literatürde mika katkılı polimerler kompozitler konusunda çok sayıda yayına rastlanmasına rağmen bunlardan bazıları (Liu, 2011; Raj, 19990; Xiang, 2010; Zhou vd., 2006; Baral ve Nando, 1999; _Deshmukh ve

Rao, 2012; Bataile vd., 1984; Raj vd., 1990; Tomar ve Maiti, (2010); Maldas ve Kokta, 1993; Zhao vd., 2001; Xia vd., 2016; Osman vd., 2001; Busigin vd., 1983.) verilmiştir. Ancak polyester kompozitler konusunda oldukça az yayın (Şen ve Nugay, 2001; Das Roy ve Phani, 1987; Nasrat ve ark., 2016) bulunmaktadır.

Mika'nın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Mika, fiziksel olarak şeffaf, elastik ve esnektir. Düşük özgül ağırlığı ($2.8-3.0 \text{ g/cm}^3$) ve yapraksı yapısı, onu homojen dağılım sağlayan bir dolgu maddesi haline getirir. Mekanik olarak, yüksek çekme ve bükme mukavemeti sunar. Mikro ölçekte kırılmayı ve bozunmayı önler, ürünlerin sertleşmesine ve kuvvetlenmesine yardımcı olur. Bu özellikler, mikanın plastikler, kauçuklar ve kompozit malzemelerde mekanik dayanıklılığı artırmak için kullanılmasını sağlar.

Literatürde yapılan bir çalışmada [Nasif, 2012] mika katkı oranının artışına bağlı olarak mika katkılı kompozitlerin eğme mukavemetlerinin değişimi verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, mika katkı oranındaki artışla birlikte eğme dayanımı artmıştır. Şekilde görüldüğü gibi düşük ($35 \mu\text{m}$) ve yüksek ($70 \mu\text{m}$) partikül boyutlu mika katkılı kompozitlerin eğme dayanımları hafif artarken orta partikül boyutlu ($57 \mu\text{m}$) mika katkılı kompozitlerin eğme dayanımları çok daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 1. Mika (farklı partikül boyutlu) katkı oranına bağlı olarak polyester kompozitlerin dielektrik dayanımının değişimi [Nasif, 2012]

Literatürde yapılan bir çalışmada (Borazan ve Gökdaı, 2017) termoplastik polyesterin (PET) bünyesine belirli oranda mika ilave edip mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada %6, %19 ve

%12 oranında mika ilavesi ile kompozitlerin eğilme mukavemetleri sırasıyla 63.1, 68.6 ve 73.5 MPa olarak arttığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde eğmedeki elastiklik modülünün de yaklaşık 4244 MPa'dan 4833 MPa değerine arttığı tespit edilmiştir. Literatürde yapılan bir çalışmada (Martias, 2014), ağırlıkça %5 ile %15 oranında mika takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinde bir değişim olmadığı gözlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmada (Busigin ve ark., 1983) saf PP ve %40 oranında mika katkılı PP esaslı kompozitin mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada %40 mika katkı oranında çekme mukavemetinin hafif düştüğü, çekmedeki ve eğmedeki elastiklik modüllerinin sırasıyla yaklaşık 4.9 kat ve 3.8 kat arttığı, eğme mukavemetinin de yaklaşık %35 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Elektriksel Özellikler

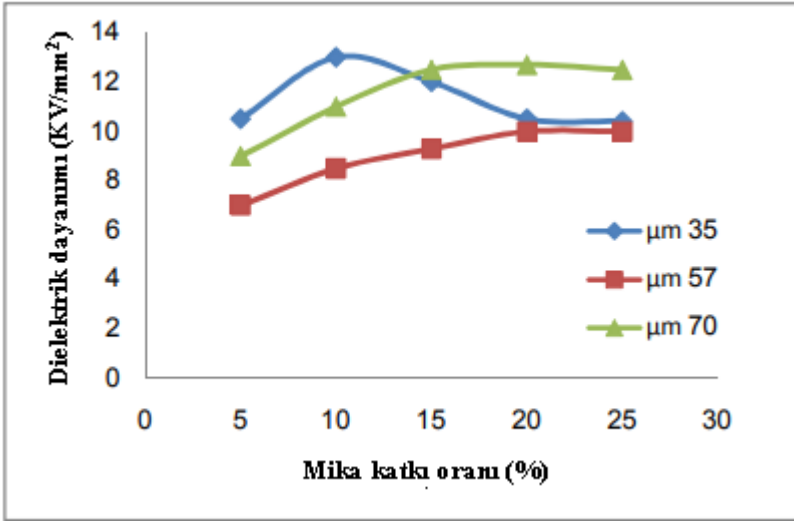
Mika, elektriksel olarak mükemmel dielektrik dayanımı sayesinde elektrik yalıtkanı olarak kullanılır. Bu özellik, mikanın kapasitörler, motor armütleri ve ısıtma elemanları gibi elektronik uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. Mika, doymamış polyester reçinelerine eklendiğinde elektriksel yalıtım özelliklerini iyileştirir. Özellikle, mika katkı oranı %0'dan %30'a çıktıkça, malzemenin ark direnci, yüzey direnci ve hacim direnci artar. Bu, malzemenin elektrik akımına karşı daha dirençli hale geldiğini gösterir. Örneğin, %10 mika ile yüzey direnci $2.1 \times 10^{17} \Omega$ 'dan $7.9 \times 10^{17} \Omega$ 'a çıkar, bu da yalıtım performansında belirgin bir iyileşme olduğunu gösterir. Mika ilavesi, özellikle elektrik endüstrisinde yalıtım malzemesi olarak kullanılan doymamış polyesterin performansını artırabilir. Ancak, kesin oranlar ve etkileri, reçine formülasyonu ve uygulama koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Aşağıdaki Tablo 2, farklı mika oranlarındaki elektriksel özellikleri karşılaştırmaktadır. Veriler, cam lifi takviyeli doymamış polyester kompozitlerinden alınmıştır:

Tablo 2. farklı mika oranlarında kompozitin elektriksel özelliklerinin değişimi

Mika katkı oranı (%)	Ark direnci (sn)	Yüzey Direnci ($\Omega \cdot 10^{17}$)	Hacim Direnci ($\Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{18}$)
0	150	2.1	1.3
10	162	7.9	2.0
20	164	8.7	3.3
30	167	9.9	3.5

Yukardaki tabloda verilen Yayılı Ark Direnci; malzemenin elektrik yayı altında ne kadar süre dayanabileceğini ölçerken daha yüksek değerler, daha iyi elektriksel yalıtım özelliği anlamına gelir. Tabloya göre, kompozit bünyesindeki mika katkı oranı %0'dan %30'a artırıldığında yayılı ark direnci 150 saniyeden 167 saniyeye yükselmiştir, yani bu yükselme mikanın yalıtım

performansını artırdığını göstermektedir. Buna ilaveten Yüzey Direnci ise, malzemenin yüzeyindeki elektrik akımına karşı gösterilen direnci göstermektedir. Daha yüksek yüzey direnç değerleri, yüzey yalıtımının daha iyi olduğunu ifade eder. Mika katkı oranı arttıkça kompozitin yüzey direnci $2.1 \times 10^{17} \Omega$ 'dan $9.9 \times 10^{17} \Omega$ 'a çıkmıştır, bu da mika katkının kompozitin yüzey yalıtımının önemli derecede iyileştiğini gösterir. Hacim Direnci ise malzemenin hacmindeki elektrik akımına karşı gösterilen direnci ölçer. Yüksek değerler, malzemenin hacimsel yalıtım yeteneğinin güçlü olduğunu gösterir. Mika oranı arttıkça hacim direnci $1.3 \times 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ 'den $3.5 \times 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ 'e yükselmiştir, bu da kompozitin hacimsel yalıtımının iyileştiğini gösterir.



Şekil 2. Mika (farklı partikül boyutlu) katkı oranına bağlı olarak polyester kompozitlerin dielektrik dayanımının değişimi [Nasif, 2012].

Literatürde yapılan bir çalışmada (Nasif, 2012) mika katkı oranının artışına bağlı olarak mika katkılı kompozitlerin dielektrik mukavemetlerinin değişimi verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi, mika katkı oranındaki artışla birlikte dielektrik dayanım artmış ve maksimum seviyeye ulaşmıştır. Daha yüksek mika katkı oranlarında ise dielektrik dayanım değerleri sabit kalmıştır. Öte yandan, daha küçük mika partikül boyutlarında düzgün bir dağılım sağlanmış, bu özellikler etkilenmemiştir (Bose, 2004). Ayrıca, hacim oranı %10 olduğunda, en küçük mika partikül boyutuna (35µm) sahip olanın daha yüksek dielektrik dayanım değerine sahip olduğu, diğer partikül boyutlarının (57, 70µm) ise daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebi mika katkı partiküllerinin bir araya gelerek (agregasyon) kusur merkezleri oluşturmalarına bağlanmıştır. Yani bu kusur merkezleri, yerel elektrik alanını bozmakta ve güçlendirmektedir. Böylece dielektrik dayanımı

azalmaktadır. Bu alan bozulması, esas olarak AC koşullarında mika dolgu malzemesi ile polimer matris arasındaki dielektrik sabitlerindeki farktan, DC koşullarında ise iletkenlik farklılıklarından kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır (Akram, 2005).

Termal Özellikler

Mika, termal olarak ısıya karşı stabildir ve sıcaklık değişikliklerine dayanıklıdır. Yanmaz ve erimez özellikte olup, 500-600°C'ye kadar termal stabilitesini korur. Bu, mikayı, fırınlar, ocaklar ve diğer yüksek sıcaklık ortamlarında ideal bir malzeme yapar. Araştırmalar, mikanın doymamış polyester kompozitlerinin termal iletkenliğini artırabileceğini, bu da ısı yalıtım performansını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Mika katkı oranı arttıkça termal iletkenlik genellikle artar, ancak termal kararlılık iyileşebilir. Isı yalıtımı ise, düşük termal iletkenlikle ilişkilendirildiğinden polyester ana matrise mika ilavesi bu özelliği azaltabilir, ancak etkisi uygulamaya bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Mikanın termal iletkenliği (0.25-0.75 W/(m.°K), muskovitin yaklaşık 1.7 W/(m.°K) flogopit doymamış polyester reçinesininkinden (0.19-0.25 W/(m.°K)) daha yüksek olan bir dolgu maddesidir. Bu nedenle, mika eklenmesi kompozitlerin termal iletkenliğini artırır, ki bu da ısı yalıtımını zorlaştırır. Örneğin, mika içeren kompozitlerde termal iletkenlik %50 mika katkısı ile 0.42 W/(m.°K)'ye, %80 mika katkısı ile %70 artışla 0.51 W/(m.°K)'ye ulaşabilir. Mika oranının ve dağılımının optimize edilmesi, uygulamaya bağlı olarak termal yalıtım performansını dengelemek için kritik öneme sahiptir. Düşük oranlar (%5-10) termal iletkenlikte minimal artışa neden olabilir, ancak yüksek oranlar (%30 ve üzeri) daha belirgin bir etkiye yol açabilir. Doymamış polyester reçineleri, özellikle otomotiv, inşaat ve elektrik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan termoset polimer çeşitlerinden birisidir. Bu reçinelerin termal yalıtım özelliklerini iyileştirmek için çeşitli dolgu maddeleri ve takviyeler eklenir. Mika, yüksek termal kararlılık ve elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle doymamış polyester kompozitlerinde sıkça tercih edilen bir dolgu maddesidir. Bu bölümde, mikanın ve katkı oranının doymamış polyester kompozitlerinin ısı yalıtım özelliklerine etkileri detaylı bir şekilde incelenmekte ve bu etkiler tartışılmaktadır.

Termal İletkenlik ve Isı Yalıtım Performansı

Isı yalıtımı, genellikle düşük termal iletkenlik ile ilişkilendirilir, çünkü bu özellik ısı transferini azaltır. Mika, kendi başına düşük termal iletkenliğe sahip bir malzemedir, ancak doymamış polyester reçinesinin termal iletkenliği (0.19-0.25 W/(m.°K)) mika katkısınınkinden (0.25-0.75 W/(m.°K)) daha düşüktür. Bu, mika eklenmesinin kompozitin termal iletkenliğini hafifçe artırabileceğini gösterir. Kompozit malzemelerde, dolgu

maddesinin termal iletkenliği matrisinkinden yüksekse, genel termal iletkenlik genellikle artar.

Mikanın katmanlı yapısı, ısı transferini azaltmada potansiyel bir avantaj sağlayabilir. Eğer mika levhaları ısı akışına dik olarak yneltilirse, termal iletkenlik azalabilir, çünkü bu durum ısı transferi için dolambaçlı yollar oluşturur. Ancak, standart polyester kompozitlerde mika genellikle rastgele dağılır, bu da bu avantajın belirgin olmasını engeller. Bu nedenle, mikanın termal yalıtım üzerindeki etkisi, dağılımına ve yönelimine bağlı olarak değişebilir.

Mika oranı, termal iletkenlik üzerindeki etkiyi belirler. Düşük oranlar (%5-10) termal iletkenlikte minimal bir artışa neden olabilir, bu da ısı yalıtım özelliklerini büyük ölçüde korur. Ancak, yüksek oranlar (%30 ve üzeri) termal iletkenlikte daha belirgin bir artışa yol açabilir, bu da ısı yalıtım performansını olumsuz etkileyebilir. Örneğin, yukarıdaki çalışmada %50 mika ile 0.42 W/(m.°K) termal iletkenlik, standart mika bandına (0.20 W/(m.°K)) göre önemli bir artış gösterir. Bu, özellikle düşük termal iletkenlik gerektiren uygulamalarda dikkatli bir denge kurulmasını gerektirir.

Genel olarak, mika eklenmesi polyester kompozitlerin termal kararlılığını artırarak yüksek sıcaklıklara dayanıklılık sağlar, ancak termal iletkenliği hafifçe artırarak ısı yalıtım performansını etkileyebilir. Bu etki, mika oranına, dağılımına ve uygulamanın gereksinimlerine bağlıdır. Örneğin, yüksek termal kararlılık gerektiren uygulamalarda (rneğin, fırınlar veya yüksek sıcaklık motorları), mikanın faydaları ön planda olabilir, ancak düşük termal iletkenlik gerektiren ısı yalıtım uygulamalarında dikkatli bir denge kurulmalıdır. Kesin sonuçlar için, spesifik reçine formülasyonu ve test koşulları dikkate alınarak deneysel çalışmalar yapılması önerilir.

Kimyasal zellikler ve Diğer Avantajlar

Mika, kimyasal olarak ışığa, elektriğe, suya, yağa, çözücülere, asitlere (hidroflorik ve konsantre sülfürik asit hariç) ve alkalilere karşı dirençlidir. Bu kararlılık, onu korozyonlu ortamlarda kullanılabilir hale getirir. Ayrıca, boyalarda çökelme yapmaz, homojen dağılım sağlar ve yapıştırmacılar ile boyalarla kolayca karışır. Neme karşı dirençli olup, dekoratif özellikleri geliştirir ve güneş, nem, ısı ve atmosferik gazların zararlı etkilerini azaltır.

Mika retim Yöntemleri

Mika, farklı işleme yöntemleriyle çeşitli formlarda üretilir:

- **Kuru ğtme:** Yüksek hızlı ekili değirmenler kullanılarak 16–100 mesh boyutlara indirgenir. Parlaklığı düşüktür ve sıvılarla karışımı zordur, çok ince taneli için uygun değildir.

- **Yaş Öğütme:** Kırıcılar veya çubuk değirmenleri kullanılarak 100, 200, 325 mesh boyutlara ulaşılır. Parlaklığı korur ve daha geniş endüstriyel kullanım alanına sahiptir, ancak daha yavaş ve maliyetlidir.

- **Mikronize:** Çok ince taneli mika üretimi için kullanılır, detaylar sınırlıdır.

Tipik Kullanım Alanları ve Endüstriyel Uygulamalar

Mika, bu özellikleri sayesinde çeşitli endüstrilerde katkı malzemesi olarak kullanılır:

- **Elektrik ve Elektronik sektörü:** Yalıtkan olarak kullanılır (örneğin; kapasitörler, motor armütürleri, ısıtma elemanları).

- **Boya Sanayii:** Dolgu maddesi olarak boyaların dayanıklılığını ve hava koşullarına direncini artırır, dekoratif özellikler kazandırır.

- **Plastik ve Kauçuk sektörü:** Termal ve elektriksel özellikleri iyileştirir, mekanik dayanıklılığı artırır.

- **İnşaat sektörü:** Yangına dayanıklı malzemelerde, çimentoda ve çalışıla-bilirliği artırmak için kullanılır.

- **Otomotiv sektörü:** Motorun oluşturduğu seslerini azaltmak ve bileşenlerin dayanıklılığını artırmak için katkı maddesi olarak kullanılır.

- **Diğer Alanlar:** Kağıt, kozmetik, döküm, tekstil, gübre sanayi, kaynak elektrodu imalatı, inci parlatma, yangın söndürme malzemesi ve akustik ürünlerde yapıştırıcı olarak kullanılır.

Mika, katmanlı yapısı, elektriksel yalıtım özellikleri, termal direnci ve mekanik takviye yetenekleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde önemli bir katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yapısı ve özellikleri, onu özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir. Mika katkılı doymamış polyester kompozit parçalar, endüstride çeşitli alanlarda kullanılan özel malzemelerdir. Bu tür kompozitler, mikanın sağladığı ısıya dayanıklılık, elektriksel yalıtım ve mekanik güç gibi avantajlarla öne çıkar.

Mika Katkılı Doymamış Polyester Kompozit Parçalar

1. Elektriksel İzolasyon Panelleri

Mika ve aramid fiberlerle güçlendirilmiş kompozit paneller genellikle yüksek gerilimli elektrik ekipmanlarında yalıtım malzemesi olarak kullanılırlar. Bu katkılar panele yüksek mekanik dayanım ve nem direnci sağlar.



2. Endüstriyel Borular ve Tanklar

Mika dolgulu doymamış polyester reçinelerden üretilen borular ve tanklar genellikle kimyasal madde taşıma ve depolama sistemlerinde kullanılırlar ve kimyasal direnç ve termal stabilite sağlarlar.

3. Yapısal Kompozit Levhalar

Mika katkılı kompozit levhalar genellikle inşaat sektöründe duvar panelleri, zemin kaplamaları ve CTP borularda kullanılırlar ve yüksek mukavemet, ısı yalıtım ve düşük su emme oranı sağlar.



4. Tipik Kullanım Alanları

Elektrik ve Elektronik: Transformatör yalıtımları, devre kartları

Kimya Endüstrisi: Asit ve bazlara dayanıklı borular, tanklar.

İnşaat: Yangına dayanıklı paneller, zemin kaplamaları.

Otomotiv: Isıya dayanıklı motor parçaları, izolasyon elemanları



SONUÇ

Doymamış polyester polimeri termoset grubunda yer alan ve endüstride en çok kullanılan plastik malzemelerden birisidir. Doymamış polyester reçineler, yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç gibi avantajları

sayesinde birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak, ortam şartlarına bağlı olarak nem alma oranı reçinenin yapısına, ortam sıcaklığına ve bağlı neme göre değişiklik gösterebilir. Ancak nem alma, özellikle açık ortamlarda zamanla mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olabilir. Bu reçinelerde kürleşme işlemi genellikle metil etil keton peroksit (MEKP) gibi katalizörlerle gerçekleştirilir; MEKP' nin oranı, genellikle %1–2 arasında olup, kürleşme hızını ve nihai ürünün özelliklerini doğrudan etkilerken, farklı MEKP türleri reaksiyon süresi ve son ürün mukavemeti açısından çeşitlilik gösterebilir. Üretim yöntemleri arasında el yatırması, püskürtme, vakum infüzyonu ve RTM (Reçine Transfer Kalıplama) gibi teknikler yer almakta olup, her bir yöntem nihai ürünün yüzey kalitesi, lif yönlenmesi ve mukavemeti üzerinde belirleyici olmaktadır. Reçine sistemine cam elyaf, karbon elyaf gibi takviye edici malzemelerle birlikte, dolgu malzemeleri, akışkanlık düzenleyiciler ve çeşitli katkıları ilave edilerek mekanik özellikler iyileştirilebilir. UV stabilizatörleri, güneş ışığından kaynaklanan foto-oksidatif bozunmayı engelleyerek malzemenin ömrünü uzatırken; yanmayı geciktiriciler, özellikle elektrikli ekipmanlarda yangın riskini azaltmak için reçineye entegre edilir. Ayrıca, antistatik katkıları kullanılarak yüzey direnci düşürülür ve elektrostatik yük birikimi önlenir, bu da ürünün özellikle elektronik ve patlayıcı ortamlarda güvenliğini artırır. Mika katkısı, polimer matrisli kompozitlerde hem elektriksel hem mekanik hem de fiziksel özelliklerin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır; elektriksel açıdan bakıldığında, mika yüksek dielektrik dayanımı sayesinde özellikle izolasyon uygulamalarında tercih edilmekte ve katkı oranı arttıkça dielektrik dayanım belirli bir seviyeye kadar artarken, aşırı yüklemelerde parçacıklar arası boşluklardan kaynaklı akım sızıntısı nedeniyle bu etki sınırlanabilmektedir; mekanik özellikler açısından, özellikle eğilme dayanımı mika katkısıyla artış gösterirken, parçacık boyutu ve dağılımı bu artış üzerinde belirleyici rol oynamakta, düzgün dağılmayan iri parçacıklar mukavemeti düşürebilmektedir; fiziksel özelliklerde ise mika katkısı sertlik ve ısıya dayanım gibi özellikleri iyileştirirken, bazı durumlarda darbe dayanımı gibi özelliklerde azalma gözlemlenmektedir.

REFERANSLAR

- Baral D., De P.P., Nando G.B., (1999) Thermal characterization of mica-filled thermoplastic polyurethane composites, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 65 (1), pp.47-51.
- Bataile, P., Boisee, S. and Schreiber, H.P. (1984). Mica as Filler for PVC Compounds: Effect of Particle size and Surface Treatment, *J.Vinyl Additive Technology*, 6(4): 147-151.
- Borazan A.A. and Gokdal D., (2017), Effect of Organic Reinforcement Usage on Mica/Polyester Composite Material, *Cumhuriyet Sci. J.*, Vol.38 (4), pp. 603-610.

Busigin C., Martinez G. M., Woodhams R.T., and Lahtinen R., (1983). Factors Affecting the Mechanical Properties of Mica-Filled Polypropylenes, *Polymer Engineering and Science*, 1983, Vol. 23, No. 14

Das Roy P. K. and Phani K. K., (1987) Elastic Properties of Mica-Filled Polyester Resin Composites, *Transactions of the Indian Ceramic Society*, Vol. 46(2), pp.51-52.

Deshmukh S.P., Rao A.C., and Mahanwar P.A., (2010). Mica-Filled PVC Composites: Effect of Particle Size, Filler Concentration, and Surface Treatment of the Filler, on Mechanical and Electrical Properties of the Composites, *J. of Thermoplastic Composite Materials*, Vol.24 (5), pp. 583–599.

Deshmukh S. P., Rao A. C., (2012). Mica Filled PVC Composites: Performance Enhancement in Dielectric and Mechanical Properties with Treated/Untreated Mica of Different Particle Size and Different Concentration, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol.11 No.2.

Liu Z.Y., Chen S.J., Zhang J. (2011), Preparation and characterization of ethylene-butene copolymer (EBC)/mica composites, *J. Polymer Research*, 18 (6) pp. 2403-2413

Maldas, D. and Kokta, B.V. (1993). Performance of Hybrid Reinforcements in PVC Composites: II. Use of Surface Modified Mica and Different Cellulosic Materials as Reinforcements, *J. Vinyl Additive Technology*, 15(1): 38-44.

Martias C., Joliff Y., Favotto C., (2014). Effects of the addition of glass fibers, mica and vermiculite on the mechanical properties of a gypsum-based composite at room temperature and during a fire test, *Composites: Part B*, 62, pp.37-53.

Nasif R.A. (2012). Study the Effect of Volume Fraction of Mica with Different Particle Size on the Mechanical and Electrical Properties for Unsaturated Polyester Composites. *Eng. & Tech. Journal*, 30: 20.

Nasrat L., Ali A.M., Dardeer, M.M., Tawfig R., (2016). Mica Filler Effect on Electrical Characteristics of Polymer Insulators, *International Journal of Engineering Innovation & Research*, Vol. 5 (2), pp.168-172.

Osman M.A., Atallah A., Muller M., Suter U.W. (2001), Reinforcement of poly(dimethylsiloxane) networks by mica flakes, *Polymer*, 42 (15), pp. 6545-6556.

Raj, R.G., Kokta, B.V. and Daneault, C. (1990). A Comparative Study on the Effect of Aging on Mechanical Properties of LLDPE-Glass Fiber, Mica, and Wood Fiber Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, 40(5-6): 645-655.

Şen S., N. Nugay N., (2001), Tuning of Final Performances of Unsaturated Polyester Composites with Inorganic Microsphere/platelet Hybrid Reinforcers, *European Polymer Journal*, Vol. 37(10), pp. 2047-2053.

Tomar N., Maiti S.N., (2010). Mechanical properties of mica-filled PBT/ABAS composites, *J. Applied Polymer Science*, 117 (2), pp. 672-681.

Xia L., Wu H., Shaoyun, Guo S., Sun X., Liang, W., (2016). Enhanced sound insulation and mechanical properties of LDPE/mica composites through multilayered distribution and orientation of the mica, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 81, pp 225-233.

Xiang Y.F., Hou Z.C., Su R., Wang K., Fu Q., (2010), The effect of shear on mechanical properties and orientation of HDPE/mica composites obtained via dynamic packing injection molding (DPIM), *Polymer Advanced Technology*, 21 (1), pp. 48-54.

Zhao, R., Huan, J., Sun, B. and Dai, G. (2001). Study of the Mechanical Properties of Mica-Filled Polypropylene-Based GMT Composite, *J. Applied Polymer Science*, 82: 2719-2728.

Zhou X.D. , Xiong R.H. , Lin Q.F. (2006), Effect of block copolymer coupling agents on properties of mica reinforced polymeric composites, *J. Materials Science*, 41 (23) pp. 7879-7885.

