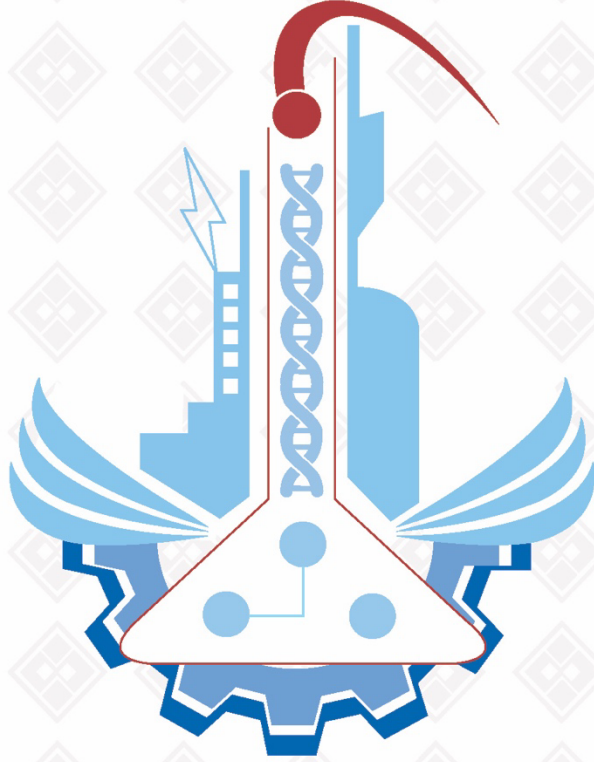


ISSN: 1308-9064

Cilt: 34 / Sayı: 2 / Yıl: 2022

FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ



Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi (FBD)
Cilt:34, Sayı:2, Yıl:2022
ISSN: 1308 - 9064

İletişim

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
23119, ELAZIĞ

Tel: 0 424 212 27 07
Faks: 0 424 236 99 55
e-posta: fenbilim@firat.edu.tr

Bu dergi yılda 2 kez ve hakemli olarak yayımlanır.

Derginin Eski Adı: Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Derginin Eski ISSN Numarası: 1300-2708

<http://dergipark.org.tr/fufbd>

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi (FBD)

Sahibi

Prof. Dr. Fahrettin GÖKTAŞ
Fırat Üniversitesi Rektörü

Genel Yayın Yönetmeni

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Baş Editör

Doç. Dr. Fatih ÖZKAYNAK
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

Editör

Doç. Dr. Emrah YILMAZ
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

DANIŞMA KURULU

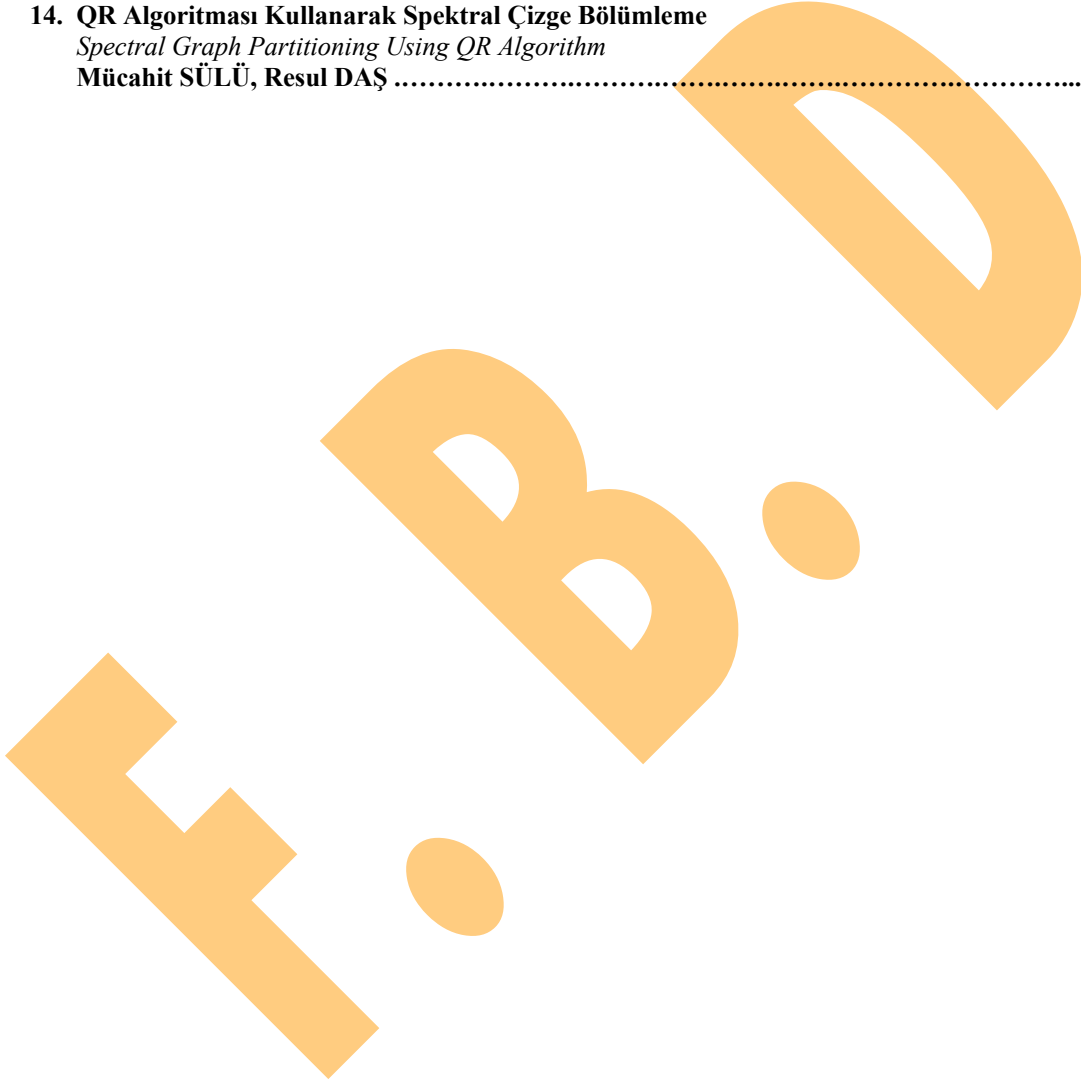
Leyla AÇIK	Gazi Ü., Biyoteknoloji	Turgay SEÇKİN	İnönü Ü., Kimya
Haluk KORALAY	Gazi Ü., Fizik	İbrahim KARATAŞ	Selçuk Ü., Kimya
Mahmut ELP	Kastamonu Ü., Su Ürünleri	Zihni DEMİRBAĞ	K.T.Ü., Biyoloji
Yusuf AYVAZ	S.Demirel Ü., Biyoloji.	Seyfettin ÇAKMAK	S.Demirel Ü., Fizik
Mikail ET	Fırat Ü., Matematik	Orhan ERMAN	Fırat Ü., Biyoloji
Hikmet GEÇKİL	İnönü Ü., Biyoloji	Ömer AKIN	T.O.B.B. Matematik
Kenan GÜLLÜ	Muğla S.K.Ü. Su Ürünleri	Sinan AKPINAR	Fırat Ü., Fizik
Mehmet KAYA	Fırat Ü., Kimya	Ahmet ŞAHİN	Erciyes Ü., Biyoloji
İlhami KIZIROĞLU	Hacettepe Ü., Biyoloji	Kadir DEMİRELLİ	Fırat Ü., Kimya
S.Güneş KÜRKÇÜOĞLU	Osmangazi Ü., Fizik	Kenan GÜLLÜ	Muğla Ü., Su Ürünleri
Dursun ŞEN	Fırat Ü., Su Ürünleri	Vedat ASİL	Fırat Ü., Matematik
Serdar SALMAN	Marmara Ü. Metal. Müh.	Ertan GOKALP	K.T.Ü. Harita. Müh.
İzzet KARA	Pamukkale Ü., Fizik	Ekrem ARTUNÇ	S.Demirel Ü., Fizik

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (FBD)
34-2, 2022

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. **Doğal Peyzajların Turizm Açısından Ekonomiye Katkıları: Bursa Sandağı Kanyonu Tabiat Parkı**
Contributions of Natural Landscape to The Economy in Terms of Tourism: Bursa Sandağı Canyon Nature Park
Nurhan KOÇAN, Ferda Nur BUDAK ÇETİN 59-78
2. **Olay Müdahale Süreçlerinde Linux Sistemlerden Manuel Veri Toplama**
Manual Data Retrieval from Linux Systems in Incident Response Processes
Mustafa Emre DEMİR, Şengül DOĞAN, Türker TUNCER..... 79-88
3. **EDR Ürünleri Kullanılarak Uç Nokta Görünürlüğünün Sağlanması**
Providing Endpoint Visibility Using EDR Products
Kevser Mehveş DAĞCI, Şengül DOĞAN, Türker TUNCER..... 89-94
4. **Spor Biyomekaniğinde Performans Analizi için Hareket Yakalama Teknolojisi Uygulamaları**
Motion Capture Technology Applications for Performance Analysis in Sports Biomechanics
Kübra Elif TOZKOPARAN, Özgür KARADUMAN..... 95-111
5. **Kendinden Helisel Kanatlı Boruların Isı Transfer Performansını Artırmaya Yönelik Yeni Bir Yaklaşım**
A New Approach on Increasing the Heat Transfer Performance Of Self Helical Finned Tubes
Cihan ÖZEL, Cevher Kürşat MACİT, Ali TAŞKIRAN, Meral ÖZEL..... 113-127
6. **Sıradan Karayolu Köprülerinin Geometri ve Malzeme Belirsizliklerini Dikkate Alarak Doğrusal Olmayan Statik Analizi**
Nonlinear Static Analysis of Ordinary Highway Bridges Considering Geometry and Material Uncertainties
Mehmet Fatih YILMAZ 129-137
7. **Kısıtlı Konut Hacimlerinde Tasarım Yaklaşımı**
Design Approach in Limited Housing Spaces
Betül İrem TEMİZ, Şengül YALÇINKAYA..... 139-147
8. **Biyokütle Kaynaklarından Bazı Platform Kimyasallarının Birlikte Üretimi**
Co-production of Some Platform Chemicals from Biomass Sources
Abdulkadir Gül, Muhammet Şaban TANYILDIZI..... 149-160
9. **Yeni CuAlCrMg Yüksek Sıcaklık Şekil Hafızalı Alaşımının(YSSHA) Termal, Yapısal ve Manyetik Karakterizasyonu**
Thermal, Structural and Magnetic Characterization of New CuAlCrMg High Temperature Shape Memory Alloy (HTSMA)
Güneş BAŞBAĞ, Oktay KARADUMAN, İskender ÖZKUL, Mustafa BOYRAZLI, Canan AKSU CANBAY..... 161-170
10. **Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Manyetit Konsantresi Peletleme İşlemlerinde Bağlayıcı Olarak Kullanılması**
Use of Granulated Blast Furnace Slag as Binder in Magnetite Concentrate Pelletizing Processes
Selçuk KARATAŞ, Emrah ÇELİK, Mustafa BOYRAZLI, Canan AKSU CANBAY..... 171-177

11. **Ultrason Tabanlı Meme Kanseri Görüntülerinin Derin Öğrenme Yaklaşımları ile Sınıflandırılması**
Classification of Ultrasound-Based Breast Cancer Images with Deep Learning Approaches
Abidin ÇALIŞKAN, Feyzi Ferat ATEŞ, Mesut TOĞAÇAR 179-187
12. **Meme Kanserinin Tespiti için Yapay Zeka Tabanlı Hibrit Bir Model Önerisi**
An Artificial Intelligence Based Hybrid Model Proposal for the Detection of Breast Cancer
Abidin ÇALIŞKAN, Feyzi Ferat ATEŞ, Mesut TOĞAÇAR 189-199
13. **Moleküler Kenetleme(Docking) Yöntemi ile Bakteriyel Bir Sinyal Kompleksi ve Peonidin Molekülü Etkileşiminin İncelenmesi**
Investigation of the Interaction of a Bacterial Signal Complex and Peonidine Molecule by Molecular Docking Method
Arzu ÖZGEN, Nihan ÜNLÜ 201-206
14. **QR Algoritması Kullanarak Spektral Çizge Bölümleme**
Spectral Graph Partitioning Using QR Algorithm
Mücahit SÜLÜ, Resul DAŞ 207-218



Doğal Peyzajların Turizm Açısından Ekonomiye Katkıları: Bursa Sadağı Kanyonu Tabiat Parkı

Nurhan KOÇAN^{1*}, Ferda Nur BUDAK ÇETİN²

¹ Bartın Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın

² Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın

*¹ nkocan@bartin.edu.tr, ² ferda.nur.budak@gmail.com

(Geliş/Received: 07/03/2022;

Kabul/Accepted: 13/09/2022)

Öz: Dünyada turizm faaliyetleri, sosyal ve ekonomik şartlara bağlı olarak turistlerin istek ve ihtiyaçları doğrultusunda zamanla değişmekte ve çeşitlenmektedir. Önceleri kıyı alanlarında yoğunlaşan turizm faaliyetleri günümüzde dağlar, kırsal alanlar, jeomorfolojik özellikleri bulunan alanlar gibi diğer doğal alanlara dönüş yaşamış ve bu alanlarda alternatif faaliyetler ve faaliyet alanları gelişmeye başlamıştır. Kanyonlar jeomorfolojik yapıdaki görsel güzellikleri ile turistleri çekerken, kanyon çevresi ve kanyon içerisinde yapılan aktivitelerden elde edilen gelirler bölge ve ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır. Turizm açısından kanyonların önemli bir çekim gücüne sahip olması, kanyonların bu bağlamda ekonomik katkı potansiyelinin dünya örnekleriyle vurgulanması ve Bursa Sadağı Kanyonu özelinde turizmin ekonomik katkısının ortaya konulması amacıyla anket yöntemi uygulanmıştır. Bu amaçla çalışmada ziyaretçi ve yerli halkın turizme bakışları anket yöntemiyle araştırılmıştır. Çalışmada yerel halktan 50 kişi ve ziyaretçilerden 100 kişi olmak üzere rastgele seçilen toplam 150 kişiyle yüz yüze görüşülmüştür. Veriler SPSS 21.0 programında değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular değerlendirilerek Bursa Sadağı Kanyonu ve çevresinin turizme ekonomik katkısının artırılmasına yönelik öneriler getirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kanyon turizmi, doğal peyzaj, turizm, Sadağı Kanyonu, Bursa.

Contributions of Natural Landscape to The Economy in Terms of Tourism: Bursa Sadagi Canyon Nature Park

Abstract: All over the world, tourism activities change and diversify over time in line with the demands and needs of tourists, depending on social and economic conditions. Tourism activities, which were concentrated in coastal areas, have now returned to other natural areas such as mountains, rural areas, areas with geomorphological features, and alternative tourism activities and activity areas have started to develop in the areas. While the canyons attract tourists with their visual beauties of geomorphological structure, the income obtained from the activities around the canyon contributes to the economy of region and country. The survey method was applied in order to have an important attraction for the canyons in terms of tourism, to emphasize the economic contribution potential of the canyons in this context with world examples and to reveal the economic contribution of tourism in Bursa Sadagi Canyon Nature Park. In the study, the views of visitors and local people towards tourism were investigated by survey method. In the study, a total of 150 people randomly selected, 50 people from the local people and 100 people from the visitors, were interviewed face to face. The data were evaluated in the SPSS 21.0 program. The data were evaluated in the SPSS 21.0 program. By evaluating the findings, suggestions were made to increase the economic contribution of Bursa Sadagi Canyon and its surroundings to tourism.

Keywords: Canyon tourism, natural landscape, tourism, Sadagi Canyon, Bursa.

1. Giriş

Turizm sektörünün doğayı koruma, mekânsal ve ekonomik gelişime aracılık etmesi gibi faydalarının yanı sıra kıyılarda artan çevre baskısını aza indirmek, turizm faaliyetlerini bütün yılı kapsayacak şekilde uzatmak ve turizmin ekonomik katkısını geniş alanlara yayarak sürdürülebilir bir kalkınma modeli oluşturmak gibi faydaları da bulunmaktadır [1]. Bu kapsamda ortaya çıkan ekoturizm yaklaşımı yerel kültürün bütünlüğüne saygı duyan ve ekosistemin korunmasına yardımcı olan bir seyahat deneyimidir [2]. Doğal peyzajlar kapsamında kanyonlar Dünya'da ve Türkiye'de birçok turiste ev sahipliği yapmaktadır.

Doğal peyzaj, oluşumunda insan etkisinin yer almadığı, tamamen doğanın zaman kavramı temelinde farklı etkenlerle birleşmesi sonucu şekillenen alanlardır. Doğal peyzajı oluşturan unsurlar; biçim, özellik, doku ve renk

* Sorumlu yazar: nkocan@bartin.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-9433-7007, ² 0000-0001-5025-9262

bakımından sürekli bir değişim ve olgunluk halindedir [3]. Arazi, toprak, iklim, su, bitki örtüsü ve hayvan toplulukları, doğal peyzajda ekolojik olarak bir bütünlük oluşturur [4]. İnsan başta olmak üzere, bütün canlıların varlığını korumada, yaşantısını sürdürmede çok önemli rolü olan doğal peyzaj, bir materyal kaynağıdır [5].

Ülkemizde ve Dünya’da doğal alanlar insanların gezip görmek istedikleri alanlardır. Bu alanların gidilip görülmesi, gezilmesi turizmi ve bununla bağlantılı olarak ekonomiyi canlı tutmaktadır. Turistlerin gittikleri bölgedeki tesiste yemek yemesi, bir hediye veya yerel ürün satın alması, ticari işletmelerin kendi aralarında yaptıkları harcamalar ve sektörde istihdam edilen ya da turizmden kazanç sağlayan kişiler tarafından yapılan harcamalar turizm geliri sağlamaktadır. Ülkemizde ve dünyada bu tür alanlarda kafe, restoran, gözlem evi, çeşitli müzeler, yöresel etkinlik alanı, macera alanları, seyir terasları, trekking rotaları, balon turları, paraşüt atlayışı, kamp alanları gibi etkinliklerin yapıldığı bilinmektedir.

Boş zaman kavramının günümüzde yaygınlaşması ve uygulanması, eğlence aktiviteleri olarak yeni yaşam tarzları yaratmıştır. Bu yaşam tarzlarını etkileyen rekreasyon faaliyetleri; aktivite türleri ve aktiviteye dahil olan kişiler açısından sürekli olarak zenginleştirilmektedir [6]. Mclean ve arkadaşları [7] turizm sektörünün karşılayacağı talepler açısından rekreasyonel faaliyetlerin önemli olduğunu vurgulamıştır. Bu faaliyetler doğa ile uyumlu bir şekilde geliştirildiğinde ve çeşitli etkinliklerle organize edildiğinde olumlu sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Turistik faaliyetlerden elde edilen gelirler bölge insanına ekonomik yarar sağlamakta, işsizliği önlemekte ve turizm belli başlı noktalarda değil ülkenin pekçok yerine dağılarak kullanım yoğunluğu ve gelirin eşit dağıtılmasını sağlamaktadır. İbret ve Cansız [8] çalışmalarında doğal peyzajların ekoturizm açısından tanıtımının yapılması ve yatırımlarla desteklenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Belirli bir bölgede yaşayan insanlar geçim kaynaklarını turizm sektöründen sağlamaya yönelirse, yerel ürün ve aktiviteler turistlerin ilgisini çekecek ve bölgede turizm sezonu dört mevsime çıkabilecektir [9; 10].

Kanyon; derin, dar vadiler veya suyun da şekillendirmiş olduğu dik yamaçlı uçurumlar şeklindeki coğrafi oluşumlardır [34]. Goudie [35] kanyonların yüzlerce metre derinlikte olabileceğini, yükselen bir kara kütlesine karşı bir nehrin kesilmesinden, bir kanalın dirençli kaya üzerine bindirilmesinden, bir manzara boyunca sel sularının patlamasından kaynaklanabileceğini ifade etmiştir. Kanyonlar akan sulardan oluşur. Uzun, derin, nispeten dar, dik kenarlı bir vadi sunarlar. Genellikle ana kayayı keserek vadi duvarları boyunca sarp kayalıklar oluştururlar. Dağlık bölgeler için tipiktirler, ancak aynı zamanda yüksek rakımlı platoları keserken de bulunurlar Akarsu erozyonunun ayrışmayı önemli ölçüde geride bıraktığı yerlerde meydana gelirler. Kanyonlardaki akarsular sıklıkla anakaya kanallarından akar [36].

1.1. Dünya’da ve Türkiye’de Bulunan Önemli Kanyonlar

Dünya’da ve Türkiye’de çok sayıda kanyon bulunmaktadır. Son yıllarda bu kanyonların turizm ve rekreasyon açısından önemleri artmıştır. Bu alanlarda kamp, fotoğraf çekme, yürüyüş, doğayı seyretme, rafting, zipline gibi çeşitli aktiviteler yapılabilmektedir. Antilop Kanyonu, Amerika Birleşik Devletleri’nin güneybatısındaki en çok ziyaret edilen ve en çok fotoğrafı çekilen kanyondur (Şekil 1) [11]. Amerika Birleşik Devletleri’ndeki bir başka kanyon Büyük Kanyon’dur. Bu kanyon, dünyanın en ünlü ve ziyaret edilen kanyonlarından biridir (Şekil 2) [8]. Wulingyuan Kanyonu, Çin’in güneydoğusundaki Hunan eyaletinde nadir kaya ormanları ve kaya oluşumlarının yanı sıra el değmemiş doğal güzelliğiyle dikkat çeken bir alandır (Şekil 3) [12]. Büyük Verdon Kanyonu Güney Fransa’da Alpes-de-Haute-Provence Departmanı’nda bulunan bir vadidir. Yaklaşık 21 km uzunluğunda ve 700 metre derinliğindeki vadi Avrupa’nın en büyük kanyonu olarak kabul edilmektedir (Şekil 4) [13]. Bu kanyonların ve benzerlerinin tüm yıl ziyaretçileri bulunmaktadır. Bu alanlar turistleri çeken alanlar olarak buldukları bölgeye ve ülkelerine ekonomik kazanç sağlamaktadır.



Şekil 1. Antilop Kanyonu, ABD[11]



Şekil 2. Büyük Kanyon'dan farklı bir görünüm [14].



Şekil 3. Wulingyuan Kanyonu cam köprü [15].



Şekil 4. Büyük Verdon Kanyonundan görünüm [16].

Tablo 1. Dünya'daki bazı önemli kanyonlar ve kanyonlarda yapılabilen etkinlikler.

	Özellikler	Yapılan Etkinlikler
Antilop Kanyonu	Erozyon sonrası oluşmuştur.	Fotoğraf çekimi, yürüyüş
Büyük Kanyon	Kolorado Irmağı'nın milyonlarca yıl aşındırması sonucu oluşmuştur.	Kanyonung, trekking, rafting manzara seyretme, fotoğraf çekimi
Wulingyuan Kanyonu	3000i aşan kum taşlarından oluşuyor.	Gözlem, trekking, fotoğraf çekimi
Verdon Vadisi	Verdon Nehri'nin aşındırması ile oluşur.	Kaya tırmanışı, doğa yürüyüşü, kano

Tablo 1'de örnek olarak verilen kanyonlarda; giriş ücreti, gözlem araçlarını kullanma, çeşitli rekreasyon aktivitelerini deneyimleme ve kiralama ücretleri alınarak ekonomik bir gelir elde edilmektedir. Valla kanyonu, Kastamonu ili Pınarbaşı ilçesi Küre Dağları Millî Parkı içinde yer alır. Kanyon 800 m derinliği ile dünyanın en derin 2. kanyonudur (Şekil 5) [17]. Köprülü Kanyon 1973 yılında Milli Park olmuştur ve bu alan 36.614 ha

büyüklüğündedir (Şekil 6) [18]. Ihlara Vadisi, Aksaray ili, Güzelyurt ilçesinde yer almaktadır. Vadi, dünya çapında, insanların içinde yaşadığı en büyük kanyon özelliğini taşımaktadır (Şekil 7) [19]. Uşak Ulubey Kanyonu granit ve kum taşı gibi sert kayalıklar içeren zeminin, hava akımı ve erozyon etkisiyle aşınması sonucunda oluşmuştur [24]. Ulubey Kanyonu, 75 km uzunluğuyla dünyanın ikinci büyük kanyonu olup, ABD Arizona'daki Büyük Kanyon'dan sonra gelmektedir (Şekil 8) [25]. Karabük-Yenice yolu üzerinde bulunan Şeker Kanyonu doğa sporları açısından elverişlidir. Kanyon 100 m yükseklikten başlayarak 250 m yüksekliğe kadar ulaşmaktadır (Şekil 9) [26]. Göksu Kanyonu Orta Toros Dağları'ndan doğan Göksu Nehri etkisinde oluşmuştur. Bu nehir 260 km uzunluğa sahiptir. Kanyon rafting ve kano severlerin uğrak noktasıdır (Şekil 10) [27].



Şekil 5. Valla Kanyonu, Kastamonu şelale [20].



Şekil 6. Köprülü Kanyon, Antalya köprü görünüşü [21].



Şekil 7. Ihlara Vadisi, Aksaray [19].



Şekil 8. Ulubey Kanyonu, Uşak.



Şekil 9. Şeker Kanyonu Karabük [22].



Şekil 10. Göksu Kanyonu Mersin [23].

Tablo 2. Türkiye’deki önemli kanyonlar ve kanyonlarda yapılabilen etkinlikler.

	Özellikler	Yapılan Etkinlikler
Valla Kanyonu	Küre dağlarını oluşturan kireçtaşı katmanlarını akarsuların aşındırması sonucu oluşmuştur.	Doğa yürüyüşü, Kanyoning, Rafting, Fotoğraf çekimi, Manzara seyretme, Yaban hayatı izleme
Köprülü Kanyon	Akarsuyun aşındırması sonucu oluşmuştur.	Rafting, Trekking, Fotoğraf çekimi
Ihlara Vadisi	Melendiz Çayı’nın binlerce yıllık aşındırması sonucunda oluşmuştur.	Kültürel gezi, Doğa yürüyüşü, Fotoğraf çekimi
Ulubey Kanyonu	Hava akımı ve erozyon etkisiyle aşınma sonucunda oluşmuştur.	Manzara seyretme, Fotoğraf çekimi, Kayalara tırmanış
Şeker Kanyonu	Akarsuların aşındırması sonucu oluşmuştur.	Kanyoning, Doğa yürüyüşü, Bisiklet turu, Çadırli kamp, Rafting, Kaya tırmanışı, Dağcılık, Fotoğraf çekimi
Göksu Kanyonu	Göksu nehrinin taşıdığı sedimentler sonucunda oluşmuştur.	Rafting, Kano, Fotoğraf çekimi

2. Materyal-Yöntem

2.1. Materyal

Sadağı Kanyonu Bursa’nın 55 km güneybatısında Orhaneli ilçesinin Sadağı köyünde bulunmaktadır. Kanyon 12 km uzunluğundadır ve 4.360 dekarlık bir alanı kaplamaktadır. Sadağı Kanyonu İznik Sansarak Kanyonundan sonra Bursa’nın ikinci büyük kanyonudur.

Marmara bölgesinde bulunan Bursa ili, kuzeyde Yalova ve Marmara Denizi, kuzeydoğuda Kocaeli ve Sakarya, doğuda Bilecik, güneyde Kütahya ve batıda Balıkesir illeri ile komşu konumdadır. Sadağı Kanyonu Bursa ili Orhaneli ilçesine bağlıdır. İlçenin 6 km batısında bulunan Sadağ köyü ve 9 km güneydoğusunda bulunan Ağaışhisar köyü termal sıcak sulara en yakın yerleşim yerleridir (Şekil 11) [29].

yapmayan kesim ise sebze üretmektedir. Bölge toprağının demir içeriği yüksektir bu nedenle demiri seven bitkiler için elverişlidir. Tarıma ek olarak büyük ve küçükbaş hayvancılık ilçenin gelir kaynakları arasında yer alır [29].

2.2. Yöntem

Çalışmada anket formu oluşturulmuş bu anket formalarını uygulamak için alan ziyaret edilip yerinde gözlem yapılmıştır. Anket soruları benzer çalışmalarda sorulan sorular ile çalışmanın amacına göre ulaşılmak istenen bilgilere yönelik olarak hazırlanmıştır. Alanda yüzyüze ve rastgele seçim yöntemiyle, yerel halk ve ziyaretçilere bu anket uygulanmış ve alana ait bilgiler toplanmıştır. Anket yerel halk ve ziyaretçiler olmak üzere toplam 150 kişi ile yapılmıştır. Yerel halka yapılan ankette 19 soru ve ziyaretçilere yapılan ankette 18 soru bulunmaktadır. Anket Sadağ Köyü sakinlerine uygulanmıştır. Hem yerel halkın hem de ziyaretçilerin görüşlerini ayrı ayrı belirlemek amacıyla iki gruba anket soruları yöneltilmiştir. Sorularla Sadağ Kanyonu'nun turizm potansiyeli, yerel halkın turizme bakış açısı, alanın tanınırlığı, insanların bu alanı neden ziyaret ettikleri ve alandaki turizm faaliyetlerinin ekonomiye katkısının olup olmadığını öğrenmek amaçlanmıştır. Derinöz [37] çalışmasında benzer bir tekniği uygulamıştır. Anketler SPSS 21.0 programında değerlendirilmiştir. Ayrıca Bursa İl Turizm Müdürlüğü, Bursa İl Tarım ve Orman Müdürlüğü kuruluşları ziyaret edilip alanla ilgili bilgi ve kaynak alınmıştır. Anketlerin uygulanması aşamasında örneklem büyüklüğünü belirlerken aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$n \geq \frac{Z^2 \times N \times p \times q}{N \times D^2 + Z^2 \times p \times q}$$

n: Örneklem büyüklüğü.

Z: Güven katsayısını (0,95'lik güven düzeyi için Z=1,96).

N: Ana kütle büyüklüğü (Çalışma alanı nüfusu)

p: İstenen özelliğin ana kütlede bulunma oranı (Ölçülmek istenen örnek büyüklüğünün başlangıçta ana kütlede bulunma oranı bilinmediğinden ve bu konuda ön bir araştırma yapılmadığından p ve q değerleri birbirine eşit (0,5) yani %50 alınarak en yüksek tahmini değere ulaşılmaktadır).

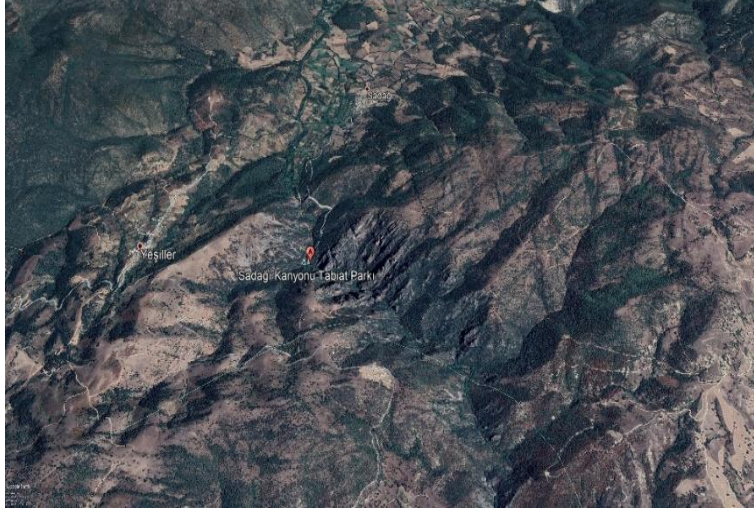
q: Ölçülmek istenen büyüklüğün ana kütlede bulunmama oranı (1-p=0,5).

D: Kabul edilen örnek hatasını göstermektedir (%10) [28].

Formül kullanılarak yerel halk ile yapılacak olan anket sayısı 49, ziyaretçiler ile yapılacak anket sayısı ise 95 olarak hesaplanmıştır. Yerel halk ile 50, ziyaretçiler ile 100 adet anket yapılarak toplam anket sayısı 150'ye tamamlanmıştır.

3. Bulgular

Sadağ Kanyonu sahip olduğu doğal güzellikleri, jeolojik yapısı, su kaynakları ve bitki çeşitliliği açısından yerli ve yabancı turist çekmektedir. Kanyon, Sadağ köyünün büyük bir kısmını kaplamaktadır (Şekil 13). Kanyondaki kayalık duvarlar üzerinde tarihi dönemlerden kalma insan ve hayvan figürleri bulunmaktadır. Bu nedenle alanın tarihi ve kültürel değeri oldukça yüksektir. Kanyon içerisinde bulunan şifalı sular kaplıcaya çevrilerek ziyaretçilere sunulmuştur. Alanda 32 adet 75 m²lik apart dairelerden oluşan bir termal otel bulunmaktadır. Kanyona şifalı sular için gelenler fazladır. Sadağ kanyonunda yürüyüş, kamp, fotoğraf çekme, doğayı seyretme ve mesire alanında etkinlikler yapılmaktadır. Ziyaretçiler kanyona giriş için düşük bir ücret ödemektedir. Kanyonda bulunan kafede yeme-içme olanağı bulunmaktadır (Şekil 14). Gelen ziyaretçiler yerel halkın üretimi olan yöresel lezzetlerin tadına bakıp satın alabilmektedir. Kanyon içinde görevli olanlar ve otel içinde çalışanlar düşünüldüğünde çalışanların büyük kısmını yerel halk oluşturmaktadır. Dolayısıyla kanyon yerel halka istihdam sağlamaktadır. Alan içerisinde kır evi (Şekil 15), seyir terası (Şekil 16), WC, lavabo (Şekil 17) ve çöp toplama alanı (Şekil 18) bulunmaktadır. Kanyon girişinde seyir ve gözlem alanı ziyaretçiler için ilgi çekicidir. Fakat çıkması oldukça zordur ve yapısal olarak ergonomik değildir.



Şekil 13. Sadağı Kanyonu Google Earth Görüntüsü



Şekil 14. Sadağı Kanyonu kafe-restoran



Şekil 15. Özel misafirler için kır evi



Şekil 16. Kanyon seyir alanı



Şekil 17. Kanyon girişinde bulunan WC, lavabo



Şekil 18. Kanyon girişinde bulunan çöp toplama alanı.

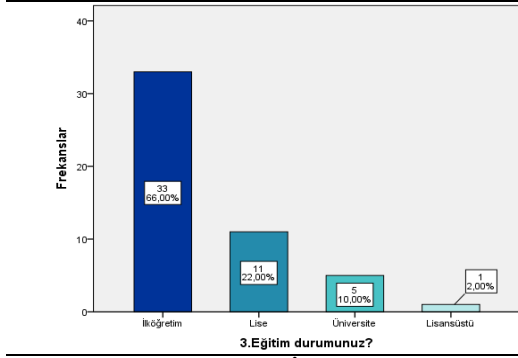
3.3. Anket Bulguları

3.3.1. Yerel Halk Anket Bulguları

Yerel halka 19 soruluk bir anket yapılmıştır. Bu sorulardan 10 tanesi açık uçlu sorudur.

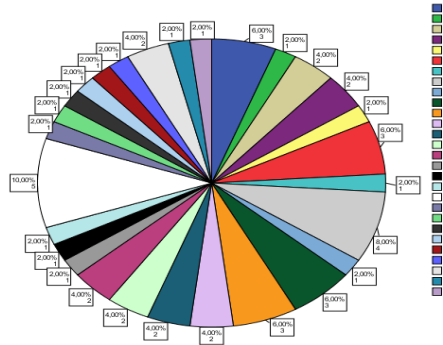
Tablo 3. Yerel halk anket bulguları.

Yerel Halk Yaş Durum Analizi	Yerel Halk Cinsiyet Analizi																														
<p>Alanda yaşayan kişilerin genç veya yaşlı olduğunu ve işgücünü belirlemek amaçlanmıştır. Alanda 36-45 yaş grubu kişilerin çoğunlukta olduğu görülmüştür.</p> <table border="1"><caption>1.Yaş grubunuz?</caption><thead><tr><th>Yaş Grubu</th><th>Frekans</th><th>Oran (%)</th></tr></thead><tbody><tr><td>18-25</td><td>6</td><td>12,00%</td></tr><tr><td>26-35</td><td>4</td><td>8,00%</td></tr><tr><td>36-45</td><td>18</td><td>36,00%</td></tr><tr><td>46-55</td><td>6</td><td>12,00%</td></tr><tr><td>56-65</td><td>11</td><td>22,00%</td></tr><tr><td>66 ve üstü</td><td>5</td><td>10,00%</td></tr></tbody></table>	Yaş Grubu	Frekans	Oran (%)	18-25	6	12,00%	26-35	4	8,00%	36-45	18	36,00%	46-55	6	12,00%	56-65	11	22,00%	66 ve üstü	5	10,00%	<p>Cinsiyet durumuna göre alandaki işgücünü belirlemek amaçlanmıştır. Alanda erkek nüfusunun daha çok olduğu görülmüştür.</p> <table border="1"><caption>2.Cinsiyetiniz?</caption><thead><tr><th>Cinsiyet</th><th>Frekans</th><th>Oran (%)</th></tr></thead><tbody><tr><td>Kadın</td><td>19</td><td>38,00%</td></tr><tr><td>Erkek</td><td>31</td><td>62,00%</td></tr></tbody></table>	Cinsiyet	Frekans	Oran (%)	Kadın	19	38,00%	Erkek	31	62,00%
Yaş Grubu	Frekans	Oran (%)																													
18-25	6	12,00%																													
26-35	4	8,00%																													
36-45	18	36,00%																													
46-55	6	12,00%																													
56-65	11	22,00%																													
66 ve üstü	5	10,00%																													
Cinsiyet	Frekans	Oran (%)																													
Kadın	19	38,00%																													
Erkek	31	62,00%																													
<p>Yerel Halk Eğitim Durumu Analizi Halkın eğitim düzeyi ile turizme yönelik bilgilendirme ve eğitimleri alabilme düzeylerini belirlemek amaçlanmıştır. Halkın çoğunluğunun ilköğretim ve lise eğitim düzeyindedir.</p>	<p>Yerel Halk Doğum Yeri Analizi Köye dışardan göç olup olmadığını tespit etmek amaçlanmıştır. Yerel halkın çoğunluğu o köy ve ilçede doğmuştur ve sonradan köye yerleşim için gelen olmamıştır.</p>																														



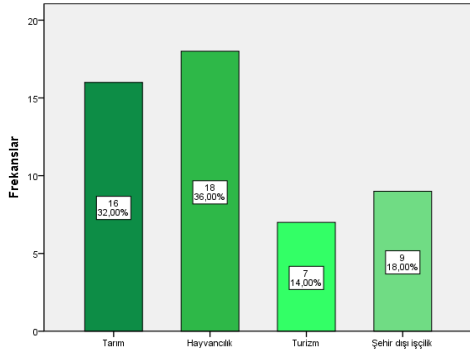
Yerel Halkın Köyde İkamet Ettikleri Süre Analizi

Halkın köyde olan bağlılıklarını tespit etmek amaçlanmıştır. Köyde yaşadıkları süre farklılık göstermekte ve belirgin bir süre dilimi bulunmamaktadır.



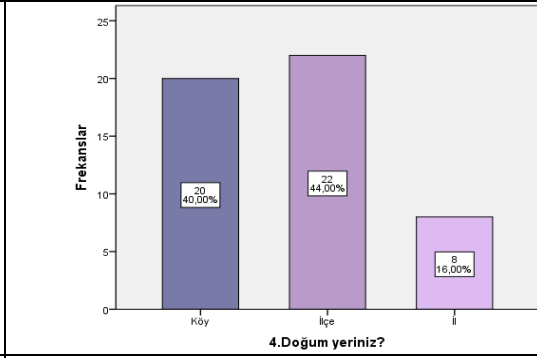
En Çok Gelir Sağlayan Sektörler Analizi

Halkın iş olanaklarını tespit etmek amaçlanmıştır. Yerel halkın en fazla kazanç sağladığı sektörler hayvancılık, tarım, şehir dışı işçilik ve turizm şeklindedir.



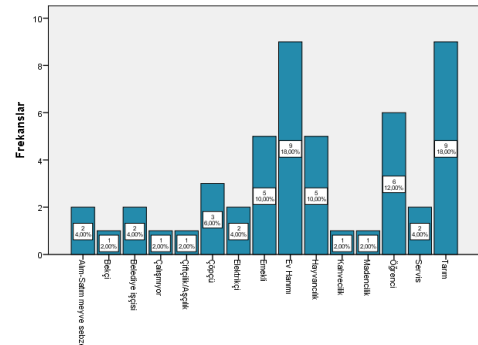
Turizmden Gelir Sağlayanların Hangi İşlerle Uğraştığı Analizi

Turizm amaçlı mevcut ve potansiyel üretimleri tespit etmek amaçlanmıştır. Yerel halk en çok halkın kendi üretimini yaptığı yöresel ürünlerden (ekmek, salça, tarhana, reçel, erişte, meyve ve sebze) ve mevsimlik turizmden gelir elde etmektedir.



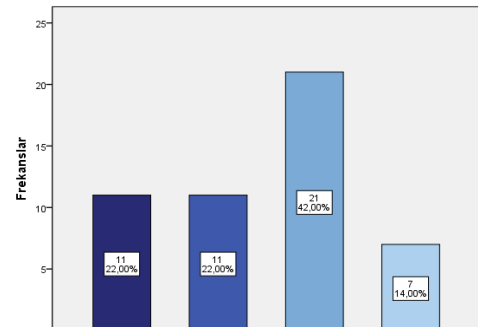
Yerel Halkın Geçim Kaynağı Analizi

Halkın ekonomik getirilerini tespit etmek amaçlanmıştır. Yerli halkın çoğunluğu ev hanımı, tarım ve hayvancılık işi ile uğraşan kişiler, öğrenci ve emeklilerdir.



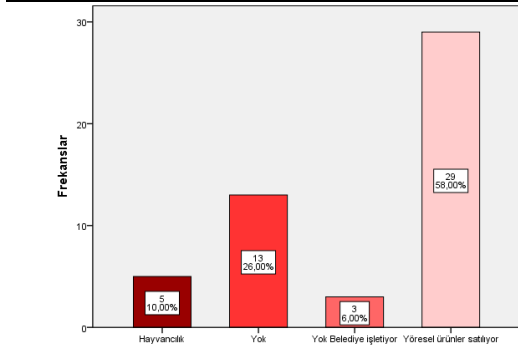
Yerel Halkın Aylık Ortalama Gelir Analizi

Halkın gelir düzeyini tespit etmek amaçlanmıştır. Yerel halkın %42'si 2000-3000 TL, %22'si 1000-2000 TL ve yine %22'si 0-1000 TL, %14'ü 3000 TL den fazla gelire sahiptir. Yerel halkın gelir seviyesi düşüktür.

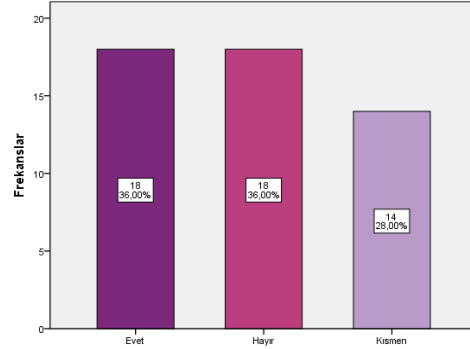


Turistlerin Köyde Katkısının Olup Olmadığının Analizi

Yerel halkın çoğunluğu turistlerin köyde katkısının olduğunu düşünmektedir. Katkısı olduğu yanıtı verenler kendi ürettikleri yöresel ürünlerini pazarlayan ve belediyede çalışan kişilerdir. Bu kişiler kanyona gelen turistlerin kanyonun tanıtımını yaparak başka insanların da alana gelmesini teşvik edeceğini düşünmektedir. Hayır diyenler ise turizmden kazanç

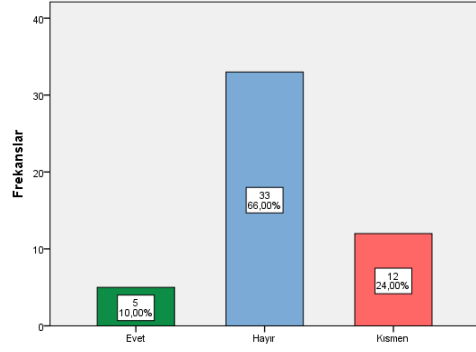


sağlayamayan ve turistlerin çevreyi kirlettiğini düşünen kesimdir. Kısmen cevabı verenler turizmin sezonluk olduğunu düşünen kişilerdir.



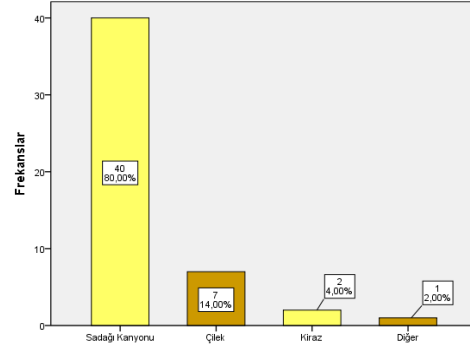
Turizm Etkinliklerinin Köye Olumlu/Olumsuz Etkisinin Varlığı Analizi

Yerel halkın çoğunluğu mevcut turizm etkinliklerinin kanyon ve çevresine olumsuz etkisi olmadığını düşünmektedir.



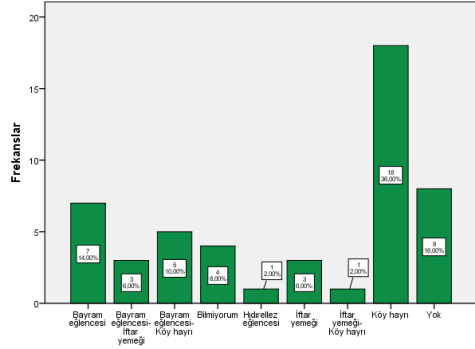
Köye Özgü En Önemli Değerin Ne Olduğu Analizi

Alan için turistik marka olabilecek ürünleri tespit etmek amaçlanmıştır. Yerel halka köylerine özgü en önemli değer olarak Sadağı kanyonu, çilek ve kiraz cevapları vermiştir.



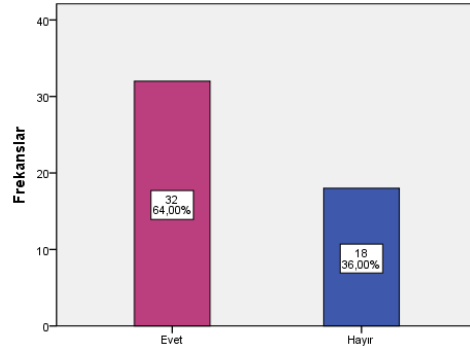
Köydeki Geleneksel Faaliyetler Analizi

Geleneksel faaliyetlerin turistik aktivite olabileceğini belirlemek amaçlanmıştır. Yerel halkın çoğunluğu geleneksel faaliyet olarak “köy hayrı” cevabını vermiştir. Köy hayrı köyde her yıl düzenlenen, bütün köyün ve misafirlerin bir araya toplandıkları, öncesinde dualar okunan ve dua sonrasında yemekler yenilen bir etkinliktir.



Yerel Halkın Sit Kavramını Biliyor Olma Durumu Analizi

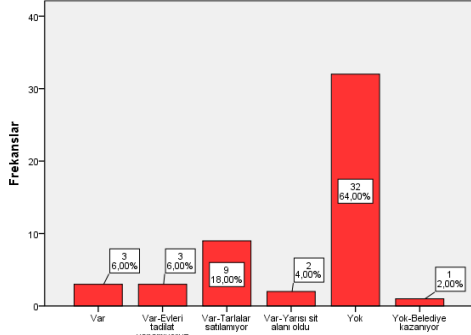
Yerel halkın doğal alan ve kaynaklara bakış açısını ölçmek amaçlanmıştır. Yerel halkın büyük çoğunluğu sit kavramını bilmektedir.



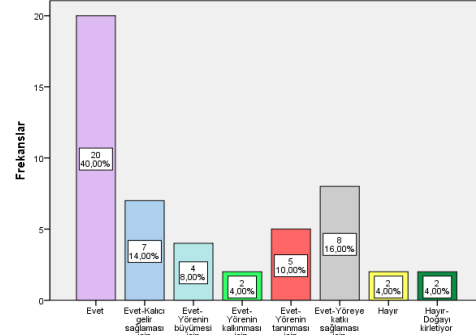
Yerel Halkın Sitden Etkilenme Durumu Analizi

Yerel Halkın Turist Gelmesini İsteme Durumu Analizi

Halkın sit kavramına bakışını tespit etmek amaçlanmıştır. Yerel halkın çoğunluğu sitden etkilenen arazisi olmadığını söylemiştir. Bir kısım ise sit nedeniyle tarlaların satılmadığını beyan etmiştir.

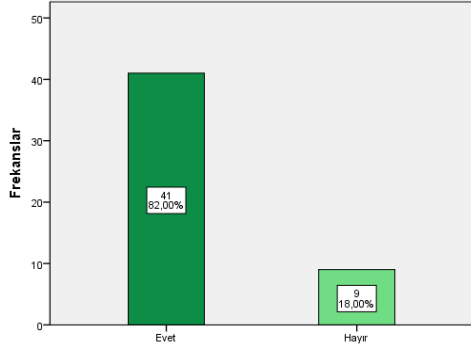


Yerel halkın çoğunluğu köye daha fazla turist gelmesini istemektedir. Halk turizmin yöreye gelir sağlaması ve yörenin kalkınması için evet cevabını vermiştir. % 3.33'lük kısım ise turistlerin doğayı kirlettikleri düşüncesiyle hayır cevabını vermiştir.



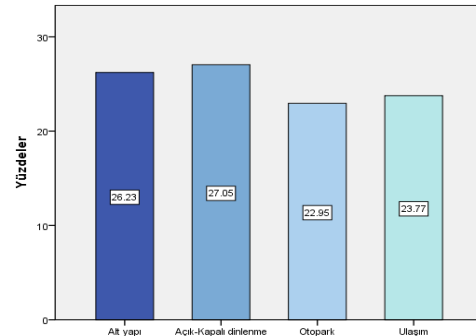
Yerel Halkın Kanyon Restorasyonundan Haberdar Olma Durumu Analizi

Yerel halkın çoğunluğu kanyonun restore edildiğinden haberdardır. Kanyon boyunca ahşap köprüler restore edilmiş, kameriyeler, satış tezgâhları, kafe-restoran yapılmıştır.



Alanın Sorun ve Eksiklikleri Analizi

Yerel halkın çoğunluğu kanyonla ilgili ulaşım, açık-kapalı dinlenme alanı, otopark kafe, WC, güvenlik, tanıtım ve rehber eksikliği ifade etmişlerdir.

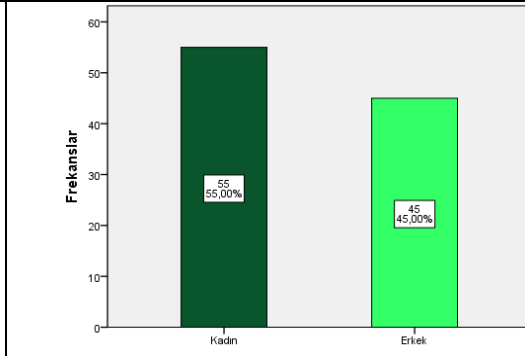
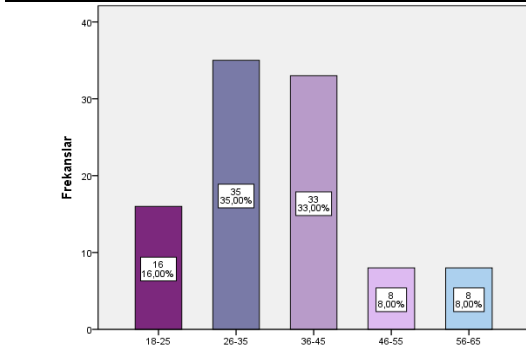


3.3.2. Ziyaretçi Anket Bulguları

Ziyaretçilere toplamda 18 soruluk bir anket yapılmıştır. Bu sorulardan 4 tanesi açık uçlu sorudur.

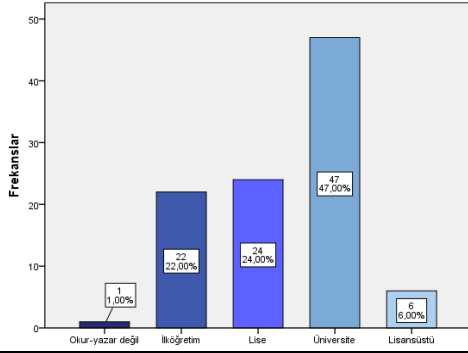
Tablo 4. Ziyaretçi anket bulguları.

Ziyaretçi Yaş Durumu Analizi	Ziyaretçilerin Cinsiyet Analizi
Alana gelen ziyaretçilerin yaş dağılımını belirleyerek öneri aktivite ve alanları belirlemek amaçlanmıştır. Ziyaretçilerin yaş grupları çoğunlukla 26 ile 45 yaş arasındır. %16'sı 18-25 yaş grubu, %8'i 46-55 ve 56-65 yaş gruplarındadır.	Alana gelen ziyaretçilerin cinsiyet dağılımını belirleyerek öneri aktivite ve alanları belirlemek amaçlanmıştır. Ziyaretçilerin %55'i kadın ve %45'i erkektir.



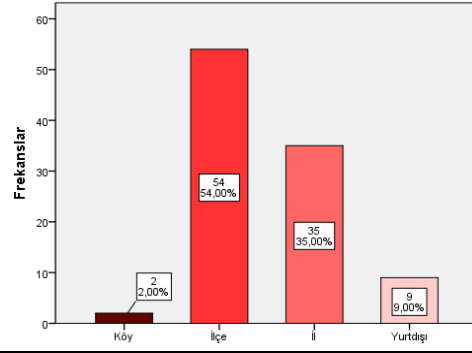
Ziyaretçi Eğitim Durumu Analizi

Ziyaretçilerin çoğunluğu üniversite mezundur. %24'ü lise, %22'si ilköğretim mezundur. Eğitim seviyesi yükseldikçe doğal alanlara olan talep ve bilinç artmaktadır.



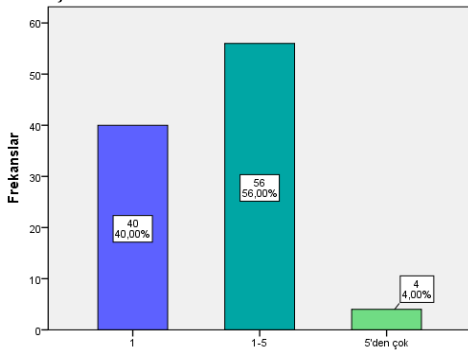
Ziyaretçi Doğum Yeri Analizi

Alana il dışından gelenlerin oranını belirlemek amaçlanmıştır. Ziyaretçilerin çoğunun yurt içi, il ve ilçelerden geldiğini ve % 9 oranında da yurt dışından ziyaretçiler gelmektedir.



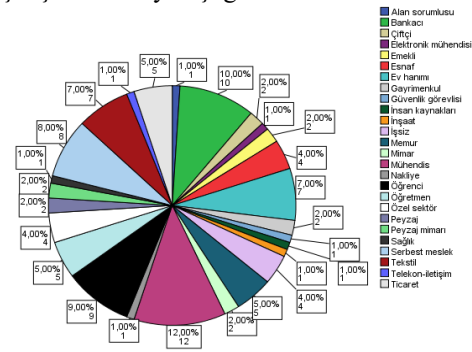
Ziyaretçilerin Alana Kaçınıcı Ziyaretleri Olduğu Analizi

Alana gelen ziyaretçilerin alanı tekrara görme isteğini belirlemek amaçlanmıştır. Ziyaretçilerin alana çoğunlukla 1 den fazla ve 5 den az geldiği anlaşılmaktadır. Fakat alana ilk kez gelenlerin sayısı da oldukça fazladır.



Ziyaretçilerin Geçim Kaynağı Analizi

Ziyaretçilerin geçim kaynakları ve buna bağlı olarak gelir düzeyini tespit etmek amaçlanmıştır. Ziyaretçilerin yaptıkları iş olarak 26 farklı cevap alınmıştır. Kamu çalışanı ve düzenli bir işte çalışanların sayısı çoğunluktadır.

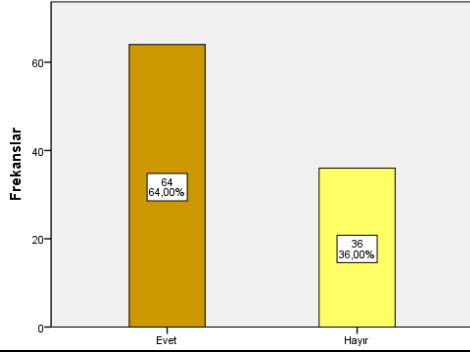


Ziyaretçilerin Geldikleri Yerin Turistik Olma Durumu Analizi

Ziyaretçilerin turizm bilincini tespit etmek amaçlanmıştır. Ziyaretçilerin çoğunun geldikleri yerlerin de turistik yerler olduğu anlaşılmaktadır.

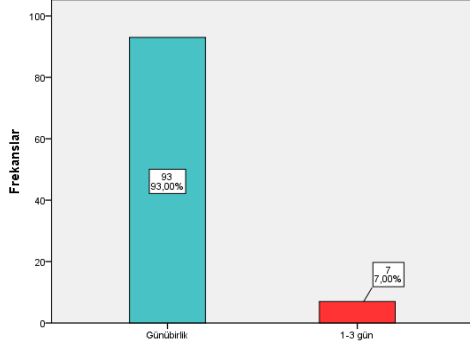
Ziyaretçilerin Aylık Ortalama Gelir Durumu Analizi

Ziyaretçilerin çoğunluğunun 3000 TL den fazla ve 2000-3000 TL arası gelirinin olduğunu söyleyebiliriz. Ziyaretçilerin % 37'lik kısmı gelirinin 0-2000 TL olduğunu söylemiştir. Bu grup üniversiteli öğrenci kesimdir. Ziyaretçilerin gelir düzeyi düşüktür.



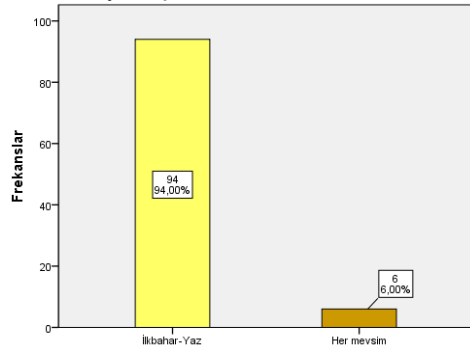
Ziyaretçilerin Alanda Konaklama Durumu Analizi

Ziyaretçilerin alanda konaklama durumlarını tespit etmek amaçlanmıştır. Ziyaretçilerin çoğunluğu alana günübirlik gelmektedir. Alan ve çevresinde konaklama yapılabilecek tesislerin az olmasının bunda payı çoktur.



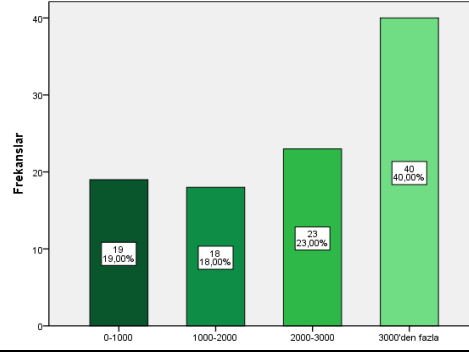
Ziyaretçilerin Alana Hangi Aylarda Geldiği Analizi

Ziyaretçiler alanı çoğunlukla ilkbahar-yaz mevsiminde ziyaret etmektedir. Soğuk hava koşullarında kanyon boyunca yürümek zor olduğundan kış aylarında ziyaret azalmaktadır. Kamp şeklinde konaklamak da kış aylarında zor olmakta ve ziyaretçi azalmaktadır.



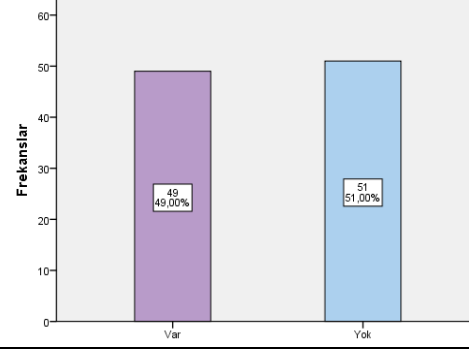
Kanyona Giriş Ücretinin Fiyat Uygunluğu Analizi

Ziyaretçiler kanyon giriş ücretinin (kişi başı 3.5 TL) normal olduğunu ifade etmişlerdir.



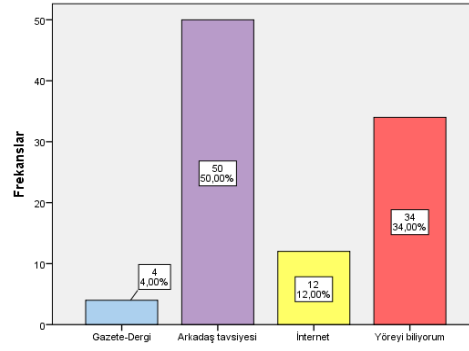
Alandaki Etkinlik ve Mekânların Yeterli Olma Durumu

Ziyaretçilerin %51'i konaklama, dinlenme gibi eylemler için yeterli mekân olmadığını, %49'u yeterli olduğunu ifade etmiştir. Kamp alanlarının yeterli olduğunu düşünenler alanda yapılan çadırli kamp türünü düşünerek yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.



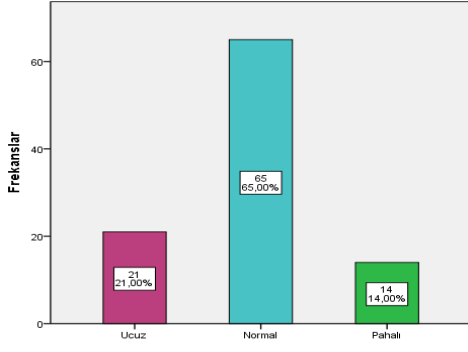
Ziyaretçilerin Kanyondan Ne Şekilde Haberdar Oldukları Analizi

Ziyaretçiler kanyondan çoğunlukla arkadaş tavsiyesi üzerine haberdar olmuşlardır. İnternet ve gazeteden haberdar olanların sayısı azınlıktadır. Kanyonun medyadan reklamı yeterli değildir.

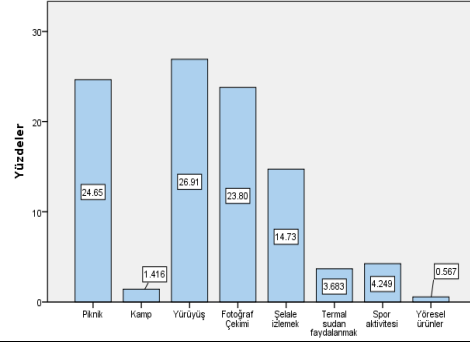


Ziyaretçilerin Kanyon ve Çevresinde Hangi Etkinlikleri Yaptığı Analizi

Ziyaretçiler kanyon ve çevresinde en çok yürüyüş, piknik, şelale izlemek ve fotoğraf çekmek gibi

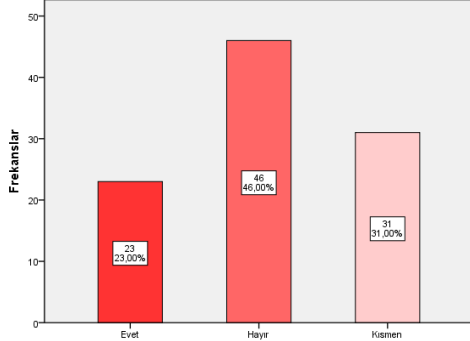


etkinlikleri yapmaktadır. Şelaleyi izleyebilmek için kanyon boyunca yürümek gerekmektedir.



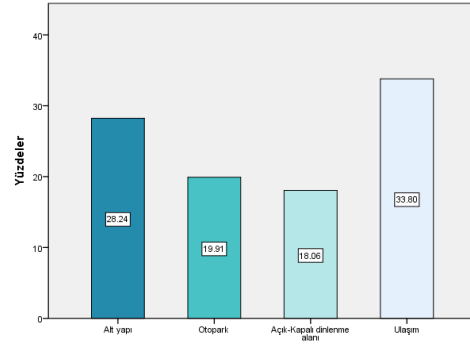
Alandaki Kent Donatılarının Yeterli Olma Durumu Analizi

Ziyaretçiler %46'sı alandaki kent donatılarının yeterli olmadığını söylemiştir. %31'i kısmen yeterli bulmuş, %23'ü ise yeterli cevabını vermiştir.



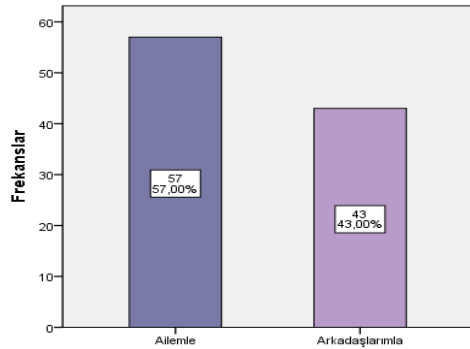
Alandaki Sorun ve Eksikliklerin Analizi

Ziyaretçiler alandaki en büyük sorunun ulaşım ve altyapı, sonrasında ise otopark ve açık-kapalı dinlenme alanı olduğunu ifade etmişlerdir. Alana ulaşım sadece özel araç ile mümkündür ve yollar dardır. Otopark sadece alan girişinde mevcuttur. Açık-kapalı dinlenme alanı olarak piknik alanı ve kafe vardır bu da gelen misafirler için yetersiz seviyededir.



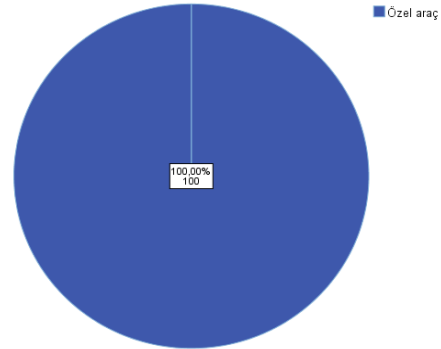
Ziyaretçilerin Alana Kim ile Geldiği Analizi

Alanın hangi gruplara hitap ettiğini tespit etmek amaçlanmıştır. Ziyaretçiler kanyona en çok aile ve arkadaşlarıyla gelmektedir. Ailesiyle gelenler %57 oranında, arkadaşları ile gelenler ise %43 oranındadır.



Ziyaretçilerin Alana Ne Şekilde Ulaşım Sağladığı Analizi

Alana ulaşım tamamen özel araç ile sağlanmaktadır. Başka bir alternatif bulunmamaktadır.



4. Sonuç ve Öneriler

Kanyonlar doğal güzellikleri ile pek çok insanın ilgisini çekmektedir. Bu sayede Dünyada ve Türkiye’de kanyon turizmi oldukça yaygındır. Bu tür doğal peyzajların korunup geliştirilerek turizme katkısı artırılabilir. Çalışma alanı olan Sadağı Kanyonunda yerinde yapılan incelemeler, anket çalışmaları ve toplanan veriler sayesinde alanın eksiklikleri saptanmıştır. Alan benzer kanyonlarla kıyaslanarak, alanda yapılabilecek yeni etkinlik ve düzenlemeler önerilmiştir. Böylece kanyonun tanıtımının ve gelişiminin sağlanması ile kanyon daha çok turist çekebilecek ve yöre halkı için gelir sağlayabilecektir.

4.1. Yerel halk anketi ve sonuçları

Yerel Halk profilini ortaya koyan sorular

- Yerel halk yaş gruplarına bağlı çıkarımlar: Yerel halk orta yaş grubundadır.
- Yerel halk cinsiyet durumuna bağlı çıkarımlar: Alanda erkek nüfusun daha fazladır.
- Yerel halk eğitim durumuna bağlı çıkarımlar: Yerel halkın %66’sı ilköğretim düzeyinde eğitime sahiptir.
- Yerel halk doğum yerine bağlı çıkarımlar: Yerel halkın %16’sı dışarıdan göç etmiştir.
- Yerel halk köyde ikamet etme durumuna bağlı çıkarımlar: Yerel halkın köyde yaşadıkları süre farklılık göstermekte ve belirgin bir süre dilimi bulunmamaktadır. Bu yaş ile de ilgili bir durumdur.
- Yerel halk geçim kaynağına bağlı çıkarımlar: Yerel halkın çoğunluğu ev hanımı, tarım ve hayvancılık işi ile uğraşan kişiler, öğrenci ve emeklilerdir. Tarım ve hayvancılığın yanı sıra turizm faaliyetlerinin ve alt yapının geliştirilmesiyle turizmden daha fazla kazanç sağlanabilecektir.
- Yerel halk gelir kaynağına göre sektörler: Yerel halkın en fazla kazanç sağladığı sektörler tarım, hayvancılık, şehir dışı işçilik ve turizm şeklindedir. Yerli halkta tarım işi ile uğraşan kişilerin sayısı çoğunluktadır. Köydeki boş araziler değerlendirilip daha çok üretim yapılarak geçim kaynağı artırılabilir. Üretilen ürünler gerek kanyon ve çevresinde gerekse köy merkezinde satışa sunulabilir. Kanyona giden yolun köy içinden geçiyor olması üretilen ürünlerin kolaylıkla pazarlanabilmesini sağlayacaktır. Ev hanımları da bu potansiyeli değerlendirip kendi ürettikleri ürünleri rahatlıkla satabilir ve kendi kazançlarını sağlayabilirler.
- Yerel halk aylık ortalama gelir durumuna yönelik çıkarımlar: Yerel halkın gelir düzeyinin düşüktür.
- Yerel halk turizme dayalı gelir durumu: Yerel halk yöresel ürünlerden ve mevsimlik turizmden gelir elde etmektedir. Mevcut durumda turizmden en çok kazanç sağlayanlar yöresel ürün satan insanlardır. Tanıtım ile kanyona daha çok turist gelirse daha çok ürün satılabilir ve böylece halkın pek çoğu turizm gelirinden yararlanabilir. Ayrıca şehir dışı işçilik oranı da azımsanmayacak seviyededir. Halk turizmden daha çok kazanç sağladığı takdirde köyden göç etmeyecek ve kırsal kalkınma da sağlanacaktır.

Kanyonun yerel halk farkındalığına yönelik sorular

- Yerel halkın turizmden katkı durumu farkındalığı: Yerel halkın %10’u evet, %24’ü kısmen katkı sunduğunu ifade etmiştir. Köye konaklama alanları olarak bungalov, butik otel ve pansiyon şeklinde konaklama tesisleri yapılabilir. Bu suretle gelen ziyaretçilerin alanda daha fazla kalarak köy halkına daha fazla ekonomik katkı yapması sağlanabilir.
- Yerel halkın turizmin köye katkı durumunda farkındalığı: Yerel halk turizmin köye katkı sağlayacağını düşünmektedir. Turizmden elde edilecek gelirin artırılması için reklam yoluyla kanyonun tanınırlığının artırılması gerekmektedir.
- Kanyonun yerel halk tarafından farkındalığı: Yerel halkın çoğu kanyonla ilgili durumlardan haberdardır.
- Yerel halkın SİT kavramı farkındalığı: Yerel halkın büyük çoğunluğu sit kavramını bilmektedir.
- Yerel halkın SİT’ ten etkilenme durumu: Yerel halkın sitte olumsuz etkilenme durumu bulunmamaktadır.
- Yerel halkın turist beklentisi: Yerel halkın çoğu turist gelmesini istemektedir. Köyde geleneksel olarak düzenlenen köy hayrı etkinliği vardır. Bu etkinlik zamanlarında köyün ve kanyonun adını duyurabilmek için yapılacak tanıtım videoları ve reklamları ile daha çok turistin köye ve kanyona gelmesini sağlayacaktır.
- Yerel halkın kanyon restorasyonundan haberdar olma durumu: Yerel halk kanyon ile ilgili gelişmelerden haberdardır.
- Yerel halkın sorunları: Yerel halkın çoğunluğu kanyonla ilgili ulaşım, açık-kapalı dinlenme alanı, otopark kafe, WC, güvenlik, tanıtım ve rehber eksikliği ifade etmişlerdir. İlk olarak alt yapı problemlerinin

çözülmesi gerekmektedir. Belediye kanyon ve çevresinde birtakım çevre düzenleme çalışmaları yapmıştır fakat kanyona giden yollar dar ve tehlikelidir. Ayrıca alana ulaşım sadece özel araçlarla sağlanmaktadır. Yaz aylarında binlerce turist geldiği İl Turizm Müdürlüğüne bildirilen ve daha da fazla turist gelmesinin hedeflendiği kanyona tek ulaşımın özel araç olması gelecek turistlerin sayısını olumsuz etkilemektedir. Araçların düzenli park etmemesi ve otoparkların doğal alanlar olmamasından dolayı alanın doğallığına zarar verecektir. Bununla birlikte alanı ziyaret etmek isteyenlerin özel aracı bulunmayabilir. En azından yaz aylarında ve hafta sonlarında kanyona toplu taşıma ile ulaşım sağlanmalıdır. Toplu taşıma ile ulaşım sağlanırsa otopark alanının da yoğunluğu azaltılmış olacaktır.

4.2. Ziyaretçi anketi ve sonuçları

Ziyaretçi profilini ortaya koyan sorular

- Ziyaretçi yaş gruplarına bağlı çıkarımlar: Ziyaretçilerin çoğu genç ve orta yaş grubundadır. Bu kitle hareket kabiliyeti yüksek, günübirlik kullanımı tercih eden, gerektiğinde karavan ve çadırlarda kamp yapmaya uygun bir yaş grubudur. 46-65 yaş arası gruplarını da alana daha fazla getirebilmek ve alanda konaklatmak için alan ve çevresine ulaşımı kolaylaştırıp konaklama yerleri yapmak gerekmektedir. Günübirlik ziyaretler 46-65 yaş grubunu zorlayabilmektedir. Konaklama ve şifalı suların faydalanmak 46-65 yaş grubu için daha cazip gelmektedir. Çünkü bu grup çeşitli ortopedik ve romatizmal rahatsızlıklar yaşayan ve tedavi için alternatif doğal kaynaklara yönelen yaş grubudur. Altyapı, konaklama gibi hizmetlerin iyileştirilmesiyle insanlar alana sadece bir kez değil belki daha çok gelmek isteyecektir.
- Ziyaretçi cinsiyet durumuna bağlı çıkarımlar: Ziyaretçilerin yarısından fazlası kadındır. Bu sebeple el sanatları ve yerel ürünlerin pazarlanması için potansiyel vardır.
- Ziyaretçi eğitim durumuna bağlı çıkarımlar: Ziyaretçilerin çoğunluğu üniversite mezunudur. Bu durum alandaki kanyon turizminin geliştirilmesi ve alana ekonomik katkı sağlaması bakımından avantajdır.
- Ziyaretçi doğum yerine bağlı çıkarımlar: Ziyaretçilerin %44'ü dışarıdan gelmektedir. Bu önemli bir potansiyeldir.
- Ziyaretçi geçim kaynağına bağlı çıkarımlar: Ziyaretçilerin çoğunluğu memur ve düzenli bir işte çalışanlardan oluşmaktadır.
- Ziyaretçinin geldiği yere göre çıkarımlar: Ziyaretçilerin çoğunluğu turistik bir yerden gelmektedir. Bu da turizm bilincinin yüksek olduğunu göstermektedir.
- Ziyaretçi gelir durumuna bağlı çıkarımlar: Ziyaretçilerin çoğu gelir düzeyi orta ve düşük kişilerdir. Fakat bu tür doğal alanların ziyaretleri aşırı maliyetli değildir. Her gelir türüne hitap edebilir. Mevcut durumda giriş ücretleri makul seviyededir. Alana yapılacak iyileştirmeler ve kullanım kararları ile farklı gelir ve yaş grubuna ait ziyaretçilerin de alanı görmesi sağlanabilir. Alanda yapılacak aktivitelerin bu gelir durumu düşünülerek ücretlendirilmesi gerekmektedir.

Ziyaretçilerin Sadağı Kanyonu'na ilişkin sorular

- Etkinliklerin ve mekânların yeterliliğine yönelik çıkarımlar: Ziyaretçiler kanyon ve çevresinde en çok yürüyüş, piknik, şelale izlemek ve fotoğraf çekmek gibi etkinlikleri yapmaktadır. Ziyaretçilerin %51'i konaklama, dinlenme gibi etkinlik türü ve mekânlarının yeterli olmadığını, %49'u yeterli olduğunu ifade etmiştir.
- Ziyaretçi kanyon ziyaret sayısına bağlı çıkarımlar: Ziyaretçilerin alana çoğunlukla 1 den fazla ve 5 den az geldiği anlaşılmaktadır. Bu da ziyaretçilerin alanı tekrar görmeye geldiklerini göstermektedir.
- Ziyaretçi konaklama durumuna göre çıkarımlar: Ziyaretçilerin çoğunluğu alana günübirlik gelmektedir. Alan ve çevresinde konaklama yapılabilecek yerlerin az olmasının bunda payı çoktur.
- Ziyaret zamanı: Ziyaretçiler alanı çoğunlukla ilkbahar-yaz mevsiminde ziyaret etmektedir. Alana ziyaretin kış aylarında da gerçekleşmesi için altyapı düzenlemelerinin yapılması, şifalı suların tanıtımının yapılması ve konaklama alanlarının artırılması gerekmektedir. Tüm yıla yayılan faaliyetlerle doğal alanların benimsenip korunması ve kullanılması daha etkili olmaktadır.
- Alanın varlığını bilme şekli: Ziyaretçiler kanyondan çoğunlukla arkadaş tavsiyesi üzerine haberdar olmuşlardır. İnternet ve gazeteden haberdar olanların sayısı azınlıktadır. Bu kanyon ve çevresinin reklamının yeterli olmadığını göstermektedir. İnsanlar kanyonun varlığından haberdar olsalar bu alanı gelip görmek isteyeceklerdir. Bunun için daha fazla tanıtım yapılmalıdır.

- Alanda yapılan etkinlikler: Kanyon ve çevresinde piknik, yürüyüş, fotoğraf çekimi ve şelaleyi izleme etkinlikleri çoğunlukla yapılmaktadır. Alanda kamp ve spor yapanlar oldukça az seviyededir. Bu sebeple alanda kamp alanları oluşturulabilir. Bu sayede alan kampçıların daha çok ziyaret edecekleri bir yer haline gelecek ve bu alan tur güzergâhlarına dâhil edilecektir. Sadağı Kanyonunu doğa sporları açısından geliştirilebilir. Zipline, kaya tırmanışları gibi macera sporlarına yer verilebilir. Örneklerde incelediğimiz Şeker Kanyonunda olduğu gibi bu alanda da tırmanış sporu yapılabilir. Ayrıca Ulubey Kanyonundaki gibi cam teras şeklinde bir seyir alanı yapılabilir. İnsanlar pasif rekreasyon olarak burada bir şeyler yiyip içebilir, dinlenebilir ve manzarayı izleyebilir.
- Giriş ücreti uygunluğu: Ziyaretçiler kanyon giriş ücretinin normal olduğunu ifade etmişlerdir. Bu fiyat artırılıp düzenli işçi çalıştırılabilir. Bu sayede yöre için istihdam sağlanmış olacaktır.
- Kent donatılarının yeterli olma durumu (iletişim, duyuru, yönlendirme panoları, güvenlik, aydınlatma, ışıklandırma, oturma elemanı, otopark, yeme-içme yeri, wc, çeşme, çöp kutusu vb): Ziyaretçiler alandaki kent donatılarını yeterli bulmamaktadır.

Sonuç olarak alan, düşünülen önerilerle geliştirilebilir düzeydedir. Doğal ve kültürel potansiyelin korunması yapılacak yenilikler ve alınacak önlemlere bağlıdır.

Kaynaklar

- [1] Godfrey K. B, The Evolution of Tourism Planning in Cyprus: Will Recent Changes Prove Sustainable, Cyprus Review, 1996. <https://www.cypusreview.org/index.php/cr/article/view/328>
- [2] White, K. J. Tourism and the Antarctic Economy, Annals of Tourism Research, Volume 21, Issue 2, 1994, Pages 245-268
- [3] Uslu, A., Yazgan, M. E., Erdoğan, E., Dilaver, Z., Barış, M. E. Peyzaj Çevre ve Tarım, 2, Anadolu Üniversitesi Yayını, Eskişehir, 2013.
- [4] TMMOB. Korumada Yeni Tanımlar Yeni Kavramlar Atölye Kültürel Peyzaj, 10-11-12 Ekim 2008, Eskişehir.
- [5] Gül, A. Peyzaj-İnsan İlişkisi ve Peyzaj Mimarlığı, Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi. 2000, Seri A Sayı 1, 97-114.
- [6] Karaküçük, S. Rekreasyon Boş Zamanları ve Değerlendirme, Ankara: Bağırhan Yayınevi, 1999.
- [7] Mclean, D.D. Hurd, A. R., Rogers, N. B. Recreation and Leisure in Modern Society, USA: Johns and Bartlett Publishers, 2005.
- [8] İbret, Ü. Cansız, E. Kanyon Turizmi ve Ekoturizm Açısından Değerlendirilmesi Gereken Bir Yöre: Küre Ersizlerdere-Karacahennem Kanyonunu, Marmara Coğrafya Dergisi, 2016, Sayı 34, 107-117.
- [9] Hazar, A. Rekreasyon ve Animasyon, 2. Baskı, Ankara: Detay yayıncılık, 2003.
- [10] Metin T. Kesici M., Kodaş D. Rekreasyon Olgusuna Akademisyenlerin Yaklaşımları, Journal of Yasar Universty, 2013.
- [11] URL-7: https://tr.wikipedia.org/wiki/Antilop_Kanyonunu, 2019
- [12] URL-11: <https://yolvemacera.com/wulingyuan-avatarin-efsanevi-gercek-ulkesi/>, 2019
- [13] URL-20: https://tr.wikipedia.org/wiki/Verdon_vadisi, 2019
- [14] URL-8: <https://wall.alphacoders.com/big.php?i=353980&lang=Turkish>, 2019
- [15] URL-10: <http://www.brandlifemag.com/hayatimizin-en-siradisi-yuruyusune-hazir-misiniz/>, 2019
- [16] URL-21: <https://www.sozcu.com.tr/hayatim/seyahat/avrupanin-en-buyuk-kanyonunu-verdon-vadisi/>, 2019
- [17] URL-12: https://tr.wikipedia.org/wiki/Valla_Kanyonunu, 2019
- [18] URL-13: https://tr.wikipedia.org/wiki/Köprülü_Kanyon, 2019
- [19] URL-9: <https://www.hurriyet.com.tr/ekonomi/ihlara-vadisi-turistlerin-ilgi-odagi-40540652>, 2019
- [20] URL-5: <https://tr.pinterest.com/pin/343610646550011162/?lp=true>, 2019
- [21] URL-6: <https://www.ankaragezginleri.com/koprulu-kanyon-hayran-birakan-milli-park/>, 2019
- [22] URL-17: <https://karabukgundem.com/dunya-guzeli-seker-kanyonunu-kanyon-yok-ediliyor.html>, 2019
- [23] URL-19: <https://www.sabah.com.tr/turizm/2018/07/06/turkiyenin-doga-harikasi-kanyonlari>, 2019
- [24] URL-15: <https://kesfetsek.com/usak-ulubey-kanyonunu/>, 2018
- [25] URL-14: <https://www.yeniasir.com.tr/yasam/2017/06/07/sakli-cennet-ulubey-kanyonlari>, 2019
- [26] URL-16: <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/karabuk/gezilecekyer/seker-kanyonunu>, 2019
- [27] URL-18: <http://trkyevnyadakraaravekanyonlar.blogspot.com/2011/05/goksu-kanyonunu.html>, 2019
- [28] Altunışık, R., Coşkun, R., Bayraktaroğlu, S. & Yıldırım, E. (2010). Sosyal bilimlerde araştırma yöntemleri-SPSS uygulamalı. 6. Baskı, Sakarya Yayıncılık, Sakarya, 381 s.
- [29] Erkut E. (2016). Bursa Orhaneli bölgesi, Sadağı ve civarının hidrojeolojisi. [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [30] URL-1: <https://bursa.ktb.gov.tr/TR-94935/orhaneli.html>

- [31] Anonim (2012). Orhaneli, Büyükorhan, Harmancık ilçeleri genel bilgileri. Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı (BEBKA) Raporu, Bursa.
- [32] URL-3: https://www.nufusu.com/ilce/orhaneli_bursa-nufusu
- [33] URL-4:
- [34] Black, D. Canyoneering: A Guide To Techniques For Wet And Dry Canyons (How to Climb Series) (www.amazon.com/Canyoneering-Guide-Techniques-Canyons-Climb/dp/0762782730), 2013.
- [35] Goudie A.S. (Ed.), Encyclopedia of Geomorphology, Volume 1,A-I. Routledge Ltd., London, 2004.
- [36] Bozic, S., Tomic, N. Canyons and gorges as potential geotourism destinations in Serbia: Comparative analysis from two perspectives - general geotourists' and pure geotourists', Open Geosciences 7(1):531-546, 2015.
- [37] Derinöz, B., İncesu Kanyonu ve Çevresi'nin (Çorum) Jeoturizm Potansiyeli, Motif Akademi Halkbilimi Dergisi, Cilt:14, Sayı:34, 792-813, 2021,

Olay Müdahale Süreçlerinde Linux Sistemlerden Manuel Veri Toplama

Mustafa Emre DEMİR^{1*}, Şengül DOĞAN², Türker TUNCER³

¹Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Merkez, Elazığ, Türkiye

²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Adli Bilişim Mühendisliği, Merkez, Elazığ, Türkiye

³Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Adli Bilişim Mühendisliği, Merkez, Elazığ, Türkiye

*191144101@firat.edu.tr, ²sdogan@firat.edu.tr, ³turkertuncer@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 30/04/2022;

Kabul/Accepted: 08/08/2022)

Öz: Günümüzde gelişmiş kalıcı tehdit gruplarının (APT) yaptığı saldırılar gerek kurumları gerekse özel şirketleri hedef almaktadır. Bu tür APT gruplarının yaptığı saldırılar birçok farklı amaca hizmet edebilmektedir. Özellikle kamu kurumlarına karşı yapılan saldırılarda devletlere ait gizli bilgilerin elde edilmesi gibi hedefleri olduğu bilinmektedir. Bu tür atakların tespit edilmesi için kurumlarda var olan tüm uç noktaların merkezi bir yerden sürekli olarak takip edilmesi ve kurum/kuruluş içerisindeki tüm aktivitelerin kontrol edilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Böyle bir sistem kurum veya kuruluşlarda kurulsu dahi sistemler üzerinde gerekli inceleme ve analiz işlemlerinin yapılması için insan kaynağı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bu sistemler genellikle Windows odaklı çalışmaktadır ve Linux destekleyenlerin verimi oldukça düşüktür. Linux sistemler bu yapıda kör kalmaktadır. İzleme yapılırsa dahi bahsedilen türde bir saldırıya maruz kaldığının tespit edilmesi ve incelenmesi mevcut kullanılan kurumsal çözümlerle başarılı olmamaktadır. Bu sebeplerle Linux sistemlerde olay müdahale süreçlerinin işletilmesinde bir zorluk olduğu değerlendirilmiştir. Bu makalede tespit edilen zorluğa çözüm sunulmaktadır. Olay Müdahale süreçlerinde Linux işletim sistemine sahip cihazlarda veri elde edilmesine yönelik çalışmalar yapılmış ve çıktıları açıklanmıştır. Özetle bu makalede sunulan çözüm yöntemi kullanılarak Linux tabanlı çoğu işletim sisteminde hızlı ve doğru sonuçlarla olay müdahale süreçleri tamamlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Linux Adli Bilişim, Linux İçin Olay Müdahale, Manuel Linux Adli Bilişim Teknikleri, Olay Müdahale, Veri Toplama.

Manuel Data Retrieval from Linux Systems in Incident Response Processes

Abstract: Nowadays, Advanced Persistent Threat (APT) groups target different types of companies. Their purposes are to obtain confidential data of organizations. In order to detect such attacks, all endpoints in organizations should be monitored and analyzed from Security Operation Center Team. At the same time, human resources are required for the management of these systems. In addition, these systems generally work on Windows and solutions that support linux are less successful. For these reasons, it is considered that there is a difficulty in the operation of incident response processes in Linux systems. This article proposes a solution to the identified difficulty. In Incident Response processes, studies were carried out to obtain data on devices with Linux operating system and their outputs were announced. In summary, incident response processes were completed with fast and accurate results in most Linux-based operating systems using the solution method presented in this article.

Key words: Linux Forensics, Incident Response for Linux Forensic, Digital Forensics for Linux, Retrieval data from Linux operating system.

1. Giriş

Advanced Persistent Threat (APT), Türkçeye Gelişmiş Kalıcı Tehdit veya Gelişmiş Sürekli Tehdit olarak çevrilen terim, dünya genelinde profesyonel siber saldırı yapan gruplara verilen genel isimdir [1]. Gruplara özel bireysel isimleri mevcuttur. Örneğin Lazarus veya APT38 olarak isimlendirilen grubun Kuzey Kore ile ilişkili olduğu bilinmektedir [2]. Bu grup genellikle IT ve Kimya sektöründe çalışan firmaları hedef almaktadır. Günümüzde bu tür saldırı grupları yaygınlaşmıştır dolayısı ile bu tür saldırıların analizi için kullanılan yeni tekniklerin geliştirilme ihtiyaçları ortaya çıkmaktadır [3,4].

Adli bilişim ve olay müdahalesi süreçlerinde inceleme yapılan kurum alt yapısındaki tüm uç noktaların hızlı bir şekilde analiz edilmesi ve tüm tehdit unsurlarının hızlıca tespit edilip ortadan kaldırılması hayati önem taşımaktadır [5]. Bu incelemelerin temel amacı kurum içerisinde kalıcılık sağlamış olabilecek tehdit gruplarının

* Sorumlu yazar: 191144101@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-8324-0127, ² 0000-0001-9677-5684, ³ 0000-0002-1425-4664

tespit edilmesi ve olası veri kaçaklığı gibi olumsuz sonuçlar doğurabilecek durumların ortadan kaldırılmasıdır [6]. Bu tür saldırılarla ve saldırganlarla mücadele etmek amacı ile birçok sistem geliştirilmiştir [7,8]. Geliştirilen sistemler çoğunlukla Windows işletim sistemlerine hitap etmektedir. Linux destekleyenler dâhi istenilen performansı vermemektedir. Olay müdahale süreçlerinde Linux sistemlerden veri elde etme süreçlerinde birçok problemle karşılaşmaktadır. Bunlardan ilki, Linux sistemlerin birçoğuna güncel EDR (Endpoint Detection Response; bilişim sistemlerinde tehdit unsurlarının tespit edilip gerektiğinde aksiyon alınmasına imkân sağlayan teknolojik çözümlere verilen genel isimdir.) araçlarına ait ajanların desteklenmemesi ve Linux tarafındaki görünürlüğün sağlanamamasıdır. Bir diğer problem ise ajan destekleyen ürünlerde dahi tam fonksiyonlu olarak sistemlere erişim sağlanamaması ve istenilen verinin istenildiği anda elde edilememesidir. Bu sebeplerle Linux sistemlerde ilkel analiz yöntemlerine başvurulmaktadır. Linux sistemlerin analizi için birçok adli bilişim aracı kullanılmaktadır. Bu araçların kullanımı için gerekli lisans maliyetlerinin karşılanması, sistemin imajının alınması ve ayrı bir ortamda bahsedilen araçlar kullanılarak analiz edilmesi gereklidir. Bu araçların yaptığı incelemeler ilkel kalmakta ve olay müdahale esnasında süreçleri oldukça uzatmaktadır [9-11].

Yukarıda açıklanan problemlerin olay müdahale süreçlerinde analiz ve kök sebebin ortaya çıkarılmasını yavaşlattığı aşikârdır. Bu sebeple tüm Linux sistemlerden incelenmesi gereken sistem verilerinin otomatik şekilde elde edilmesini sağlayacak araç tüm süreçleri hızlandıracaktır. Bu kapsamda değerlendirildiğinde herhangi bir programlama dilinde yazılacak bir aracın gerekli dosyaları istenilen bir hedefe ayrıştırılmasını sağlayabilecek bir çözüm ile hali hazırda olan bir siber güvenlik olayına müdahale etmek oldukça hızlanacaktır.

Bu çalışmanın katkıları aşağıdaki gibidir.

- 1- Adli bilişim yazılımları hem yüksek maliyete sahiptirler hem de bazı delilleri paket adli bilişim yazılımlarıyla elde etmek mümkün değildir çünkü her adli bilişim yazılımının kendine has özelliği vardır. Bu çalışmada önerilen yöntemle amaca yönelik adli bilişim analizi yapabilecek scriptler yazılmıştır.
- 2- Adli analiz yazılımları genellikle yavaş çalışırlar (karmaşıklıkları yüksek). Bu çalışmada sunulan metotla düşük karmaşıklıkta Linux sistemler için adli analiz yapılabilecektir.
- 3- Bu çalışmada operasyonel olarak kullanılacak bir analiz aracı detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Bu çalışmada mevcut Linux komutları ve python ve bash programlama dilleri kullanılarak Linux sistemlerden hızlı ve pratik şekilde veri toplama ve inceleme yapılması hedeflenmektedir. Olay müdahale süreçlerinde analizlerin nasıl yapıldığının detaylı anlaşılması adına literatürde bu işlemlerin nasıl gerçekleştirildiği “2. Adli bilişim ve Olay Müdahalesi” başlığında açıklanmıştır. Normal şartlarda Linux sistemlerde adli bilişimin nasıl yapıldığı “3. Linux Sistemlerde Adli Bilişim” başlığında açıklanmıştır. Önerilen çözümde kullanılan yöntemler hakkındaki bilgiler 4. Bölümde verilmiştir. Bulgular Bölüm 5’te, değerlendirme ve sonuç ise Bölüm 6’da açıklanmıştır.

2. Adli Bilişim ve Olay Müdahalesi

Adli bilişim, dijital ortamlardan elde edilen delillerin, bir konuyu ortaya çıkarmak amacıyla kabul görülebilir şekilde farklı ortamlara aktarılması ve daha sonrasında elde edilen delillerin değerlendirme, inceleme ve raporlama süreçlerini kapsayan ve Adli Bilimlerin altında yer alan bir bilim dalıdır [12,13].

Olay müdahalesi ise bir kurum veya kuruluşun gelişmiş kalıcı tehditlere (APT) maruz kalması sonucunda, tüm sistemlerde var olan tehdit unsurlarının tespit edilmesi, olay ile ilgili kök nedenin ortaya çıkarılması, kalıcılık sağlayan tehdit unsurlarının tekrar oluşmamasını sağlayacak şekilde temizlenmesini ve sistemlerin yeniden güvenli hale getirilmesini sağlayan süreçler bütünüdür [14].

Olay müdahalesi süreçlerinde incelemeler yapılırken Adli Bilişim tekniklerine başvurulur. Olay müdahalesinde temel amaç tehdit unsurlarının en hızlı şekilde ortadan kaldırılıp sistemlerin yeniden güvenliğini sağlamaktır. Bu sebeple adli bilişim tekniklerinde kullanılan delil elde etme süreçleri olay müdahalesinde kullanılmamaktadır. Delil elde etme süreçlerinde başvuru yöntemleri işlemlerin yavaş yapılmasına ve tehdit unsurlarının kalıcılığının artmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla yapılması gereken öncelikli işlem tüm sistem envanterinin çıkartılması ve sistemlerin hepsinin tekelden görünür hale getirilmesini sağlamaktır. Görünürlük sağlandıktan sonra sistemler üzerinde bulunan kritik logların kural setlerinden geçirilerek aktif yetkisiz işlemlerin tespiti amaçlanmaktadır [14].

Olay müdahalesi süreçlerinin işletilebilmesi için kurum ve kuruluşlarda bulunan tüm sistemlerin, işletim sistemi ve platform bağımsız olarak gerekli log kaynaklarında istenilen logların merkezi yönetim birimine aktarılması gereklidir. Olay Müdahalesi süreçleri ulusla arası kabul görmüş iki temel başlıkta ele alınabilir. Bu başlıklar “2.1 Adli Bilişim ve Olay Müdahalesi Süreçleri” başlığı altında detaylandırılmıştır.

2.1 Adli Bilişim ve Olay Müdahalesi Süreçleri

Adli bilişim, bilginin bütünlüğünü korurken ve veriler için katı bir gözetim zinciri sürdürürken verilerin tanımlanması, toplanması, incelenmesi ve analizi gibi işlem basamaklarını takip eder [8]. Kuruluşlar, birçok kaynaktan gelen sürekli artan miktarda veriyi kullanır. Adli bilişim teknikleri, Suçları ve dâhili politika ihlallerini araştırmak, bilgisayar güvenliği olaylarını yeniden oluşturmak, operasyonel sorunları gidermek, kazayla oluşan sistem hasarından kurtarma gibi birçok amaç için kullanılabilir. Sistemlerinde ve ağlarında hangi olayların meydana geldiğini belirlemek için pratik olarak her kuruluşun adli bilişim yeteneklerine ihtiyacı vardır. Olay müdahalesi planı, bir siber güvenlik olayına müdahale etmek için hazırlanmış talimatlardır. Bir güvenlik olayı ciddi sorunlar açabilecek ise, hasarı hızla kontrol altına almak, en aza indirmek ve sonuçlardan bir ders çıkartarak tekrar oluşmamasını sağlamak için belirli adımlar atılır [15].

Her siber güvenlik olayı, soruşturma gerektirmeyebilir. Şirket içindeki bir çalışanın tek bir giriş hatası gibi olaylar, münferit olaylar olarak meydana geldiğinde farkında olmak önemlidir. Siber güvenlik ekipleri, her türün ne zaman araştırılması gerektiğine ilişkin belirlenmiş sınırları olan olay türlerinin bir listesine sahip olmalıdır. Böylelikle, her olay türü için özelleştirilmiş olay müdahale adımlarına sahip olmanız gerekir [5]. Bu çalışmada olay müdahale süreçlerine değinilecek ve Linux sistemlerde yapılması gereken adımlar ele alınacaktır.

2.1.1 SANS Olay Müdahalesi Adımları

SANS Olay müdahale planı, bilişim uzmanlarının ve personelinin veri ihlali veya siber saldırı gibi bir siber güvenlik olayını tanımasına ve bunlarla başa çıkmasına yardımcı olan, altı farklı aşamadan oluşan belgelenmiş, yazılı bir plandır [16,17]. Bu Planlar sırası ile Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1 SANS Olay Müdahale Adımları

SANS Olay Müdahalesi Adımları
Preparation – Hazırlık
Identification – Tanımlama
Containment – Muhafaza Etme
Eradication – Temizleme/Yok Etme
Recovery – Yeniden Kullanılabilir Hale Getirme
Lessons Learned – Çıkarılan Dersler

2.1.2 NIST Olay Müdahalesi Adımları

NIST, Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü anlamına gelir. Olay müdahale adımları ile olay müdahalesi için sektör standartlarından birisi haline gelmişlerdir. NIST’e ait olay müdahalesi adımları Tablo 2’de gösterilmiştir [18].

Tablo 2 NIST Olay Müdahale Adımları

NIST Olay Müdahalesi Adımları
Preparation – Hazırlık
Detection and Analysis – Tespit ve Analiz
Containment, Eradication ve Recovery – Muhafaza Etme, Temizleme/Yok Etme ve Yeniden kullanılabilir Hale Getirme
Post Incident Activity – Olay Sonrası Aktiviteler

2.1.3 SANS’a Göre Olay Müdahale Adımlarının Açıklanması

Sans’a göre olay müdahale adımları aşağıda verilmiştir [16,17].

Hazırlık: Hazırlık aşamasının amacı, kuruluşun bir an önce bir olaya kapsamlı bir şekilde müdahale edebilmesini sağlamaktır. Bunun için önceden hazırlanması gereken kritik unsurlar; Politika, Müdahale, Planı Stratejisi, İletişim, Belgelendirme, Ekip, Erişim kontrolü, Eğitim, Araçlar olarak söylenebilir.

Tanımlama: Bu adım, kuruluştaki normalde süre gelen işlemlerin tespit edilmesini ve anomali olarak değerlendirilmesi gereken aktivitelerin tespit edilmesi aşamasıdır. Bir aktivitenin şüpheli bir olayı temsil edip etmediğini anlamayı ve olayın ne kadar önemli olduğunu belirlemeyi içerir. Bu aşamada tüm BT altyapısındaki uç

noktaların tespit edilip gerekli araç kurulumlarının yapılması süreçleri işlenir. Aynı zamanda günlük dosyaları, hata mesajları ve güvenlik araçlarından gelen uyarılar dâhil olmak üzere birden fazla kaynaktan gelen olayları analiz etme süreçleri işletilir. Birden çok kaynaktan gelen verileri ilişkilendirerek bir olayı tanımlama ve mümkün olan en kısa sürede raporlama süreçleri de bu aşamada işletilir.

Muhafaza: Muhafaza etmenin amacı, mevcut güvenlik olayından kaynaklanan hasarı sınırlamak ve daha fazla hasarı önlemektir. Olayı tamamen hafifletmek ve aynı zamanda kovuşturma için gerekli olabilecek delillerin yok edilmesini önlemek için işletilmesi gereken süreçleri içerir.

Temizleme: Temizleme, saldırıların ortaya çıkardığı kötü amaçlı yazılımları veya diğer yapıları tamamen ortadan kaldırmayı ve etkilenen tüm sistemleri tamamen geri yüklemeyi amaçlamaktadır. Temizleme aşamaları Tablo 3'te açıklanmıştır.

Tablo 3 Temizleme Aşamaları Süreçleri

Temizleme Aşamaları Süreçleri	
Yeniden görüntüleme	Herhangi bir kötü amaçlı içeriğin kaldırılmasını sağlamak için etkilenen sistem sabit sürücülerinin tamamen silinmesi ve yeniden imajının oluşturulmasıdır.
Kök Sebebi Önleme	Olayın nedenini anlamak, örneğin saldırgan tarafından kötüye kullanılan bir güvenlik açığına yama uygulamak gibi gelecekteki tehlikeleri önlemeyi içerir.
Temel güvenlik uygulamalarını uygulama	Örneğin, eski yazılım sürümlerini yükseltme ve kullanılmayan hizmetleri devre dışı bırakmayı amaçlamaktadır.

Yeniden Kullanılabilir Hale Getirme: Kurtarma işleminin amacı, temiz olduklarını ve tehdidin ortadan kaldırıldığını doğruladıktan sonra tüm sistemleri tam çalışır duruma getirmektir. İşlemleri geri yüklemek için saat ve tarihin tanımlanması için sistem sahipleri, güvenlik ekibinden gelen bilgilere dayanarak hizmetlerin ne zaman geri yükleneceği konusunda nihai kararı vermelidir. Test etme ve doğrulama, sistemlerin temiz ve çalışır durumda olduklarını doğrulama adıdır. İzleme, olaydan sonra işlemleri gözlemlemek ve anormal davranışları kontrol etmek için bir süre izlemeyi sürdürme adıdır. Aynı olayın tekrarlanmasını önlemek için geri yüklenen sistemlerde neler yapılabileceğine karar verme aşamasıdır.

Çıkarılan Dersler: Olayın bitiminden en geç iki hafta sonra, Güvenlik Ekibi olay hakkındaki tüm ilgili bilgileri derlemeli ve gelecekteki olay müdahale faaliyetlerine yardımcı olabilecek dersleri çıkarmalıdır. Bir olayın devam ederken tüm yönlerini belgelemek gereklidir ve kapsamlı belgelere ulaşmak, bir dahaki sefere alınacak dersleri belirlemek için çok önemlidir. Bir olay raporu yayınlanmalı, rapor tüm olayın gözden geçirilmesini sağlamalı ve Kim, Ne, Nerede, Neden ve Nasıl sorularına cevap vermelidir. Güvenlik Performansını iyileştirmenin yollarının belirlenmesinde ise doğru şekilde işlenmeyen ve bir dahaki sefere iyileştirilebilecek öğelerin tespit edilmesi gerekir.

3. Linux Sistemlerde Adli Bilişim

Adli bilişim araştırmacıları, güvenilir kanıtları ortaya çıkarmak için birçok farklı sistem ve araca aşina olmalıdır. Bu nedenle, ister bir Linux makinesinde bir analiz yapmak ister Linux'u bir araştırma platformu olarak kullanmak olsun, Linux ile aşinalık gereklidir. Analiz yürütmek için bir platform olarak Linux, bir araştırmacının gerçeği ortaya çıkarmasına izin verecek çeşitli araçlar sağlar. Ayrıca, bir araştırmacının bir Linux makinesini denetlemek için gerekli olan yöntem ve kavramlardan haberdar olması da önemlidir. Ayrıca, Linux dosya sistemi günlüğünün yeterli bilgisi, bir Linux makinesinde kanıt bulmak için kritik bir faktördür [10].

Temel ve basit bir Linux dosya sistemi, önemli bir dosya bilgisini koruyabilir ve yönetebilir. Linux İşletim Sisteminin faydalı verilerinin madenciliği ve analizi, bilgisayar adli analizinin önemli araçları ve araştırma yönü haline gelmiştir [11].

3.1 Linux Adli Bilişimi

Adli bilişim dünyasında, araştırmacıların aralarından seçim yapabilecekleri çeşitli araçlar ve seçenekler vardır. Bir bilgisayar araştırmacısının amacı, açık kaynaklı ve doğrulanabilir araçları kullanarak gerçeği ortaya çıkarmak olduğundan, araştırmacıyı ihtiyaç duyulan gerçeklerden uzak tutabilecek olası soyutlama katmanlarını ortadan kaldırır [19]. "Dcfldd" olarak bilinen böyle bir araç, adli bilişim uzmanlarının yararlanabileceği tüm özelliklere sahip DoD adli bilişim kütüphanesi tarafından geliştirilen Linux dd yardımcı programının değiştirilmiş bir sürümüdür [20]. Dosya sistemi analizi amacıyla kullanılan bu tür bir başka araç, araştırmacıların sürücü

sektörlerini kolayca analiz etmesine ve karma kanıt dosyaları oluşturmasına olanak tanıyan açık kaynaklı Linux tabanlı bir araç seti olan "Sleuth Kit" ve "Autopsy" dir [21].

Genel olarak, bir adli bilişim uzmanının temel amacı, şüpheli cihazlardan kanıt şeklinde gerçeği ortaya çıkarmaktır. Tartışılabilir sorun, kapalı kaynak programlarını kullanırken, bu tür bilgiler araçların kullanıcılarına açıklanmadığından, mevcut araç sürümüyle ilgili hata düzeltmelerini veya sorunları doğrulamanın çoğu zaman bir yolu olmamasıdır. Bu, kanıt toplama sürecinde çarpık sonuçlara veya çarpıklığa yol açabilir. Örneğin, Sleuth Kit gibi açık kaynaklı bir araç kullanmak, bir araştırmacı programın meşruiyetini ve birçok farklı şekilde nasıl çalıştığını doğrulayabilir, bunlardan biri hata düzeltmelerinin kamuya açık kaydı olabilir, başka bir seçenek kaynak kodun daha yeni sürümleriyle eskisini karşılaştırabilir. Üçüncü seçenek, kodun gerçek işlevini doğrulamaktır, dolayısıyla aracın nasıl olduğunu sunabilmek, kanıtı meşru bir şekilde ortaya çıkarır [19]. Bir kapalı kaynak aracı kullanırken araştırmacı, kendileri ve kanıt arasına soyutlama katmanları yerleştirir ve bu katmanların her biri ile kanıtın çarpıtılabileceği veya hatalara sahip olabileceği potansiyeli artar [10].

3.2 Linux Sistemlerde Denetim ve Loglama

Adli bilişim araştırmacıları, araştırmaları için herhangi bir yararlı bilgiyi toplamaya çalışmak için genellikle bir ana makinede bulunan denetim sistemlerine ve günlüklere bakarlar. Bu nedenle, bir araştırmacının, özellikle bir Linux sisteminde, denetleme ve günlüğe kaydetme ile ilgili kavram ve metodolojilere aşina olması önemlidir. Denetim, güvenlik amacıyla bir sistem veya uygulamada izlemek istediği eylemleri ifade eder. Loglama, bir uygulamada veya sistemde meydana gelen tüm etkinlikleri günlüğe kaydetmeyi ifade eder [22,23].

Her iki araç da (audit ve log) bir adli bilişim araştırmacısı için kanıtları ortaya çıkarma çabalarında veya bir şüphelinin bilgisayarında ne tür bir suçun işlendiğini daha iyi anlamaya yönelik girişimlerde çok yararlı olabilir. Linux, adli araştırmacılara yardımcı olabilecek pek çok yararlı günlüğe sahiptir ve Linux, varsayılan olarak çoğu dağıtımda yüklü olan ilginç bir denetim sistemine sahiptir.

Daha önce bahsedildiği gibi, Linux varsayılan olarak adli bilişim araştırmacıların Linux sistemlerini analiz ederken yararlanabilecekleri çok sayıda yararlı terminal komutuna ve günlüklere sahiptir. "history" ve "/usr/bin/w" gibi bazı basit komutlarla başlayalım. "history" komutu, oturum açmış mevcut kullanıcı tarafından yürütülen son komutları gösterir ve "usr/bin/w", şu anda kimin oturum açmış olduğunu ve her bir kullanıcının ne yaptığını görmeyi sağlar [8]. Bu komutlar, bir sistemde hemen ne olabileceğini anlamının basit bir yoludur, ancak günlük dosyaları bir araştırmacı için çok daha yararlıdır çünkü genellikle şüpheli bir olayın meydana gelebileceği anı içerirler. Örneğin, "/var/log/faillog" dizini her başarısız kullanıcı oturum açma girişimini içerir ve bu, kötü bir aktörün bir sisteme girmeye çalışıp çalışmadığını belirlemeye çalışmak için yararlı bir günlük olabilir [24]. Diğer bir örnek, makineden yazdırılan tüm öğelerin kaydını gösteren "/var/log/lpr.log" dur. Bu, kurumsal casusluk davaları için harika bir araç olabilir ve hangi bilgilerin alındığı iddiasını sağlamlaştırmak için mahkemede ek kanıtlar sağlayabilir. Bunlar, gerçekleştirilebilecek temel günlükler ve komutlardan yalnızca birkaçıdır; ancak, bilgisayar korsanlarının izlerini gizlemek için günlüklerin kolayca tehlikeye atılabileceğini ve düzenlenebileceğini anlamak önemlidir. Bu nedenle, gelişmiş bir denetim sistemine sahip olmak önemlidir.

Pek çok Linux dağıtımı varsayılan olarak, genellikle ilgili olayları izlemek için harika bir araç olan Linux Denetim sistemini (Linux audit log) kurmuştur [20,10].

Bir sistem çağrısı bu filtrelerden birinden geçtiğinde, dışlama filtresi aracılığıyla gönderilir, bu da denetim kuralı yapılandırmasına bağlı olarak onu daha fazla işlem için denetim arka plan programına gönderir.

Denetim sistemi, güvenlik göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır ve bir kullanıcının günlük dosyalarındaki birçok yararlı bilgiyi denetlemesine ve kaydetmesine olanak tanır. Örneğin, tipik bir denetim sistemi günlük dosyasında şunlar bulunabilir. Söz konusu olayın sonucu ile birlikte olayın tarihi/saati ve türü, öznelerin ve nesnelerin hassasiyet etiketleri, olayı tetikleyen kullanıcının kimliği, herhangi bir güvenilir veri tabanındaki değişiklikler "/etc/passwd" gibi ve denetim yapılandırmasında yapılan değişiklikler ve Denetim günlük dosyalarına erişme girişimleri [10]. Bu, denetim sisteminin neler yapabileceğinin tam bir listesi değildir, ancak Linux Denetim sisteminden ne kadar yararlı bilginin elde edilebileceğini gösterir. Denetleme ve kayıt tutma, adli bilişim araştırmacıları için değerli bilgi araçlarıdır. Bir sistemde meydana gelen tüm olaylar ve söz konusu olayları tetikleyen kullanıcı hakkında bilgi içerirler. Linux bunun farkındadır ve güvenli denetim/günlük çözümleri sağlamak için birçok araç sağlamıştır [20,10].

3.2.1 Linux Dosya Sistemi Günlük Dosyalarının Adli Bilişimi

Dosya sistemi günlükleri, diskte bulunan verileri dosya sistemine gönderilmeden önce önbelleğe almak için kullanılır. Bu, güç kaybı veya sistem arızası olması durumunda hiçbir şeyin kaybolmamasını sağlamak için yapılır;

ancak, böyle bir olay meydana gelirse, yazma işlemlerinin tamamlanmasına izin vermek için günlük yeniden oynatılabilir. Günlük analiz edilebilir ve üzerine yazılan veya silinen veri dosyalarını kurtarmak için kullanılabilir, çünkü önceki dosya yazma işlemleri genellikle sınırlı bir süre için günlükte saklanır. Linux'un ext2 sürümünden sonra, günlük tutma ReiserFS, ext3 ve ext4 gibi daha yeni dosya sistemlerine uygulanmıştır [20].

Günlük sistemi, bir işletim sisteminde adli bilişim için en önemli mekanizmadır. Linux sistemindeki adli öneme sahip olabilecek çeşitli kayıt mekanizmaları, [9]'da tartışılmaktadır.

Ext3 dosya sistemi, Linux uzantılı dosya sistemlerinin üçüncü varyasyonudur ve günlük kaydı özelliğini ilk uygulayan sistemdir. Ext3 süper blok yapısını kullanır, bu nedenle günlüğün boyutu yalnızca dosya sisteminin boyutuna bağlıdır. Günlükte oturum açılmış her girdi bir dönüşümlü sıraya konur, tüm girdilerin bir yorum bloğu ve bir tanımlayıcı bloğu vardır [20].

Dosya sistemi içindeki dosyalarda değişiklik yapıldığında, bunlar günlükte oturum açarlar ve bu değişiklikler bir veri kurtarma aracı kullanılarak keşfedilebilir. Ext3'te varsayılan günlük ayarlarını kullanırken, günlükte kaydedilen dosya sisteminde yalnızca meta verilere yapılan değişiklikler olur. Bu, bir dosya düzenlenirken tüm meta verilerin günlükte saklandığı anlamına gelir. Yalnızca meta verilerin günlüğe kaydedilmesi yerine, tüm veriler bağlama komutu seçeneği, "data = journal" kullanılarak günlüğe kaydedilebilir. Günlük girişlerini analiz etmek ve değiştirilmiş, silinmiş veya üzerine yazılmış dosyaları aramak için Java tabanlı bir veri kurtarma aracı kullanılabilir. Veri kurtarma aracı, komut satırı bağımsız değişkeni olarak iletilen bir dosya sisteminin açmak için bir "FileInputStream" nesnesi kullanır ve dosyayı bayt seviyesinde okur. Dosyayı açtıktan sonra, bilgiler süper bloktan çıkarılır ve ileride kullanılmak üzere saklanır [25,26].

Günlük dosyalarının Linux işletim sisteminin ext3 sürümüne uygulanması, verilerin tek bir yerde depolanmasına yardımcı olmanın harika bir yoludur. Tüm verilerin tek bir yerde saklanmasıyla birlikte, bu, bir veri kurtarma aracının günlüklerde kullanımını çok daha kolay hale getirir. Veri kurtarma araçları, günlük bloklarında değişiklikler, silmeler ve üzerine yazılan dosyalar için arama yapmak için kullanılabilir. Araç, her bloktan ne tür verilerin kurtarıldığını ve günlük bloğundaki bir dosyada yapılan düzenleme türüne göre nasıl kurtarılacağını belirlemek için birçok adım atar [20].

3.2.2 Linux Dosya Sistemi Yapısı

Linux işletim sisteminin en önemli bileşenlerinden biri olan dosya sistemi, sadece verileri değil aynı zamanda yapıyı da içeren bir veri koleksiyonu olan dokümanı yönetmek ve depolamak için kullanılır. Linux işletim sisteminin temel dosya sistemi olan Ext2, kullanılan ekipmanın mantık bölümlerini, tüm dosya sistemi hakkında bazı tanımlayıcılar ve veri blokları içeren birçok veri bloğu grubuna ayırır [20].

3.3 Linux Adli Bilişimde Kullanılan Metotlar

Linux tabanlı web sunucuları sürekli saldırı altındadır. SophosLabs'ta, 2013 yılında bir günde ortalama 16.000-24.000 web sitesinin güvenliği ihlal edilmiştir [27]. Linux sistemleri gerçekten de kötü amaçlı yazılımlar tarafından saldırıya uğrar. Microsoft'un işletim sistemi tasarımı, belgeleri yürütülebilir yükleri yükleyebilen bazı özellikler içerir. Yazılım kancalarından ve kod saplamalarından (kayıt defteri) oluşan bir veri tabanının kullanılması da işleri basitleştirmiştir [27,28].

Linux kötü amaçlı yazılımları, Windows virüslerine kıyasla ne yaptığından ve nasıl yaptığından oldukça farklıdır. Önemli işletim sistemi dizinleri, kötü amaçlı yazılım tarafından bilgisayar sistemini bir bütün olarak etkilemek için kullanılabilir. Ek olarak, içerideki kötü niyetli kişilerin riski her zaman vardır. Linux sistemlerine yönelik saldırılar, web tarayıcıları veya Java kapsayıcıları gibi sistem hizmetlerindeki hataları istismar etmeyi amaçlama eğilimindedir. Bunlar da sıklıkla yükseltilmiş ayrıcalıklarla çalışmazlar, bu nedenle genellikle hedeflenen hizmetin davranışını değiştirmek ve muhtemelen devre dışı bırakmak için bir istismar bulunur. Kötü amaçlı yazılım, Linux dosya sistemindeki çeşitli dizinleri kullanarak onu bir hizmet olarak çalışacak ve Bilgisayara zarar verecek şekilde yerleştirir. Ayrıca, içerideki kötü niyetli kişilerin faaliyetleri de dosya sisteminde depolanır. Bu, sistemdeki kötü niyetli faaliyetlerin izlerini bulmak için Linux dosya sistemi altındaki dizinlerin adli incelemesini yapma ihtiyacını ortaya çıkarır [27].

Ubuntu işletim sisteminin bir dosya sistemi, adli öneme sahip birçok yapılandırma bilgisini ve bilgiyi koruyabilmekte ve yönetebilmektedir. Ubuntu işletim sisteminin faydalı verilerinin madenciliği ve analizi, bilgisayar sistemine yapılan saldırının artmasıyla birlikte zorunlu hale geldi. Dosya Sisteminin araştırılması, vakayla ilgili bilgilerin toplanmasına yardımcı olabilir [28]. Ubuntu işletim sistemi, Linux işletim sisteminin dağıtımlarından biridir. Ubuntu çekirdeklerinin çoğu, varsayılan Linux çekirdeğidir. Ubuntu, genellikle bir ağaç yapısı olarak kabul edilen Linux dosya sisteminin kullanır. Ubuntu, Ext4'ü varsayılan dosya sistemi olarak

kullanıyor. Ext4, daha önce varsayılan dosya sistemi olan Ext3'ün bir evrimidir. Ext dosya sisteminin gelişimi Tablo 4'de özetlenmiştir. Linux bilgisayarlar, bilgisayar korsanlarının saldırısına çok açıktır. Linux kutuları, esasen merkezi bir kontrol noktası için genellikle sunucu olarak kullanılır. Aslında, bilgisayar korsanları tarafından honeypot'lara indirilen kötü amaçlı yazılımların yaklaşık %70'i Linux/Rst-B ile enfekte olmuştur. EXT dosya sistemine ait özelliklerin bulunduğu bilgiler Tablo 4'da gösterilmektedir [27,28].

Tablo 4 EXT Ailesi Özellikleri ve Sınırlamaları

Linux Dosya Sistemi	Yayın Tarihi	Özellikleri	Sınırlar
EXT	1992	Kullanılan Sanal Dosya sistemi kavramı	Dosya erişimi için ayrı zaman damgası desteği yok
EXT2	1993	Dosya Sıkıştırma eklendi	Günlük kaydı özelliği yok
EXT3	1999	Günlük kaydı eklendi, çevrimiçi dosya sistemi büyümesi	Kapsamlar, dosya numaralarının dinamik tahsisi ve blok alt tahsisi gibi eksik özellik
EXT4	2006	Kapsam tabanlı depolama, EXT2 ve EXT3 ile geriye dönük uyumluluk, Çevrimiçi birleştirme	Güvenlik sorununa neden olan silindikten sonra dosyanın üzerine yazmayın.

Ubuntu Linux ve Free BSD'deki çeşitli dosya sistemlerinin karşılaştırmalı bir çalışması da [29]'de yapılmıştır. Bilgisayar adli bilimi için Linux dosya sistemi analizi uygulamaları talebini karşılamak için, [30] 'de Linux dosya sistemini analiz etmek için nesne yönelimli bir yöntem önerilmiştir. Makale ayrıca, sınıflar arasındaki miras ilişkisi ve sınıfın kapsüllenmesi ile farklı veri kaynaklarını derinlemesine analiz etti ve Linux dosyası bilgilerini kullanıcılara dostça bir ara yüzde gösterdi. Linux işletim sistemi, dünya çapında birçok iş hizmetinde bir sunucu sistemi olarak kullanılmıştır. Bir sunucudaki yetkisiz izinsiz girişler geometrik bir ilerleme ile sürekli olarak artmaktadır. Tersine, izinsiz giriş kazalarına karşı koruma ve önleme teknikleri kesinlikle yetersizdir. Dijital adli bilişim araştırmasında tehlikeye atılmış bir Linux sistemiyle başa çıkmak için yeni bir çerçeve geliştirildi ve uygulandı [31]. Linux Forensics ve Linux sisteminin adli araştırması için çeşitli adli bilişim ve olay müdahale süreçlerinde kullanılan araçlarla ilgili sorunlar [32] 'de tartışılmıştır.

4. Kullanılan Yöntem ve Önerilen Yaklaşım

Linux İşletim Sistemlerinde, sistem üzerinde gerçekleştirilen işlemlerle ilgili bilgiler dosya sisteminde tutulur. Adli bilişim araştırmacısının sistemde gerçekleştirilen çeşitli faaliyetlerin potansiyel dijital kanıtlarını bulmasına yardımcı olabilecek dosya sistemindeki bazı dosyalar ve dizinlerdir ve bunlar aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Linux Dosya Sisteminin temel olarak incelenmesi gereken alanları aşağıdaki gibidir.

- /etc/rc.d
- /etc/init.d
- /etc/NetworkManager/System-connections
- /etc/passwd
- /etc/shadow
- /etc/profile
- /etc/networks
- /etc/hosts
- /etc/cron.d,
- /etc/cron.daily
- /etc/cron.weekly
- /etc/cron.d
- /etc/cron.daily
- /usr/bin
- /usr/lib
- /usr/local/share/recently-used.xbel
- /var/log/syslog
- /var/log/lastlog
- /var/log/faillog

- /var/tmp/
- /dev
- /proc/net/netstat
- /proc/net/dev_mcast
- /proc/cpuinfo
- /proc/PID/exe

4.1 Linux Sistemlerden Veri Elde Etme Yöntemi

Bu makalede yapılan tüm araştırmalar ve edinilen bilgiler doğrultusunda varılan kazanımların ve kullanılan araçların olay müdahale süreçleri içerisinde istenilen hızı kazandırmadığı görülmüştür. Bu sebeple Linux sistemlerden dosya elde etmek için bash programlama dilinde aşağıda açıklaması yapılan araç geliştirilmiştir. İlgili araç henüz tüm Linux dağıtımlarında istikrarlı çalışmasa dahi yukarıda açıklamaları verilen verileri çok hızlı şekilde toplayabilmesi ile bu makalede ele alınan soruna çözüm olabilmektedir. Geliştirilen aracın nasıl çalıştığı ve hangi verileri topladığı aşağıda açıklanmıştır.

Önerilen yöntem, bash script dilinde yazılmıştır. Yöntemin temel amacı Linux işletim sistemi üzerinde yerleşik olarak geliştirilmiş araçların kullanarak sistem verilerini toplamaktır. Toplanan verileri makine ismini de ekleyerek bir zip dosyasına kaydetmektedir. Uygulamayı çalıştırmak için yönetici haklarına sahip olmak gereklidir. Uygulamanın temelini standart linux komutları oluşturmaktadır. Yukarıda Linux dosya sisteminde incelenmesi gereken alanların dosya yolları verilmiştir.

Uygulama temel olarak sistem komutlarını sırasıyla çalıştırıp çıktılarını bir konuma yazmaktadır. Buradaki çıktılar adli bilişim açısından önem arz eden verileri içermektedir. Bu çıktıları okuyan analistler yaşanan siber güvenlik vakasına çözüm üretirler. Uygulamada çalışan fonksiyonlara bir örnek Şekil 1'de verilmiştir.

```

service() {
    echo -e
    if chkconfig -l && /dev/null; then
        chkconfig -l > $LOC/$IRCASE'-chkconfig.txt'
    else
        chkconfig --list > $LOC/$IRCASE'-chkconfig.txt'
    fi
    if sysv-rc-conf -list && /dev/null; then
        sysv-rc-conf -list >> $LOC/$IRCASE'-chkconfig.txt'
    else
        inserv -s >> $LOC/$IRCASE'-chkconfig.txt'
    fi
    systemctl list-unit-files >> $LOC/$IRCASE'-chkconfig.txt'

    # cron
    echo -e "\n[Debug][servicereg] get cron information ... to cron.txt"
    cp -RH /etc/cron.allow $LOC/$IRCASE'-cronallow.txt'

    cp -RH /etc/cron.deny $LOC/$IRCASE'-crondeny.txt'

    cp -RH /etc/crontab $LOC/$IRCASE'-crontab.txt'

    ls -al /etc/cron.* > $LOC/$IRCASE'-cronfiles.txt'
}

```

Şekil 1 Çalışan Servislerin Tespiti İçin Gerekli fonksiyon

Geliştirilen araç bu alanlardaki verilerin okunmasını sağlamakta ve bir metin çıktısı oluşturmaktadır. Aynı zamanda bu dosyaların özet fonksiyon değerlerinin de hesaplayarak veri bütünlüğünü de sağlamaktadır. Bu işlemi tek seferde ve hızlıca yapması en temel kazanımıdır. Normal şartlarda bu verilerin elde edilebilmesi için ya sisteme uzak bağlantı sağlanarak tek tek ilgili alanlardan verilerin okunması gerekir ya da sistemin imajının alınması ve Bölüm 3'te bahsedilen Linux Adli Bilişim araçlarının kullanılması gerekmektedir. Bizim yöntemimiz sayesinde buradaki lisans maliyeti ve zamandan kazanım sağlanmaktadır. Şekil 2 ve 3'de araca ait örnek çıktılar gösterilmiştir.

1	d4fb107b25fe3f4d637df1b56445960332ccc56fe027ec6a3f849b35d663c3dd	/usr/bin/znew
2	04484a4171fb583cf0f6645de2efcfc66a53ffa31d6b802533a6e00355c75ee2	/usr/bin/dpkg
3	eac9ecba762c54dd50150d743414c4800a22aa8a4951794849b5f451d08f1937	/usr/bin/xsm
4	b52a1b162880dba8af6eef90f9a80f9a6d10b8af41750e28ce78bb0b76050948	/usr/bin/gdb
5	a934cdb1643a924d96a0edbe85b8bb058fad9e51a7b7b66bcc74b0520227f39a	/usr/bin/pkg-config
6	31ada0d1b8f1b182910d90d6f560f30166c1fefb053f97b0b28da96236f78167	/usr/bin/tzselect
7	c69f113aeafff76af527f11533ba10a7f0cdcaab0ce47b696a06d51b60234d4	/usr/bin/ptx
8	cbdfc9f8b4b58d645917138197bdf8a5e36541b6778aa0e395741d9e97e5220d	/usr/bin/foo2zjs -pstops
9	e3ed27ec700fe277a48d137cdd39913c7141f4dde9074733f926eb2c8b4f2350	/usr/bin/who

Şekil 2 Özet Fonksiyonlarının Hesaplanması

```

1 root:x:0:0:root:/root:/bin/bash
2 daemon:x:1:1:daemon:/usr/sbin:/usr/sbin/nologin
3 bin:x:2:2:bin:/bin:/usr/sbin/nologin
4 sys:x:3:3:sys:/dev:/usr/sbin/nologin
5 sync:x:4:65534:sync:/bin:/bin/sync
6 games:x:5:60:games:/usr/games:/usr/sbin/nologin
7 man:x:6:12:man:/var/cache/man:/usr/sbin/nologin
8 lp:x:7:7:lp:/var/spool/lpd:/usr/sbin/nologin
9 mail:x:8:8:mail:/var/mail:/usr/sbin/nologin
10 news:x:9:9:news:/var/spool/news:/usr/sbin/nologin
11 uucp:x:10:10:uucp:/var/spool/uucp:/usr/sbin/nologin
12 proxy:x:13:13:proxy:/bin:/usr/sbin/nologin
13 www-data:x:33:33:www-data:/var/www:/usr/sbin/nologin
14 backup:x:34:34:backup:/var/backups:/usr/sbin/nologin
15 list:x:38:38:Mailng List Manager:/var/list:/usr/sbin/nologin
16 irc:x:39:39:ircd:/var/run/ircd:/usr/sbin/nologin
17 gnats:x:41:41:Gnats Bug-Reporting System (admin):/var/lib/gnats:/usr/sbin/nologin
18 nobody:x:65534:65534:nobody:/nonexistent:/usr/sbin/nologin
19 systemd-timesync:x:100:101:systemd Time Synchronization,,,:/run/systemd:/usr/sbin/nologin
20 systemd-network:x:101:103:systemd Network Management,,,:/run/systemd:/usr/sbin/nologin
21 systemd-resolve:x:102:104:systemd Resolver,,,:/run/systemd:/usr/sbin/nologin
22 messagebus:x:103:106:/:/nonexistent:/usr/sbin/nologin
23 syslog:x:104:110:/:/home/syslog:/usr/sbin/nologin
24 _apt:x:105:65534:/:/nonexistent:/usr/sbin/nologin

```

Şekil 3 passwd dosya içeriğinin görüntülenmesi

5. Bulgular ve Çıkarımlar

Literatür taraması ve araştırmalar sonucunda, olay müdahale planının bilgi güvenliği tehditlerinin tespit edilmesi ve ortadan kaldırılması için çok kritik olduğu görülmüştür. Olay müdahalesi, teknik sorunlar dışında birçok yönü içerdiği anlaşılmıştır. Bir olay müdahale ekibinin dikkate alması gereken yönetsel, yasal ve sosyal sorunlarının olduğu görülmüştür. Bu sorunların temelinde incelemenin pratik ve hızlı bir şekilde yapılması gerektiği değerlendirilmiştir. Bu sorunların başında gelen Linux sistemlerin incelenmesi yönüne çözüm üretilmiştir. Üretilen çözümde zamandan ve maliyetten kazanım mevcuttur. Önerilen script sayesinde kurum içerisinde var olan bir uzak yönetim çözümü ile Linux sistemlerinin analizi oldukça kolay hale gelmektedir.

6. Değerlendirme ve Sonuç

Yapılan çalışmalar sonucunda önerilen çözümün adli bilişim ve olay müdahalesi süreçlerinde katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Kurumların bu çözüm sayesinde olay müdahale süreçlerini daha efektif yönetebileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca bu çözüm yöntemi sektörde bu alanda çalışan araştırmacılar tarafından da kullanıldığı ve başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Chen J, Su C, Yeh K-H, Yung M (2018) Special issue on advanced persistent threat. vol 79. Elsevier,
- [2] Niakanlahiji A, Wei J, Chu B-T A natural language processing based trend analysis of advanced persistent threat techniques. In: 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2018. IEEE, pp 2995-3000
- [3] Ahmad A, Webb J, Desouza KC, Boorman J (2019) Strategically-motivated advanced persistent threat: Definition, process, tactics and a disinformation model of counterattack. Computers & Security 86:402-418
- [4] Auty M (2015) Anatomy of an advanced persistent threat. Network Security 2015 (4):13-16
- [5] Hekim H, BAŞIBÜYÜK O (2013) Sİber Suçlar ve Türkiye’NİN Sİber Güvenlik Politikalari. Uluslararası Güvenlik ve Terörizm Dergisi 4 (2):135-158
- [6] Karantzis G, Patsakis C (2021) An empirical assessment of endpoint detection and response systems against advanced persistent threats attack vectors. Journal of Cybersecurity and Privacy 1 (3):387-421
- [7] Javed AR, Ahmed W, Alazab M, Jalil Z, Kifayat K, Gadekallu TR (2022) A Comprehensive Survey on Computer Forensics: State-of-the-art, Tools, Techniques, Challenges, and Future Directions. IEEE Access
- [8] Garfinkel SL (2010) Digital forensics research: The next 10 years. digital investigation 7:S64-S73
- [9] Ling T The study of Computer forensics on Linux. In: 2013 International Conference on Computational and Information Sciences, 2013. IEEE, pp 294-297
- [10] Reddy N (2019) Linux forensics. In: Practical Cyber Forensics. Springer, pp 69-100
- [11] Nikkel B (2021) Practical Linux Forensics: A Guide for Digital Investigators. no starch Press,
- [12] Reith M, Carr C, Gansch G (2002) An examination of digital forensic models. International Journal of Digital Evidence 1 (3):1-12
- [13] Henkoğlu T (2020) Adli bilişim: Dijital delillerin elde edilmesi ve analizi. Pusula,

- [14] Schneier B (2014) The future of incident response. *IEEE Security & Privacy* 12 (5):96-96
- [15] Casey E (2009) *Handbook of digital forensics and investigation*. Academic Press,
- [16] Sabillon R (2022) *Cybersecurity Incident Response and Management*. In: *Research Anthology on Business Aspects of Cybersecurity*. IGI Global, pp 611-620
- [17] Andrade R, Torres J, Cadena S Cognitive security for incident management process. In: *International Conference on Information Technology & Systems*, 2019. Springer, pp 612-621
- [18] Thompson EC (2018) *Cybersecurity incident response: How to contain, eradicate, and recover from incidents*. Apress,
- [19] Altheide C, Carvey H (2011) *Digital forensics with open source tools*. Elsevier,
- [20] Amarchand G, Munn K, Renicker S A Study on Linux Forensics.
- [21] Carrier B (2005) *File system forensic analysis*. Addison-Wesley Professional,
- [22] Clarke GE (2018) *CompTIA security+ certification study guide (exam SY0-501)*. McGraw-Hill Education,
- [23] Jones KJ, Bejtlich R, Rose CW (2005) *Real digital forensics: computer security and incident response*. Addison-Wesley Professional,
- [24] Easttom C (2017) *System forensics, investigation, and response*. Jones & Bartlett Learning,
- [25] Sachowski J (2018) *Digital Forensics and Investigations: People, Processes, and Technologies to Defend the Enterprise*. CRC Press,
- [26] Leigland R, Krings AW (2004) A formalization of digital forensics. *International Journal of Digital Evidence* 3 (2):1-32
- [27] Patil DN, Meshram BB (2016) Digital forensic analysis of ubuntu file system. *Int J Cyber Secur Digit Forensics* 4 (5):175-186
- [28] Patil DN, Meshram BB An Evidence Collection and Analysis of Ubuntu File System.
- [29] Yang K-p, Wallace K (2011) File Systems in Linux and FreeBSD: A Comparative Study. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences* 2 (9)
- [30] Chen W, Liu C-m The analysis and design of Linux file system based on computer forensic. In: *2010 International Conference On Computer Design and Applications*, 2010. IEEE, pp V2-60-V62-64
- [31] Choi J, Savoldi A, Gubian P, Lee S, Lee S Live forensic analysis of a compromised linux system using LECT (Linux Evidence Collection Tool). In: *2008 International Conference on Information Security and Assurance (isa 2008)*, 2008. IEEE, pp 231-236
- [32] Grundy B (2014) *Advanced artifact analysis*. European Union Agency for Network and Information Security

EDR Ürünleri Kullanılarak Uç Nokta Görünürlüğünün Sağlanması

Kevser Mehveş DAĞCI^{1*}, Şengül DOĞAN², Türker TUNCER³

¹Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Merkez, Elazığ, Türkiye

²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Adli Bilişim Mühendisliği, Merkez, Elazığ, Türkiye

³Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Adli Bilişim Mühendisliği, Merkez, Elazığ, Türkiye

*¹ dagcikevser@gmail.com, ² sdogan@firat.edu.tr, ³ turkertuncer@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 30/04/2022;

Kabul/Accepted: 07/09/2022)

Öz: Günümüzde büyük kurum ve kuruluşlara yapılan siber saldırılar gün geçtikçe artmaktadır. Meydana gelen siber saldırılar sonucunda; kurumlar maddi ve itibar kaybı gibi büyük kayıplar yaşamaktadırlar. Siber saldırıların geç tespiti, analistlerin yetkinliği ve verilerin ayrıştırılma sürecinde yaşanan aksaklıklar saldırıların zarar boyutunu arttırmaktadır. Bu sebepten dolayı meydana gelen saldırıların erken tespiti önem arz etmektedir. Bilgi güvenliğine aykırı durumların yaşanmaması ve saldırıların erken tespit edilebilmesi için kapsamlı yapılara ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda uç nokta saldırı tespit sistemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan uç nokta (endpoint) tespiti ve cevaplama (response) yazılımlarının kullanım alanlarına ve özelliklerine yer verilmiştir. Sonuç olarak uç nokta tespiti ve cevaplama sistemlerinin (Endpoint Detection and Response –EDR–) görünürlüğünün artırılmasının sağlayacağı avantajlar sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Uç nokta güvenliği, Uç nokta ajanları, Çoklu müdahale işlemleri, Olay müdahale, Uç nokta analizi

Providing EndPoint Visibility using EDR Products

Abstract: Today, cyber-attacks on large institutions and organizations are increasing day by day. As a result of cyber-attacks; Institutions experience great losses such as financial and reputational loss. The late detection of cyber-attacks, the competence of analysts and the disruptions in the data separation process increase the damage size of the attacks. For this reason, early detection of attacks is important. Comprehensive structures were needed to prevent situations against information security and to detect attacks early. In line with this need, endpoint intrusion detection systems have been developed. In this study, the usage areas and features of the commonly used endpoint detection and response software are given. As a result, the advantages of increasing the visibility of endpoint detection and response systems (Endpoint Detection and Response -EDR-) are presented.

Key words: Endpoint Security, Endpoint Agent, Multiple intervention operation Incident response, Endpoint analysis

1. Giriş

Günümüzde teknolojinin ilerlemesi ve gelişmesine bağlı olarak büyük ve kurumsal şirketlerce uç nokta sistemlerin güvenliğinin sağlanması çok önemli bir konu haline gelmiştir [1]. Özellikle uzaktan çalışmanın daha da yaygın hale gelmesi ile birlikte uç nokta güvenliği siber saldırılar için daha büyük önem kazanmaktadır. Saldırı yöntemleri gittikçe değişmekte ve uç nokta güvenliğine yönelik tehdit ve saldırılar daha yeni, yakalanması zor bir hal almaktadır [2]. Bir uç sisteminin güçlü yönlerinden biri, artık bir IP adresi alınabildiği dünyanın herhangi bir yerinde bir uç noktayı konuşlandırabilmektir. Bu güç, güvenlik açısından da bir zayıflık teşkil etmektedir. Güvenlik araştırmacıları ve mühendisler bu saldırıların önüne geçmek için son nokta korumasına yönelik uç nokta tespit müdahale ürünleri geliştirmektedirler. Herhangi bir veri bir saldırgan tarafından yerel olarak ya da uzaktan erişilirse veya değiştirilirse etkisi çok yüksek olabilir [3]. Uç nokta güvenliği, ağ üzerinde bulunan tüm varlıkları güvence altına almak için tasarlanmış birçok farklı donanım sistemini, yazılım programını ve diğer araçları kapsayabilen bir terimdir.

Uç nokta güvenliği sağlamaya yönelik geliştirilen bu sistemler, uç nokta verilerinin sürekli olarak izlenmesi ve toplanmasını, kural tabanlı olarak otomatik yanıt ve analiz özelliklerini birleştiren çözümlerdir. Böylece uç noktalar üzerindeki görünürlük artmıştır [4].

Tüm uç nokta algılama ve yanıtlama sistemleri aynı şekilde çalışmaz ve aynı yetenek çeşitliliğine sahip değildir. Bununla birlikte, tüm uç nokta algılama ve müdahale araçları, aynı amaç için aynı temel işlevleri yerine getirir. Siber güvenlik dünyası çok geniş ve uçsuz bir alandır. Bu alan içerisinde her probleme yönelik her gün yeni çalışmalar yapılmakta ve ürünler geliştirilmektedir. Bu çalışma ile dünya üzerinde yaygın olarak kullanılan

* Sorumlu yazar: dagcikevser@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-2429-486X, ² 0000-0001-9677-5684, ³ 0000-0002-1425-4664

bir EDR ürünü üzerinden uç noktadaki görünürlüğünün sağlanma adımları açıklanmıştır. Herhangi bir güvenlik ihlaline karşı zaman kaybetmeden, birden fazla makine üzerinde daha hızlı ve efektif çözümler üretilebileceğine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, bu çalışma büyük organizasyonlar görev yapan siber güvenlik ve adli bilişim mühendisleri için iyi bir el kitabı özelliği taşımaktadır.

2. VMware Carbon Black Uç Nokta Tespiti ve Cevaplama

Carbon Black (Bit9 ve Bit9+ Carbon Black), Massachusetts merkezli bir siber güvenlik şirkettir. Şirket, zararlı davranışları tespit etmek ve kötü amaçlı dosyaların bir kuruluşa saldırmasını önlemeye yardımcı olmak için tasarlanmış uç nokta güvenlik hizmeti sağlamaktadır. 2019 Ekim ayında şirket, VMware tarafından satın alınmıştır [5].

Carbon Black EDR ürünü ile uç nokta görünürlüğünü ve güvenliğini sağlamaya yönelik olarak, ajan kurulan bilgisayarlar üzerinde meydana gelen kötücül davranışları analiz edebilir, çalıştırılan ve silinen zararlı dosyaları tespit edilerek incelenmektedir.

2.1. Uç Nokta Güvenliği Riskleri

Son noktada ihlallerle en iyi nasıl başa çıkılacağına karar vermek için öncelikle bunların oluşturduğu gerçek riskleri anlamak önemlidir. İlk olarak korumasız cihazlar, uzaktaki çalışanlar tarafından veya bir BYOD anlaşmasının parçası olarak kullanılanlar olma eğilimindedir. Bu kısmen güncel olmayan antivirüs veya İnternet güvenlik yazılımı nedeniyle daha düşük bir güvenliğe sahip oldukları anlamına gelir. Ek olarak, sahte veya lisanssız çözümler çalıştırabilecekleri veya güvenilmeyen bir ağdan çalıştıkları için daha yüksek bir riske sahiptirler [6]. Uç nokta görünürlüğü sağlanması ile tehdit avı ve olay tepki süresi azalarak saldırı önleme becerileri artmaktadır [7]. Uzaktan çalışan kullanıcı bilgisayarlarında olası veri sızıntısını engellemek amaçlı uç nokta seviyesinde veri sızıntısını önlemeye yönelik güvenlik önlemleri alınmalıdır [8].

3. Uç Nokta Tespiti Ve Cevaplama (Endpoint Detection And Response)

Uç nokta güvenliği sağlama çözümü (EDR), güvenlik ekiplerine uç noktaları sürekli olarak izleme ve olaylara anında müdahale için merkezi bir platform sağlamaktadır. Olayların nereden yayıldığı, nasıl ilerlediği ve kaynağını bulup çözümlendirme gibi kritik soruların cevabını "Incident Investigation" yaparken bulabilmemize olanak tanımaktadır. EDR ürünleriyle, kısa süre içerisinde tehdit edilen ya da saldırıya uğrayan makineyi tespit etme, önlem alma ve iyileştirme gibi çözümler sağlanabilmektedir.

EDR platformları, meydana gelebilecek zararlı aktiviteleri daha öncesinden tespit edilmesine olanak sağlayan ve sürekli izleme özelliğine sahip uç nokta ajanlarından oluşmaktadır. EDR araçları, kuruluştaki her ana bilgisayarda sistem günlüklerini toplar [9]. Bu ajanlar sayesinde, sistemler üzerinde görünürlük artırılır ve anlık müdahale işlemleri gerçekleştirilerek olayın zarar boyutu minimum seviyeye indirilmektedir.

EDR sistemleri, zararlı yazılımlara karşı kullanılan en önemli sistemlerden birisidir. Bununla birlikte, kötü amaçlı yazılım tespiti, özellikle yeni çıkan zero day attacks (sıfırıncı gün saldırısı) gibi kötü amaçlı yazılımların tespiti artık inanılmaz derecede zor ve giderek daha karmaşık hale gelmiştir. Bu tür saldırıların tespiti için davranışsal analiz, zeki sistemler, trafik analizi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak, bu önlemler ve gelişmiş yöntemler dahi, tüm zararlı yazılımların engellenmesini sağlayamamaktadır. SANS Enstitüsünün raporuna göre, siber saldırıların % 50'den azının antivirüs yazılımı tarafından tespit edildiği sonucuna varmıştır [6].

Antivirüs yazılımlarının aksine, EDR platformları yeni tehditleri tespit etmek için virüs imzalarına güvenmez. Bunun yerine EDR araçları, kötü niyetli siber aktörlerin varlığını tespit etmek için uzlaşma göstergeleri (IOC), saldırı göstergeleri (IOA) veya anormal süreç davranışlarını proaktif olarak arama yaparak tespit etmektedirler. Eski anti-virüs araçlarını atlatan, tehdit avlama olarak da bilinen tehditleri proaktif olarak aramak, tehdit aktörlerinin bir ağda tespit edilmeden kalma sürelerini azaltacaktır. Tehdit avcılığı, bir analistin bakmak için siber tehdit istihbarat yayınlarını kullanarak yeni tehditlere ayak uydurmasını gerektirir [11].

Bir kuruluşu hedef alabilecek yeni ortaya çıkan tehditler için uç nokta tespiti ve yanıtı araçları, kötü amaçlı yazılımların davranış analizine ve kötü niyetli kullanıcı etkinliğine dayalı olarak analistler tarafından oluşturulan önceden belirlenmiş bir dizi kuralı kullanarak kötü niyetli faaliyetlere tepki verebilir [11].

4. EDR Ürünleri Çalışma Metodolojisi

EDR, son kullanıcı sistemleri üzerindeki ağ olaylarını ve kullanıcı aktivitelerini sürekli olarak izlemek için kullanılmaktadır. EDR üzerinde tespit edilen veriler merkezi bir veri tabanına kaydedilir. EDR araçları ile geçmiş bir olayı araştırmak ve tanımlamak için veriler analiz edilebilir veya benzer tehditleri aramak ve bunlara karşı önlem almak için kullanılabilir. Herhangi bir tehdit unsuru oluşması durumunda, EDR aracı son kullanıcıyı uyarabilir ve bloklama işlemi gerçekleştirebilir. EDR ürünleri ile bir veya birden fazla makine üzerinde işlemler gerçekleştirilebilir [12].

EDR sisteminin tüm uç noktalarda çalışabilmesi için, izleme yapılacak sistemlere EDR ajanlarının yüklenmesi gerekmektedir. Bu yükleme genellikle uç noktaya dağıtılan bir yazılım paketi biçimindedir. EDR ajanları sistemler üzerinde tek tek kurulabildiği gibi toplu olarak da kurulabilmektedir. Toplu kurulum için kuruluş içerisinde kullanılan Active Directory yönetim yazılımları gibi çözümler kullanılmaktadır.



Şekil 1 EDR Ürünü Çalışma Yapısı

Adım 1: Uç nokta cihazlara ajan yazılımı dağıtımını gerçekleştirilir. Bunun için öncelikli olarak uç nokta sistem üzerine yüklenen dosya çalıştırılarak veri akışı sağlayacak bir ajan kurulur. Yüklenen ajan, bilgisayarı izler ve tüm aktiviteleri kaydeder.

Adım 2: Kullanıcı ve varlık davranışı analizi (UEBA), kullanıcıların normal davranışlarını dikkate alan bir tür siber güvenlik sürecidir. Buna karşılık, bu "normal" kalıplardan sapmalar olduğunda herhangi bir anormal davranış veya durumu tespit ederler. Örneğin bir kullanıcı her gün düzenli olarak 20 MB dosya indiriyorsa ancak aniden gigabaytlarca dosya indirirse, sistem bu anormalliği algılayarak hemen uyarabilir. EDR ürün yapısında da bu özellikler etkinleştirilmiştir. EDR ajanında aktif olan bu özellik ile kullanıcı davranışı analiz edilmektedir.

Adım 3: EDR uç noktadaki etkinlikleri sürekli olarak izler ve analiz eder. Bilgileri bir bildirim ile uyarı vererek doğrudan bir gösterge panosuna bildirir. Ana sayfada oluşan alarmların göstergeleri yer almaktadır.

Adım 4: EDR uç noktada potansiyel olarak kötü niyetli anormal davranış oluşumunu algılar. Gelişmiş algoritmalar, saldırı sırasında sırayla yürütülen hizmetlerin ve işlemleri adım adım kaydeder.

Adım 5: Olayı başlatan süreci göstermek için bir görselleştirme veya süreç haritası oluşturulur. EDR ajanı bulunan makine üzerinde çalışan işlemlerin (processlerin) çalışma/çalıştırılma zaman çizelgesi bir görselle gösterilmektedir.

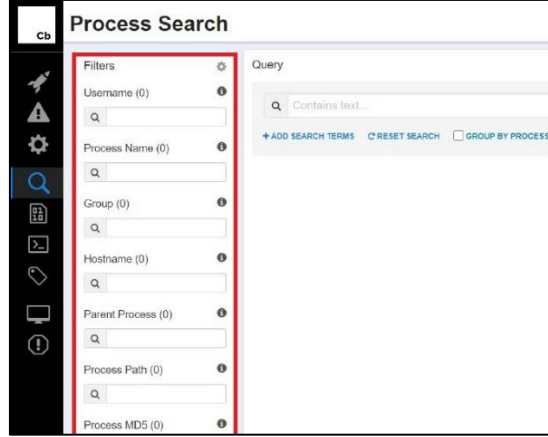
Adım 6: Bir güvenlik analisti veya mühendis, ilgili alarmların uyarı mesajını alır.

Adım 7: Süreç analiz edilir ve gerekli çözümler sağlanır.

Bugün piyasada yer alan EDR çözümlerinin temel işlevleri performansları bakımından birbirleriyle benzerlik göstermektedir. Satıcılar arasındaki en büyük fark, bilgileri görsel olarak nasıl sundukları ve analist için sağlayabildiği kullanım kolaylığıdır.

4.1. İşlem arama

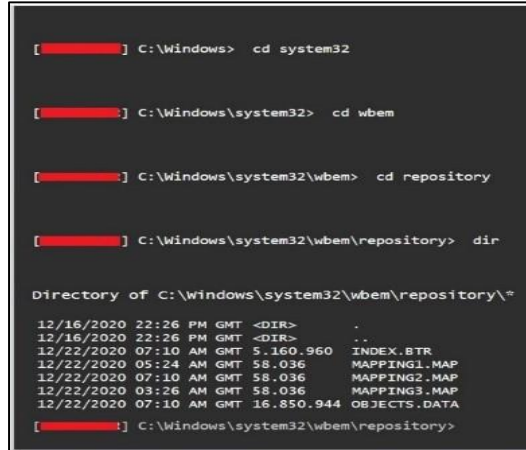
Process Search (işlem arama) işlemi ile sistemler üzerinde meydana gelen tehditlerin kök nedeninin tespiti için, ilgili zararlı aktiviteler tüm uç noktalarda anlık olarak aratılabilir. Örneğin, şüpheli yazılım davranışını bildiren bir alarm veya bir istihbarat raporu alındığında, uç nokta ajanları, sorunları analiz etmek ve çözüm bulmak için verileri otomatik olarak toplamaktadır. Ayrıca şüpheli dosyanın başka hangi makineler üzerinde çalıştığı ve belirlenen zaman dilimi aralığında, şüpheli işlemlerin ve diğer işlemlerin sayıları görüntülenebilir.



Şekil 2 Aktivite Sorgulama Arayüzü

4.2. Canlı İşlem

Canlı işlem (Live Response), Carbon Black (CB) Response sensörüne bağlı herhangi bir makineye doğrudan erişim için bir komut satırı ara yüzü açar. Live Response işlemi ile adli bilişim mühendisleri, güvenlik analistleri uzaktan canlı araştırmalar gerçekleştirebilir, devam eden saldırılara müdahale edebilir ve uç nokta tehditlerini anında düzeltebilmektedir. Örneğin, sensör bulunan bir makinede dizin içeriğini görüntülemesine, işlemleri sonlandırılmasına ya da yönetilen bilgisayarlardan dosya almasına olanak tanımaktadır.



Şekil 3 Canlı sistem Arayüzü

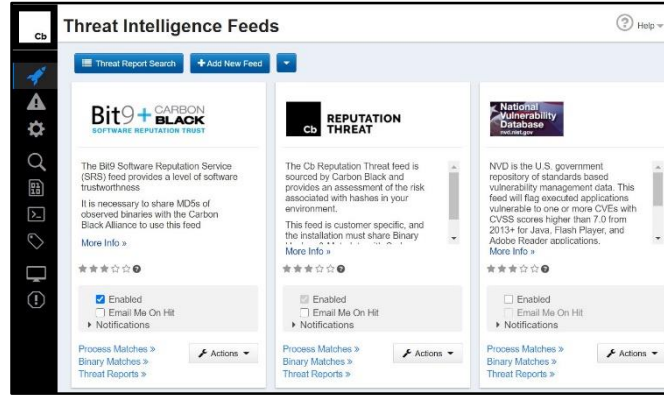
4.3. Tehdit istihbaratı akışları

Tehdit istihbaratı akışları (Threat Intelligence Feeds), bölümü, uç nokta üzerinde yer alan tehditlerin algılanmasını, doğrulanmasını, görünürlüğünü ve analizini geliştirmek için CB sunucusunda etkinleştirilebilen tehdit istihbaratı besleme alanını açıklamaktadır.

Bu beslemeler çeşitli kaynaklardan gelmektedir. Bu kaynaklar:

- Yönetilen güvenlik hizmetleri sağlayıcısı ve bilgi çıkarımı (MSSP / IR) ortakları
- Müşteriler
- Açık kaynak Platformlar

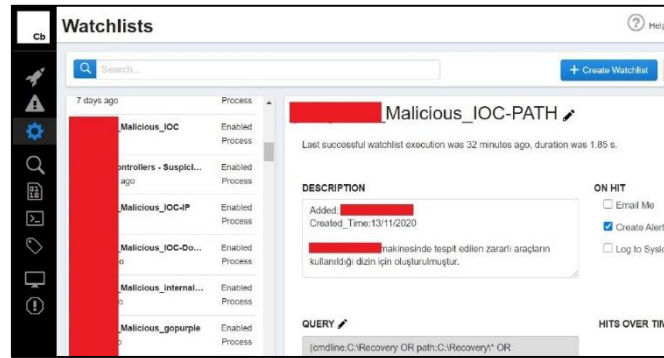
Bu bölüm ile uç nokta için tehdit içerebilecek kurallar seçilerek, uç nokta üzerinde oluşabilecek kötücül bir davranış da alarm üreterek hızlı sonuç alınması sağlanabilmektedir. Threat Intelligence Feeds özelliği ile aynı zamanda kurumlar için önem arz etmeyen beslemeler kapatılabilmektedir.



Şekil 4 Threat Intelligence Arayüzü

4.4. İzleme listesi

İzleme Listeleri olarak da adlandırılan Watchlists bölümünde, Threat Intelligence alanında yer almayan, çalışan kuruma özel olarak güvenlik analistlerinin kendi kurallarını oluşturabileceği alan yer almaktadır. Bu kurallar sayesinde oluşabilecek güvenlik riskleri önceden tespit edilebilmektedir.



Şekil 5 Kural yazma arayüzü

5. Bulgular ve Çıkarımlar

Bu çalışma ile EDR sistemleri detaylı bir şekilde anlatılmış ve bir yazılım üzerinden örneklenmiştir. Siber saldırıların arttığı bu dönemde, kurum ve kuruluşların hem itibar hem de veri güvenliğini korumaya yönelik olarak gerekli yapılandırmaları yapmaları gerekmektedir. Kötücül durumlarla karşı karşıya gelindiğinde gerekli analizlerin zaman kaybetmeden yapılabilmesi için uç noktalarda güvenliğin artırılması gerekliliği görülmüştür. Uç nokta yazılımları sayesinde birden fazla makine üzerinde zaman kaybetmeden hızlı bir şekilde tespit ve analiz çalışması yapılabildiği bu sayede güvenliğin ve görünürlüğünün artırdığını göstermiştir.

6. Sonuçlar

Yapılan incelemeler sonucunda uç nokta güvenliğinin sağlanmasının bilgi güvenliğinin sağlanması için çok önemli bir parametredir. Uzaktan çalışmanın artması ve daha da yaygınlaşması ile beraber evden çalışmaya devam eden çalışanlar, siber tehditlere karşı tesis içi çalışanlarla aynı derecede korunmayabilir ve en son güncellemeleri ve güvenlik yamalarını içermeyen cihazları kullanıyor olabilmektedirler. Ek olarak, siber güvenlik çalışanlarının bilgi ve tecrübe eksikliği (insan faktörü) bilgi güvenliğinin sağlanamamasında çok önemli bir faktör olarak görülmektedir. Tüm bu faktörler, kuruluşu ve çalışanlarını siber güvenlik risklerine maruz bırakmaktadır. Bu durum ile siber suçluların kurumsal ağa saldırarak için çalışanı bir basamak olarak kullanabileceği ve çalışanın bilgisayarının kullanılmasını önleyebilmesi için de kullanılan uç noktaların güvenliğinin sağlanmasının gerekli bir hal aldığı görülmüştür.

Elde edilen bulgular sonucunda, kurum ve kuruluşların gerekli yatırımları yaparak uç nokta güvenliğini sağlamaya yönelik çözümler tercih etmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

- [1] Internet: Intel, <https://www.intel.com.tr/content/www/tr/tr/business/enterprise-computers/resources/endpoint-security.html>, 05.09.2022.
- [2] Internet, Morphisec, <https://blog.morphisec.com/endpoint-security-is-harder-than-ever>, 05.09.2022
- [3] Sivaraman Eswaran, Aruna Srinivasan, Prasad Honnavalli, “A threshold-based, real-time analysis in early detection of endpoint anomalies using SIEM expertise”, 2021.
- [4] Internet: VMware, <https://www.vmware.com/topics/glossary/content/endpoint-detection-and-response-edr.html>, 05.09.2022.
- [5] Internet: VMware Carbon Black, https://en.wikipedia.org/wiki/VMware_Carbon_Black, 05.09.2022.
- [6] Patrick J. Walsh, “Network Security”, 2009.
- [7] Internet: ESET, https://www.eset.com/fileadmin/ESET/TR/Pages/Business/Bundles/ESET_PROTECT_Enterprise_TR_A4.pdf, 05.09.2022.
- [8] Internet: Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi (2020): https://cbddo.gov.tr/SharedFolderServer/Genel/File/bg_rehber.pdf, 05.09.2022.
- [9] WU Hassan, A Bates, D Marino, “Tactical Provenance Analysis for Endpoint Detection and Response Systems”, 2020.
- [10] HV Strong, R Permeh, SJ Oswald, “Endpoint Detection And Response System With Endpoint - Based Artifact Storage”, 2020.
- [11] Terry Liggett, “Evolution Of Endpoint Detection And Response Platforms”, 2018.
- [12] Cezar, A., Cavusoglu, H., & Raghunathan, S. Sourcing, “information security operations: The role of risk interdependency and competitive externality in outsourcing decisions”, Production and Operations Management, 2017.

Spor Biyomekaniğinde Performans Analizi için Hareket Yakalama Teknolojisi Uygulamaları

Kübra Elif TOZKOPARAN¹, Özgür KARADUMAN^{2*}

^{1,2} Yazılım Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ kubraeliftozkoparan@gmail.com, ^{2*} okaraduman@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/05/2022;

Kabul/Accepted: 11/07/2022)

Öz: Bu çalışmada, spor performanslarında hareket yakalama teknolojisi kullanılarak sporcuların hareketlerini gerçek zamanlı olarak izleme ve kaydetme yoluyla fiziksel durumu tespit etme, sportif performanslarını belirleme ve yaralanmaları önleme mekanizmaları geliştirme amaçlanmaktadır. Burada, performansın fiziksel yönlerine bakılarak kinetik ve fiziksel performans arasındaki ilişkiyi anlamaya çalışmak için spor biyomekaniği analizi kullanılmaktadır. Biyomekanik analiz, en uygun hareket ve yük analizi için modeller oluşturarak performans üzerinde büyük bir etkiye sahip olma imkânı vermektedir. Dolayısıyla bu analiz, bir beceriyi gerçekleştirmenin en güvenli ve etkili yolunu belirlemek, farklı bir çevreye göre vücudun nasıl hareket ettiği veya nasıl tepki verdiğinin araştırılması için kullanılabilir. Bu çalışmada, spor biyomekaniğinde kullanılan hareket yakalama teknolojilerinin donanım ve yazılım bakımından sınıflandırılması yapılmış; bireysel ve takım sporlarında kullanılan hareket yakalama sistemleri ile ilgili çalışmaların algılayıcılara, denek sayısına, spor türüne göre avantaj ve dezavantajları ortaya koyulmuştur. Ayrıca, spor biyomekaniğinde kullanılan görüntü işleme uygulamaları, optik olan ve optik olmayan sistemler, marker kullanılarak ve marker kullanılmadan yapılan veri toplama işlemleri gibi hususlar ele alınmıştır. Spor biyomekaniğinin etkili ve doğru bir şekilde kullanımının sporcu performansı ve sporcu sağlığı için önemli bir rol oynadığı ve sporcuya özel sistemlerin geliştirilmesinde önemli katkılar sağladığı göze çarpmaktadır. Bu çalışmanın biyomekanik alanındaki çalışmalara, özellikle spor biyomekaniği araştırmalarına önemli ölçüde yol gösterici olacağını düşünmekteyiz.

Anahtar kelimeler: Hareket Yakalama, Biyomekanik, Spor Biyomekaniği, Optik Sistem, İşaretli/İşaretsiz Sistem.

Motion Capture Technology Applications for Performance Analysis in Sports Biomechanics

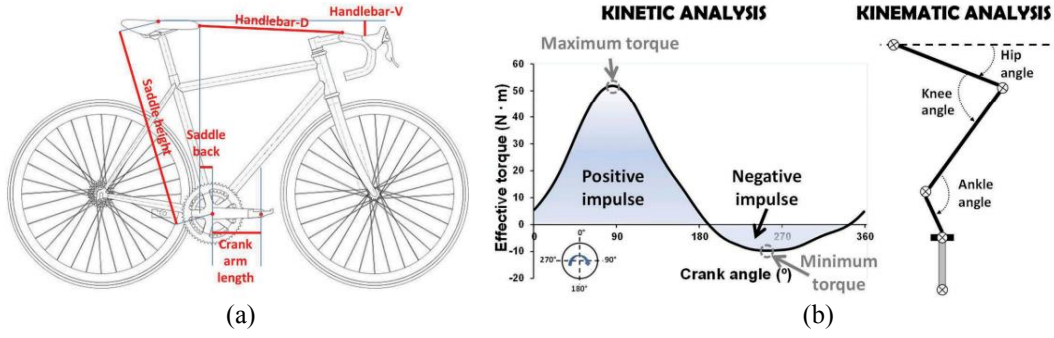
Abstract: In this study, by using motion capture technology in sports performances, it is aimed to develop mechanisms to detect physical condition, determine sports performance and prevent injuries by monitoring and recording the movements of athletes in real time. In this sense, sports biomechanics analysis is used to try to understand the relationship among kinetic and physical performance by looking at the physical aspects of performance. Biomechanical analysis enables to have a major impact on performance by creating models for optimum motion and load analysis. Therefore, this analysis can be used to determine the safest and most effective way to perform a skill, to study how the body moves or responds to a different environment. In this study, motion capture technologies used in sports biomechanics are classified in terms of hardware and software; The advantages and disadvantages of the studies on motion capture systems used in individual and team sports are revealed as regards sensors, the number of subjects, and the type of sport. In addition, matters such as image processing applications used in sports biomechanics, optical or non-optical systems, and data collection processes with or without markers has been handled. It is salient points that the effective and correct use of sports biomechanics plays an important role in athlete performance and athlete health, and makes significant contributions to the development of athlete-specific systems. We hope that this study can significantly guide studies in the field of biomechanics, especially sports biomechanics.

Key words: Motion Capture, Biomechanics, Sports Biomechanics, Optical System, Marker/Markerless System.

1. Giriş

Spor biyomekaniği, spor bilimlerinin daha geniş alanındaki temel disiplinlerinden biridir. Yarışmalarda yaralanma riskini azaltmak ve spor performansını artırmak amacıyla spordaki temel hareketlerin detaylı analizini içerir [1]. Performansın fiziksel yönlerine bakan araştırmacılar, kinetik ve fiziksel performans arasındaki ilişkiyi anlamaya çalışmak için spor biyomekanik analizini kullanır. Biyomekanik analiz, optimum hareket ve yük analizi için modeller oluşturarak performans üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Bu, bir beceriyi hareket ettirmenin veya gerçekleştirmenin en güvenli veya en etkili yolunu belirlemek ve farklı bir çevrenin vücudun nasıl hareket ettiği veya tepki verdiği üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılır. Spor biyomekaniği üzerine yapılan araştırmalar geleneksel olarak kinetik ve kinematik çalışmalara bölünmüştür. Kinetik, vücuda etki eden kuvvetler ile bu kuvvetlerin hareketi nasıl etkilediği arasındaki ilişkinin incelenmesidir.

* Sorumlu yazar: okaraduman@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1140-5631, ^{2*} 0000-0002-6569-3616



Şekil 1. (a) Bisikletin ana ölçüleri: sele yüksekliği (saddle height), sele arkası (saddle back), krank kolu uzunluğu (crank arm length), selenin üstü ile gidon freni arasındaki dikey mesafe (Handlebar-V) ve selenin önü ile gidonun ortası arasındaki mesafe, (b) Kinetik ve kinematik analiz [2].

Kinematik, yer değiştirme, hız ve ivme içeren nesnelerin hareketinin geometrisidir. Basit bir ifadeyle kinetik, harekete neden olan kuvvetleri (yerçekimi, sürtünme vb.) incelerken, kinematik hareketin kendisini (hız, ivme, vb.) açıklamaktadır. Şekil 1’ de bisikletin ana ölçümleri, kinetik ve kinematik analiz mantığı verilmiştir. Sporunun performans analizi, uzun bir süre boyunca yapılan antrenmanın bir sonucu olarak sporcuların gelişmelerini, fiziksel kondisyon derecesini veya teknik uzmanlığı değerlendirmeyi amaçlar. Optimum performans ve teknik arayan spor eğitmenleri, özel bir antrenman planı geliştirir ve farklı araçlar aracılığıyla sonuçları izler [3]. Tüm bu sistemler, uygun eklem ve segment kinematiğini hesaplamak için vücut segmentlerinin hareketini izlemeyi amaçlar. Ek bilgiler için ise daha ileri işlemlerle ya cihazın kendisinden ya da karmaşık kas ve/veya iskelet modelleri aracılığıyla çıkarılabilir. Spor hareketi için insan hareketini analiz etmenin iki ana yöntemi vardır. İlk yöntem olan video tabanlı yaklaşımda kameralar kullanarak sporcuları antrenman veya yarışma sırasında kaydetmek ve onlara görsel geri bildirim sağlamak söz konusudur [4]. Bu geri bildirim, görev tamamlanır tamamlanmaz veya özel yazılımlar yoluyla ilgi çekici vücut yer işaretlerinin (body landmarks) manuel olarak dijitalleştirilmesinden sonra teslim edilebilir. İkinci yöntem ise, hareket yakalama (motion capture) olarak da bilinen otomatik izleme hareket analiz sistemleri, gecikmeli bir sayısallaştırma süreci olmaksızın insan hareketini gerçek zamanlı olarak izlemeyi ve kaydetmeyi amaçlar [5]. Bu sistemler, kızılötesi ışıkla çalışan çoklu video kameralardan, sahnedeki derinlik bilgisi almak için ek sensörlere sahip tek kameralı sistemlere kadar çeşitli yakalama teknikleri kullanır [6]. Hareket yakalama, bir canlı hareket olayını kaydetme ve zaman içinde bir dizi önemli noktayı izleyerek ve performansın iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) temsilini elde etmek için birleştirerek bunu matematiksel terimlere yazmak işlemidir. Kısacası, canlı performansın dijital performansına dönüşümü mümkün kılan teknolojidir. Biyomekanik, navigasyon, simülasyon, sanal gerçeklik ve animasyon gibi birçok alanda kullanılan hareket yakalama teknolojisinin önemi giderek artmaktadır. Zaman içinde optik, optik olmayan ve işaretli gibi farklı hareket yakalama yaklaşımları geliştirilmiştir. Hareket yakalama, teknik ve yarışma değerlendirmesi gibi çeşitli spor disiplinleri ve etkinliklerinde nicel amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Ayrıca, biyomekanik bir perspektiften hareket yakalama, araştırmacıların insan hareketini yöneten mekanik hakkında bilgi edinmelerine yardımcı olan birincil veri kaynağıdır. Bu çalışma, bir sporunun vücut segmentlerinin küresel konumunu kaydetme yöntemleri ile ilgili çalışmalar içermektedir. Ölçüm sistemlerinin doğruluğu ve pratik kullanımı hakkında bilgi almak yoğun zaman gerektirmektedir. İç mekân/dış mekân gibi farklı konumlar, sıcaklık ve nem gibi hava koşulları, gürültü, saçılma, manyetik bozulmalar gibi ölçüm parazitleri ve alanda kapamaya (occlusion) neden olan engeller gibi çeşitli zorluklarla karşılaşılabilir.

2. Hareket Yakalama Sistemi

Hareket yakalama, kullanıcıların bir nesnenin hareket desenlerini kaydetmesine olanak tanımaktadır. Hareket yakalama sürecinin veya tekniğinin kullanılmasının temel nedeni, gerçekçi sonuçlar elde etmenin kolay olmasıdır. Bir oyun veya filmin yapımcıları, sanatçıların vücudunun ve yüzünün karmaşık hareketini hareketli bir karaktere iletme için hareket yakalama teknolojisi kullanmaktadır. Hareket yakalama teknolojisi kullanan bazı alanlar; Mühendislik, Hukuk, Eğlence Dünyası, Bilgisayar Oyunları, Televizyon ve Sinema Filmleri, Sağlık Sektörü, Spor Mühendisliği, Savunma Sanayidir [8].

2.1. Optik sistemler

Optik algılama, geniş ve değişken bir teknoloji koleksiyonunu kapsar. Görüntü tabanlı sistemler, belirli kemik noktalarıyla hizalanmış, öznenin vücut bölümleri üzerinde önceden belirlenmiş noktaları markerlar ile izlemek için birden fazla kamera kullanarak konumu belirleme işlemidir. Pozisyon, çalışma hacminin birden fazla 3D görüntüsü kullanılarak tahmin edilir. Stereometrik teknikler, her bir görüntüdeki izlenen nesnelere üzerindeki ortak izleme noktalarını ilişkilendirir ve bu bilgiyi, her bir görüntü ve kamera parametreleri arasındaki ilişki ile ilgili bilgilerle birlikte konumu hesaplamak için kullanır. Optik sistemler; pasif marker sistem, aktif marker sistem, zaman modülasyonlu aktif marker sistem, yarı pasif algılanamaz marker sistem ve sualtı hareket yakalama sistemlerinden oluşmaktadır. Markerlar pasif (yansıtıcı) veya aktif (ışık yayan) olabilmektedir [10]. Yansıtıcı sistemler, kamera merceğinin etrafına monte edilmiş kızılötesi (IR) LED' leri, kamera merceğinin üzerine yerleştirilen IR geçiş filtreleri ile birlikte kullanır ve markerlardan yansıyan ışığı ölçer. Darbeli LED' lere dayalı optik sistemler, gövde bölümlerine yerleştirilen LED' lerin yaydığı kızılötesi ışığı ölçer. Ayrıca, doğal nesnelere markerların yardımı olmadan kamerayla izlenmesi mümkündür, ancak genel olarak daha az doğrudur. Büyük ölçüde görüntü tanıma için computer vision tekniklerine dayanır ve genellikle yüksek hesaplama kaynakları gerektirir. Optik sistemler, gerekli bir ışık yolu engellendiğinde kapama (occlusion) sorunlarını içermektedir. Diğer ışık kaynaklarından veya yansımalarından kaynaklanan parazit de sözde hayalet markerlarla sonuçlanabilecek bir sorun olabilir [11].

Tablo 1. Optik sistemlerde kullanılan donanımlar ve özellikleri.

Çalışma No	Sistem, Kamera /Sensör Sayısı, Frekans(fps)	Denek Sayısı	Aktivite	Fonksiyonel Görevler ve Ana Sonuçlar
[12-17]	Qualisys, Vicon, M. Analysis 5, 8, 16 100-250 Hz	10 – 89 arası sporcu 8 erkek + 7 kadın 15 erkek + 15 kadın	Koşu	Ayakkabısız koşmak, ayağın yere vuruş modellerini değiştirmektedir ve diz ekstansiyon eklem momentlerini azaltmaktadır. Ayrıca ön çapraz bağın, ayakkabı giyildiği zamana göre daha az gerilmesine neden olur ve ön çapraz bağ yaralanmasıyla ilgili istenmeyen mekanikleri azaltabilir. Erkek rekreasyonel koşucularda aşıl tendon patolojisi açısından daha büyük risk altında olabilir. Kararlılık, hareketlerin hızı üzerindeki kısıtlamalar değiştirildiğinde düzenlenir, bu nedenle yavaş koşma, hızlı koşmadan daha kararlıdır. Hızlandırılmış koşudaki skapular davranış üst ve alt ekstremite hareketlerine katkıda bulunur ve hızlı bir sprint için tüm vücut dengesinin koordinasyonunu kolaylaştırır. Atel koşullarının kontrol koşulundan daha simetrik bir koşu düzenine yol açtığını ortaya çıkardı.
[18]	Vicon, 8, 200 Hz	15 sporcu	Ragbi	Katılımcıların tee koşullarında değişkenlik olmasına rağmen, tee yanındaki son ayak pozisyonu çok benzer ve tutarlı olabilir.
[19-22]	Vicon, M. Analiz 8 250 – 500 Hz	19 – 40 arası sporcu 10 erkek sporcu	Beyzbol	Oyun boyunca top hızını takip etmek, atıcıya anlık geri bildirim sağlar, bu bilgi top hızını korumak için gereklidir. Adım uzunluğu, top hızını bozmadan fiziksel eforu etkileyebilir, burada kısalan adımlar beyzbol atıcılarında rekabetçi eforlara makul bir şekilde yanıt verebilir. Hızlanma aşaması sırasında etkileşim torkunun kullanımı ile ilişkili sıraya bağlı dönüş eksenini değişiklikleri, topun serbest bırakılmasında el hızının üretiminde önemli bir faktör olabilir.
[23]	Qualisys, 7, 100 Hz	9 erkek sporcu	Cross-country sky	Çift kutuplama, esas olarak ters sarkaç veya yaylı kütle tipi ile karakterize edilen, diğer birçok bacaklı karasal hareket biçiminden farklı benzersiz bir hareket modelini içerir.
[24, 25]	Optitrack, Vicon 8, 10, 12 100 – 120 Hz	1 – 13 arası sporcu	Yürüyüş	Yürüme sırasında yürüme hızı, yüzey eğimi ve bireylerin boyuydu. Optitrack sistemi, daha eski ve hala yaygın olarak kullanılan bir sistemle karşılaştırılabilir, işaretçi izleme doğruluğu ve güvenilirliği sunabilen düşük maliyetli bir 3D hareket analiz sistemi sağlar.
[26]	Vicon, 8, 250 Hz	8 erkek sporcu	Masa Tenisi	Raket kütlesi ve hızı, masaya yakın oynamanın ve ralli hızını hızlı hale getirmenin avantajlarından birini vurgular.
[27]	Qualisys, 8, 250 Hz	8 erkek + 8 kadın sporcu	Eskrim	Kadınlar, hamlenin sonunda daha fazla diz abduksiyonu ve daha fazla kalça adduksiyonu ürettiler, bu nedenle eskrim hamlesi sırasında üretilen daha fazla diz abduksiyonu ve kalça adduksiyonu nedeniyle daha fazla diz yaralanması riski altında olabilirler.
[28-32]	Vicon, Qualisys 8, 10 250-500 Hz	50-285 arası, 34 erkek sporcu	Golf	Kulüp başı sunumundaki farklılıklar, topun fırlatma koşullarında değişikliklere neden oldu. Darbe konumu değişkenliği, fırlatma açısının ve toplam mesafe değişkenliğinin belirlenmesinde rol oynar. Dirsek - omuz hareketi ve gövde tilt analizi, Sagittal ve koronal düzlemde dirsek açısı tahmini. Bilek, dirsek ve omuz hareket tahmini. Üst uzuv hareket analizi

[33-48]	Derinlik Kamera (Leap Motion Controller) , Çoklu Kamera (Qualisys, Vicon, BTS SMART-D) 12, 24 240-300 Hz	8-20 arası, 28 kadın sporcu	Tenis	Tenis servisi sırasında uygun olmayan enerji akışı ve geçici mekanikler top hızını azaltabilir, üst ekstremitte eklem kinetiklerini artırabilir ve bu nedenle muhtemelen üst ekstremitenin aşırı kullanım yaralanmalarını artırabilir. Pelvisin tepe açılma hızları, üst gövde, gövde rotasyonları ve omuzlar arasındaki süre, üst ekstremitte eklem kinetiği ve top hızı ile önemli ölçüde ilişkilidir. Maksimum açılma hızların zamanlamasındaki tutarlılık, ileri düzey tenisçilerin kas yorgunluğuna rağmen servis tekniklerinin zamansal modelini koruyabildiklerini göstermektedir. Sınırlı ölçüm alanında sadece pozisyon tespiti yapılmıştır; tıkanıklıklar ve işlem sonrası gecikme mevcuttur, hassasiyet 1mm'den küçüktür ve sistem kablosuzdur.
[49-54]	Vicon, 8, 100 Hz	3 erkek sporcu	Kürek	Bir hareket edinim sistemi, bir EMG sistemi, bir ergometre ve bir kalp atış hızı monitörü ile kürekçilerin disiplinler arası bir araştırmasının geliştirilmesi odaklı çalışılmıştır.
[55]	Vicon, Optitrack 8, 10 250Hz	8 erkek sporcu	Bowling	Gövde momentlerinde ve lomber omurga kuvvetinde iki tür kriket bowling tekniği arasında anlamlı bir fark bulunmadı, bu nedenle max-gövde tekniği bel yaralanma risklerini artırmayabilir.
[56]	M. Analysis, 10, 200 Hz	4 sporcu	Buz Hokeyi	Lineer ve açılma hızları, doğruluk ve pakın devrilmesi, çıplak hokey sopası/normal hokey eldivenleri ve kalan üç kavrama koşulu arasında farklı olmadığı görüldü.
[57]	GoPro, 2, 60 Hz	2 SCF	Yüzme	Aksiyon kameraları, uygun bir kalibrasyon metodolojisi (kullanışlı araçlar ve paket ayarı) aracılığıyla doğru bir metrik sistem haline getirilebilir.
[58, 59]	Vicon, Optitrack 8, 12 100Hz	1-3 arası SCP	Laboratuvar	NaturalPoint OptiTrack kamera sistemi, biyomekanik ve diğer ilgili alanlarda kesinlikle kullanılabilir güvenilir bir çalışma sistemidir. Düşük maliyetli hareket yakalama sistemleri genel kullanım için yeterince doğrudur; bununla birlikte, Vicon sistemi, çok daha kısa etiket etiketleme süresi ile NaturalPoint sisteminden daha iyi performans gösterdi.
[60- 62]	Vicon, Optitrack, Qualisys 10, 8, 6 100-250 Hz	31-40 arası erkek sporcu, 16 kadın sporcu	Atlama	Kol sallama, daha büyük net eklem momentleri ve segment ivmeleri ile ilişkili olan ve hepsi birlikte daha iyi dikey sıçrama performansına katkıda bulunan bir proksimalden distale stratejinin kullanımını teşvik eder. Atlama minderi sistemleri, atlama yüksekliğindeki değişiklikleri izlemek için güvenilir ölçümler sağlar. Ayak uzunluğu, hareket yakalama ile önemli ölçüde daha yüksek atlama yüksekliğini açıklayabilir.
[63-65]	Qualisys, 8, 240 Hz	8 – 10 arası sporcu	Tekvando	Eş fazlı hareket gerektiren egzersizleri dahil etmek, sporcuların sadece koordinat stabilitesi kazanmalarına değil, aynı zamanda verimlilik kazanmalarına da yardımcı olabilir. Sporcular dairesel vuruşta en iyi performansı elde etmelerini sağlayamayacağından 90° duruş pozisyonunu benimsememelidir.
[66]	Qualisys, 6, 500Hz	12 erkek sporcu	Powerlifting	Halterin dirsek eklemi etrafındaki moment kolundaki farklılıklar nedeniyle, eklem açısına özgü toplam kuvvet üretimi için hala zayıf bir mekanik bölge olabilir.
[67]	Vicon, 10, 250 Hz	31 sporcu	Avustralya Futbolu	Direnç antrenmanı ve beceri kazanım programları, vuruş isabeti ile göreceli zayıf kütle pozitif korelasyon gösterdiğinden, vuruş isabetliliğinin geliştirilmesinde rol oynayabilir.
[68]	Vicon, 10, 250 Hz	8 kadın sporcu	Jimnastik	Çalışma, kalça fleksiyon-abdüksiyonunu artırmak, bacak ve kol açılma momentumunu gövdeye aktarmak ve çubuğa giden el yolunu düzeltmek için yönergeler sağladı.
[69]	Vicon, 12, 200 Hz	10 sporcu	Unihockey	Top hızı temel olarak, kalçanın ve gövdenin rotasyonu ve elinin kol üzerindeki rotasyonu ve kaçırma hareketleri nedeniyle destek bacağının (ayak bileği, diz ve kalça) esnekliğinden etkilenmiştir.
[70]	Vicon, 6, 200Hz	18 erkek sporcu	Kriket	Omuz ve bacak hareketi ile ilişkili ve adım uzunluğunun önemi ve eğitilebilirliği nedeniyle, kriketçiler topu almak için ivmeyi artırmayı hedeflemelidir.
[71-76]	Qualisys, BTS, Vicon 4, 10, 9, 6 60-500 Hz	10 – 22 arası sporcu	Futbol	Daha hızlı oyuncular topla daha kısa bir yoldan daha ekonomik bir şekilde koşabilirler, bu nedenle antrenörler yüksek adım sıklığı ve dar koşu yörüngelerinin gerekli olduğu özel uygulamalar tasarlamaya teşvik edilir. Oyuncular, top hızına ve potansiyel olarak genel performansına en güçlü katkıyı sağlayan diz ekstansiyon açılma hızının iyileştirilmesine yönelik antrenörlerden yararlanabilirler.
[77]	Qualisys, 8, 236 Hz	7 sporcu	Ski cross	İç mekan antrenman rampalarının elit sporcuları eğitmek ve izlemek için daha uygun olduğu belirlendi.
[78]	Vicon, 10, 200 Hz	24 sporcu	Badminton	Gövde dönüşünün, raketle serbest bırakma hızını en üst düzeye çıkarmak için forehand şutunun kalitesinin önemli bir ölçüsü olarak belirlendi.

Gerçek sistemler, saniyede 100 kareden (fps) 500 fps' ye kadar yakalayabilir, ancak görüntü çözünürlüğünü azaltarak daha yüksek kare hızları elde edilebilir. Alternatif olarak, fps sayısı, 1 fps değeri 1 Hz değerine eşit olduğunda, görüntü yakalama frekansı Hertz (Hz) cinsinden de görüntülenir. Kızılötesi aydınlatma, 2 kHz' e kadar yansıtıcı markerların yüksek kontrastlı görüntülerinin yakalanmasını sağlar. Optik hareket yakalama, beyzbolda adım uzunluğu [20] veya sıraya bağlı dönüş eksenleri [21], tenis ve golf sporunda üst ekstremite eklemine [34 - 36] alt gövde [28] ve gövde dönüşü [31] gibi çeşitli biyomekanik koşulların bir fonksiyonu olarak top hızını değerlendirmek için kullanılan materyallerle birlikte sporda kullanılmıştır.

2.2. Optik olmayan sistemler

Optik olmayan sistemler, uzaydaki konumları hakkında veri göndermek için vücut parçalarına bağlı sensörler kullanır. Optik olmayan sistemler inersiyel (atalet) sistemleri, mekanik sistem, manyetik/elektromanyetik sistem, germe sensörleri, görüntü işleme, ultrasonik lokalizasyon sistemi, füzyon sistemi ve akustik sistemleri içermektedir. İlerleyen bölümlerde ilgili başlıkların ayrıntılı açıklamalarına yer verilmiştir. Elektromanyetik sistemler, güçlü bir kaynak tarafından oluşturulan iyi tanımlanmış bir elektromanyetik alan içinde küçük elektrik bobinlerinden (sensör başına üç, ortogonal olarak) oluşur. Bobinler sabit bir manyetik akım içinde küçük voltaj veya akım ürettiğinde sporcunun hareketleri izlenir.

Tablo 2. Optik olmayan sistemlerde kullanılan donanımlar ve özellikleri.

Çalışma No	Sistem, Kamera / Sensör Sayısı, Frekans (fps)	Denek Sayısı	Aktivite	Fonksiyonel Görevler ve Ana Sonuçlar
[79-85]	IMU, EM 1 60-100 Hz	4 sporcu	Koşu	Sık ve hızlı duruşlar, kas ve eklem yorgunluğunun daha erken başlamasına ve yaralanma olasılığının artmasına neden olabilir. Geleneksel ayakkabı tipinde ve minimalist ayakkabı tipinde 50 km'lik koşudan sonra, uzun mesafe, sürekli hızlı koşu sırasında motor ünite işe alım modelinde bir değişiklik olabilir.
[86, 87]	EM, IMU, Vicon 2 100-300 Hz	41 erkek + 41 kadın sporcu	Atlayış	Daha büyük sagittal düzlem ilk darbe fazı enerji emilimi muhtemelen daha fazla ön çapraz bağ yüklemesini gösterirken, ön düzlemde daha az elverişli ön düzlem biyomekaniği ile ilişkilendirilmiştir. Kinematik parametrelerdeki değişiklikler, koşullar arasında belirgin ve birkaç değişiklik, sıçrama performansındaki değişikliklerle önemli ölçüde ilişkilidir.
[88-92]	IMU, Qualisys, M.Analysis, Probe, Radar, Vicon 1, 2, 8, 10 100-200 Hz	7 erkek + 7 kadın sporcu 7 kadın + 6 erkek sporcu	Yürüyüş	Bu yeni yürüyüş kayıt sistemleri, yürüme hızından bağımsız olarak adım döngüsünün %51'inde güvenilir bir şekilde topuk-off momenti gibi zamansal ve uzamsal tanımlayıcıları değerlendirmeyi amaçlar. Elde edilen ve dikey ivmeden elde edilen sonuçlar mükemmel bir uyum içindeydi, bu da ivmenin ivme boyutlarını bağımsız olarak ele almaya uygun bir alternatif olduğunu gösteriyor. Ultrason ve hareket yakalama, intrinsik ayak kinematığının daha doğru ölçümlerini sağlamaya yardımcı olabilecek invazif olmayan bir tekniktir. Sistemin ev ortamlarında günlük yürüyüş değerlendirme aracı olarak kullanılabilmesi, düşme riski değerlendirmesi ve diğer sağlık uygulamaları için faydalı olması. Fonksiyonel yerleşimlerde bulunan giyilebilir teknolojilerin potansiyel kullanımı, egzersiz sırasında denek performansını değerlendirmek için geçerlidir ve kabulü artırmak için fonksiyonel çözümler önerir.
[93, 94]	IMU, 2, 500 Hz	4 erkek + 6 kadın sporcu	Cross-country sky	Bu çalışma, kutuplarda ve kayaklarda IMU' ları entegre ederek çapraz adımlı XC kayakta uzamsal-zamansal parametreleri ölçmek için kullanımı kolay bir sistem tanıttı.
[95-104]	IMU, Vicon 1,7 200 Hz	12 sporcu	Dağ Kayağı	Uyarlanan algoritmanın koşu bandında kayakla dağcılık için uzaysal-zamansal parametreleri ölçmek için geçerli olduğu kanıtlandı ve kar üzerinde benzer şekilde performans göstermesi bekleniyor.
[105]	IMU, Vicon 5, 7 100 Hz	1 sporcu	Kürek	Enstrümanlı tekne veya simülatörden toplanan veriler ile atalet sensörlerinden elde edilen vücut hareketi verilerinin birleştirilmesine dayanan, dış mekan kürek performansını izlemek için yeni bir yaklaşım.

[106]	IMU, 1, 120 Hz	6 sporcu	Alp Kayağı	Sert, donmuş yüzeylerde geniş bel genişliğine sahip kayaklar, diz eklemini enine ve ön düzlemlerde ROM'un sonuna olumsuz bir şekilde yaklaştırabilir ve böylece diz yaralanmaları riskini artırır.
[107-115]	EM, 12, 240 Hz	20 erkek sporcu	Beyzbol	Aşırı yüklemeli ısınmada, beyzbol oyuncuları, aktivasyon sonrası güçlendirmenin etkisini en üst düzeye çıkarmak ve etki yorgunluğunu en aza indirmek için 3 dakikalık dinlenme ile en az 3'ten fazla kuru vuruş yapmalıdır.

Her sensör konum ve oryantasyonu aynı anda okuyabilir, ancak sensörlerin yakınındaki herhangi bir metal nesne manyetik alanda bozulmalara neden olarak ölçüm doğruluğunu bozabilir [79, 86, 107]. Örneğin, kollar üzerindeki ağırlık takviyesinin yanı sıra sopanın kendisi, 4" x 4" global referans çerçeve vericisiyle etkileşimi önlemek için değildir. Bu kayıtlarda, 60 Hz [79] ile 120 Hz [86] arasında değişen tek sensörlü bir kurulumda 240 fps' de çalışan 12 sensörlü bir kurulum olmak üzere iki çalışma mevcuttur. Genel olarak, bu tür sistemler, referans kriteri olarak optik sistemlerle karşılaştırılır veya yukarıda açıklanan özelliklerle verileri tamamlamak için bunlarla birlikte kullanılır. Ancak, bir Gerçek Zamanlı Kinematik Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GZ KKN), alplerde kayakları izlemek için atalet verilerini yüksek çözünürlüklü ve yüksek frekanslı gerçek zamanlı coğrafi konum belirleme ile birleştirmek için kullanılır. Benzer şekilde orta ile üst göğüs vertebraına (omurlara) yerleştirilmiş $\pm 8g$ üç eksenli ivmeölçerli bir IMU (Inertial Measurement Unit) ve zemin etkilerinin ilk IMU tarafından sağlanan $\pm 8g$ aralığını aşmasının beklendiği durumlarda koşudaki dikey ivmeleri ölçmek için distal fibulalara (ayak bileğine) bağlı 100 g'lık bir ivmeölçer içeren ek bir özel yapım IMU' ya sahip bir IMU kullanmıştır [80]. Belirli konumlarda bir veya iki IMU bulunan her bir çalışmadaki IMU' ların sayısı son derece düşüktür. Ancak dış mekan kürek çekme performansını farklı aletlerden izlemek için bunlardan biri de gövdenin orta noktasında bulunan bir IMU ve her üst uzuv için kolda ve ön kolda bulunan iki IMU kullanılarak yeni bir yaklaşım önermiştir [105]. Bu çalışma, IMU' ların potansiyellerinden birinin, düşük kütleleri ve minimum saldırgan davranışları nedeniyle iç ve dış mekan deneyleri için uygunlukları olduğunu göstermektedir.

2.3. İşaretsiz (Markerless) sistemler

Nesnelerin izlenmesi için özel ekipman giymesi gerekmeden video ve diğer sensörlerden 3D hareketi yeniden oluşturmak için gelişmiş bilgisayarlı görüntü işlemedir. Genel olarak, kızılötesi ve ultrasonik sensörlerle birlikte bir veya iki normal video kameradan oluşan vücut bölümlerinin ve eklemlerinin çıkarılacağı insan formlarını tanımlamak için kullanılır.

Tablo 3. İşaretsiz sistemlerde kullanılan donanımlar ve özellikleri.

Çalışma No	Sistem, Kamera /Sensör Sayısı, Frekans (fps)	Denek Sayısı	Aktivite	Fonksiyonel Görevler ve Ana Sonuçlar
[116-122]	Video, Microsoft Kinect, Leap Motion controller, RGB Kamera	7 erkek sporcu	Tenis	Arkaya yönlendirilmiş daha büyük omuz kuvvetlerine sahipken, düz servis, dilim servise kıyasla önemli ölçüde daha yüksek maksimum omuz iç rotasyon hızına sahip olduğu belirlendi. Omuz eklemi kinematığı. Üst vücut, önkol, el, parmak hareketi. El hareketi için sınıflandırma teknikleri analizi. Yüksek gürültü, tıkanıklıklar, yüksek işlem maliyeti, genellikle gerçek zamanlı değildir ve aydınlatmaya karşı yüksek hassasiyetli. Kablosuz dış mekan, esnek, sensör yükü yok ve bağlamsal bilgi belirlendi.
	8			
	200 Hz			
[123-128]	Kinect, Vicon, Video, Xtion, RFID etiketler, Qualisys	1-21 arası sporcu,	Yürüyüş	Kinect, klinik yürüyüş analizi için düşük maliyetli, gelecek vaat eden bir geliştirme prosedürüdür. Kinect, adım zamanlamasını ölçmek için uygun bir araç olmak için temel hareket yakalama yeteneklerine sahiptir, ancak klinik kullanım için uygulanmadan önce hassasiyetini artırmak için daha fazla ilerleme gereklidir. Fleksiyon/ekstansiyon açılarının yanı sıra kalça abduksiyonu/addüksiyonu, marker bazlı sistemden elde edilenlere çok benzemektedir. Ancak iç/dış rotasyonlar, diz abduksiyonu/addüksiyonu ve ayak bileği inversiyonu/eversiyonu daha az güvenilir. Önerilen koşu bandı,
	8, 12	5 erkek + 5 kadın		
	30-120 Hz			

				bir hareket yakalama sistemi ve aletli bir koşu bandı içeren tipik, maliyetli, etkileşimli bir koşu bandına benzer bir performansa ulaşır. Yöntemin ilk geliştirme aşamasında olmasına rağmen, sonuçlar umut vericidir ve hareket bilgilerinin RFID yanıt sinyallerinden çıkarılabileceğini göstermektedir.
[129]	Kinect, BTS	5 erkek + 5 kadın sporcu	Atlayış	Kinetik, geleneksel hareket analizi teknolojisi için uygun bir vekil olmayabilir, ancak patolojik/yüksek yaralanma riski popülasyonlarında gerçek zamanlı bir geri bildirim aracı olarak potansiyel uygulamalara sahip olabilir.
	8			
	30-250 Hz			
[130-133]	Video, Kinect, M. Analysis, Vicon	20 erkek sporcu,	Laboratuvar	Sonuçlar, hiperkinezili bireylerde hareketi ölçebilen, invazif olmayan bir yöntem olarak işaretsiz bir sistemin uygulanabilirliğini ve geçerliliğini ortaya koymaktadır. Kinect, hareket paterni, güvenilirlik ve hesaplanan tepe açıları açısından işaretçi tabanlı sistemle uyumuştur, bu nedenle klinikte kullanılabilir, işaretçisiz, uygulanabilir bir hareket yakalama aracı olabilir. Kinect tekrarlanabilirliğinin, egzersiz için işaretleyici tabanlı sistem sonuçlarına istatistiksel olarak benzer olduğu bulundu. Ancak ölçülen ROM, sistemler arasında farklı bulundu. Kinetik, alt ekstremite kinematığını doğru bir şekilde ölçmek için etkilidir ve hasta popülasyonlarının eklem kinematığındaki klinik olarak anlamlı farklılıkları ayırt etmek için ilk adımı sağlar.
	8, 10, 14	48 sporcu		
	30, 200 Hz			
[134]	Kinect, Vicon	10 erkek sporcu	Stability	Kinect sistemi, toplam vücut kütle merkezi salınımlarının yüksek oranda ilişkili ölçümünü üretir, bu nedenle klinik salınımların değerlendirilmesi için hareket yakalama ve kuvvet plakası sistemine uygun maliyetli bir alternatiftir.
	8			
	30-240 Hz			

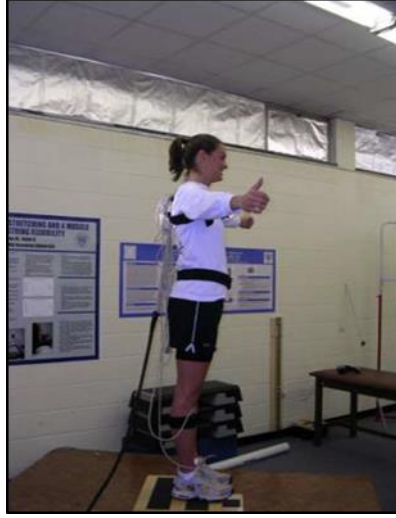
Bilgisayarlı görmede ortaya çıkan yeni teknikler ve araştırmalar, hareket yakalama teknolojisine yönelik markersız yaklaşımın hızla gelişmesine yol açmaktadır. Stanford ve Maryland Üniversitesi, MIT ve Max Planck Enstitüsü'nde geliştirilenler gibi markersız sistemler, deneklerin izleme için özel ekipman giymesini gerektirmez. Özel bilgisayar algoritmaları, sistemin birden çok optik girdi akışını analiz etmesine, insan biçimlerini tanımlamasına ve bunları izleme için kurucu parçalara ayırmasına imkân tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. İşaretsiz sistemlerde kullanılan derinlik kamerasının dezavantajı, mekânsal ve zamansal doğruluk düzeyidir. Bu tür sistemlerdeki video kameralar genellikle 640x480 piksel çözünürlükte çalışır ve bu da oyunlarda vücut tanıma için yeterlidir ancak amaç bir vücut segmentinin hareketini izlemek olan uygulamalarda bazı sorunlar ortaya çıkabilir.

3. Hareket Yakalama Teknolojisi ve Spor Türleri

Bir ülke içerisinde herhangi bir spor dalını uygulamak ve o sporla uğraşmak için var olan şartlar olgunlaştıkça bireylerde her zaman profesyonelleşme dürtüsü ortaya çıkar. Çünkü şartlar iyileştikçe daha fazla o sporla uğraşmak ve daha iyi performans sergilemek kaçınılmaz bir istektir. Ancak spor aktivitesindeki kullanım artışıyla birlikte birkaç problemle karşılaşmak olası bir sonuçtur. Bu problemler başlıca spor sırasında sakatlanma ve yaralanmalardır. İyi teknikten en küçük sapma bile yaralanmalara neden olabilir veya aksi takdirde sporcu performansını azaltabilir. Yanlış spor yapım veya araçların yanlış kullanımları sonucu vücuttaki verimlilik oranının düşmesi, fazla güç kaybı ve spor sırasında yapılan hataların tespit edilememesi karşılaşılan problemlerdendir. Bu problemlerin çözümleri için açıklanan hareket yakalama sistemleri alt bölümlerde açıklanmıştır.

3.1. Elektromanyetik sistemler (Electromagnetics Systems - EMS)

Manyetik sistemler, hem verici hem de alıcıdaki birbirine dik üç bobinin bağlı manyetik akışına göre konumu ve yönelimi hesaplar. Üç bobinin voltaj veya akımının göreceli yoğunluğu, bu sistemlerin izleme hacmini ayrıntılı haritalayarak hem menzili hem de yönelimi hesaplaması imkânını verir. Sensör çıkışı 6 DoF olmakta ve optik sistemlerde gerekli olan marker sayısının üçte ikisi ile elde edilen dirsek pozisyonu ve dirsek açısı için biri üst



Şekil 3. Manyetik/elektromanyetik hareket yakalama sistemi [135].

kolda ve biri alt kolda olmak üzere etkili sonuçlar sağlamaktadır. İşaretler metalik olmayan nesnelere tarafından kapatılmaz. Ancak manyetik alanı etkileyen inşaat demiri veya kablolar gibi çevredeki metal nesnelere ve monitörler, ışıklar gibi elektrik kaynakları sebebiyle manyetik ve elektriksel parazitlere karşı hassastır. Özellikle yakalama alanının kenarlarına doğru sensör tepkisi doğrusal değildir. Sensörlerden gelen kablolar, aşırı performans hareketlerini engelleme eğilimindedir. Manyetik sistemlerle, bir hareket yakalama oturumunun sonuçlarını gerçek zamanlı olarak izlemek mümkündür. Manyetik sistemler için yakalama hacimleri, optik sistemler için olduğundan önemli ölçüde daha küçüktür. Manyetik sistemlerde, alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) sistemleri arasında bir ayrım vardır. DC sistemi kare darbeler kullanır, AC sistemleri sinüs dalgası darbesi kullanmaktadır [135]. Elektromanyetik sistemler, transponderden bazı istasyonlarına giden elektromanyetik dalgalarının (radyo dalgalarının) uçuş süresi vasıtasıyla ölçüm transponderlerinin bilinmeyen konumlarını bulur [136]. Bir OMS' den farklı olarak, transponderlerin konumlarını bulmak için görüş hattı gerekli değildir. Ayrıca insan vücudu uygulanan alan için şeffaftır [137]. Deneysel kurulumla ilgili olarak sistemin sınırlamaları, ortamdaki ferromanyetik malzeme için verilerin doğruluğunu azaltan hassasiyettir [138]. Üstelik bazı istasyonu ile transponder arasındaki mesafe arttıkça gürültü artmakta ve sinyal kalitesi düşmektedir [138, 139]. EMS genellikle spor analizi için bir dezavantaj olan düşük örnek frekanslarına sahiptir. Birden fazla işaretleyici kullanıldığında frekanslar düşer.

3.2. Atalet ölçüm birimi (Inertial Measurement Unit - IMU)

İnarsiyal (atalet) sistemi teknolojisi, ivmeölçerler içeren küçük mikromekanik sensörler olan genellikle üç koordinatı ölçmek için üç eksenli ve genellikle jiroskoplar ve manyetometrelerle birleştirilen atalet ölçüm birimlerine dayanan başka bir optik olmayan sistem türüdür. Statik nesnelere için, ivmeölçerler açısal dönüşleri ölçebilir, ancak dinamik hareketler için jiroskoplar ve manyetometreler, sensör füzyon algoritmaları aracılığıyla ivmeölçer ile birleştirilir. Atalet sistemi verileri, sensör başına 6 DoF serbestlik derecesi ile gerçek zamanlı olarak genellikle kablosuz olarak bir bilgisayara iletilir. Literatürde genellikle hız entegre jiroskopları ve ivmeölçerler olarak anılırlar. Sistemin kalitesi sadece içerdiği algılama unsurları tarafından değil, aynı zamanda sinyal işleme hattının kalitesi ile de belirlenir. Atalet sensörleri sırasıyla kuvvetler veya torklardan etkilenmedikçe, sabit öteleme ve dönme hızını korumak için cisimlerin özelliğini kullanmaktadır. İç kulakta bulunan vestibüler sistem biyolojik bir 3D atalet sensörüdür. Başın doğrusal ivmesinin yanı sıra açısal hareketi de algılayabilir. Vestibüler sistem, gözlerin çevreye göre dengesini ve stabilizasyonunu sağlamak için önemlidir. Pratik atalet takibi, özellikle silikon ivmeölçerler ve hız sensörlerinde minyatürleştirilmiş ve mikro işlenmiş sensör teknolojilerindeki gelişmelerle mümkün kılınmıştır. Bir hız jiroskopu açısal hızı ölçer ve eğer zaman içinde entegre edilirse, başlangıçta bilinen bir açıya göre açıdaki değişikliği sağlar. Bir ivmeölçer, yerçekimi ivmesi g dahil olmak üzere ivmeleri ölçer. Küçük ve ucuz sensörlerle ilişkili gürültü ve önyargı hataları, herhangi bir telafi uygulanmadığında uzun süre yön ve konumun izlenmesinde pratik değildir. Atalet sensörlerinden gelen sinyalleri yardımcı / tamamlayıcı sensörlerle birleştirerek ve sinyal karakteristikleri hakkındaki bilgileri kullanarak sapma ve diğer hatalar en aza indirilebilir.



Şekil 4. Atalet hareket yakalama sistemi [140].

Atalet sistemlerini kullanılması hızlı, kolay kurulum nedeniyle ve dar alanlarda avantajlıdır fakat düşük konumsal doğruluğu ve zamanla birleşebilen konumsal kayma nedeniyle dezavantajlı bir sistemdir. Zeminin yönünü bir dereceye kadar doğru bir şekilde ölçebilirler. Sistemin taban fiyatları 1.000 Amerikan Doları ile 80.000 Amerikan Doları arasında değişmektedir.

3.3. Görüntü işleme sistemi (Image Processing System - IMS)

IMS genellikle EMS ile karşılaştırıldığında daha iyi doğruluğa ve OMS ile karşılaştırıldığında daha iyi bir aralığa-menzile sahiptir. Görüntü işleme çekilen filmler veya fotoğraflar dijital olarak analiz edilir. Sensör tabanlı olan diğer ölçüm yöntemlerinin aksine, bu yöntem optik kameralar ve bilgisayarlı görme algoritmaları (computer vision algorithms) kullanılarak görüntü tabanlıdır. Bu işaretli izleme, olay tespiti (event-detection) gibi durumlarda sporlarda büyük bir avantaj olabilir [142]. Görüntü işlemenin bazı dezavantajları da vardır bunlar gerçek zamanlı görüntü tanıma gerçekleştirmek kolay değildir ve pahalıdır, yüksek kaliteli ve/veya yüksek hızlı kameralar gerektirebilir. Doğruluk aynı zamanda deneysel kurulumla, yani kameranın nesne yörüngesine göre konumu ve kamera sayısına da bağlıdır [143]. Ayrıca, genel olarak, kamera çözünürlüğündeki bir artış, uygulanabilir maksimum örnekleme frekanslarında bir azalma ile sonuçlanır. Görme tabanlı sistemler (vision-based) iki kategoriye ayrılabilir: Model tabanlı izleme (model-based tracking) ve özellik tabanlı izleme (feature-based tracking). Model tabanlı izleme, izlenen nesnenin 3D modelini kullanır. Model tabanlı izlemenin temel konseptinde, her video karesinde poz bilgisi, önce bir tahmin filtresi aracılığıyla dinamik bir model kullanılarak ve ardından video karesindeki ölçümlerle güncellenir. Model tabanlı izleme sistemlerinin bir dezavantajı, katılımcıların ve ortamın 3 boyutlu modelleri gibi ek bilgilere ihtiyaç duyulması nedeniyle bilinmeyen ortamlarda kullanımlarının zor olması ve kamera hareketini kısıtlamalarıdır [144]. Özellik tabanlı izleme algoritmaları, nesneyi izlemek için çerçevelerdeki ilgili noktaları kullanır.



Şekil 5. Görüntü işleme tabanlı hareket yakalama sistemi [143].



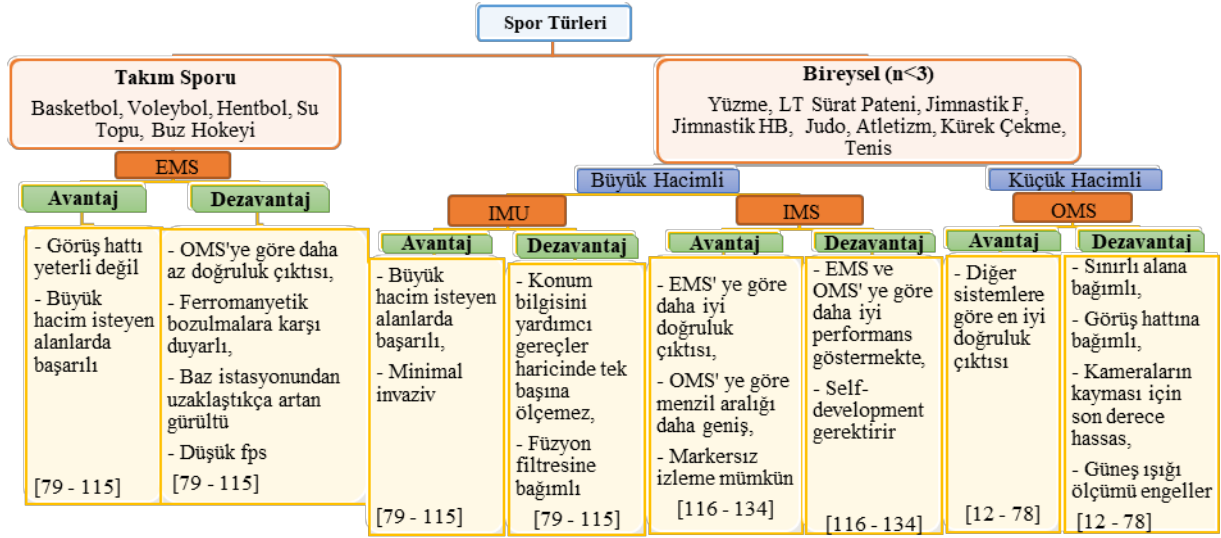
Şekil 6. Optoelektronik Hareket Yakalama Sistemi [10].

3.4. Optoelektromanyetik sistem (Optoelectromagnetic System - OMS)

Optik sistemler, üst üste binen projeksiyonlar sağlamak üzere kalibre edilmiş iki veya daha fazla kamera arasındaki bir nesnenin 3D konumunu üçgen hale getirmek için görüntü sensörlerinden alınan verileri kullanır. Veri alma, geleneksel olarak bir aktöre bağlı özel markerlar kullanılarak uygulanır; ancak, daha yeni sistemler her bir nesne için dinamik olarak tanımlanan yüzey özelliklerini izleyerek doğru veriler oluşturabilir. OMS' ler diğer sistemlerden daha hassastır. Optik sistemlerin (örneğin Optitrack veya Vicon) literatürde genellikle hareket yakalamada altın standart olarak kabul edilmektedir [145]. Bir OMS ışığı algılar ve bu algılamayı, zaman aşımı üçgenlemesi (time-offlight triangulation) yoluyla bir markerın 3D konumunu tahmin etmek için kullanır. Sistemlerin doğruluğu, deneysel kurulumun aşağıdaki bölümlerine bağlıdır: kameraların birbirine göre konumları, kameralar ve markerlar arasındaki mesafe, alandaki markerların konumu, sayısı ve türü, ve yakalama hacmi içindeki markerların hareketi [146]. Ayrıca, kamera çözünürlüğü ile örnekleme frekansı arasında bir değiş tokuş söz konusudur. OMS, sabit kameralara dayalıdır ve bu nedenle yalnızca sınırlı bir alanda veri alabilir [147]. Yakalama hacmi, maksimum kamera sayısına ve her kameranın görüş alanına bağlıdır. Fazladan markerlar genellikle hata olasılığını azaltan tıkanıklıkların üstesinden gelmek için kullanılır, ancak markerların sayısını artırmak aynı zamanda işleme gecikmesini de artırır. Sistemin diğer sınırlamaları, görüş hattı gerekliliğidir. Bu, kameralar işaretleri gözden kaybettiğinde veri çıkışının kesileceği anlamına gelir [148, 149]. Ayrıca, sistemler kurulumdaki değişimlere, örneğin kameranın yanlışlıkla kayması nedeniyle, karşı son derece hassastır [149]. Sistemler daha çok karanlık alanlarda (iç mekânlarda) kullanılır çünkü parlak güneş ışığı ölçümleri etkiler [148]. Özetle birçok kamera tarafından izlenen işaretleyiciler kullanılmaktadır. Kablo bağlantısı olmadığından hareketler serbestçe gerçekleştirilmektedir. Sahnede birden fazla kişi bulunabilir. Gerçek zamanlı uygulamalarda diğerlerine göre daha etkindir. Veriler temiz ve detaylıdır.

4. Değerlendirme ve Tartışma

Şekil 7' de takım sporları ve bireysel sporlar arasında doğruluk değerlerine göre sınıflandırılmıştır. Takım sporları öncelikli olarak büyük ölçüm hacimleri ve kapamaları (occlusions) içerir. Takım sporları esas olarak takiple ilgili olduğundan, doğruluk, teknik faktörlerin yaygın olarak analiz edildiği bireysel sporlardan daha az önemlidir [150]. Bireysel sporlar ise istenilen ölçüm hacimlerine göre ayrıştırılmıştır. Daha küçük hacimler, son derece hassas OMS' ler tarafından karşılanır. Daha büyük hacimlerdeki bireysel sporlar, şu anda kinematik ölçümü açısından en uygun seçenekler IMS ve IMU sistemleri olarak belirlenmiştir. Bireysel sporlar altında belirlenen sistemlerin avantaj ve dezavantajlarına Şekil 7' de belirtilmiştir. Tipik olarak doğruluk, bir konumlandırma sisteminin kapsamı ile ters orantılıdır (yani daha büyük bir ölçüm hacmi için daha düşük bir doğruluk), bu da bunu genellikle bir ölçüm sisteminin seçiminde sınırlayıcı faktör haline getirir. Katılımcıların yer değiştirmesi büyüdüğünde, bazen çok sayıda hareket döngüsü elde etmek için ergometreler kullanılır [147]. Ancak, bu her zaman istenen bir şey değildir, çünkü bir ergometre üzerindeki hareketler gerçek hareketten farklı olabilir ya da sporcu aynı hareketi tekrarlayamaz.



Şekil 7. Spor türlerine göre hareket yakalama sistemlerinin avantaj ve dezavantajları.

Spor analizi araştırmaları genellikle, yakalanması statik veya yavaş hareketlerden (örneğin yürüyüş analizi) daha zor olan oldukça dinamik hareketlerle ilgilenir. Örneğin, yüksek örnek frekanslarının gerekliliği teknik bir zorluk teşkil etmektedir. Spor uygulamaları için tipik örnek frekansları 50 Hz- 250 Hz arasındadır (Tablo 1-2-3). Aşırı miktarda veri kullanılmasını önlemek ve yüksek frekanslı paraziti önlemek için çok yüksek örnek frekansları kullanmayı tercih eder. Yalnızca belirli durumlarda örneğin çarpma (atlama gibi) veya çok yüksek hızlı hareketleri (beyzbol atışları gibi) incelemek için çok yüksek frekanslar (>1000 Hz) gereklidir. Ayrıca, sistemin, örneğin lineer ivmelerin sensör füzyon algoritmalarının sensör oryantasyon tahminini bozabileceği inertial ölçüm birimlerinde sorunlu olduğu kanıtlanan hareket dinamikleri ile ilgilenmesi gerekmektedir. Ölçüm sistemi sensörlerin, markerların, aktarıcılarının veya etiketlerin doğrudan bir sporcunun üzerine yerleştirilmesini gerektirdiğinde sensörlerin boyutu ve ağırlığı önemlidir. Özellikle yüksek performans ve yüksek dinamik koşullarda, bir sporcunun hareket özgürlüğü minimum düzeyde engellenmelidir.

Kaynaklar

- [1] Thomas J, Hall J.B, Bliss R. Guess TM. Comparison of Azure Kinect and optical retroreflective motion capture for kinematic and spatiotemporal evaluation of the sit-to-stand test. *Gait & Posture* 2022; 94: 153-159.
- [2] García-López J, Díez-Leal S, Ogueta-Alday A, Larrazabal J, and Rodríguez-Marroyo JA. Differences in pedalling technique between road cyclists of different competitive levels. *Journal of Sports Sciences* 2016; 34(17), 1619-1626.
- [3] Southgate DFL, Prinold JAI, and Weinert-Aplin RA. In sports innovation, technology and research motion analysis in sport 2016; 3-30.
- [4] Pueo B. High speed cameras for motion analysis in sports science. *Journal of Human Sport and Exercise* 2016; 11(1): 53-73.
- [5] Lopez Elvira JL, Lopez Plaza D, Lopez Valenciano A, and Alonso Montero C. Influence of footwear on foot movement during walking and running in boys and girls aged 6-7. *Retos-Nuevas Tendencias En Educacion Fisica Deporte Y Recreacion* 2017; 31: 128-132.
- [6] Kotsifaki A, Rossom SV, Whiteley R, Korakakis V, Bahr R, Sideris V, and Jonkers I. Single leg vertical jump performance identifies knee function deficits at return to sport after ACL reconstruction in male athletes. *British Journal of Sports Medicine* 2022; 20: 755-769.
- [7] Marqués L, Cela J, and Gisbert M. Pre-service physical education teachers' self-management ability: a training experience in 3D simulation environments. *Retos. Nuevas Tendencias En Educación Física, Deporte Y Recreación* 2017; 32: 30-34.
- [8] Kurban T, Beşdok E. İnersiyal algılayıcı tabanlı hareket yakalama. In: *Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO*; 26 - 30 Kasım 2008; Turkey.
- [9] Zhuang Y, Pan Y, Xiao J. A modern approach to intelligent animation 2008; 77-106.
- [10] Motion Capture. https://en.wikipedia.org/wiki/Motion_capture (Son Erişim: 23-07-2022).
- [11] Human Motion Analysis. <https://www.xsens.com/a-history-of-motion-capture> (Son Erişim: 23-07-2022).

- [12] Bisesti BA, Lawrence MA, Koch AJ, and Carlson LA. Comparison of knee moments and landing patterns during a lateral cutting maneuver: shod vs. barefoot. *Journal of strength and conditioning research* 2015; 29(11): 3075–3078.
- [13] Greenhalgh A, Sinclair J. Comparison of achilles tendon loading between male and female recreational runners. *Journal of Human Kinetics* 2014; 44(44): 155–159.
- [14] Mehdizadeh S, Arshi AR, and Davids K. Effect of speed on local dynamic stability of locomotion under different task constraints in running. *European Journal of Sport Science* 2014; 14(8): 791–798.
- [15] Otsuk M, Ito T, Honjo T, and Isaka T. Scapula behavior associates with fast sprinting in first accelerated running. *SpringerPlus* 2016; 5(1): 682.
- [16] Maurer C, Stief F, Jonas A, Kovac A, Groneberg DA, Meurer A, and Ohlendorf D. Influence of the lower jaw position on the running pattern. *PLoS ONE* 2015; 10(8): 1-16.
- [17] Goss DL, Lewek M, Yu B, Ware WB, Teyhen DS, and Gross MT. Lower extremity biomechanics and self-reported footstrike patterns among runners in traditional and minimalist shoes. *Journal of Athletic Training* 2015; 50(6): 603–611.
- [18] Cockcroft J, Van Den Heever D. A descriptive study of step alignment and foot positioning relative to the tee by Professional rugby union goal-kickers. *Journal of Sports Sciences* 2016; 34(4): 321–9.
- [19] Crotin RL, Ramsey DK. Stride Length: A reactive response to prolonged exertion potentially effecting ball velocity among baseball pitchers. *International Journal of Performance Analysis in Sport* 2015; 15(1): 254–267.
- [20] Crotin RL, Kozlowski K, Horvath P, and Ramsey DK. Altered stride length in response to increasing exertion among baseball pitchers. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2014; 46(3): 565–571.
- [21] Hansen C, Rezzoug N, Gorce P, Venture, G, and Isableu B. Sequence-dependent rotation axis changes and interaction torque use in overarm throwing. *Journal of Sports Sciences* 2015; 34(9): 878-885.
- [22] Laughlin WA, Fleisig GS, Aune KT, and Diffendaffer AZ. The effects of baseball bat mass properties on swing mechanics, ground reaction forces, and swing timing. *Sports Biomechanics* 2016; 15(1): 36–47.
- [23] Danielsen J, Sandbakk O, Holmberg HC, and Ettema G. Mechanical energy and propulsion in ergometer double poling by cross-country skiers. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2015; 47(12): 2586–2594.
- [24] Hejrati B, Chesebrough S, Bo FK, Abbott JJ, and Merryweather AS. Comprehensive quantitative investigation of arm swing during walking at various speed and surface slope conditions. *Human Movement Science* 2016; 49: 104–115.
- [25] Carse B, Meadows B, Bowers R, and Rowe P. Affordable clinical gait analysis: An assessment of the marker tracking accuracy of a new low-cost optical 3D motion analysis system. *Physiotherapy* 2013; 99(4): 347–351.
- [26] Iino Y, Kojima T. Mechanical energy generation and transfer in the racket arm during table tennis topspin backhands. *Sports Biomechanics* 2016; 15(2): 180–197.
- [27] Sinclair J, Bottoms L. Gender differences in the kinetics and lower extremity kinematics of the fencing lunge. *International Journal of Performance Analysis in Sport* 2013; 13(2): 440–451.
- [28] Joyce C, Burnett A, Cochrane J, and Ball K. Three-dimensional trunk kinematics in golf: between-club differences and relationships to clubhead speed. *Sports Biomechanics* 2013; 12(2): 108–120.
- [29] Sommer M, Häger C, and Rönnqvist L. Synchronized metronome training induces changes in the kinematic properties of the golf swing. *Sports Biomechanics* 2014; 13(1): 1–16.
- [30] Milanese C, Corte S, Salvetti L, Cavedon V, and Agostini, T. Correction of a Technical Error in the Golf Swing: Error Amplification Versus Direct Instruction. *Journal of Motor Behavior* 2016; 48(4): 365–376.
- [31] Sinclair J, Currigan G, Fewtrell D, and Taylor PJ. Biomechanical correlates of club head velocity during the golf swing. *International Journal of Performance Analysis in Sport* 2014; 14(1): 54–63.
- [32] Betzler NF, Monk SA, Wallace ES, and Otto SR. The relationships between driver clubhead presentation characteristics, ball launch conditions and golf shot outcomes. *Journal of Sports Engineering and Technology* 2014; 228(4): 242–249.
- [33] Lädermann A, Chagué S, Kolo FC, and Charbonnier C. Kinematics of the shoulder joint in tennis players. *Journal of Science and Medicine in Sport* 2016; 19(1): 56–63.
- [34] Martin C, Bideau B, Bideau N, Guillaume N, Delamarche P, and Kulpa R. Energy Flow Analysis During the Tennis Serve Comparison Between Injured and Noninjured Tennis Players. *The American Journal of Sports Medicine* 2014; 42(22): 2751–2760.
- [35] Martin C, Kulpa R, Delamarche P, and Bideau B. Professional tennis players’ serve: correlation between segmental angular momentums and ball velocity. *Sports Biomechanics* 2013; 12(1): 2-14.
- [36] Martin C, Kulpa R, Ropars M, Delamarche P, and Bideau B. Identification of temporal pathomechanical factors during the tennis serve. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2013; 45(11): 2113-2119.
- [37] Martin C, Bideau B, Delamarche P, and Kulpa R. Influence of a prolonged tennis match play on serve biomechanics. *PLoS ONE* 2015; 11(8): 1-14.
- [38] Reid M, Giblin G, and Whiteside D. A Kinematic comparison of the overhand throw and tennis serve in tennis players: How similar are they really? *Journal of Sports Sciences* 2015; 33(7): 713-723.
- [39] Judson LJ, Churchill SM, Barnes A, Stone JA, Brookes IGA, Wheat J. Measurement of bend sprinting kinematics with three-dimensional motion capture: a test–retest reliability study. *Journal of Biomechanics* 2020; 19(6): 761-777.
- [40] Elgammal A, Lee CS. Tracking people on a torus. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2009; 31(3): 520-38
- [41] Inamura T, Toshima I, Tanie H, and Nakamura Y. Embodied symbol emergence based on mimesis theory. *International Journal of Robotics Research* 2004, 23(4-5): 363-377.

- [42] Kulic D, Takano JW and Nakamura Y. Incremental learning, clustering and hierarchy formation of whole body motion patterns using adaptive hidden Markov chains. *International Journal of Robotics Research* 2008; 27(7): 761-784.
- [43] Shon AP, Grochow K, and Rao RPN. Robotic imitation for human motion capture using Gaussian processes. In: 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots; December 2005; Tsukuba: IEEE. pp. 129-134.
- [44] Shon AP, Grochow K, Hertzmann A, and Rao RPN. Learning shared latent structure for image synthesis and robotic imitation. In Weiss Y, Schlkopf B, and Platt JC (Eds), *Advances in Neural Information Processing Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, 2005.
- [45] Butt A, Rovini E, Dolciotti C, Bongioanni P, De Petris G and Cavallo F. Leap Motion Evaluation for Assessment of Upper Limb Motor Skills in Parkinson's Disease. In: *International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, July 2017; IEEE. pp. 116-121.
- [46] Gieser SN, Boisselle A, and Makedon F. Realtime static gesture recognition for upper extremity rehabilitation using the leap motion. In: *International Conference on Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management*, August 2015; Springer. pp. 144-154.
- [47] Yahya M, Shah JA, Warsi A, Kadir K, Khan S, and Izani M. Real time elbow angle estimation using single RGB camera. *arXiv preprint arXiv* 2018; 1808.07017.
- [48] Manghisi VM, Uva AE, Fiorentino M, Bevilacqua V, Trotta GF, and Monno G. Real time RULA assessment using Kinect v2 sensor. *Applied Ergonomics* 2017; 65: 481-491.
- [49] Skublewska-Paszowska, M, Montusiewicz J, Łukasik E, Pszczoła-Pasierbiewicz I, Baran KR, Smółka J, and Pueo, B. Motion capture as a modern technology for analysing ergometer rowing. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2016; 10(29): 132-140.
- [50] Naksuk N, Lee G, and Rietdyk S. Whole-body human-to-humanoid motion transfer, In: *Proceedings of 2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robotics*, 2005; Tsukuba, pp. 104-109.
- [51] Sigal L, Balan A, and Black M. HumanEva: synchronized video and motion capture dataset and baseline algorithm for evaluation of articulated human motion. *International Journal of Computer Vision* 2009; 87(1-2): 4-27.
- [52] Rawal A, Chehata A, Horberry T, Shumack M, Chen C, and Bonato L. Defining the upper extremity range of motion for safe automobile driving. *Clinical Biomechanics* 2008; 54: 78-85.
- [53] Figueiredo PRP, Silva PL, Avelar BS, da Fonseca ST, Bootsma RJ, and Mancini MC. Upper limb performance and the structuring of joint movement in teenagers with cerebral palsy: the reciprocal role of task demands and action capabilities. *Experimental Brain Research* 2015; 233(4): 1155-1164.
- [54] Yang C, Kerr A, Stankovic V, Stankovic L, Rome P, and Cheng S. Human upper limb motion analysis for post-stroke impairment assessment using video analytics. *IEEE Access* 2016, 4: 650-659.
- [55] Zhang Y, Ma Y, and Liu G. Lumbar spinal loading during bowling in cricket: a kinetic analysis using a musculoskeletal modelling approach. *Journal of Sports Sciences* 2016; 34(11): 1030-1035.
- [56] Frayne RJ, Dean, RB, and Jenkyn TR. Improving ice hockey slap shot analysis using three-dimensional optical motion capture: A pilot study determining the effects of a novel grip tape on slap shot performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* 2015; 229(2): 136-144.
- [57] Bernardina GRD, Cerveri P, Barros RML, Marins JCB, and Silvatti AP. Action Sport Cameras as an Instrument to Perform a 3D Underwater Motion Analysis. *Plos One* 2016; 11(8).
- [58] Hansen C, Gibas D, Honeine JL, Rezzoug N, Gorce P, and Isableu B. An inexpensive solution for motion analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* 2014; 228(3): 165-170.
- [59] Thewlis D, Bishop C, Daniell N, and Paul G. Next-generation low-cost motion capture systems can provide comparable spatial accuracy to high-end systems 2013; 29(1): 112-117.
- [60] Mundy PD, Lake JP, Carden PJC, Smith NA, and Lauder MA. Agreement between the force platform method and the combined method measurements of power output during the loaded countermovement jump. *Sports Biomechanics* 2016; 15(1): 23-35.
- [61] Chiu LZ, Bryanton MA, and Moolyk AM. Proximal-distal sequencing in vertical jumping with and without arm swing. *Journal of Strength and Conditioning Research* 2014; 28(5): 1195-1202.
- [62] Pueo, B. High speed cameras for motion analysis in sports science. *Journal of Human Sport and Exercise* 2016; 11(1): 53-73.
- [63] Estevan I, Falco C, Silvernail JF, and Jandacka D. Comparison of lower limb segments kinematics in a taekwondo kick. an approach to the proximal to distal motion. *Journal of Human Kinetics* 2015; 47(1): 41-49.
- [64] Estevan I, Freedman Silvernail J, Jandacka D, and Falco C. Segment coupling and coordination variability analyses of the roundhouse kick in taekwondo relative to the 68 initial stance position. *Journal of Sports Sciences* 2016; 34(18): 1766-1773.
- [65] Estevan I, Jandacka D, and Falco C. Effect of stance position on kick performance in taekwondo. *Journal of Sports Sciences* 2013; 31(16): 1815-1822.
- [66] Gomo O, van den Tillaar R. The effects of grip width on sticking region in bench press. *Journal of Sports Sciences* 2015; 1-7.
- [67] Hart NH, Cochrane JL, Spiteri T, Nimphius S, and Newton RU. Relationship between leg mass, leg composition and foot velocity on kicking accuracy in Australian football. *Journal of Sports Science and Medicine* 2016; 15(2): 344-351.

- [68] Huchez A, Haering D, and Holvoët P. Local versus global optimal sports techniques in a group of athletes. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 2013; 18: 37–41.
- [69] Lazzeri M, Kayser B, and Armand S. Kinematic predictors of wrist shot success in floorball/unihockey from two different feet positions. *Journal of Sports Sciences* 2016; 1–8.
- [70] Lockie RG, Callaghan SJ, and Jeffriess MD. Acceleration kinematics in cricketers: Implications for performance in the field. *Journal of Sports Science and Medicine* 2014; 13(1): 128–136.
- [71] López, JL, López D, López A, and Alonso C. Influence of footwear on foot movement during walking and running in boys and girls aged 6-7. *Retos. Nuevas Tendencias En Educación Física, Deporte Y Recreación* 2017; 31: 128–132.
- [72] Zago M, Piovan AG, Annoni I, Ciprandi D, Iaia FM, and Sforza C. Dribbling determinants in sub-elite youth soccer players. *Journal of Sports Sciences* 2015; 414: 1–9.
- [73] Sinclair J, Fewtrell D, Taylor PJ, Bottoms L, Atkins S, and Hobbs SJ. Three dimensional kinematic correlates of ball velocity during maximal instep soccer kicking in males. *European Journal of Sport Science* 2014; 14(8): 799–805.
- [74] Sinclair J, Fewtrell D, Taylor PJ, Atkins S, Bottoms L, and Hobbs SJ. Three dimensional kinematic differences between the preferred and non-preferred limbs during maximal instep soccer kicking. *Journal of Sports Sciences* 2014; 32(20): 1914–1923.
- [75] Inoue K, Nunome H, Sterzing T, Shinkai H, and Ikegami Y. Dynamics of the support leg in soccer instep kicking. *Journal of Sports Sciences* 2014; 32(11): 1023–1032.
- [76] Arshi AR, Nabavi H, Mehdizadeh S, and Davids K. An alternative approach to describing agility in sports through establishment of a relationship between velocity and radius of curvature. *Journal of Sports Sciences* 2014; 33(13): 1349–1355.
- [77] Nedergaard NJ, Heinen F, Sloth S, Holmberg HC, and Kersting UG. Biomechanics of the ski cross start indoors on a customised training ramp and outdoors on snow. *Sports Biomechanics* 2015; 14(3): 273–286.
- [78] Zhang Z, Li S, Wan B, Visentin P, Jiang Q, Dyck M, Shan, G. The Influence of X-Factor (Trunk Rotation) and Experience on the Quality of the Badminton Forehand Smash. *Journal of Human Kinetics* 2016; 53(1): 9–22.
- [79] Kasmer ME, Ketchum NC, and Liu XC. The effect of shoe type on gait in forefoot strike runners during a 50-km run. *Journal of Sport and Health Science* 2014; 3(2), 122–130.
- [80] Gageler WH, Thiel D, Neville J, James DA. Feasibility of using virtual and body worn inertial sensors to detect whole-body decelerations during stopping. *Procedia Engineering* 2013; 60(0): 28–33.
- [81] Hollander K, Hoenig T, Edouard P. Biomechanics of running. In: *IEEE International Workshop on The Running Athlete*, April 2022; IEEE. pp. 3-11.
- [82] Losciale JM, Ithurburn MP, Paterno MV, and Schmitt LC. Passing return-to-sport criteria and landing biomechanics in young athletes following anterior cruciate ligament reconstruction. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Journal of Orthopaedic Research*, 2022; 40(1), pp. 208-218.
- [83] Hindle BR, Keogh JW, Lorimer AV. Inertial-based human motion capture: a technical summary of current processing methodologies for spatiotemporal and kinematic measures. *Applied Bionics and Biomechanics* 2021.
- [84] Ruiz-del-Solar J, Palma-Amestoy R, Marchant R, Parra-Tsunekawa I, and Zegers P. Learning to fall: designing low damage fall sequences for humanoid soccer robots, robotics and autonomous systems. *Humanoid Soccer Robots* 2009; 57(8): 796-807.
- [85] Pastor I, Hayes HA, and Bamberg SJ. A feasibility study of an upper limb rehabilitation system using kinect an computer games. In: *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, August 2012; IEEE. pp. 1286-1289.
- [86] Taborri J, Keogh J, Kos A, Santuz A, Umek A, Urbanczyk C, Kruk E, Rossi S. Sport biomechanics applications using inertial, force, and emg sensors: a literature overview. *Journal of Applied Bionics and Biomechanics* 2020.
- [87] McGinnis RS, Cain SM, Davidson SP, Vitali RV, Perkins NC, and McLean SG. Quantifying the effects of load carriage and fatigue under load on sacral kinematics during countermovement vertical jump with IMU-based method. *Sports Engineering* 2016; 19(1): 21–34.
- [88] Bötzel K, Marti FM, Rodríguez MÁC, Plate A, and Vicente AO. Gait recording with inertial sensors - How to determine initial and terminal contact. *Journal of Biomechanics* 2016; 49(3): 332–337.
- [89] Rantalainen T, Hart NH, Nimphius S, and Wundersitz DW. Associations Between Step Duration Variability and Inertial Measurement Unit Derived Gait 70 Characteristics. *Journal of Applied Biomechanics* 2016; 32(4): 401–406.
- [90] Telfer S, Woodburn J, and Turner DE. An ultrasound based non-invasive method for the measurement of intrinsic foot kinematics during gait. *Journal of Biomechanics* 2014; 47(5): 1225-1228.
- [91] Wang F, Skubic M, Rantz M, and Cuddihy PE. Quantitative gait measurement with pulse-doppler radar for passive in-home gait assessment. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 2014; 61(9): 2434-2443.
- [92] Papi E, Osei-Kuffour D, Chen YMA, and McGregor, AH. Use of wearable technology for performance assessment: a validation study. *Medical Engineering & Physics* 2015; 37(7): 698–704.
- [93] Fasel B, Favre J, Chardonens J, Gremion G, and Aminian K. An inertial sensor based system for spatio-temporal analysis in classic cross-country skiing diagonal technique. *Journal of Biomechanics* 2015; 48(12): 3199–3205.
- [94] Atrsaei A, Salarieh H, and Alasty A. Human arm motion tracking by orientation-based fusion of inertial sensors and Kinect using unscented Kalman filter. *Journal of Biomechanical Engineering* 2016; 138(9).
- [95] Fasel B, Praz C, Kayser B, and Aminian K. Measuring spatiotemporal parameters of uphill ski-mountaineering with ski-fixed inertial sensors. *Journal of Biomechanics* 2016; 1-4.

- [96] Calinon S, Guenter F, and Billard A. On learning, representing and generalizing a task in a humanoid robot. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part B* 2007; 37(2): 286-298.
- [97] Field M, Stirling D, Naghdy F, and Pan Z. Motion segmentation for humanoid control planning. In: *ARAA Australasian Conference on Robotics and Automation*, 3-5 December 2008; Canberra,
- [98] Fujimori Y, Ohmura Y, Harada T, and Kuniyoshi Y. Wearable motion capture suit with full-body tactile sensors. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 12-17 May 2009; Kobe. IEEE. pp. 3186-3193.
- [99] Miller N, Jenkins OC, Kallmann M, and Mataric, MJ. Motion capture from inertial sensing for untethered humanoid teleoperation. *4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, 10-12 November 2012; Los Angeles, CA. IEEE. pp. 547-565.
- [100] Vlastic D, Adelsberger R, Vannucci G, Barnwell J, Gross M, Matusik W, and Popovic J. Practical motion capture in everyday surroundings. *ACM Transactions on Graphics* 2007; 26(3): 35-es.
- [101] Ward JA, Lukowicz P, Troster G, and Starner T. Activity recognition of assembly tasks using body-worn microphones and accelerometers. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006; 28(10), pp. 1553-1567.
- [102] Biswas D, Cranny A, Gupta N, Maharatna K, Achner J, Klemke J, Jöbges M, and Ortmann S. Recognizing upper limb movements with wrist worn inertial sensors using k-means clustering classification. *Human Movement Science* 2015. 40: 59-76.
- [103] El-Gohary M, McNames J. Human joint angle estimation with inertial sensors and validation with a robot arm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 2015; 62(7): 1759-1767.
- [104] McLeod A, Bochniewicz EM, Lum PS, Holley RJ, Emmer G, and Dromerick AW. Using wearable sensors and machine learning models to separate functional upper extremity use from walking-associated arm movements. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 2016; 97(2): 224-231.
- [105] Ruffaldi E, Peppoloni L, Filippeschi A. Sensor fusion for complex articulated body tracking applied in rowing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* 2015; 229(2): 92-102.
- [106] Zorko M, Nemeč B, Babič J, Lešnik B, and Supej M. The waist width of skis influences the kinematics of the knee joint in alpine skiing. *Journal of Sports Science and Medicine* 2005; 14(3): 606-619.
- [107] Kim YK. The Effect of Different Warm-up Procedures on Bat Speed in Baseball. *Korean Journal of Sport Biomechanics* 2013; 23(2): 91-97.
- [108] Matsunaga T, Oshita M. Recognition of walking motion using support vector machine. In: *Proceedings of the ISICE2007*, pp. 337-342.
- [109] Moldenhauer J, Boesnach I, Beth T, Wank V, and Bos K. Analysis of human motion for humanoid robots. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 18-22 April 2005; Barcelona, Spain. IEEE. pp. 311-316.
- [110] Ramana PKR, Grest D, and Volker K. Human action recognition in table-top scenarios: an HMM-based analysis to optimize the performance. In: *Proceedings of 12th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, 2007; 27-29 August 2007; Vienna, Austria. pp. 101-108.
- [111] Yamamoto T, Fujinami T. Hierarchical organization of the coordinative structure of the skill of clay kneading. *Human Movement Science* 2008; 27 (5): 812- 822.
- [112] Zhao L and Badler NI. Acquiring and validating motion qualities from live limb gestures. *Graphical Models* 2005. 67(1): 1-16.
- [113] Bai L, Pepper MG, Yan Y, Spurgeon SK, Sakel M, and Phillips M. Quantitative assessment of upper limb motion in neurorehabilitation utilizing inertial sensors. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 2015; 23(2), pp. 232-243.
- [114] Huang MH, Brown SH. Age differences in the control of postural stability during reaching tasks. *Gait & Posture* 2013; 38(4), pp. 837-842.
- [115] Pang M, Guo S, Huang Q, Ishihara H, and Hirata H. Electromyography based quantitative representation method for upper-limb elbow joint angle in sagittal plane. *Journal of Medical and Biological Engineering* 2015; 35(2): 165-177.
- [116] Abrams GD, Harris AH, Andriacchi TP, Safran MR, and Safran M. Biomechanical analysis of three tennis serve types using a markerless system. *Br J Sports Med* 2014; 48: 339-342.
- [117] Nakano N, Sakura T, Ueda K, Omura L, Kimura A, Iion Y, Fukashiro S, and Yoshioka S. Evaluation of 3D Markerless Motion Capture Accuracy Using OpenPose with Multiple Video Cameras. *Journal of Sports Science, Technology and Engineering* 2020; 2:50.
- [118] Drazan JF, Phillips WT, Seethapathi N, Hullfish TJ, Baxter JR. Moving outside the lab: Markerless motion capture accurately quantifies sagittal plane kinematics during the vertical jump. In: *IEEE International Conference on Journal of Biomechanics*, 26 August 2021; 125.
- [119] Wade L, Needham L, McGuigan P, Bilzon J. Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics. In: *IEEE Transactions on Sports Medicine and Rehabilitation*, 25 February 2022.
- [120] Xu X, Robertson M, Chen KB, Lin JH, and McGorry RW. Using the Microsoft Kinect™ to assess 3-D shoulder kinematics during computer use. *Applied Ergonomics* 2017; 65: 418-423.
- [121] Schlagenhauf F, Sreeram S, and Singhose WE. Comparison of kinect and vicon motion capture of upperbody joint angle tracking. In: *14th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, 2018; IEEE.
- [122] Yang C, Kerr A, Stankovic A, Stankovic L, and Rowe P. Upper limb movement analysis via marker tracking with a single-camera system. In: *International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2014; IEEE.

- [123] Auvinet E, Multon F, and Meunier J. New Lower-Limb gait asymmetry indices based on a depth camera. *Sensors* 2015; 15(3): 4605-4623.
- [124] Pfister A, West AM, Bronner S, and Noah JA. Comparative abilities of Microsoft Kinect and Vicon 3D motion capture for gait analysis. *J Med Eng Technol* 2014; 38(5): 1464-522.
- [125] Sandau M, Koblauch H, Moeslund TB, Aanæs H, Alkjær T, and Simonsen EB. Markerless motion capture can provide reliable 3D gait kinematics in the sagittal and frontal plane. *Medical Engineering and Physics* 2014; 36(9): 1168-1175.
- [126] Clark RA, Bower KJ, Mentiplay BF, Paterson K, and Pua YH. Concurrent validity of the Microsoft Kinect for assessment of spatiotemporal gait variables. *Journal of Biomechanics* 2013; 46(15): 2722-2725.
- [127] Kim J, Gravunder A, and Park HS. Commercial Motion Sensor Based Low-Cost and Convenient Interactive Treadmill. *Sensors* 2015; 15(9): 23667-23683.
- [128] Krigslund R, Dosen S, Popovski P, Dideriksen JL, Pedersen GF, and Farina D. A novel technology for motion capture using passive UHF RFID tags. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 2012; 60(5): 1453-1457.
- [129] Eltoukhy M, Kelly A, Kim CY, Jun HP, Campbell R, and Kuenze C. Validation of the Microsoft Kinect® camera system for measurement of lower extremity jump landing and squatting kinematics. *Sports Biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports* 2016, 1-14.
- [130] O'Keefe JA, O'riás AAE, Khan H, Hall DA, Berry-Kravis E, and Wimmer MA. Implementation of a markerless motion analysis method to quantify hyperkinesia in males with fragile X syndrome. *Gait and Posture* 2014; 39(2): 827-830.
- [131] Schmitz A, Ye M, Boggess G, Shapiro R, Yang R, and Noehren B. The measurement of in vivo joint angles during a squat using a single camera markerless motion capture system as compared to a marker based system. *Gait and Posture* 2015; 41(2): 694-698.
- [132] Bonnechère B, Jansen B, Salvia P, Bouzahouene H, Omelina L, Moiseev F, Van Sint Jan S. Validity and reliability of the Kinect within functional assessment activities: Comparison with standard stereophotogrammetry. *Gait and Posture* 2014; 39(1): 593-598.
- [133] Schmitz A, Ye M, Shapiro R, Yang R, and Noehren B. Accuracy and repeatability of joint angles measured using a single camera markerless motion capture system. *Journal of Biomechanics* 2014, 47(2), 587-591.
- [134] Yeung LF, Cheng KC, Fong CH, Lee WCC, and Tong KY. Evaluation of the Microsoft Kinect as a clinical assessment tool of body sway. *Gait & Posture* 2014; 40(4): 532-538.
- [135] Motion Capture: Magnetic Systems. Next Generation. *Imagine Media* October 1995; 10: 51.
- [136] Gustafson JA, Dowling B, Heidloff D, Quigley RJ, Garrigues GE. Optimizing Pitching Performance through Shoulder and Elbow Biomechanics. *IEEE Transactions on Operative Techniques in Sports Medicine* 2022; 150890.
- [137] Trasolini NA, Nicholson KF, Mylott J, Bullock GS, Phil D, Hulburt TC, Waterman BR. Biomechanical Analysis of the Throwing Athlete and Its Impact on Return to Sport. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation* 2022; e83-e91.
- [138] Choo CZY, Chow JY, Komar J. Validation of the Perception Neuron system for full-body motion capture. *Journal of Biomechanics* 2022; 31(10): 957-961.
- [139] Diffendaffer AZ, Bagwell MS, and Fleisig GS. The Clinician's Guide to Baseball Pitching Biomechanics. *Journal of Biomechanics, Sports Health* 2022.
- [140] <https://www.technaid.com/products/motion-capture-system-tech-mcs-hub-imu/> (Son erişim: 23.07.2022)
- [141] Wade L, Needham L, McGuigan P, Bilzon J. Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics. *PeerJ* 2022; 10: e12995.
- [142] Girbés-Juan V, Schettino V, Gracia L, Solanes JE, Demiris Y, Tornero J. Combining haptics and inertial motion capture to enhance remote control of a dual-arm robot. *Measurement* 2022; 1-20.
- [143] Beetz M, von Hoyningen-Huene N, Kirchlechner B, Gedikli S, Siles F, Durus M, and Lames M. Asporago: Automated sports game analysis models. *International Journal of Computer Science in Sport* 2009; 8(1): 1-21.
- [144] Corazza S, Mündermann L, Gambaretto E, Ferrigno G, Andriacchi TP. Markerless motion capture through visual hull, articulated icp and subject specific model generation. *International Journal of Computer Vision* 2010; 87(1): 156-169.
- [145] Maletsky LP, Sun J, and Morton NA. Accuracy of an optical active-marker system to track the relative motion of rigid bodies. *Journal of Biomechanics* 2007; 40(3): 682-685.
- [146] Begon M, Colloud F, Fohanno V, Bahuaud P, and Monnet T. Computation of the 3D kinematics in a global frame over a 40 m-long pathway using a rolling motion analysis system. *Journal of Biomechanics* 2009; 42(16): 2649-2653.
- [147] Spörri J, Schiefermüller C, and Müller E. Collecting kinematic data on a Ski track with optoelectronic stereophotogrammetry: A methodological study assessing the feasibility of bringing the biomechanics lab to the field. *PloS One* 2016; 11(8): e0161757.
- [148] Panjkota A, Stancic I, and Supuk T. Outline of a qualitative analysis for the human motion in case of ergometer rowing. In: *WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and Computers in Science and Engineering*; 2009.
- [149] Windolf M, Götzen N, and Morlock M. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systemsexemplified on the vicon-460 system. *Journal of Biomechanics* 2008; 41(12): 2776-2780.
- [150] Van Der Kruk E, Reijne MM. Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *European journal of sport science* 2018; 18(6): 806-819.

Kendinden Helisel Kanatlı Boruların Isı Transfer Performansını Artırmaya Yönelik Yeni Bir Yaklaşım

Cihan ÖZEL^{1*}, Cevher Kürşat MACİT¹, Ali TAŞKIRAN¹, Meral ÖZEL¹

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*¹cozel@firat.edu.tr, ¹macitkursatcevher@gmail.com, ¹ataskiran@firat.edu.tr, ¹mozel@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 03/06/2022 ;

Kabul/Accepted: 12/08/2022)

Öz: Bu çalışmada, kendinden helisel kanatlı boruların ısı transfer performanslarını artırmak için borunun cidar kalınlığı inceltilerek kanat yüksekliğini artırma uygulamasına gidildi. Bu amaç için başlangıçta 3 mm et kalınlığına sahip standart bir boru seçildi ve bu borunun malzemesi ve çalışma koşulları dikkate alınarak boru mukavemet bağıntısı ile borunun et kalınlığı yeniden hesaplandı. Hesaplama sonucunda boru et kalınlığı 1,077 mm olarak bulundu ve bu değer standart olarak seçilen boru et kalınlığından (3 mm) daha ince olduğu görüldü. Bu şekilde bir uygulama ile boru cidar kalınlığı azalırken başlangıçta standart boru için seçilen 5 mm' lik kanat yüksekliğinin ise 6,923 mm ye artırılması sağlandı. Daha sonra her iki boru 10, 20 ve 30 mm' lik katvelerde Solidwork ortamında tasarlandı. Tasarımları yapılan boruların ısı performansları ise Ansys Fluent ortamında farklı Reynolds (Re) sayıları (5000, 10000 ve 15000) kullanılarak incelendi. Bu analiz sonuçlarına göre ısı transferi açısından en iyi performans 5000 Re değerinde ve cidar kalınlığı 1,077 mm olan boruda elde edildi.

Anahtar kelimeler: Boru Cidar Kalınlığı, Kanat Yüksekliği, Isıl Performans, Ansys Fluent Programı

A New Approach on Increasing the Heat Transfer Performance of Self Helical Finned Tubes

Abstract: In this study, in order to increase the heat transfer performance of self-helical finned pipes, the wall thickness of the pipe was thinned and the fin height was increased. For this purpose, a standard pipe with a wall thickness of 3 mm was chosen initially, and the wall thickness of the pipe was recalculated with the pipe strength relation, taking into account the material and operating conditions of this pipe. As a result of the calculation, the pipe wall thickness was found to be 1.077 mm and this value was seen to be thinner than the standard selected pipe wall thickness (3 mm). With such an application, the wall thickness of the pipe was reduced, while the fin height of 5 mm, which was initially selected for the standard pipe, was increased to 6.923 mm. Later, both pipes were designed in Solidwork environment with pitches of 10, 20 and 30 mm. The thermal performances of the designed pipes were examined using different Reynolds (Re) numbers (5000, 10000 and 15000) in Ansys Fluent environment. According to the results of this analysis, the best performance in terms of heat transfer was obtained in the pipe with 5000 Re value and a wall thickness of 1.077 mm.

Keywords: Pipe Wall Thickness, Fin Height, Thermal Performance, Ansys Fluent Program

1. Giriş

Isı değiştiricilerinde temel amaç, ısının bir akışkandan diğer bir akışkana maksimum şekilde transferini sağlamaktır. Isı değiştiricilerinde ısı transferinin artırılması, enerji tasarrufu ve enerjinin verimli ve etkin kullanımı anlamına gelmektedir. Bu kapsamda ısı geçiş yüzeyinin artırılmasına yönelik şu ana kadar pek çok çalışmalar yapılmıştır. Çelik ve ark. (2018), eşanjörlerde dairesel kesitli borular yerine elips kesitli borular kullanıldığında bu boruların ısı transfer performansına, akışkan basıncına, çıkış sıcaklığına ve hızına etkileri Fluent programında analiz edilmiştir [1]. Maakoul ve ark. (2020), boyuna kanatçıklara sahip çift borulu bir ısı değiştiricisinin termohidrolik performansını araştırmışlardır. Çalışmada, kanatçık tipinin ısı performansına etkisini incelemek amacıyla bölünmüş boyuna kanatçıklar ve geleneksel boyuna kanatçıklar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bölünmüş boyuna kanatçıkların kullanıldığı durumda elde edilen ısı transfer oranının geleneksel boyuna kanatçıklara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür [2]. Hosseini ve ark. (2015), faz değiştiren malzeme içeren çift borulu ısı değiştiricilerinde boyuna kanatçıkların etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, kanatçık yüksekliğinin ısı değiştiricinin termal performansı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla iki farklı kanatçık yüksekliği üzerinde kıyaslama yapılmıştır.

* Sorumlu yazar: cozel@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-3227-6875, ¹ 0000-0003-0466-7788, ¹ 0000-0002-0578-5711, ¹ 0000-0002-9516-47

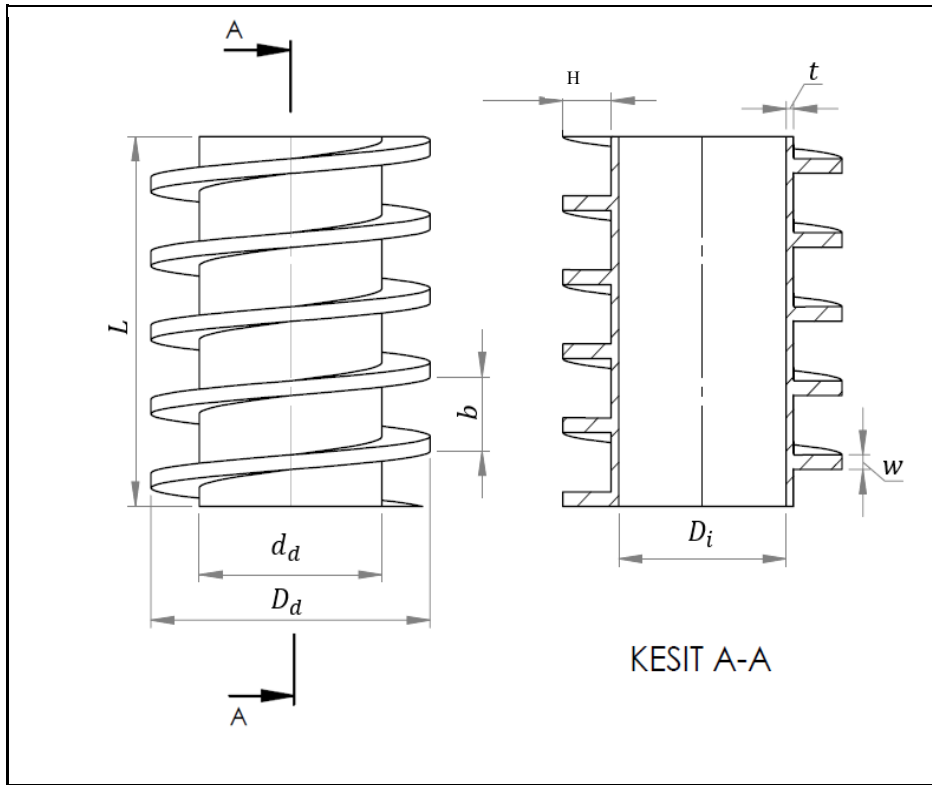
Sonuçlar, kanat uzunluğunun faz değiştiren malzemenin daha kısa sürede erimesine yol açtığı görülmüştür [3]. Cüce (2020) geleneksel ve oyuklu boyuna kanatçıkların ısı transferine etkisini sayısal olarak araştırmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, boyuna oyuklu kanatçıklarda geleneksel kanatçığa göre ısı transferinin daha az fakat birim kanat hacmi başına düşen ısı transferine göre oyuklu kanatçıkların daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, oyukların kanatçıkların ağırlığını önemli ölçüde azalttığını ve düşük taşınım katsayısı değerlerinde oyuk etkilerinin daha belirgin olduğu görülmüştür [4]. Koca ve Budak (2021), dikey konumlandırılmış bir iç içe borulu ısı değiştiricisinde içteki borunun kanatçıklı olmasının ısı transferi ve basınç düşüşüne etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde edilen bulgulara göre, en yüksek ısı transferinin kanatçık sayısı en çok olan iç boruda meydana geldiği tespit edilmiştir. Kanatçıklı bölgenin uzunluğunun 300 mm olduğu boruda meydana gelen ısı transferinin ve basınç düşüşünün düz boruya göre sırasıyla %147,38 daha fazla ve %131,25 daha az olduğu gözlemlenmiştir [5]. Buyruk ve ark. (2017), plakalı kanatlı bir ısı eşanjöründe ısı transferini artırmak için 30° ve 90° açılı ve yatay yönden 10 mm ofsetli dikdörtgen kanatların ısı performansı birleşik ısı transferi yaklaşımı ile sayısal olarak değerlendirilmiş ve karşı akış için kanatçiksiz kanala kıyasla 30° kanatçık açılı kanal çıkışında ısı transferinin % 10 arttığı tespit edilmiştir [6]. Işık ve ark. tarafından yapılan çalışmada (2021), boruların dış yüzeyine yerleştirilen boyuna düz ve boyuna dalgalı bakır kanatçıkların tipine göre ısı transferini incelemek için 4 farklı kütleli debi kullanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre boyuna dalgalı kanatçıkların boyuna düz kanatçıklara kıyasla ısı transferini en düşük %8, en yüksek %11 oranında artırdığı gözlemlenmiştir [7]. Buyruk ve ark. (2017), paralel ve ters akışlar için, 300, 600 ve 900 Reynolds sayıları için zikzak ve iç zikzak-dış zikzak kanatçık türlerinin ve kanat yüksekliklerinin ısı transferine etkileri incelenmiştir. Karşı akış için kanatsız bir kanala kıyasla B tipi kanatlı kanal çıkışında ısı transferinin yaklaşık % 9 arttığı tespit edilmiştir [8]. Karataş (2019), Gövde-boru tipi ısı değiştiricilerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) uygulaması ile akış ve ısı analizi yapılmıştır. Çalışmada, değişik akış tipleri ve zikzak levha modelleri kullanılarak ısı taşınım katsayıları ve basınç kayıpları için analizler yapılmıştır [9]. Buyruk ve ark. (2017), paralel ve ters akış şartlarında Reynolds sayısının farklı değerlerinin ve kanatçık yüksekliğinin ısı transfer artışı üzerindeki etkisi ile soğuk ve sıcak akışkanların sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Soğuk akışkan sıcaklığının ters akış durumunda iç-dış zikzak kanatçıklı kanalda düz kanala göre kanal çıkışında % 8.4, paralel akış durumunda ise zikzak kanatçıklı kanalda yine düz kanalla karşılaştırıldığında % 7.6'lık artış elde edildiği belirtilmiştir [10]. Bazarbashi (2013), dalgalı kanatçıklı bir ısı değiştiricinin çok amaçlı optimizasyonun yapılması amaçlanmış ve dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine düz veya zikzak bir şekilde yerleştirilen S kanat tiplerinde ısı transferi ve basınç kaybı özellikleri yanıt yüzey metoduyla hesaplanmıştır. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için oluşturulan matematiksel modellerin literatür ile uyumlu sonuçlar verdiği ve bu yüzden yanıt yüzey metodunun Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün tahmininde kullanılabilmesi görülmüştür [11]. Kim ve ark. (2003), kanatçıklı borulu ısı değiştiricilerinde ısı direnç değerleri ile ilgili olarak deneysel ve sayısal incelemeler yapmışlardır. Çalışmada, farklı boru büyüklük oranları, kanatçık arasındaki mesafeler ve kanatçık tipleri kullanılmış ve bulunan sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile örtüştüğü görülmüştür [12]. Kotcioğlu ve Bölükbaşı (2003), düzlem yüzey kanatçıklı, silindirik kanatçıklı ve akış yönünde birbirleri ile 60°'lik açı yapan daralan-genişleyen kanatçıklı elemanlar kullanarak deneyler yapmışlardır. Silindirik kanatçıklı ve düzlem kanatçıklı deney elemanlarının ısı transferi açısından iyi performans göstermiş olduğunu, ayrıca kanatçık verimlerini de bularak Re sayısı arttıkça ısı transferindeki iyileşmenin de arttığını bulmuşlardır [13]. Erek ve ark. (2005), çalışmada on farklı ısı değiştiricide iki kanat arasındaki mesafe farkı, boru merkezindeki yer değişikliği, kanatçık yüksekliği, boru et kalınlığı ve boru eliptikliğinin ısı transferi ve basınç düşümü üzerine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir [14]. Tepe (2021), kanatlı boru ısı değiştiricisinde çukurlu/çıkıntılı kanadın ısı transfer performansına ve akış karakteristiklerine etkisi sayısal olarak Ansys Fluent programında incelenmiştir. Sonuçlar, çukur olmayan düz yüzeyli kanatçık ile karşılaştırılmıştır. Yüzey üzerine yerleştirilen çukurların/çıkıntılıların düz yüzeye göre ısı transferini %26.63'e kadar artırdığını ortaya koymuştur [15]. Çelik ve ark. (2018), dikdörtgen kesite sahip tek bir mikro kanal içerisine, farklı yerleşim düzenlerinde dikdörtgen kanatçıklar yerleştirmiştir. Akışkan olarak su seçilerek mikro kanalda akış ve ısı geçişi özellikleri HAD uygulaması ile Ansys Fluent programında incelenmiştir. Sonuçlara göre basınç düşümünün Nusselt sayısının, artan Re sayısı ve kanal içine yerleştirilen kanatçıklar ile arttığını göstermiştir [16]. Şahin ve ark. (2007), düz plakalı kanatçıklı tek sıra borulu ısı değiştiricilerinde sonlu hacimler metodu kullanılarak kanatçıkların ısı transferine etkisini incelemişlerdir Modellerde kanatçıkların 30° eğik açı olması durumunda toplam ısı transferi değerinde % 105.24 seviyesinde bir artışın olduğunu sayısal olarak bulmuşlardır [17]. Chang ve Wang (1997), dalgalı şekilli kanatçık geometrisine sahip bir boru-tüp demetli ısı değiştiricisinde ısı transferi parametreleri boru demeti, kanatçık dalga açısı, boru genişliği, kanatçık dalga uzunluğu, kanatçık uzunluğu ve kanatçık adımları gibi farklı geometrik yapıları için incelemişlerdir [18]. Kundu ve Das (1997), üçgen ve dörtgen sıralı kanatçıklı borulu ısı değiştiricilerinin optimum boyutlandırmasını yapmışlardır [19]. Abdulateef ve ark. (2017), üç borulu bir ısı değiştiricide boyuna kanatçıkların etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmada, 16,2 kgs⁻¹, 29,4 kgs⁻¹ ve 37,4 kgs⁻¹ olmak üzere üç farklı kütleli debi ve boyuna ve üçgenel olmak

üzere iki farklı kanatçık tipi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, faz değişim malzemesinin erime süresi açısından iç, iç-dış ve dışına üçgenel kanatçıkların boyuna kanatçıklarla kıyaslandığında sırasıyla %11, %12 ve %15 iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir [20]. Tao ve ark. (2005), ısı değiştiricilerindeki ısı transferi ve basınç düşüşünü üç boyutlu deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında delikli ve düz plakalı kanatçık yüzeylerindeki performansı, Nu sayısı ve sürtünme faktörü arasındaki ilişkiyi karşılaştırmışlardır [21]. Kazemi ve ark. (2018), faz değişimi sırasında boyuna kanatçık açısının ısı transferi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, faz değişim malzemesi olarak RT35 kullanmışlardır. RT35'in erime işlemi iki ve üç kanatlı durumlar için farklı açılarda incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, üç kanatlı ısı değiştiricilerinde kanat açısının 60° den 120° 'ye çıkmasıyla toplam erime süresinin azaldığı görülmüştür. Çift kanatlı ısı değiştiricilerinde ise açının 150° den 45° ye düşürülmesi ile erime süresinin azaldığı ve açının daha fazla küçülmesinin erime süresini artırdığı görülmüştür [22].

Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak kendinden helisel kanatlı boruların ısı transfer performansını artırmak için başlangıçta 3 mm et kalınlığına sahip standart bir boru seçildi ve bu borunun malzemesi ve çalışma koşulları dikkate alınarak boru mukavemet bağıntısı ile minimum et kalınlığı hesaplandı. Böylece, boru cidar kalınlığı azalırken kanat yüksekliğinin de artırılması sağlandı. Daha sonra, aynı özelliklere sahip olan standart cidarlı ve ince cidarlı olarak tasarlanan yeni tip borular farklı hatvelerde SolidWorks ortamında modellendi ve Ansys Fluent Programı kullanılarak farklı Re sayılarına göre ısı transfer performansları sayısal olarak araştırıldı.

2. Mateyal Ve Metot

Isı transfer performansının araştırılması düşünülen kendinden helisel kanatlı borunun geometrisi aşağıdaki gibidir (Şekil 1).



Şekil 1. Boru geometrisi

Yukarıdaki şekilde verilen kanatçıklı boru ve üzerindeki büyüklüklerin ısı transferine etkisiyle ilgili yukarıda da bahsedildiği gibi şu ana kadar pek çok araştırmalar yapılmıştır [1-22]. Bu çalışmada, borunun iç (D_i) ve kanatçıklı dış çapı (D_d) değiştirilmeden borunun kanat yüksekliğini artırmak için ilk önce standart bir boru dikkate alındı ve boru malzemesine ve içerisinden geçen akışkanın basıncına göre borunun dayanabileceği minimum et kalınlığı aşağıdaki mukavemet bağıntısıyla hesaplandı [23].

$$t = \frac{d_d \cdot P_i}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{em}} + s_0 \quad (1)$$

Burada t , d_d , P_i , ϕ , σ_{em} ve s_0 sırasıyla boru et kalınlığı, boru dış çapı, boru içindeki akışkan basıncı, boru kaynak dikiş faktörü, boru malzemesinin emniyet gerilmesi ve boru korozyon payıdır. Çalışmada kullanılan tüm bu değerler ve diğer geometrik büyüklükler literatürden Tablo 1’deki gibi seçildi [23-25].

Tablo 1. Kendinden helisel kanatlı standart boru boyutları ve malzeme özellikleri

Tasarım Parametreleri	Seçilen Büyüklükler
Kanatlı borunun dış çap (D_d)	40 mm
Boru et kalınlığı (t)	3 mm
İç çap (D_i)	24 mm
Kanat Yüksekliği (H)	5 mm
Şehir şebeke su basıncı (P_i)	0,4 MPa
Boru korozyon payı (s_0)	1 mm
Boru malzemesi	St 37
Boru malzemesinin akma gerilmesi (σ_{ak})	240 N/mm ²
Boru emniyet katsayısı (s)	3.2
Boru malzemesinin emniyet gerilmesi [$\sigma_{em}=(\sigma_{ak}/s)$]	75 N/mm ²
Boru kaynak dikiş faktörü (ϕ)	Dikişsiz (1)



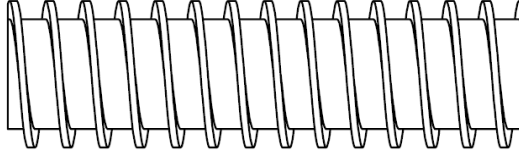
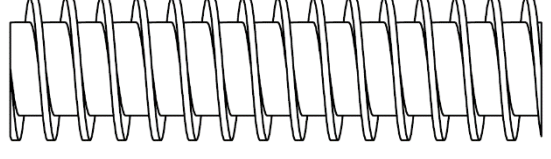
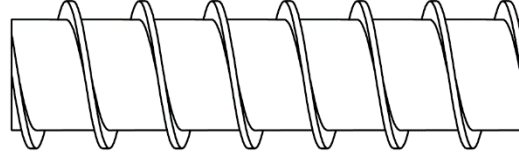
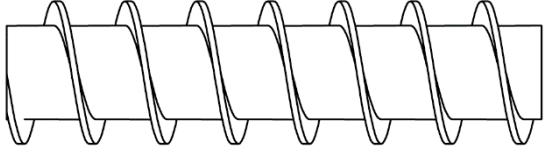
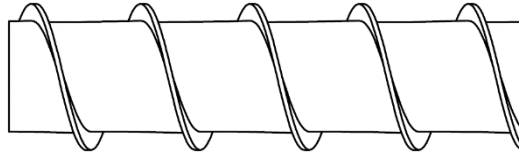
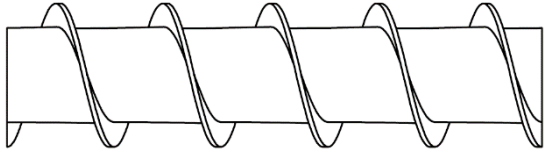
Daha sonra, tabloda P_i , D_i , ϕ , s , s_0 , σ_{ak} ve σ_{em} için verilen büyüklükler kullanılarak borunun minimum cidar kalınlığı denklem (1) yardımıyla aşağıdaki gibi yeniden hesaplandı.

$$t = \frac{(24+2t) \cdot 0,4}{2 \cdot 1,75} + 1$$

Yapılan hesaplama sonucu boru cidar kalınlığı (t) 1,077 mm olarak bulundu. Mukavemet bağıntısı kullanılarak hesaplanan bu sonuca göre, başlangıçta seçilen 3 mm boru et kalınlığı yerine 1,077 mm et kalınlığına sahip bir borunun da kullanılabileceği görüldü. Bu durumda, boru cidar kalınlıkları arasındaki fark (3-1,077=1,923 mm) başlangıçta seçilmiş olan 5 mm’lik kanat yüksekliğine ilave edildi (Tablo 2). Bu şekilde bir uygulama ile bir taraftan boru cidar kalınlığı azaltıldı ve diğer taraftan da borunun dış çapı değiştirilmeden kanat yüksekliği artırıldı. Standart olarak seçilen boru cidar kalınlığı (3 mm), bu çalışmada bulunan boru cidar kalınlığı (1,077 mm), boru boyu uzunluğu (L), kanat yüksekliği (H), kanat kalınlığı (w), hatve (b) ve borun diğer büyüklükleri Tablo 2 deki gibi seçildi. Şekil 2’de ise tüm bu değerlere göre boruların SolidWorks ortamında modellenmesi yapıldı.

Tablo 2. Kendinden helisel kanatlı boruların geometrik büyüklükleri

Boru Tipi	L (mm)	H (mm)	D_d (mm)	D_i (mm)	t (mm)	w (mm)	b (mm)
Standart cidarlı boru	500	5	40	24	3	2	10, 20, 30
İnce cidarlı boru	500	6.923	40	24	1.077	2	10, 20, 30

1. Standart Cidarlı Boru Modelleri	2. İnce Cidarlı Boru Modelleri
 <p>a) $L=500$, $t=3$, $H=5$</p>	 <p>b) $L=500$, $t=1.077$, $H=6.923$</p>
 <p>c) $L=500$, $t=3$, $H=5$ ve $b=10$</p>	 <p>d) $L=500$, $t=1.077$, $H=6.923$ ve $b=10$</p>
 <p>e) $L=500$, $t=3$, $H=5$ ve $b=20$</p>	 <p>f) $L=500$, $t=1.077$, $H=6.923$ ve $b=20$</p>
 <p>g) $L=500$, $t=3$, $H=5$ ve $b=30$</p>	 <p>h) $L=500$, $t=1.077$, $H=6.923$ ve $b=30$</p>

Şekil 2. SolidWorks ortamında farklı hatve ve et kalınlıklarında tasarlanan borular

2.1. Sayısal modelleme

Bu çalışmada, Şekil 2' de tasarımı verilen boruların ısı transfer performanslarını belirlemek için Ansys Fluent programı kullanılmıştır. Bu amaç için Şekil 3'te gösterilen model boru üzerinde sonlu elemanlar metodu ile kare ve üçgen ağ yapıları oluşturulmuş ve bu ağ yapılarından en iyi sonucu veren üçgen yapı model kullanılmıştır. Ağ yapısında ise ortalama 140000 düğüm noktası ve 270000 eleman sayısı kullanılmıştır.



Şekil 3. Borunun Ansys ortamında sonlu eleman modeli

Fluent programında analizlerin yapılması için akışkan olarak su ve suyun boruya giriş sıcaklığı 70 °C olarak seçildi. Türbülans model olarak Shear Stress Transport (SST k- ω) denklemi kullanıldı. Borunun giriş ve çıkış kısımları ise akışkanın sınır şartları olarak tanımlandı. Borunun kanatçık ve hatveli kısımları ise taşınım maruz bırakıldı. Çalışmada Şekil 2' de verilen tasarım parametreleri kullanılarak boru geometrisi boyunca akış ve ısı transferinin çözümü üç boyutlu, zamandan bağımsız ve birleşik (iletim ve taşınım) ısı iletimi yaklaşımıyla yapıldı. Çözümler için Ansys programında sonlu hacimler yöntemi kullanıldı. Bu yöntemde boru geometrisi ilk önce parçalara bölünerek parçaların her biri için çözüm yapıldı ve daha sonra bu çözümler birleştirilerek problemin genel çözümü bulundu. Korunum denklemlerini sayısal olarak çözümlenebilen cebirsel denklem sistemlerine dönüştürmek için ise kontrol hacim esaslı bir teknik kullanıldı. Problemin çözümünde kullanılan süreklilik denklemi, momentumun ve enerjinin korunumu denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir [25].

Süreklilik Denklemi;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

X yönündeki momentum denklemi;

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Y yönündeki momentum denklemi;

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{dp}{dy} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Z yönündeki momentum denklemi;

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{dp}{dz} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

Enerji Denklemi;

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = - \left(\frac{k}{\rho c_p} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Bu denklemlerde, ρ yoğunluk, μ dinamik viskozite, p basınç, k ısı iletkenlik, T sıcaklık, c_p özgül ısı ve u , v , w ise sırasıyla x , y ve z yönlerindeki hızlardır.

SST k- ω denklemi için;

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + P_{kb} - \beta' \rho \kappa \omega \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} \omega) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k + P_{\omega b} - \beta \rho \kappa \omega \quad (8)$$

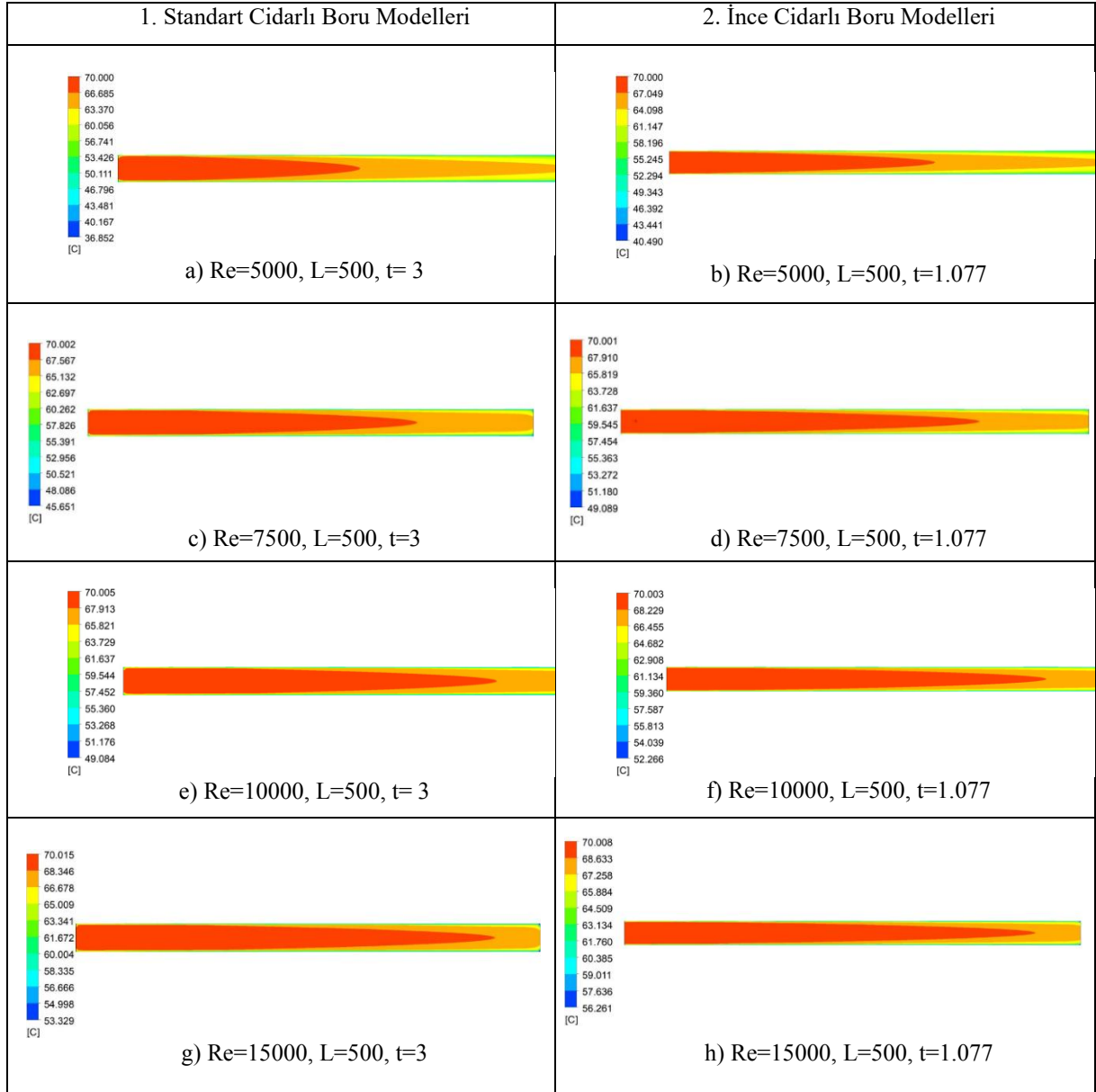
$$P_{\omega b} = \frac{\omega}{k} [(\alpha + 1) C_3 \max(0, P_{kb}) - P_{kb}] \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (10)$$

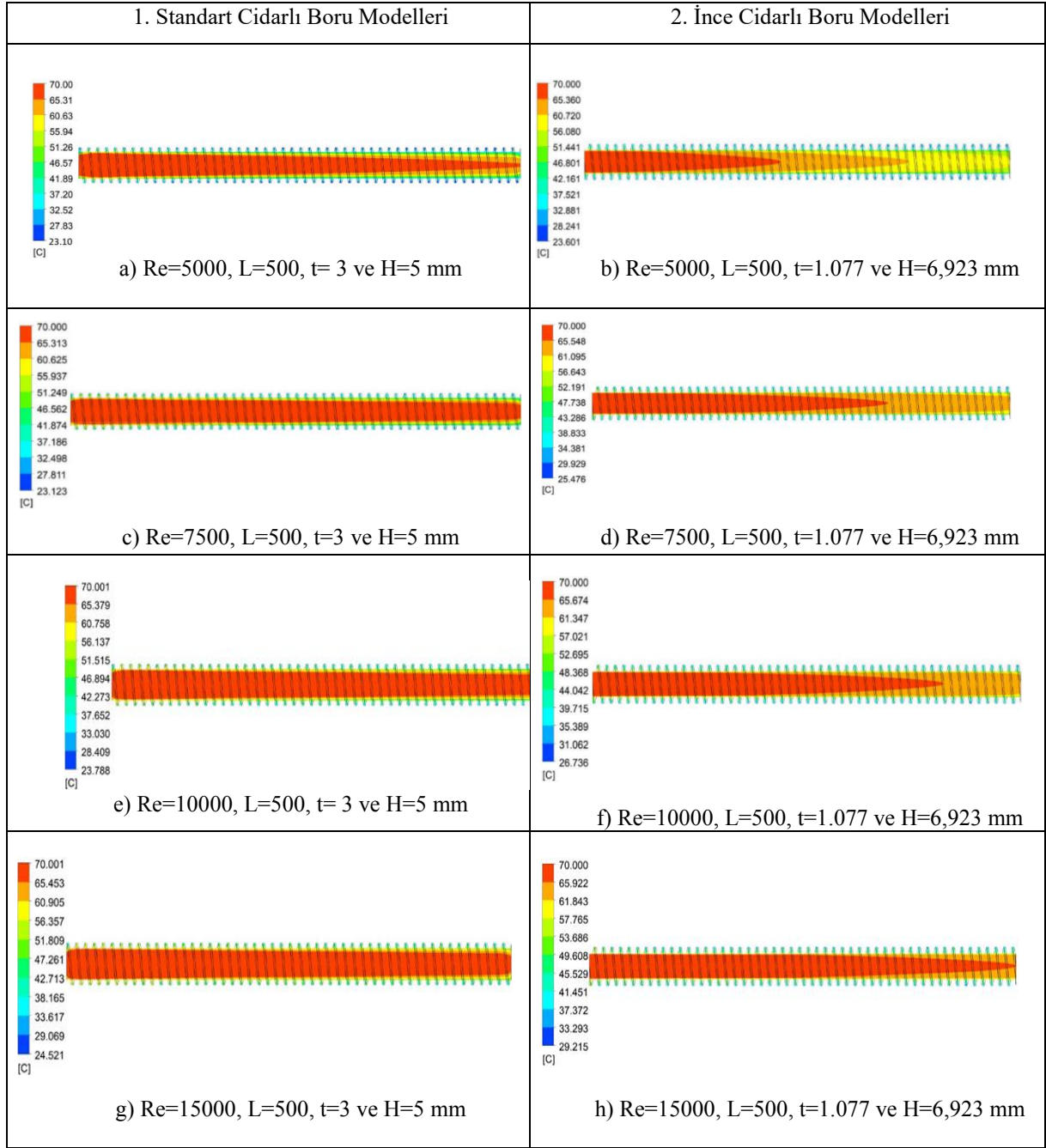
Yukarıdaki denklemlerde β' , β , α , σ_k ve σ_ω ampirik sabitlerdir. Kullanılan türbülans modelindeki bu sabitler ise literatüre [25] uygun olarak seçildi.

3. Sonuçlar Ve Tartışma

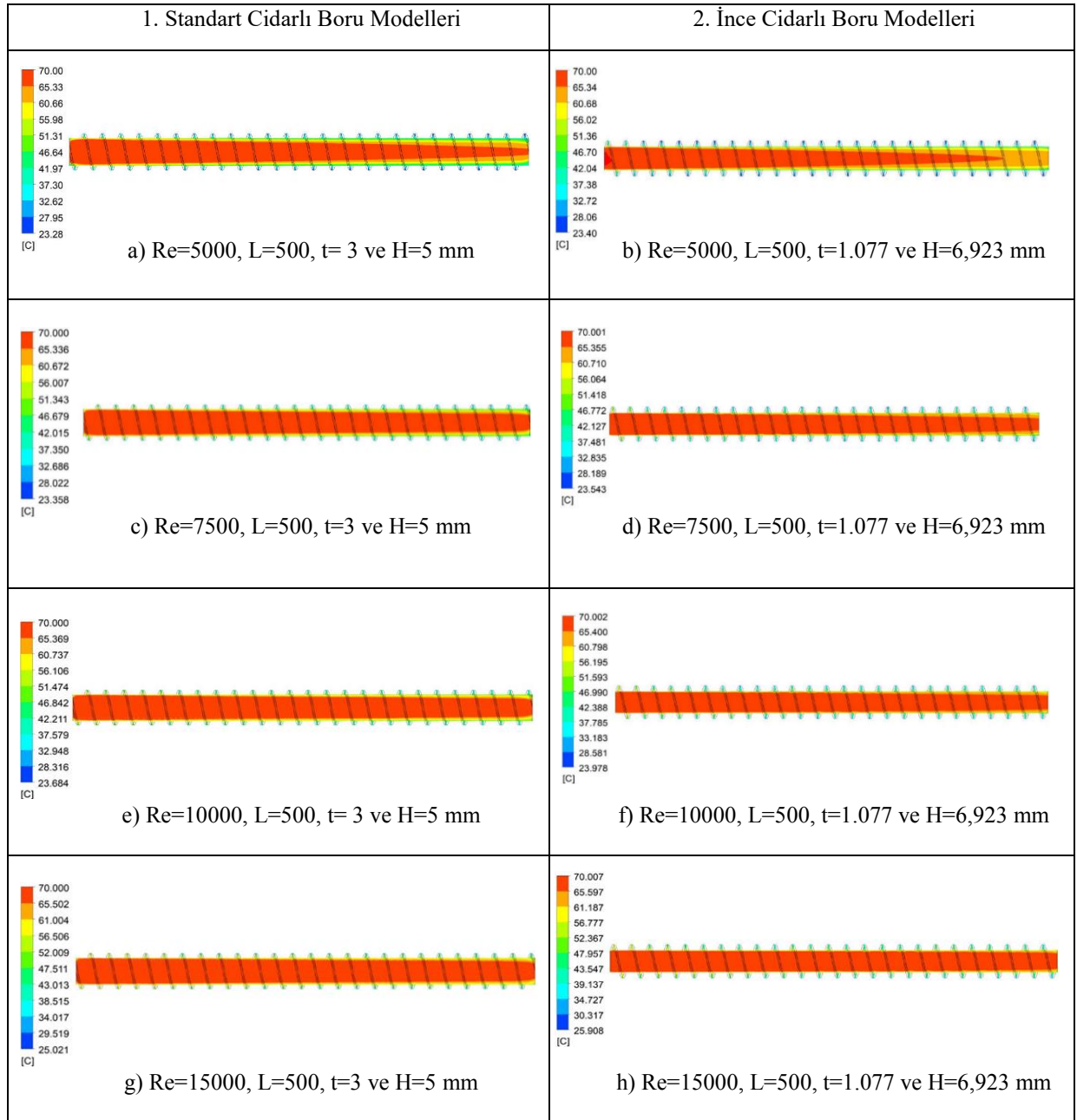
Birinci ve ikinci kısımda modelleri verilen kendinden kanatçıklı boruların Ansys Fluent programından elde edilen sıcaklık dağılımıyla ilgili analiz sonuçları her iki boru tipi için Şekil (4-7)' de verilmiştir.



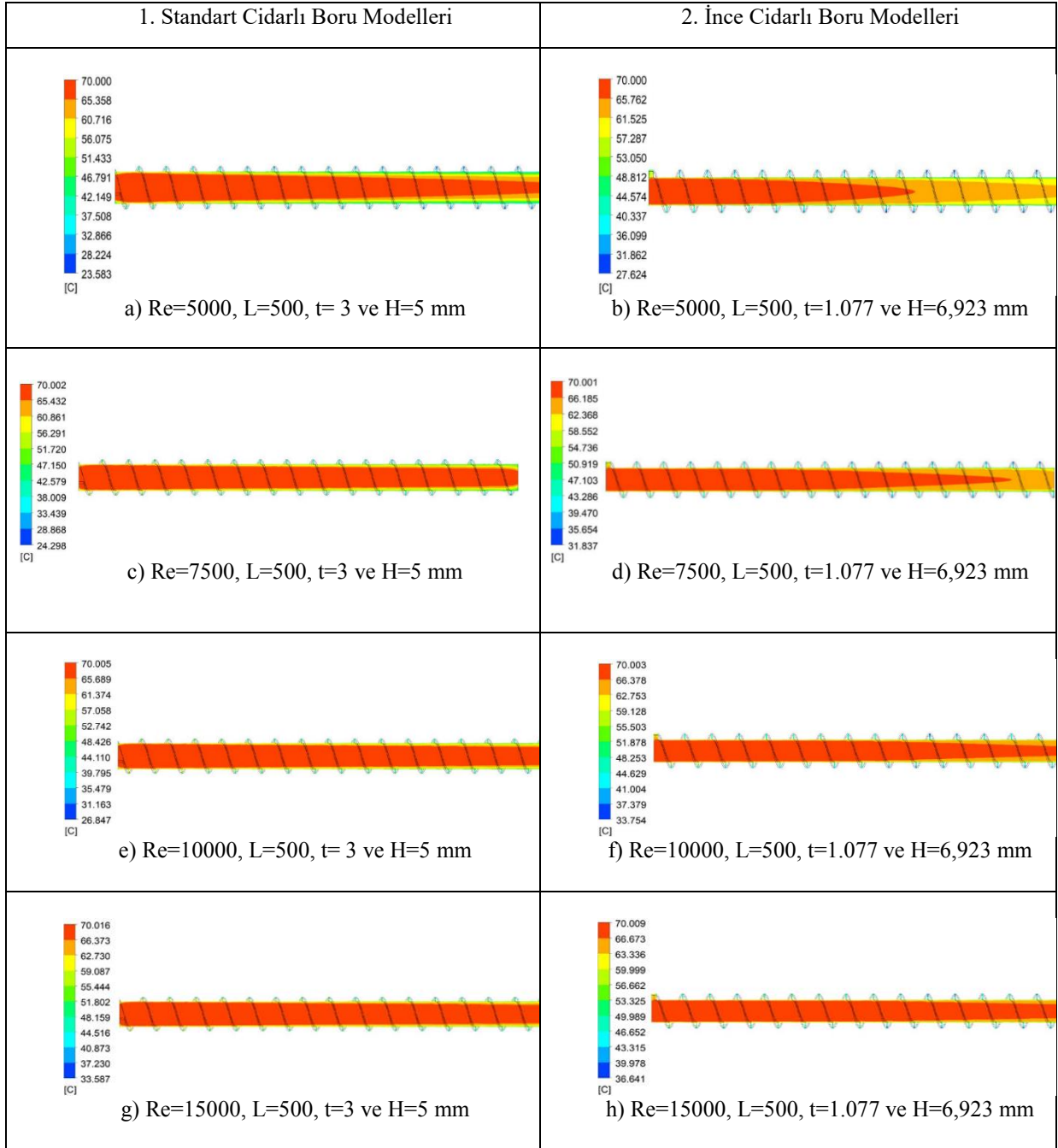
Şekil 4. Kanatsız borular için akışkan sıcaklığının Re sayılarına göre değişimi



Şekil 5. 10 mm hatveli borular için akışkan sıcaklığındaki değişimler



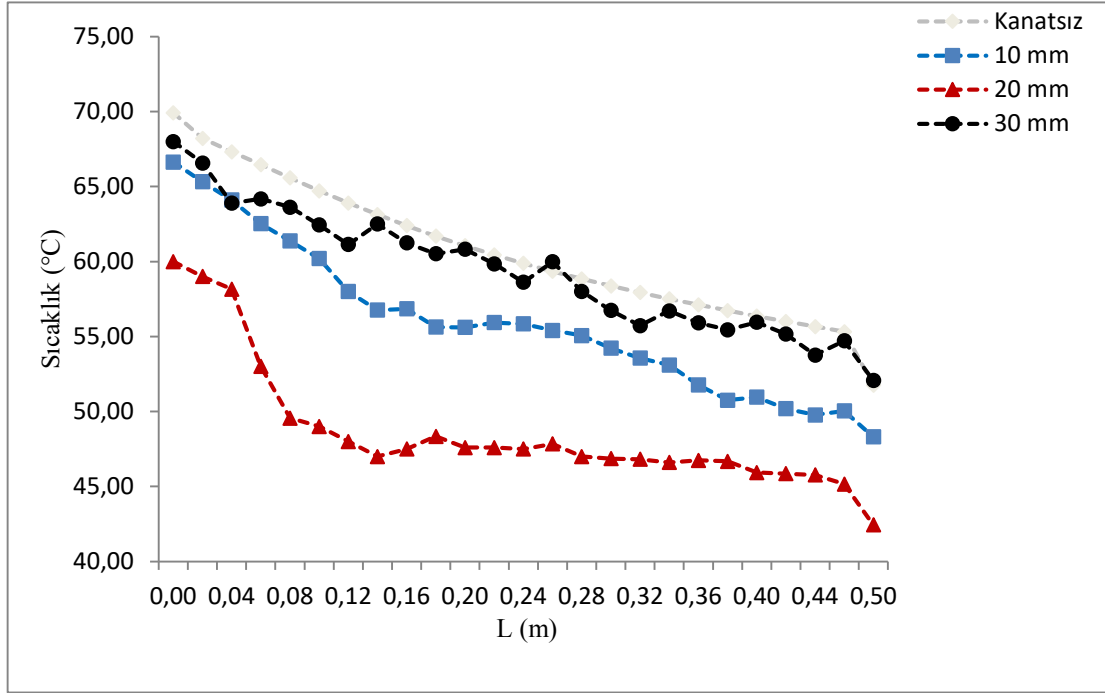
Şekil 6. 20 mm hatveli borular için akışkan sıcaklığındaki değişimler



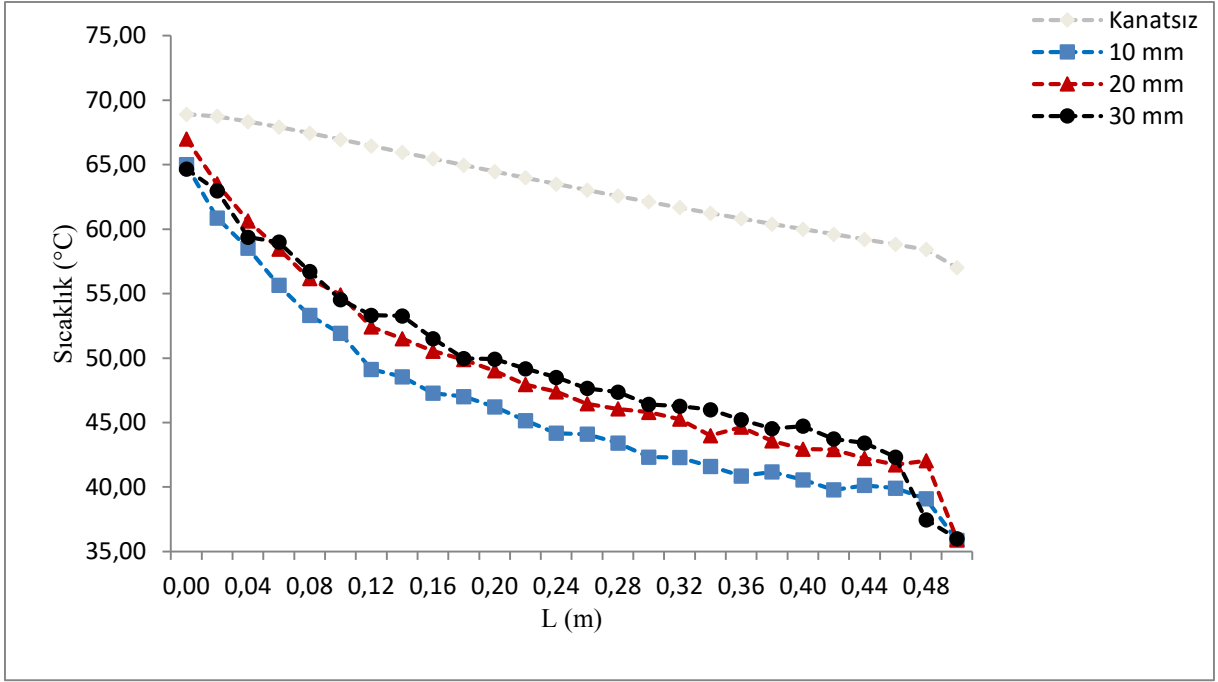
Şekil 7. 30 mm hatveli borular için akışkan sıcaklığındaki değişimler

Tüm şekiller dikkate alınıp akışkan sıcaklığındaki değişimler incelendiğinde 1.077 mm cidar kalınlığına sahip olan kanatlı boruların 3 mm cidar kalınlığına sahip olan borulara göre aynı hatve şartlarında daha yüksek sıcaklıklara sahip oldukları görülmektedir. Reynolds sayısı arttıkça bütün durumlarda bu sıcaklıkların arttığı görülmüştür. Artan boru uzunluğuna göre sıcaklık dağılımları da farklı cidar kalınlığına sahip iki tip boru aşağıdaki gibi incelenmiştir. Şekil 8 ve 9 sırasıyla 1,077mm ve 3mm et kalınlığına sahip olan boruların boru uzunluğuna göre kanatsız ve 10, 20, 30 mm 'lik hatvelerdeki kanatlı borular için sıcaklık dağılımları verilmiştir. Boru uzunluğu boyunca sıcaklık değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın nedeni boru uzunluğu boyunca sınır tabaka kalınlığındaki artışın (veya değişimin) sebep olduğu düşünülmektedir. Yine Şekil 8 incelendiğinde

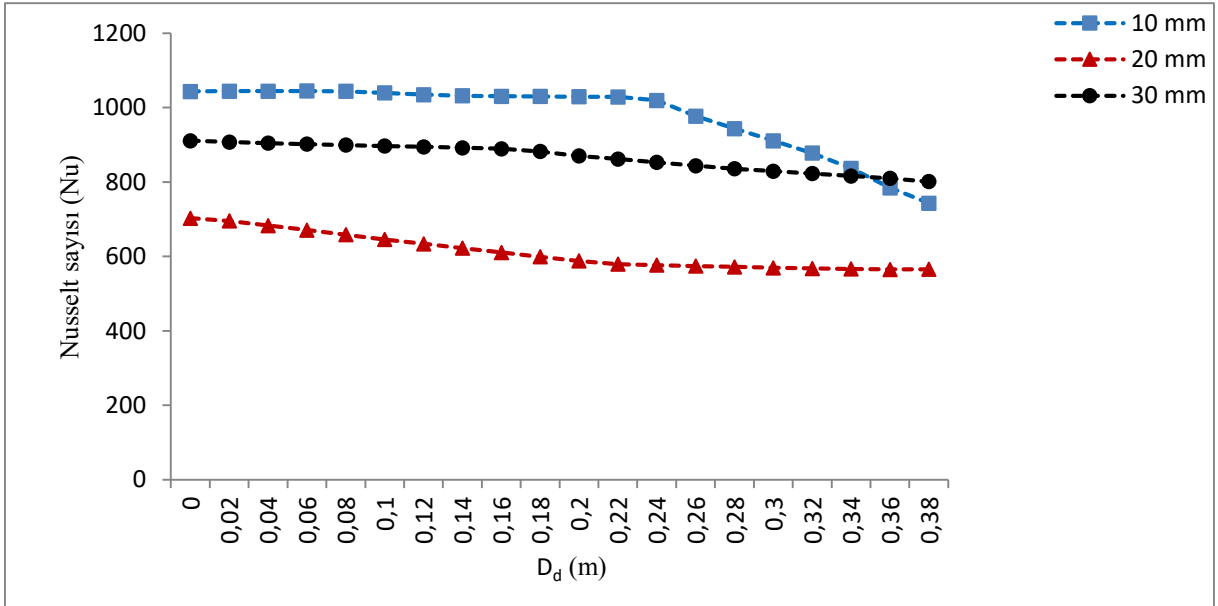
en düşük sıcaklık değerinin 20 mm hatveli boruda elde edildiği ancak 30 mm hatveli boruda ise sıcaklık değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ise boru hatvesinin büyümesi ile helisel kanatçık uzunluğunun azalması (Şekil 2) ve buna bağlı olarak da ısı transferinin azaldığı düşünülmektedir. Çünkü Şekil 8 ve 9'daki kanatsız borularda da sıcaklık değerlerinin kanatlı borulara göre çok daha yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür. 10 mm hatveli boruda ise helisel kanatçık uzunluğunun artmasına karşılık sıcaklık değerinin 20 mm hatveli boruya göre daha büyük değerlerde olduğu da görülmüştür. Bu duruma ise hatvenin azalmasıyla kanat açıklığındaki azalmanın (Şekil 2 ve Şekil 5) sebep olduğu düşünülmektedir. Nitekim tüm bu durumlar literatürlerle de desteklenmektedir [5, 12].



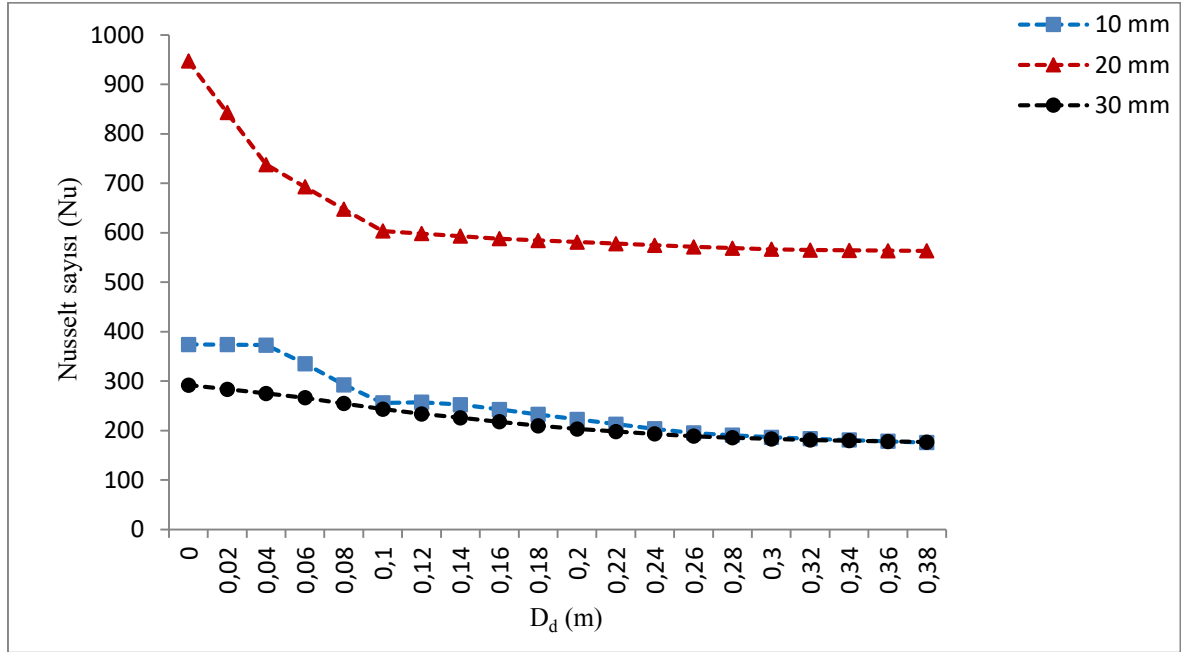
Şekil 8. Cidar kalınlığı 1,077 mm olan borularda boru uzunluğuna göre sıcaklık dağılımları



Şekil 9. Cidar kalınlığı 3 mm olan borularda boru uzunluğuna göre sıcaklık dağılımları

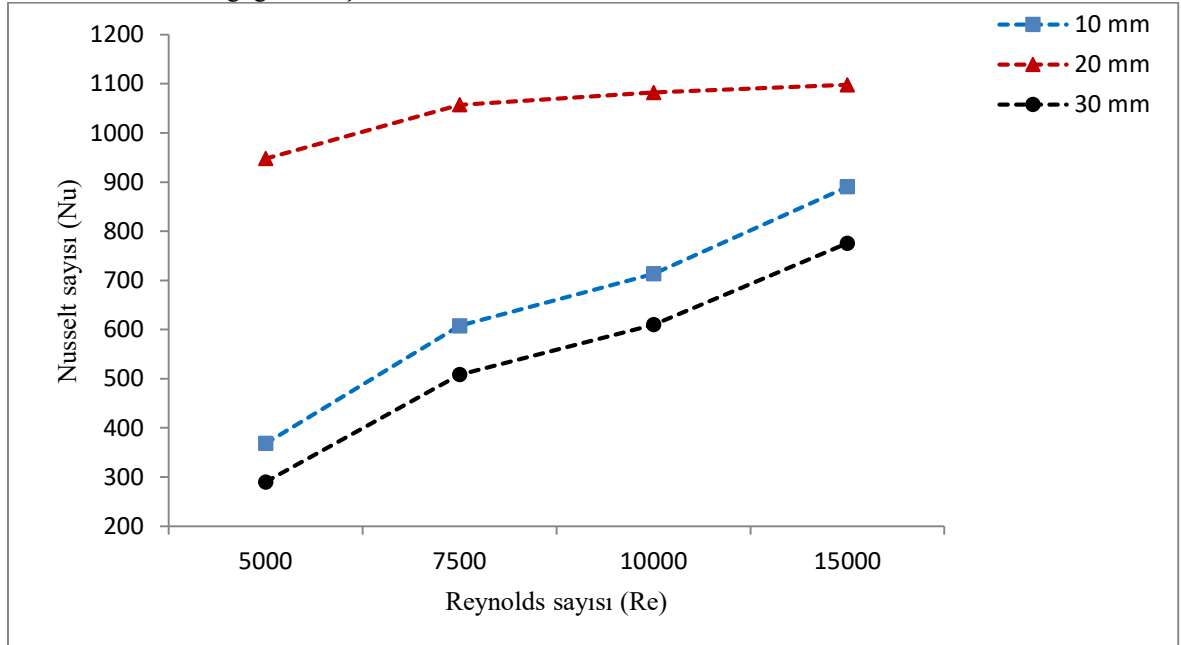


Şekil 10. Cidar kalınlığı 1.077 mm olan borularda yerel Nu sayısının değişimi

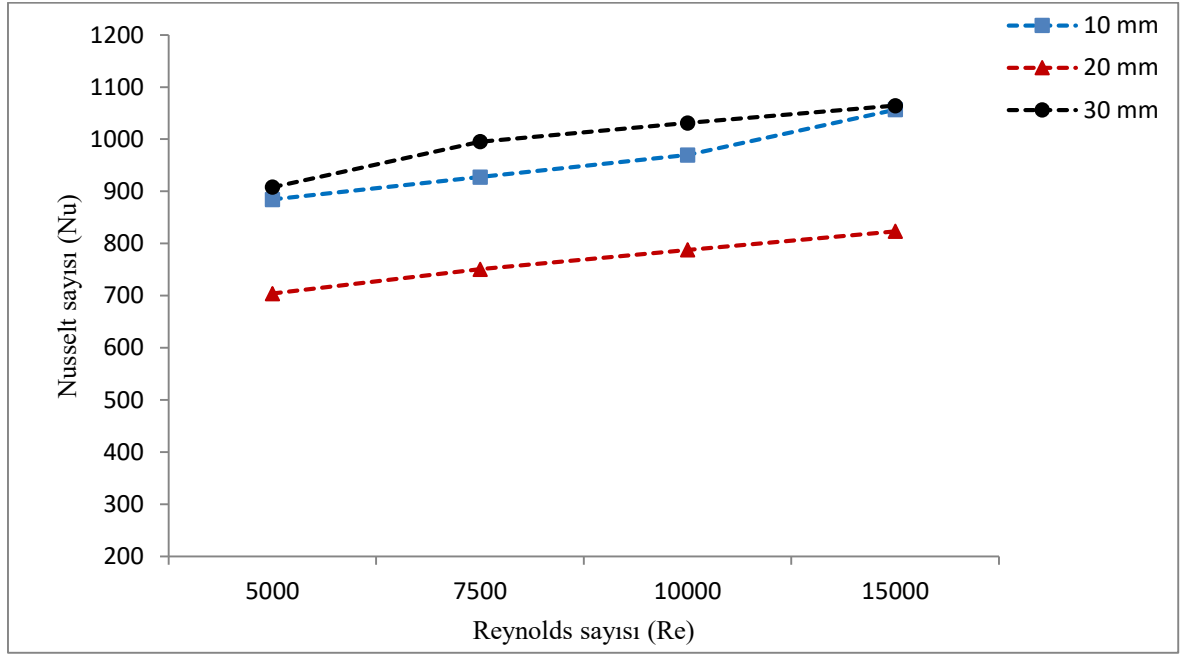


Şekil 11. Cidar kalınlığı 3 mm olan borularda yerel Nu sayısının değişimi

Şekil 10 ve 11 deki grafiklerde ise her iki model için boruların kanatlı dış çapına göre Nu değişimleri gösterilmiştir. 1,077 ve 3 mm et kalınlıkları ve farklı hatvelerdeki borular için kanatlı dış çapın artmasıyla Nu sayısının azaldığı görülmüştür. Kanat yüksekliğinin artması Nu sayısının ve dolayısıyla ısı taşınım katsayısının azalmasına sebep olmuştur. Bu azalmanın nedeni kanat yüksekliğinin artmasından dolayı sınır tabaka kalınlığındaki değişimin sebep olduğu düşünülmektedir. 1,077 mm et kalınlığındaki boru için en yüksek Nu sayısının 20 mm 'lik hatveli boruda elde edilirken, 3 mm et kalınlığına sahip boruda ise yüksek Nu sayısı 10 mm hatveli boruda elde edildiği görülmüştür.



Şekil 12. Cidar kalınlığı 1,077 mm olan borularda farklı Re sayılarına göre Nu sayısındaki değişim



Şekil 13. Cidar kalınlığı 3 mm olan borularda farklı Re sayılarına göre Nu sayısındaki değişim

Artan Reynolds sayısına göre Nu sayısının değişimi de farklı cidar kalınlıklarına sahip borular için ayrıca hesaplanmıştır. Şekil 12 ve 13 ise sırasıyla 1,077 ve 3 mm cidar kalınlığındaki boruların artan Re sayısına göre Nu sayısının değişimi 10, 20, 30 mm hatveli borular için gösterilmiştir. Tüm boru tiplerinde Re sayısının artmasına karşılık Nu sayısının da arttığı görülmüştür. Elde edilen bu sonucun farklı çalışmaların sonuçları ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür [6,8,10,13,16]. Ancak 1,077 mm et kalınlığındaki boru için en yüksek Nu sayısının 20 mm hatveli boruda elde edildiği, 3 mm et kalınlığındaki boru için en yüksek Nu sayısının ise 30 mm hatveli borularda elde edildiği görülmüştür. Yine yukarıdaki grafikler incelendiğinde kanatlar arasındaki mesafenin (açıklığın) artması ile ısı taşınım katsayısını artırdığı görülmüştür. Çünkü kanatlar arası açıklık artarsa o bölgedeki sınır tabaka kalınlığı azalır ve bu durum Nu sayısının ve dolayısıyla ısı taşınım katsayısının artmasına sebep olur. Ayrıca ısı transfer performansının, kanat aralığı, kanat yüksekliği ve kanat tipinden etkilendiği ve elde edilen bu sonuçların literatürle de desteklendiği görülmüştür [12].

4. Sonuçlar

1,077 ve 3 mm cidar kalınlığındaki borular baz alınarak farklı hatvelerdeki borular için Re sayısına göre Nu sayısındaki değişimin incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Kalın cidarlı boruda ısı transferi açısından en iyi sonuç 10 mm hatveli boruda ince cidarlı boruda ise en iyi sonuç 20 mm hatveli boruda elde edildi.
2. Boru çalışma şartları dikkate alınarak boru cidar kalınlığının inceltilmesinin boru ağırlığını azalttığı ve buna karşılık ısı transferini iyileştirdiği görüldü.
3. Cidar kalınlığının azalması ile ısı transferi açısından en iyi sonucun 20 mm hatveli boruda elde edilmesi kalın cidarlı borulardaki 10 mm hatveli boruya göre daha düşük ağırlıklı ve daha az maliyetli boruların kullanımına olanak sağlayacaktır.
4. Cidarı inceltilmiş boruların düşük sıcaklık değerlerinde daha verimli çalışacağı ancak çok yüksek sıcaklık değerlerinde ise bu borularda deformasyon oluşabilir.

Kaynaklar

- [1] Çelik Hamdi Selçuk, Zeynep Çelik Ve Uçar Mehmet. "Boru Konstrüksiyonun Isı Transfer Performansına Etkisinin Sayısal Yöntemlerle Analiz Edilmesi." Mühendis Beyinler Dergisi (2015) 1.3: 5-15.
- [2] El Maakoul, Anas, et al. "Performance enhancement of finned annulus using surface interruptions in double-pipe heat

- exchangers." *Energy Conversion and Management* 210 (2020): 112710.
- [3] Hosseini, M. J., et al. "Experimental and numerical evaluation of longitudinally finned latent heat thermal storage systems." *Energy and Buildings* 99 (2015): 263-272.
- [4] Erdem, CUCE "Boyuna Uzatılmış Yüzeylerde Dikdörtgenel Oyukların Isı Atımına Etkisi: Bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi." *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* (2020) 20.5: 931-940.
- [5] Tarkan, KOCA ve Serbay Ali BUDAK. "Kanatçıklı iç borulu dikey ısılarında ısı transferi ve basınç düşümü analizi." *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 11.1 (2021): 62-72.
- [6] Buyruk, Ertan, and Koray Karabulut. "Numerical Investigation Into Heat Transfer for Three-Dimensional Plate Fin Heat Exchangers with Fins Placed Perpendicular to Flow." *Transactions of Famena* 37.2 (2013): 87-102.
- [7] Erdem, I. Ş. I. K., and Volkan Tuğan. "Dairesel Bir Boruda Kullanılan Boyuna Dalgalı Kanatçıkların Isı Transferine Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi." *International Journal of Pure and Applied Sciences* 7.1 (2021): 19-26.
- [8] Buyruk, Ertan, and Koray. Karabulut. "Research of heat transfer augmentation in plate fin heat exchangers having different fin types." *Journal of Engineering Thermophysics* 29.2 (2020): 316-330.
- [9] Karataş, Tuğçe. CFD analysis of shell and tube heat exchanger (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [10] BUYRUK, Ertan, and Koray KARABULUT. "Plakalı Kanatçıklı Isı Değiştiricilerde Kanat Geometrisinin Isı Transferine Olan Etkisinin Üç Boyutlu Sayısal Olarak İncelenmesi." *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 19.56 (2017): 346-363.
- [11] Bazarbashi, M. Dalgalı Kanatçıklı Isı Değiştiricinin Yanıt Yüzey Metodu ile Çok Amaçlı Optimizasyonu. Diss. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2013.
- [12] Kim, Chang Nyung, Jin Jeong, and Baek Youn. "Evaluation of thermal contact conductance using a new experimental-numerical method in fin-tube heat exchangers." *International journal of refrigeration* 26.8 (2003): 900-908.
- [13] Kotcioğlu, İsak, And Abdurrahim Bölükbaşı. "Düsey Dikdörtgen Kesitli Bir Kanalda Farklı Kanatçıklı Yüzeylerde Isı Transferinin İncelenmesi" *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 5.2 (2003): 89-102.
- [14] Ereğ, Aytunc, et al. "Effect of geometrical parameters on heat transfer and pressure drop characteristics of plate fin and tube heat exchangers." *Applied Thermal Engineering* 25.14-15 (2005): 2421-2431.
- [15] Tepe, Ahmet Ümit. "Kanatlı-Borulu Isı Değiştiricilerinde Çukurlu/Çıkıntılı Kanat ile Isı Transfer Performansının Arttırılması." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 23: 401-414.
- [16] Parlak, Nezaket, And Halime Çelik. "Kanatçık Geometrisinin Isı Geçişine Etkisinin Parametrik İncelenmesi." *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies* 2.2 (2018): 25-29.
- [17] Şahin, Hacı Mehmet, Ali Rıza Dal, and Eşref Baysal. "3-D Numerical study on the correlation between variable inclined fin angles and thermal behavior in plate fin-tube heat exchanger." *Applied Thermal Engineering* 27.11-12 (2007): 1806-1816.
- [18] Chang, Yu-Juei, and Chi-Chuan Wang. "A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry." *International Journal of heat and mass transfer* 40.3 (1997): 533-544.
- [19] Kundu, B., and P. K. Das. "Optimum dimensions of plate fins for fin-tube heat exchangers." *International journal of heat and fluid flow* 18.5 (1997): 530-537.
- [20] Abdulateef, Ammar M., et al. "Experimental and computational study of melting phase-change material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins." *Solar Energy* 155 (2017): 142-153.
- [21] Tao, W. Q., Z. G. Qu, and Y. L. He. "Experimental and 3d numerical study of air side heat transfer and pressure drop of slotted fin surface." (2005).
- [22] Kazemi, M., Hosseini, M. J., Ranjbar, A. A. and Bahrapoury, R.. Improvement of longitudinal fins configuration in latent heat storage systems. *Renewable Energy*, (2018) 116, 447-457.
- [23] Akkurt, M. (2012). Makine Elemanları Teorik Hesaplar ve Hesap Yöntemleri Kitabı (1.bs.)
- [24] Seyrek Boru-<http://Seyrekboru.Com/Tr/Sayfa/Urunler/16/Dikissiz-Borular>
- [25] Karabulut, K., Buyruk, E., Kılınç, F., & Karabulut, Ö "Farklı Geometrilere Oluşan Kanatçıklı Plakalı Isı Değiştiricileri İçin Isı Transferinin Üç Boyutlu Sayısal Olarak İncelenmesi" *Tesisat Mühendisliği – 2013 Sayı 137 - Eylül/Ekim*.

Standart Karayolu Köprüsünün Geometri ve Malzeme Yönünden Belirsizlikleri Dikkate Alarak Doğrusal Olmayan Statik Analizi

Mehmet Fatih YILMAZ^{1*}

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Atakum, Samsun, Türkiye
^{*}mehmetfatih.yilmaz@omu.edu.tr

(Geliş/Received: 08/08/2022;

Kabul/Accepted: 15/08/2022)

Öz: Yapısal kapasitenin belirlenmesinde ilk ve en önemli aşamalardan biri malzeme dayanımlarının belirlenmesidir. Bu kısımda bir çok bilinmeyen yer almasına karşılık, olasılıksal yaklaşımlardan faydalanılarak malzeme özellikleri deterministik olarak elde edilebilmektedir. Bununla birlikte geliştirilen olasılık modellerinde kullanılan yaklaşımlar ilave belirsizliklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Günümüzde gelişen bilişim ve bilgisayar teknolojileri yardımı ile malzeme yönünden belirsizliklerin yapısal tasarımlarda dikkate alınması mümkün hale gelmektedir. Bu nedenle geçmişte yönetmelikler tamamen deterministik yaklaşımları içerirken, günümüzde yarı-deterministik yaklaşımları içermekte ve tam olasılıksal yaklaşımların geliştirilebilmesi için çalışmalar yürütülmektedir. Bütün bunlar yapının performansının belirlenmesinde, yukarıda bahsi geçen belirsizliklerin dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Ancak halen pratik ve güncel bir hesap yöntemi geliştirilebilmiş değildir. Bu çalışma kapsamında Türkiye karayolu hatlarında yer alan tipik bir köprü türü ele alınmış. Köprü ayağının moment-eğrilik ilişkisi malzeme belirsizlikleri dikkate alınarak modellenmiştir. Ayrıca kolon yükseklikleri ve köprü açıklıklarındaki belirsizlikler de Monte-Carlo yaklaşımı ile modellenmiş, köprüün yatay yük taşıma kapasitesinin belirlenebilmesi için artımsal statik itme analizi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Belirsizlikler, Monte-Carlo Yöntemi, Doğrusal Olmayan Statik Analiz, Moment-Eğrilik

Nonlinear Static Analysis of Ordinary Highway Bridges Considering Geometry and Material Uncertainties

Abstract: Material properties are an initial critical step to correctly determine the structure's capacities. Although there are many uncertainties, with the help of the probabilistic approach, the structural components' material strength was determined deterministically. The assumptions made to determine the material strengths generate additional uncertainties in determining the strength of the structures. Nowadays, developing computer technologies enable the determination of the strength capacities of structures with probabilistic approaches that consider these uncertainties in designing structural components. For this reason, while the approaches followed in the regulations included completely deterministic analyses in the past, quasi-statistical methods are used today, and studies are carried out to develop entirely statistical approaches. Therefore, to determine the structure's actual behavior, the uncertainties in the structural components should be taken into account. However, a practical and up-to-date approach has not been developed yet, and the existing methods impose an extensive analytical and computational burden. In this study, an ordinary single-column bridge in Türkiye was considered. Furthermore, the moment-curvature relationship of the pier was simulated considering material uncertainties. In addition, the differences in column heights and span lengths were modeled with the help of the Monte-Carlo simulation. Incremental static analyses were performed, and the lateral load-carrying capacities of the bridge were simulated.

Key words: Uncertainties, Monte-Carlo Simulation, Nonlinear Static Analysis, Moment-Curvature

1. Introduction

Turkey has three active fault lines, and nearly all of its land area is vulnerable to earthquakes. The transportation systems must continue to function even after significant earthquakes to allow people to reach the disaster zone sustainably, minimize economic losses, and not interrupt commercial activities. However, it is impossible to analyze all bridges, the most fragile components of existing transportation systems. For this reason, bridges were divided into specific groups by considering their structural behavior. It was accepted that the capacity analyses performed for these groups were valid for other bridges in the same group.

Another issue to be considered in determining the performance of bridges was structural and geometric uncertainties. Since the bridges in the defined group have different column heights and span distances, these

* Sorumlu yazar: mehmetfatih.yilmaz@omu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-2746-7589

differences should be considered in the analysis. Furthermore, the material attributes employed in the analytical approach are values that cannot be calculated deterministically and provide variable findings in each sample. However, with the help of experimental studies, it has been seen that these parameters can be represented using specific probabilistic models. It is critical to apply probabilistic techniques to predict the specific compressive and tensile strengths of materials used in bridge construction and elasticity modules, such as concrete and reinforcing steel. The Monte-Carlo simulation brings us essential amenities for modeling. It helps us to represent probabilistic models realistically. However, many models must be produced to represent the actual model, significantly increasing the analysis load. For this reason, different approaches such as Latin Hypercube Sampling and Important Sampling have been developed to reduce the number of samples and make analysis approaches applicable [1–4].

There are two indispensable factors in determining the horizontal displacement capacities of bridges. One of them is the determination of the nonlinear behavior of the bridge piers and their deformation capacity, and the other is the determination of the support responses. In modeling the behavior of the bridge piers, the acceptance of the behavior of plastic hinges comes to the fore. One of the most common methods for simulating the nonlinear behavior of piers is the plastic hinge exception. It is necessary to obtain the moment-curvature relationship of the bridge piers and determine their deformation capacity [5]. In addition, the pushover analysis has been widely used to determine the bridge's lateral load-carrying capacity. In this approach, the analysis should be performed by increasing the loads until a certain peak displacement is reached when the bridge has either static lateral loads or modal loads in a specified direction. Thus, the horizontal displacement capacity of the bridge in the relevant direction will be determined. The most important disadvantages of this approach are the difficulties in considering the high mode effects and the challenges in redistributing loads after the initial yield point is reached in the structural members.

Incremental Static analyses (Pushover) have been developed with the help of different approaches so that high mode effects can also be taken into account. A few of these approaches are the N2 methods, incremental static analysis, capacity spectrum methods, and adaptive capacity spectrum methods [6]. With the help of these approaches, it has become possible to determine the structural responses more realistically by considering the higher modal effects. However, since a significant part of the studies is focused on buildings, it is critical to determine the effectiveness of the developed approaches on bridges. In the studies carried out in this context, the effectiveness of the methods developed for certain bridges has been proven [7, 8]. However, the necessity of carrying out more comprehensive and extensive studies has been emphasized. Nowadays, with increasing interest, special studies such as the determination of the earthquake performance of steel bridges and the determination of the earthquake performance of high-speed train bridges are carried out with the help of pushover analysis [9–12]. Furthermore, the direction of the earthquake load affects the bridge's collapse mechanism and should also be considered in the pushover analysis. Therefore multidirectional pushover analysis was performed to determine the directional effects of earthquake loads [13]. Another exciting advancement is considering the near-fault ground motion to determine the bridge response. The rupture distance of the center of the earthquake and bridge affects the ground motions characteristic vitally there for considering the near-fault effect while pushover analysis has great importance [14].

Although dynamic analyses should be performed in the time domain to obtain more realistic results, static approaches can get results with the necessary convergence and reduce computational load and analysis costs [15, 16]. In addition; it also allows parametric studies that require a large number of analyses to be conducted.

Within the scope of this study, one of the ordinary bridge types designed as a Turkish highway bridge has been examined with the help of analytical models in which different uncertainties were taken into account. Different column heights and span distances for single-pier bridges with two spans were modeled using Monte-Carlo simulation, and material uncertainties were also considered. Pushover analyses were performed on the models developed using the OpenSees program. The horizontal displacement capacities of the bridge and the corresponding base shear forces were obtained by taking into account the uncertainties in the bridge. In addition, the moment-curvature relations for the bridge pier were also modeled with the help of Monte-Carlo simulation, and the yield curvatures, moment capacities, and rotational capacities of the piers were determined.

2. Bridge Modeling

Considering the ordinary highway bridges in Turkey, the essential parts of these bridges were built after the 1990s. The bridges are grouped into four different classes based on structural attributes [17]. Ordinary standard roadway bridges are defined by Caltrans (2006). Steel shim elastomeric bearings on the abutments and bending cap beams support the bridge superstructure. Elastomeric bearings as base isolators are commonly used to reduce the seismic load and are composed of steel plates, rubber pads, and steel core materials. The only force between the abutment-elastomeric bearing and the superstructure-elastomeric bearings is friction force. There are no connecting devices between the abutment and the superstructure and the elastomeric bearing. During a severe earthquake, the friction force can be exceeded, and the superstructure slides on the elastomeric bearing, and unseating occurs. The shear key was a fuse element designed to prevent the superstructure from dropping below the piers and sacrificed itself to protect the superstructure, piers, and abutments.

Ordinary roadway bridges in Turkey are composed of multi-span composite structures that include pre-stressed concrete girders and continuous cast-in-place reinforced concrete decks (See Figure 1). C40 and C25 concrete materials was used to build the girders and deck respectively, and S420 reinforcement steel was used for all reinforced members. Figure 2 shows the view of the typical single-column pier of the ordinary roadway bridge in Turkey.

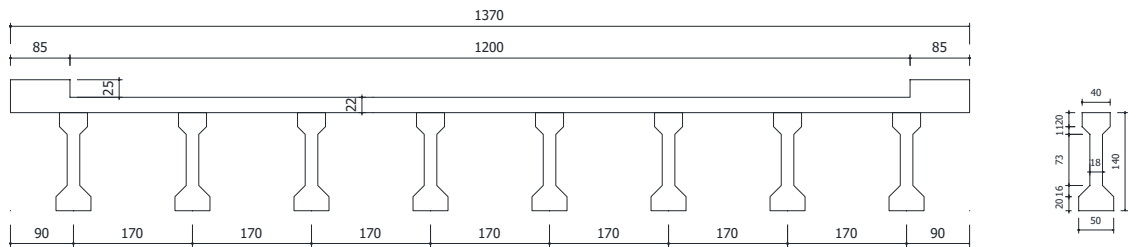


Figure 1 Typical shape of the superstructure of the ordinary bridges (All the dimensions are in cm)

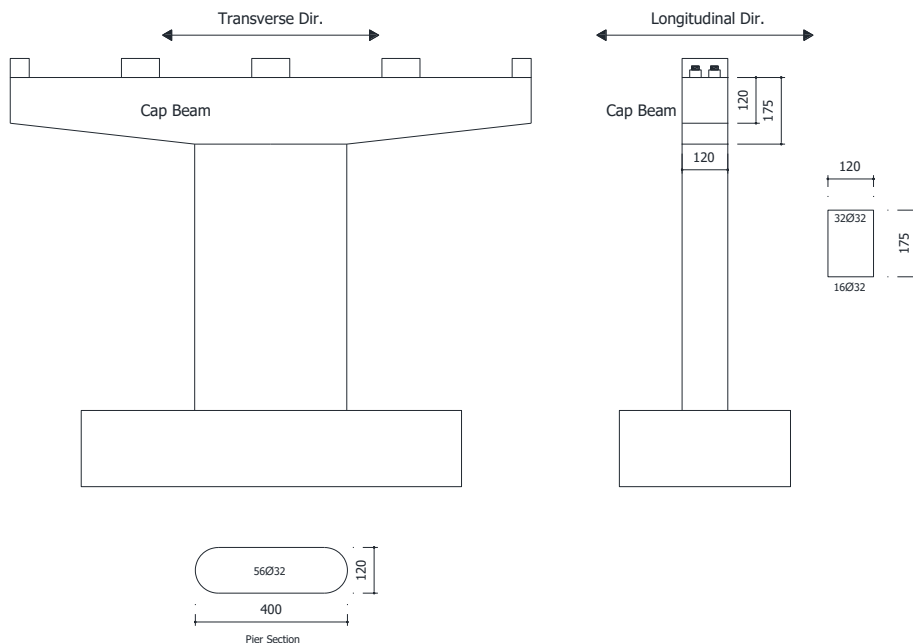


Figure 2 Typical view of the single column pier of the ordinary bridges

. A 3-D finite element model of the bridge was developed using OpenSees [18] software. The model took into account P- Δ with large displacements to determine the second-order effects on the piers. Concrete 02 materials

were used to define both confined and unconfined concretes and ReinforcingSteel materials were used to describe the reinforcement steel materials. Expected values of the concrete and steel materials were considered in the analysis. The bridge's superstructure was assumed to be elastic under seismic excitation. Therefore elasticBeamColumn element modules were used to model the superstructure. dispBeamColumn elements were used to define the bridge's piers, and pier sections were defined using fiber section commands, including the torsional rigidity of the piers.

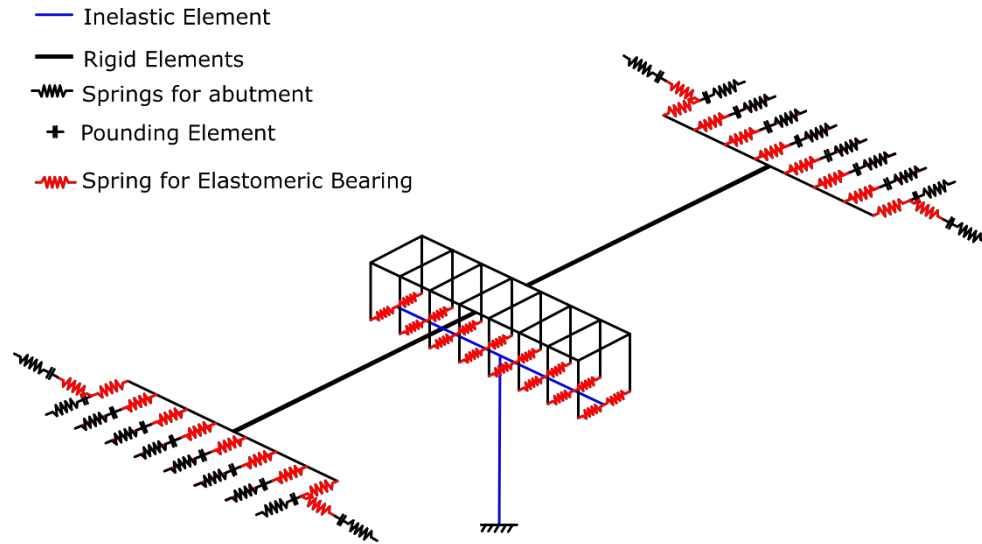


Figure 3 3-D analytical model of the bridges

The elastomer bearing transfers the lateral load with friction between the superstructure and the abutments. Because there was no connecting device, the lateral load-carrying capacities depended on the dynamic friction coefficient and the axial load acting on the systems. After the friction load exceeds the lateral load capacity, it remains constant. The friction coefficient is defined as 0.4 by Caltrans (2006). Elastomer bearings were modeled with ElasticPP material modeling. The elastomer bearing's initial rigidity was calculated using $K_{bearing} = \frac{G^* A}{h_{nt}}$, where G is the shear modulus of the rubber pads, A is the area of the elastomer bearing, and h_{nt} is the total thickness of the rubber.

The bridge's superstructure and substructure are not continuous in horizontal and vertical directions. The different behaviors of the two components cause an opening and closing of the expansion joint, which leads to a nonlinear and discontinuous effect on the bridge. When joints are closed, pounding occurs between adjacent bridge components, simulated by pounding elements. 50mm and 25mm gaps in longitudinal and transverse directions are modeled, respectively, with the initial stiffness and shear yielding capacity. ElasticPPGap materials were used to model the pounding elements. Moreover, the abutment and backfill soil models were created according to the [19] models.

3. Defining Material and Structural Uncertainties.

According to the inventory analysis conducted by [17], the bridge lengths are changed between 10 to 40 meters with mean 23.8m and a standard deviation of 6.1m and assumed to fit a normal distribution, moreover, the column height has the mean 6.73m long with standard deviation 2.04m and normally distributed. The concrete materials are defined as C25 material with expected compression stresses of 32.5MPa, and reinforcement steel has an expected yielding stress of 504 MPa. The uncertainties considered in the analytical models are presented in Table 1.

Table 1 Uncertainty distribution of the bridge characteristic models.

Modeling parameters	Probability Distribution	Mean	Covariance
Span Length	Normal	23.8	0.25
Column Height	Normal	6.73	0.3
Concrete Com. Strength	Normal	32.5	0.1
Rebar Yielding	Lognormal	504	0.05

Simulation process duplicates behavior of existing or designing system. It allows the engineer to experience the system's behavior either better understand the system or further management. The main advantages of simulation are understanding the essential component of the system, how they respond, and how they behave in the future. Properties of simulation outputs are determined by the input and transfer function. When the transfer function is simple, output properties can be calculated analytically. However, it is impossible in many cases because of different uncertainties and complex actions. In this case simulation, the technique gives a better solution with a reliable result depending on the number of simulations. When the number of simulations goes to infinity, the results coincide with exact, which is impossible to compute. Therefore, an adequate number of simulations should be determined in using simulation.

Monte Carlo simulation, which is the most commonly used effective tool, is used in this study with a hundred thousand samples. The simulation of the uncertainties of the bridge components and material properties was generated using normal distributions. Histograms of the distribution of the selected delays as shown in Figure 4.

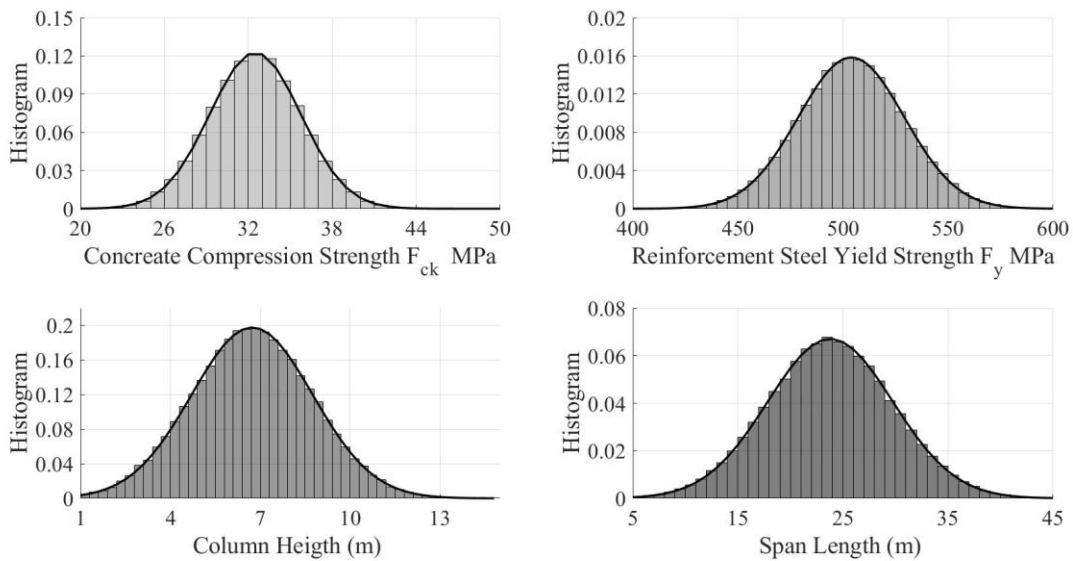


Figure 4 Histograms of the bridge components and materials distribution.

4. Discussion on Moment Curvature of the Bridge Piers.

The moment-curvature relationship of the bridge pier was obtained with the help of the OpenSees [18] program, taking into account the uncertainties modeled in the Monte Carlo simulation. Using the moment-curvature relations, the maximum moment capacity of the bridge pier and the angle of rotation at which yield occurs in the reinforcements in the bridge pier were simulated. Moreover, the curvature at which damage starts to occur and the non-linear deformation capacity of the bridge under lateral loads will be determined.

The expected value of the moment capacities of the column piers was determined as 4434kNm, and the standard deviation was determined as 171.7kNm. Figure 5 showed the histogram of moment capacities and was well-matched with normal and log-normal distribution curves. Considering that the normal distribution is used to model uncertainties in construction materials, it is seen that the moment capacity was well-matched with both the normal and log-normal distributions. The covariance value of the moment capacities of the column piers was determined as 0.038, which indicates that the distribution ratio of the moment capacities is low and the probability of obtaining a moment capacity close to the mean earthquake is high.

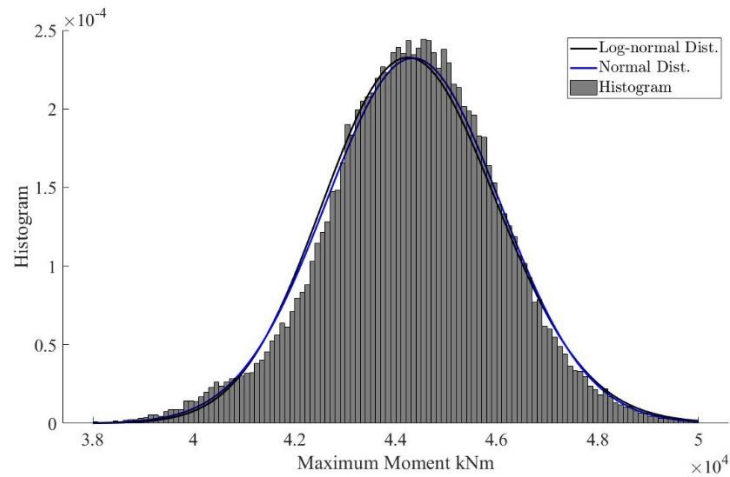


Figure 5 Bridge Piers Maximum moment distributions.

The rotation angle at which the first flow started in the piers was simulated considering the material uncertainties. Figure 6 presents the histogram of the obtained results. The expected values of curvature corresponding to the yield rotation were calculated as 0.0027 (1/m), and the standard deviation was calculated as 0.00014 (1/m). The covariance value was determined as 0.051. Figure 6 compares yield curvature values with normal and log-normal distributions. Consequently, it was discovered that the yield curvature closely matched the normal distribution.

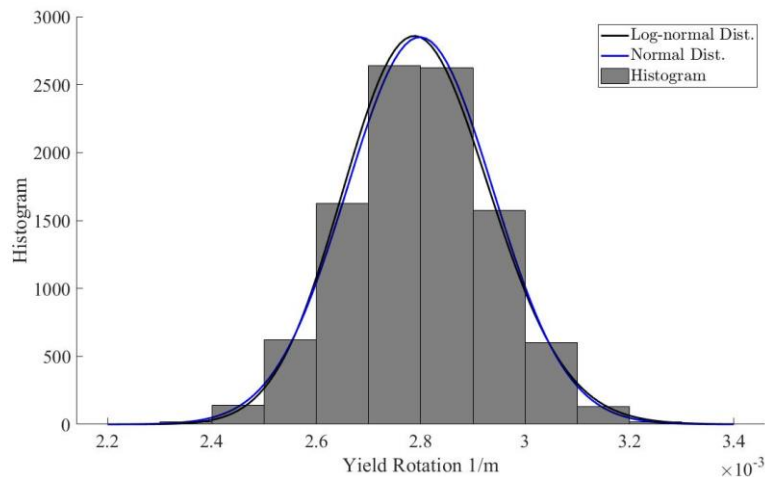


Figure 6 Bridge Piers Yield Rotation Curvature distributions

Hundred-thousand simulations were used to determine the structural uncertainties. The moment capacities obtained from the modeling were expected to converge to a specific mean and standard deviation value. Although

the essential advantage of the MSC approach is that it allows all uncertainties to be taken into account as they were, it is also necessary to determine whether a sufficiently large number of simulations has been reached. Furthermore, the findings produced in models run with low simulation numbers differ significantly from the actual values. The variations in the averages of the computed moment capacity values according to the simulation numbers are presented in Figure 7. The number of reasonable simulations within the scope of this study was calculated. Accordingly, after ten-thousand simulations, the average values converged at a specific moment capacity. Therefore, it was seen that realistic results could be obtained if ten thousand or more simulations were performed to determine the moment capacities of the investigated column piers.

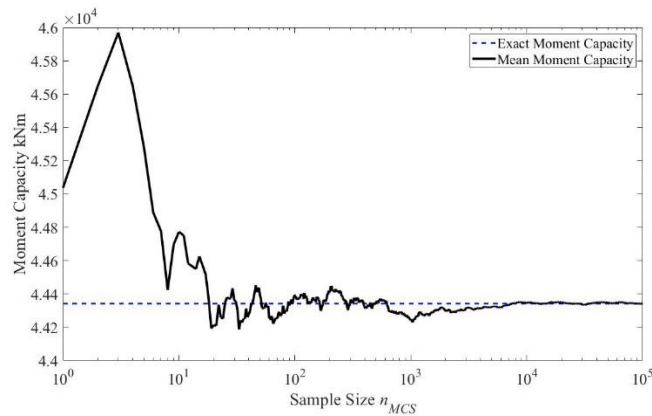


Figure 7 Distribution of the Sample Sizes and mean moment capacities.

5. Discussion on the Bridge capacity

Using the non-linear model of the bridge and considering the uncertainties in concrete compressive strength, reinforcement yield strength, column heights, and bridge span lengths, the bridge capacity was determined with the help of ten-thousand samples. With the use of incremental static analysis on the models, the horizontal load-carrying capabilities of the bridge were tried to be determined. Figure 8 shows the maximum, mean, and minimum base shear forces determined from the analysis. As a result of the study, it was seen that there were significant differences in the base shear forces. The base shear forces were significantly affected by the uncertainties in the material models and the geometric uncertainties, such as the height of the bridge piers and the bridge's width.

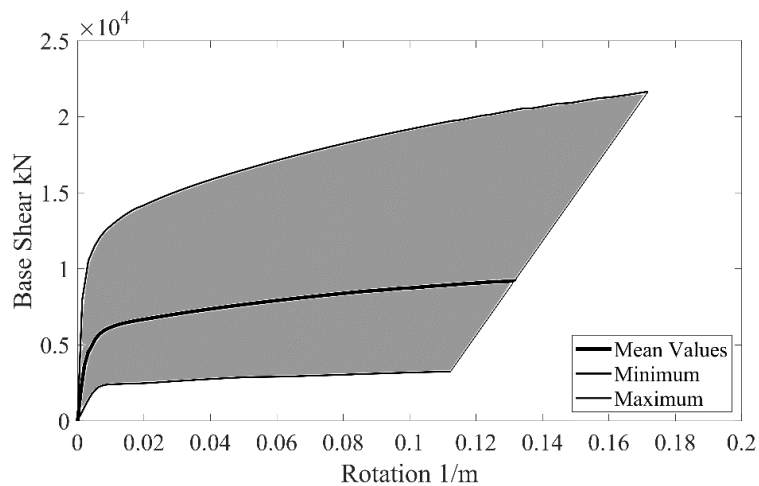


Figure 8 Pushover diagrams of the bridge based on Base Shear and Piers rotations.

6. Conclusion.

Bridges "under natural disasters" are the most vulnerable components of the transportation networks. For this reason, it is essential to determine the structural performance of bridges. In this context, dividing the existing bridges into specific groups and determining the horizontal load-carrying capacities of these groups provides general and practical information about the capacities of the bridges. This work investigated the horizontal load-carrying capability of an ordinary highway bridge in Türkiye regarding material and geometry uncertainties.

- The concrete's compressive strength and the reinforcing steel's tensile strength were considered material uncertainties in the bridge design. The Monte-Carlo method simulated the predicted concrete compressive strength and steel tensile strength with a normal distribution.
- The moment-curvature relationship of the piers modeled with the help of fiber elements was obtained by considering non-linear material prototypes and uncertainties in material strength.
- Moment capacities of the piers have 4434 kNm mean, and 171.7 kNm standard deviation and well fit with the normal distribution.
- When the rotational curvatures of Piers elements were examined, it was determined that yielding started at an average of 0.0027 (1/m) curvature.
- To examine the effectiveness of the number of samples involved in the simulation, a sensitivity analysis is performed. After 10^4 samples, the moment capacity approximated the average value.
- The horizontal load-carrying capacity of the bridge as a system and the corresponding rotational values were obtained. The ones corresponding to the average, maximum, and minimum base shear forces were plotted graphically.

Referenes

- [1] Biondini F. Use of Simulation in Structural Reliability. *Struct. Congr.* 2008, 2008.
- [2] Melchers RE. Importance Sampling in Structural Systems. *Struct Saf* 1989;6:3–10.
- [3] Infanger G. Monte Carlo (Importance) Sampling Within a Benders Decomposition Algorithm for Stochastic Linear Programs. *Ann Oper Res* 1992;39:69–95.
- [4] Oh M, Berger JO. Adaptive importance sampling in monte carlo integration. *J Statistical Comput Simul* 1992;41:143–68. doi:10.1080/00949659208810398.
- [5] Yilmaz MF. Reliability analysis of Bridge with Monte-Carlo Simulation. *Int. Congr. Phenomenol. Asp. Civ. Eng., Erzurum/ Turkey: PACE* 2021; 2021, p. 1–6.
- [6] Perdomo C, Monteiro R, Sucuoğlu H. Generalized force vectors for multi-mode pushover analysis of bridges. *Bull Earthq Eng* 2017;15:5247–80. doi:10.1007/s10518-017-0179-6.
- [7] Pinho R, Casarotti C, Antoniou S. A comparison of single-run pushover analysis techniques for seismic assessment of bridges. *Earthq Eng Struct Dyn* 2007;36:1347–62. doi:10.1002/eqe.684.
- [8] Paraskeva TS, Kappos AJ. Further development of a multimodal pushover analysis procedure for seismic assessment of bridges. *Earthq Eng Struct Dyn* 2009;39:211–22. doi:10.1002/eqe.947.
- [9] Lu Z, Ge H, Usami T. Applicability of pushover analysis-based seismic performance evaluation procedure for steel arch bridges. *Eng Struct* 2004;26:1957–77. doi:10.1016/j.engstruct.2004.07.013.
- [10] Bignell JL, LaFave JM, Hawkins NM. Seismic vulnerability assessment of wall pier supported highway bridges using nonlinear pushover analyses. *Eng Struct* 2005;27:2044–63. doi:10.1016/j.engstruct.2005.06.015.
- [11] Zordan T, Briseghella Bruno B, Lan C. Parametric and pushover analyses on integral abutment bridge. *Eng Struct* 2011;33:502–15. doi:10.1016/j.engstruct.2010.11.009.
- [12] Guo W, Hu Y, Liu H, Bu D. Seismic performance evaluation of typical piers of China's high-speed railway bridge line using pushover analysis. *Math Probl Eng* 2019;2019. doi:10.1155/2019/9514769.
- [13] Araújo M, Marques M, Delgado R. Multidirectional pushover analysis for seismic assessment of irregular-in-plan bridges. *Eng Struct* 2014;79:375–89. doi:10.1016/j.engstruct.2014.08.032.
- [14] Bergami AV, Fiorentino G, Lavorato D, Briseghella B, Nuti C. Application of the incremental modal pushover analysis to bridges subjected to near-fault ground motions. *Appl Sci* 2020;10:1–19. doi:10.3390/app10196738.
- [15] Bergami AV, Nuti C, Lavorato D, Fiorentino G, Briseghella B. Incremental Modal Pushover Analysis for Bridges. *Appl Sci* 2020;10:1–24.
- [16] Yilmaz MF, Aydın AC. Assessment of an old roadway bridge under static and seismic loading conditions. *Chall J Struct Mech* 2021;7:107. doi:10.20528/cjsmec.2021.02.006.

- [17] Avşar Ö, Yakut A, Caner A. Analytical Fragility Curves for Ordinary Highway Bridges in Turkey. *Earthq Spectra* 2011;27:971–96. doi:10.1193/1.3651349.
- [18] PEER. Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) 2005.
- [19] Caltrans. Seismic Design Criteria. Sacramento, CA.: 2006.

Kısıtlı Konut Hacimlerinde Tasarım Yaklaşımı

Betül İrem TEMİZ^{1*}, Şengül YALÇINKAYA²

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İskenderun, Hatay
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Trabzon

*¹ betul.temiz@iste.edu.tr, ² sengulyk@yahoo.com

(Geliş/Received: 22/08/2022;

Kabul/Accepted: 15/09/2022)

Öz: Kısıtlı metrekareye sahip olan mekanlarda alanın verimli kullanılması önemlidir. Kullanıcıya konforlu, fonksiyonel ve pratik bir yaşam ortamı sunulabilmesi için bu mekanlarda optimum koşullar sağlanmalıdır. Mekânda dış kabuktan, iç mekâna, mobilyadan aksesuara yapılacak her tasarımda sınırlılığın aşılmasına yönelik bir anlayışı benimsenmelidir. Tasarımda en iyiyi, en uygunu ve en elverişli olan yaklaşımı aramak gerekmektedir.

Kısıtlı hacimlerde tasarım yaklaşımının temelini oluşturan eylem alanlarında örgütlenme çeşitliliği ve mekân öge/bileşenlerindeki devinim, mekâna işlevsel, görsel ve boyutsal olarak katkı sağlamaktadır. Tasarımda mekâna özgü çözümlerin temel alınması ile daha fazla eylem ve eylem alanına olanak yaratılması ve devinim özelliğinin kullanılması optimum koşulların oluşmasında etkin olmaktadır. Bu bağlamda çalışma da kısıtlı hacimlerdeki tasarım yaklaşımları ile mekânda optimum koşulların nasıl sağlandığının ortaya konulması hedeflenmiştir. Eylem alanlarındaki örgütlenmeyle ve mekân bileşenlerinde/öğelerindeki devinim üzerinden ele alınan kısıtlı mekanlarda tasarım yaklaşımı, örnek konutlar üzerinden analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda optimum koşulların sağlanmasına yönelik iç mekan tasarım yaklaşımlarıyla; yapının mevcut taban alanından daha geniş kullanılabilmesi, görsel olarak daha yoğun/seyrekle veya yeterlilik hissiyatını sağlayabileceği ve eylem alanlarında çeşitli kullanımlara imkan verilebileceği gibi işlevsel, görsel ve boyutsal açıdan oluşabilecek birçok problemin çözümlenebileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Tasarım, Kısıtlı Hacim, Dar mekân, Optimum, Konut

Design Approach In Limited Housing Spaces

Abstract: Efficient use of space is important in spaces with limited square meters. Optimum conditions should be provided in these spaces so that a comfortable, functional and practical living environment can be offered to the user. The approach of overcoming restraints should be adopted in every design that will be made from outer shell to interior space, furniture to accessories. It is necessary to look for the best, the most appropriate and the most convenient in the design.

Organizational diversity in action areas and movement in space/item components which forms the basis of the design approach in limited spaces contribute to the space functionally, visually and dimensionally. By taking space-specific solutions as a basis in the design, The creation of opportunities for more actions and action areas and the use of the motion feature are effective in creating optimal conditions. In this context, the study is aimed at demonstrating how optimal conditions are achieved in space with design approaches in restricted spaces. The design approach in restricted spaces, which is addressed through organization in action areas and movement in space components/elements, has been analyzed through a sample housing. As a result of the study, it was found that with interior design approaches aimed at ensuring optimal conditions, the structure can be used wider than the existing floor area, visually more dense / sparse or provide a sense of adequacy, and various uses can be made in action areas, as well as many problems that may arise from a functional, visual and dimensional point of view can be solved.

Key words: Design, Limited Spaces, Narrow Space, Optimum, Housing

* Sorumlu yazar: betul.temiz@iste.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-2381-6873, ² 0000-0003-1629-6443

1. Giriş

Günümüzde sosyal, geçici, kalıcı, hobi gibi çeşitli kullanım amaçlarıyla tercih edilen kısıtlı konut hacimleri; hareketli veya sabit, kurum-söküm imkânı olabilen, yeni konumlarda farklı kullanımlara adapte olabilen, iç-dış mekânda şekillendirip özelleştirilebilen ve her mevsimde kullanılmak üzere çeşitli alternatiflerle ve avantajlarla tasarlanabilmektedirler. Tasarım aşamasında minimum alana sahip olan yapılar insanların rahat, huzurlu, kolay şekilde yaşayabilmeleri ve mekânın da kullanıcıya daha iyi hizmet verebilmesi önemlidir. Bu yüzden tüm alandan maksimum düzeyde yararlanılmaya çalışılmakta ve bu durum göz ardı edilmeden tasarlanmalıdır. Yapılan tasarım kullanılmadığı zamanlarda minimum alan hacmine, gereksinim durumunda ise yapıdaki ihtiyacı maksimum alana erişerek karşılamalıdır [1]. Bu sebeple konutun tasarlanmadan önce kullanıcı profilini ve ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak doğru mekân örgütlenmesiyle eylem alanlarını çözümlenmesi gerekmektedir. Çünkü, kullanıcısının ihtiyaç duyduğu eylem alanlarıyla doğru bir şekilde örgütlenmesi mekânın işlevselliği ve konforu açısından oldukça önemlidir. Bu şekilde alanın kısıtlılığı dezavantaj olmaktan çıkıp optimum işlevsellikle kullanıcıya az alanda pratik bir yaşam sunabilecektir. Dolayısıyla kısıtlı metrekareye sahip mekanlarda alanı en iyi şekilde değerlendirilmesi için özel tasarım yaklaşımlarının gerekliliği söz konusudur.

Çalışmada kısıtlı hacimlerin tasarımında optimum koşulların sağlanmasında eylem alanlarındaki örgütlenmenin ve mekân öge/bileşenlerde devrimin nasıl olabileceği kuramsal olarak tartışılmıştır. Seçilen mobil özellikli mikro konut örneği üzerinden konu irdelenmiştir. Örnek konut; mikro metrekareye sahip olması, çeşitli eylem alanlarını ve bu eylem alanlarının farklı örgütlenmelerle mekânda çözümlenmesi, devingen mekân öge/bileşenlerine sahip olması ile bu tür konutları temsil etme özelliğine sahiptir. Mekanlarda optimum koşulların sağlanması için dış strüktürün tasarımından mobilya ölçeğine kadar çözüm ve detayların üretilmesinde ortaya konulan doğru yaklaşımın mekân performansını artırdığı görülmektedir.

2. Kısıtlı Konut Hacminde Optimum İç Mekân Tasarımı

Artan nüfus, aile sayılarındaki azalma, yerleşim yeri yetersizliği ve değişen yaşama uyum kaygılarından dolayı şehirlerdeki konut m²'lerinde düşüşle beraber kısıtlı konut kavramı literatürde kullanılmaya başlanmıştır [2]. Mikro konutlar gibi dar ve sınırlı metrekarelerde tasarım olarak beklenen kısıtlı hacimde optimum koşulları sağlayacak çözüm üretmektir. Kısıtlı kelimesi sözlükte “sınırlanmış, sınırlı”, optimum ise “en elverişli, en iyi, en uygun olan” şeklinde yer almaktadır [3]. Burada mekânın sınırlılığının farkında olma durumu ve en iyiyi arama çabası hakimdir. Bu durum tasarım açısından özel bir yaklaşım gerekliliğini ortaya koymaktadır. Kısıtlı yaşam alanları, yeni akım ve tasarımla güncel hayat şartlarında gereksinimlerine hitap edecek şekilde uyarlanmış mekânlardır. Mekânın ölçeğine göre bir yerleşim, düzen ve işleyiş söz konusudur [4]. Bu konutlarda, mekân örgütlenmesi mekânın işlevselliği açısından oldukça önemlidir. Örgütlemeye, her santimin verimli bir biçimde kullanılması ile kullanıcıya en uygun yaşam alanını sunulması amaçlanmalıdır.

Konut, mekânı kullanacak kişilerden ve eylemlerinden ayrı düşünülmemelidir. Konutta kullanılan eylem alanları ve fonksiyonlar kullanıcıya, zamana ve koşullara göre farklılık gösterebilir. Mekânda bu gereksinimlerin karşılanması için özellikle kısıtlı mekanlarda ihtiyaç durumunda ortaya çıkabilecek eylem alanının oluşturulması veya mevcut eylem alanlarındaki dönüşümlerle aktif hale getirilmesi önemlidir. Bunun için eylem alanlarındaki örgütlenme ve mekân bileşen ve öğelerindeki devingenlik belirleyici olmaktadır. Bu konuda kısıtlı konutlardaki yaklaşımlar değerlendirildiğinde aşağıda yer alan sınıflamalar elde edilmiştir;

2.1. Eylem Alanlarındaki Örgütlenmeyle Optimum Koşulların Sağlanması

Konutlar çeşitli eylem alanlarını içerisinde barındırırlar. Bu eylemlerin mekânda karşılanması için mekân eylemlere göre ayrılabilen, aynı alan birden fazla eylem için kullanılabilen veya alan dönüşerek farklı eylemlere imkân verebilmektedir. Özellikle metrekare olarak küçük alana sahip konutlarda organizasyon, mekândaki işlevlere cevap verecek örüntülerle kurgulanmalıdır [4]. Kısıtlı konut içerisinde oturma, yemek yeme, yemek hazırlama, yatma, banyo-wc, depolama, çalışma, hobi olmak üzere çeşitli eylem alanları çözümlenmektedir. Kısıtlı mekâna sahip konut planları analiz edildiğinde eylem alanlarının organizasyonu ile ilgili 4 farklı oluşuma rastlanmıştır;

Tek hacimde alt alan oluşturma: Kısıtlı hacimlere sahip konutlarda genel olarak bir alanda birden fazla işlevin gerçekleştiği sistemler kullanılmaktadır [5]. Alanları az ve sınırlı olan konutlarda çoğunlukla benzer eylemler tek hacim içinde alt alanlar oluşturularak çözümlenmektedirler [6]. Kısıtlı hacimlere sahip yapılarda alanın sınırlılığından dolayı tek hacimde alt alan oluşturularak çözümlenme sıklıkla görülmektedir.

Bağımsız alan oluşturma: Bazı eylemler genel olarak mahremiyet kaygısı ile yapıda ayrı alan olarak çözümlenmektedir. Özellikle banyo-wc başta olmak üzere mutfak ve yatak odasında tercih edilmektedir. Diğer eylem alanları ile arasında net ayırım vardır. Tek işleve olanak sağlayan bu çözümler, duvar veya bölücü panellerle diğer eylem alanlarından ayrılmakta ve özelleştirilmektedir.

Mekânda dönüşerek alan oluşturma: Kısıtlı hacme sahip yapılarda alan darlığı nedeniyle her zaman bağımsız alanda çözümler mümkün olmamaktadır. Birden fazla eylem tek bir alanda çözümlenmekte ve alan dönüşerek gereksinim duyulan eyleme imkân vermektedir. Buradaki eylemler aynı anda yapılamamakta, gereksinime bağlı olarak dönüşüm sağlanmaktadır. Diğer taraftan dönüşerek çözümlenen tüm eylem alanları, tek hacimde alt alan oluşturma bir şekli olarak örnek gösterilebilir.

Kat/Kot kullanımı ile alan oluşturma: Eylem alanları mekân içerisinde kot veya kat kullanımlarıyla da çözümlenebilmektedirler. Hacmin değerlendirilmesinde kot veya asma kat çözümleri geliştirilerek farklı eylem alanları oluşturulmaktadır. Duvar veya bölücü elemanlar olmadan eylem alanları kat ve kot sayesinde sınırlarını oluşturulabilmektedir. Bu alanlar genel olarak yatma ve oturma eylem alanı olarak değerlendirilmektedirler.

2.2. Mekân Bileşen ve Öğelerindeki Devinimle Optimum Koşulların Sağlanması

Mekânı oluşturan bileşen ve öğeler, mekânsal örgütlenmede çok farklı roller üstlenmekte, mekânın bütünü üzerinde etkili roller almaktadırlar [7]. Kısıtlı hacimlerde bulunan mekân bileşen ve öğelerinin sahip olduğu devinim konutun daha fonksiyonel kullanımını sağlamaktadır. Ching'e göre mekân öğesi olarak kullanılan mobilya, mimari ve kullanıcı arasında iletişim kurar. Biçim ve ölçek olarak aracılık ederek, mekândaki faaliyetlere kullanışlılık ve konfor katar. Mekanları kullanışlı hale getirir [8]. Mekân bileşen ve öğelerinde, özellikle mobilyalardaki devinim; hareket ve yer değiştirmenin sonucu olarak mekânın ve kullanıcının istediği gereksinimleri karşılamaktadır. Mekândaki devinim kullanıcı ihtiyacına göre uyarlanabilmesi, mekân da daha fazla kullanım alanı sağlama, alanın çok yönlü kullanımına olanak tanınması açısından kısıtlı hacimler için birçok avantaj sağlamaktadır. Devinim özelliğine sahip konut plan örnekleri analiz edildiğinde 4 farklı oluşuma rastlanmıştır;

Dönüşebilirlik: Kısıtlı metrekareye sahip konutlar da özellikle de tek bir alanda çözümlenen yapılarda kullanıcı gereksinimleri aynı bölge içerisinde çözümlenebilmektedir. Bu durumda fonksiyonel dönüşüm özelliği kullanılarak bir işlevden diğerine geçilerek kullanım sağlanmaktadır. Farklı zamanlarda farklı işlevle dönüştürülerek kullanılan mekân bileşen ve öğeleri fonksiyonel dönüşümle konutta alandan tasarruf sağlanabildiği gibi ihtiyaç duyulan işlevin yerine getirilmesine de imkân vermektedir. Yatak olarak kullanılan alanın ihtiyaç doğrultusunda çalışma alanına dönüşümü bu oluşuma örnek olarak verilebilir.

Çok İşlevsellik: Dönüşebilirlikle farklı zaman da farklı işlevlere uyarlanma söz konusuysa, çok işlevsellikle aynı zaman içerisinde birden fazla amaçla kullanılabilme yer alır. Aynı zamanda farklı kullanıma olanak sağlayan mobilya, eylem alanlarının da çeşitlenmesini olanak sağlamaktadır. Eylem alanlarının üst üste bindirildiği mobilya tasarımları birçok eylem gereksinimini karşılamakta ve genelde kısıtlı yaşam alanlarında tercih edilerek kendi içerisinde düzenle kullanılan birden fazla işlevi yapısında bulunduran mobilyalardır [9]. Asma kata ulaşmak için kullanılan merdivenin aynı zamanda alt kısımları depolama amaçlı kullanılması bu oluşuma örnek olarak verilebilir.

Boyutsal Uyarlanabilirlik: Gereksinim olduğu zamanlarda işlevini ve temel formunu değiştirmeden, boyutlarını arttırarak ihtiyacın karşılama durumudur [10]. Konutlarda genişleyebilen taban alanı veya dış strüktürüyle mekân olduğundan daha geniş şekilde kullanılarak yeni eylem alanı ihtiyacını karşılayabilir. Hareketli bir sistemle genişleyen dış kabuk ile teras-balkon oluşturma bu oluşuma örnek olarak verilebilir.

Mobilerite: Hareketli ve işlev çeşitliliği olan donatılarla kullanıcısının isteklerine göre biçimlenen yapılar, hacim olarak küçük olmalarına rağmen kapasiteleriyle kaliteli yaşama imkân vermektedirler [11]. Kısıtlı hacimde birçok işlevin gerçekleştirilme ihtiyacı; yeri-yönü değiştirebilen, ihtiyaç durumunda ortadan kaldırılabilen donatı tercihini arttırmıştır. Sabit mekân bileşen ve öğelerine göre daha fonksiyonel olan hareketli donatılar kullanıcıların talepleriyle yerleri ve durumları değiştirilerek kullanılabilirler. Konut iç mekân düzenlemelerinde kullanılmadıkları zaman yer değiştirebilen mobilyalar kullanmak ekstra alan kazandırmaktadır [12]. Yemek yeme eylem alanında kullanılan masanın başka bir alana taşınabilmesi bu oluşuma örnek olarak verilebilir.

3. Tiny House Örnekleri Üzerinden Çözümleme

Çalışmanın bu bölümünde kuramsal olarak açıklanan eylem alanları, mekân bileşen ve öğelerinde devinim ile optimum arayışı iki örnek üzerinden çözümlenmiştir.

3.1. Rustic Modern Tiny House

Ana White ve eşi tarafından tasarlanan Ana White Rustic Modern Tiny House yaklaşık 19 metrekareye sahip çekilebilir mobil mikro konuttur. Kısıtlı hacme sahip yapı, Alaska da inşa edilmiş, depolama alanlarına ve çok işlevli mekân bileşen ve öğelerine sahip bir yapıdır [13], (Şekil 1).



Şekil 1. Ana white rustic modern tiny house [14]

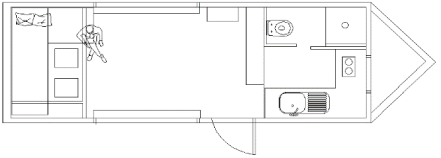
Mobil ev; giriş alanına, yemek hazırlama alanı, yemek yeme alanı, banyo-wc, oturma alanı, depolama alanı ve yatma alanına sahiptir. Yemek hazırlama, oturma, yatma, giriş ve yemek yeme eylem alanları tek hacimde alt alan oluşturularak; banyo-wc alanı bağımsız mekân oluşturularak; yemek hazırlama alanı ile banyo-wc mekânda kot kullanımıyla çözümlenirken oturma eylem alanı, yatma eylem alanına dönüştürülerek kullanılmaktadır. Konuta girildiğinde hemen karşıda bir portmanto sağ tarafta ise 2 basamak kotla yükseltilen bir zemin bulunmaktadır. Bu yükseltilmiş zemin depolama amaçlı kullanıma imkân verdiği gibi eylem alanları arasında sınır etkisi yaratmaktadır. Yükseltilen kot üzerinde yemek hazırlama eylem alanı ve tam bölücü ile ayrılmış bağımsız alanda çözümlenen banyo-wc yer almaktadır (Şekil 2).

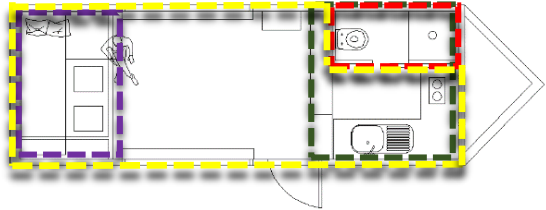
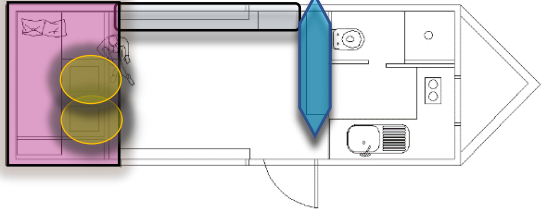
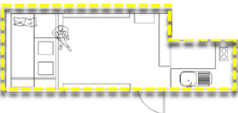



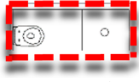


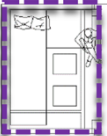

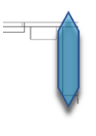

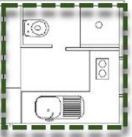





Şekil 2. Ana white rustic modern tiny house iç mekân [14]

Bu yapıda asma kat yoktur fakat girişin sol kısmında oturma alanında kullanılan ve koltuk üzerinde kayabilen sistemle yatma alanı oluşturulmuştur. 'Asansör yatak' olarak adlandırılan sistemle hareket ettirilecek raylar dikey olarak aşağı veya yukarı yönde kayar ve yüksekliği değişebilmektedir. Bu şekilde mekân örgütlenmesi yapılırken taban alanından faydalanılmasının yanı sıra mekânın yüksekliğinden de yararlanılmaktadır. Mekân bileşen ve öğelerinin konutta bu şekilde verimli kullanılması ihtiyaç duyulan mekân bileşen ve öğe ihtiyaçları karşılanmakta, eylem alanlarının da çeşitlenmesini sağlamaktadır.

Tablo1. Rustic modern tiny house yapısının optimum tasarım çözümlenmeleri

RUSTIC MODERN TINY HOUSE: 19m ² 'de Çekilebilir Mobil Mikro Konut	
<ul style="list-style-type: none"> ■ Tek hacimde alt alan ■ Bağımsız alan ■ Dönüştürülen alan ■ Kat/kot kullanımı ile alan 	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;">  </div> <ul style="list-style-type: none"> ■ Dönüşebilirlik ■ Çok İşlevsellik ■ Boyutsal Uyarlanabilirlik ■ Mobilerite
EYLEM ALANLARINDAKİ ÖRGÜTLENMEYLE OPTİMUMU YAKALAMA	MEKÂN BİLEŞEN VE ÖĞELERİNDEKİ DEVİNİMLE OPTİMUMU YAKALAMA

	
<p>Tek Hacimde Alt Alan Oluşturma</p>	<p>Dönüştürülebilirlik</p>
  <p>Yemek yeme, oturma, yemek hazırlama ve yatma alanı tek hacimde alt alan oluşturularak aynı alanda çözümlenerek esnek mekan örgütlenmesini sağlama</p>	  <p>Oturma amaçlı kullanılan kanepenin farklı zamanlarda ihtiyaç durumunda yatak olarak kullanılması ile farklı işlevleri yerine getirebilme olanağı</p>
<p>Bağımsız Mekân Oluşturma</p>	<p>Çok İşlevsellik</p>
  <p>Banyo-wc alanı sürgülü kapıyla eylem alanlarından ayrılarak bağımsız alanda çözümlenme</p>	 <p>Masanın aynı anda depolama amaçlı kullanımıyla ölü alanları değerlendirme imkanı</p>
<p>Mekânda Dönüşerek Alan Oluşturma</p>	<p>Boyutsal Uyarlanabilirlik</p>
  <p>Kullanıcı ve mekân gereksinimine bağlı olarak gün içinde farklı eylem alanlarına dönüşmesini sağlayarak yeni alanların kullanılabilirliğine imkan verme</p>	  <p>Hareketli bir kayar sistemle kullanılan dolapla değişime açık, genişleyebilen veya boyut artırarak yeni ihtiyaçları karşılaması</p>
<p>Kat/Kot Kullanımı ile Alan Oluşturma</p>	<p>Mobilerite</p>
  <p>Yemek hazırlama alanı ve banyo-wc kot kullanımı ile çözümlenmektedir. Bu şekilde hem yükseltilen kotun depolama amaçlı kullanımı hem de alandan tasarruf sağlama</p>	  <p>Öğelerin/bileşenlerin konumunu veya yönünü değiştirilmesiyle başka alana taşınarak alanın farklı kullanımlara imkan vermesi, ihtiyaç durumunda ortadan kaldırılabilmesi</p>
<p>Tablodaki görseller [14] kaynağından alınmıştır.</p>	

Örnek konut da optimum koşulların sağlanması için benimsenen tasarım yaklaşımları incelenmiş ve analizine **Tablo 1**'de yer verilmiştir.

Bu yaklaşımlar işlevsel olarak değerlendirildiğinde; eylem alanlarındaki örgütlenmede oturma, yatma, yemek yeme ve yemek hazırlama eylem alanlarıyla tek hacimde alt alanla çözümlenme yapılmasına rağmen yeni alan ihtiyacı durumunda yeniden düzenleme imkanı sağlayarak kullanılabilirdiği görülmektedir. Oturma alanı olarak kullanılan kanepenin ise yeni alan ihtiyacı durumunda yani yatak olarak kullanılabilirdiği ancak bu durumda eski işleviyle kullanılmadığı görülmektedir. Bunun yanı sıra kanepenin üzerinde yer alan asansör yatağın en alt seviyeye indirildiği takdirde kanepenin kullanılmadığı fakat orta seviyede kullanıldığında her iki mobilyanın da birbirlerinin işlevlerini engellemeden kullanılabilirdiği görülmektedir. Mekân bileşen ve öğelerinin devinimiyle de kısıtlı hacimler de dönüştürülebilirlikle farklı işlevlerin yapıldığı, ölü alanların çok işlevsellikle değerlendirildiği, boyut artırarak veya değişime açık hareketli sistemlerle yeni ihtiyaçların karşılandığı, mobileriteyle de farklı alanlarda farklı kullanımlara imkân verildiği görülmektedir.

Görsel olarak bakıldığında; konuttaki bileşen/öğelerin devinim sonrası farklı konum, düzen, biçim ve kullanımlarla çeşitli görünümler sağladığı, mekânın değiştiği analiz edilmiştir. Değişen eylem alanlarında farklı örgütlenmelere bağlı olarak konutta görsel olarak daha yoğun veya daha seyrek olarak kullanımlarla farklılaşmaların olduğu gözlemlenmektedir.

Boyutsal olarak ise; konutun mevcut taban alanı metrekare olarak kısıtlı hacme sahip olduğu için her santimi ayrı bir öneme sahiptir. Eylem alanlarındaki örgütlenmeyle ve mekân bileşen/öğelerindeki devinime elverişli tasarımlarla sahip olduğu metrekaresinden çok fazla alana hizmet ettiği görülmektedir.

3.2. The Minim Tiny House

2013 yılında Foundry ve Brian Levy tarafından tasarlanan ABD’de bulunan The Minim Tiny House, 23 metrekareye sahip çekilebilir mobil mikro konuttur. 3 American Institute of Architects tasarım ödülünü kazanan mikro evdir [15], (Şekil 3).



Şekil 3. The minim tiny house tiny house [15]

İçerisinde yemek hazırlama alanı, yemek yeme alanı, yatma alanı, banyo-wc alanı, oturma alanı ve çalışma alanı bulunmaktadır. Yemek hazırlama alanı, oturma alanı, çalışma alanı ve yemek yeme alanı tek hacimde alt alan oluşturularak; banyo-wc bağımsız mekânda oluşturularak; çalışma alanı kot kullanımı ile yerde yükseltilerek çözümlenirken, oturma alanı depolama alanına dönüştürülerek kullanılmaktadır. Konuta girdiğimizde sağ tarafta yemek hazırlama alanı, sağ tarafta ise diğer eylem alanları bulunmaktadır (Şekil 4).











Şekil 4. The minim tiny house iç mekân [15]

Çalışma alanı kotla yerden yükseltilmiştir. Yükseltilen alan kayabilir sisteme sahip ihtiyaç durumunda ortaya çıkan yatağın kullanılmasıyla değerlendirilmiştir. Oturma alanındaki kanepenin alt kısmı depolama alanı olarak kullanılmaktadır. Böylece taşınabilen mobil özellikli masa ve sandalyeler kullanılmadığı zamanlarda ortadan kaldırılabilir. Bu durum taban alanından tasarruf sağladığı gibi çeşitli eylem alanlarının aynı hacimde gerçekleşmesini sağlar.

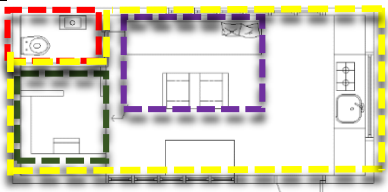
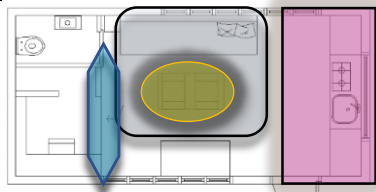








Tablo2. The minim tiny house yapısının optimum tasarım çözümlenmeleri

THE MINIM TINY HOUSE: 23m²'de Çekilebilir Mobil Mikro Konut

	Dönüşebilirlik
	Çok İşlevsellik
	Boyutsal Uyarlanabilirlik
	Mobilerite

-  Tek hacimde alt alan
-  Bağımsız alan
-  Dönüştürülen alan
-  Kat/kot kullanımı ile alan



EYLEM ALANLARINDAKİ ÖRGÜTLENMEYLE OPTİMUMU YAKALAMA	MEKÂN BİLEŞEN VE ÖGELERİNDEKİ DEVİNİMLE OPTİMUMU YAKALAMA
	
<p>Tek Hacimde Alt Alan Oluşturma</p>	<p>Dönüştürülebilirlik</p>
 <p>Yemek yeme, oturma, yemek hazırlama, çalışma ve yatma alanı tek hacimle alt alan oluşturarak aynı alanda çözümlenerek esnek mekan örgütlenmesini sağlama</p>	 <p>Mutfakta bulunan ocağın farklı zamanlarda ihtiyaç durumunda üstü kapatılarak tezgah olarak kullanılması ile farklı işlevleri yerine getirebilme olanağı</p>
<p>Bağımsız Mekân Oluşturma</p>	<p>Çok İşlevsellik</p>
 <p>Banyo-wc alanı sürgülü kapıyla eylem alanlarından ayrılarak bağımsız alanda çözümlenme</p>	 <p>Oturma alanının aynı anda depolama amaçlı kullanımıyla ölü alanları değerlendirme imkanı</p>
<p>Mekânda Dönüşerek Alan Oluşturma</p>	<p>Boyutsal Uyarlanabilirlik</p>
 <p>Kullanıcı ve mekan gereksinimine bağlı olarak gün içinde farklı eylem alanlarına dönüşmesini sağlayarak yeni alanların kullanılabilirliğine imkan verme</p>	 <p>Yükseltmiş döşeme altında bulunan depolama alanında kullanılan hareketli kayar sistemin gereksinim durumunda boyut değiştirerek yeni ihtiyaçları karşılaması</p>
<p>Kat/Kot Kullanımı ile Alan Oluşturma</p>	<p>Mobilerite</p>
 <p>Çalışma alanının kot kullanılarak mekanla sınırının çizilmesi ve yükseltilecek kotun depolama amaçlı kullanımıyla alandan tasarruf sağlama</p>	 <p>Ögelerin/bileşenlerin konumunu veya yönünü değiştirilmesiyle başka alana taşınarak alanın farklı kullanımlara imkan vermesi, ihtiyaç durumunda ortadan kaldırılabilmesi</p>
<p>Tablodaki görseller [15] kaynağından alınmıştır.</p>	

Örnek konut da optimum koşulların sağlanması için benimsenen tasarım yaklaşımları incelenmiş ve analizine **Tablo 2'**de yer verilmiştir.

Bu yaklaşımlar işlevsel olarak değerlendirildiğinde; eylem alanlarındaki örgütlenmede oturma, çalışma, yatma, yemek yeme ve yemek hazırlama eylem alanlarıyla tek hacimde alt alanla çözümlenme yapılmasına rağmen yeni alan ihtiyacı durumunda yeniden düzenleme imkânı sağlayarak kullanılabilmesi görülmektedir. Oturma alanı olarak kullanılan kanepenin, ihtiyaç durumunda aynı zamanlarda depolama alanı olarak kullanılabilmesi görülmektedir. Yükseltilecek döşemenin içinde kayar sistemle oluşturulan yatağın kullanılırken döşeme üzerinde bulunan çalışma alanının da işlevini engellemeden kullanılabilmesi

görülmektedir. Fakat yatağın kullanılan konumundan kaynaklı olarak banyo-wc geçişi zorlaştırdığı görülmektedir. Taşınabilir özellikteki masa ve sandalyeler kullanılırken yatak taşınarak yükseltilen döşeme altına gizlenir. Kullanılan yükseltmiş döşeme iki eylem arasında sınır algısı yaratarak mekânın eylem alanları arasında bölünmesini sağlar. Mekân bileşen ve öğelerinin devinimiyle de tıpkı kısıtlı hacme sahip olan Rustic modern tiny house da olduğu gibi dönüştürülebilirlikle farklı işlevlerin yapıldığı, ölü alanların çok işlevsellikle değerlendirildiği, boyut artırarak veya değişime açık hareketli sistemlerle yeni ihtiyaçların karşılandığı, mobileriteyle de farklı alanlarda farklı kullanımlara imkân verildiği görülmektedir.

Görsel olarak bakıldığında; mekânda oluşan devinimle konuttaki bileşen/öğelerin farklı konum, düzen ve biçimlerde kullanıldığı gözlemlenmektedir. Değişen eylem alanlarındaki yeni örgütlenmelere bağlı olarak konutta değerlendirilen boşluklarla görsel olarak mekân, daha yoğun veya daha seyrek olarak kullanımlarla farklılaşmaların olduğu analiz edilmektedir.

Boyutsal olarak ise; kısıtlı hacme sahip konutta doğru örgütlenmeler ve devinime elverişli tasarımlarla kullanıldığında taban alanından tasarruf sağlandığı görülmektedir. Bu tasarım yaklaşımlarıyla mevcut alanından daha fazla metrekareyle kullanılabilme imkanına sahip olarak, çeşitli eylem ve eylem alanlarının bu alanlar içinde çözümlenebilmesine olanak vermektedir.

4. Sonuç

Dar ve az metrekareye sahip konutlarda alanların en iyi şekilde değerlendirilmesi; insanların rahat, huzurlu, kolay şekilde yaşayabilmeleri ve mekânın da kullanıcılarına daha iyi hizmet verebilmesi açısından önemlidir. Bu sebeple kısıtlı alanların her metrekaresi oldukça kıymetlidir. Benimsenecek tasarım yaklaşımı ile mekânda optimum koşulları sağlamak mümkündür. Kullanıcının mekânsal gereksinimleri mekândaki kısıtlılıklar gözetilerek çeşitli çözüm önerileri ile karşılanabilir. Önemli olan işlevsel tasarımlar ile doğru optimum mekân çözümlenmelerini bir araya getirip mekânda uygulayabilmektir. Bu şekilde mekân, kullanıcılarına yeterlilik hissini halihazırda sağlaması mümkün olacaktır. Bu konutlarda eylem alanlarındaki mekân örgütlenmesi yapılırken; mekân içerisinde kullanılan mekân bileşen ve öğelerinde dönüştürülebilirlik, çok işlevsellik, boyutsal uyulanabilirlik ve mobilerite özellikleri düşünülerek tasarlanıp yapıda konumlandırılmalıdır. Örnek konut analizinde de görüldüğü gibi mekânda kullanılan bileşenlerin, öğelerin fonksiyonel kullanımı veya eylem alanlarının mekân koşullarına uygun örgütlenmesi durumunda taban alanı dar olmasına rağmen kullanıcının gereksinimleri mekân tarafından karşılanabilecektir. İncelenen örnekte alanın kısıtlılığı kullanılan mekân öğelerinin estetik kaygıdan daha çok işlevsel amaçlı kullanıma yönelimi sağladığı, doğru tercihler ve çözümlenmeler ile konutlar da daha kullanışlı ve konforlu alanlar tasarlanabileceği görülmektedir.

Sonuç olarak optimum koşulların sağlanmasına yönelik iç mekân tasarım yaklaşımlarıyla; farklı mekân bileşen ve öğelerindeki devinimlerle ve eylem alanlarındaki örgütlenmelerdeki çözümlenmelerle kısıtlı hacimlerde de mekânın boyutsal olarak; taban alanının daha geniş kullanımı, görsel olarak; daha yoğun, seyrek algılanma veya yeterlilik hissiyatı, işlevsel olarak; çeşitli eylem ve eylem alanını kullanma imkânı, pratiklik ve konforlu kullanımı sağlanacaktır. Dolayısıyla kısıtlı hacimlerde metrekare sınırlılığından dolayı işlevsel, görsel ve boyutsal açıdan oluşabilecek birçok problemin çözümlenmesi mümkün olacaktır.

Kaynaklar

- [1] Karaca, H.N. Kısıtlı Konut İç Mekanlarındaki Mobilya Tasarımları, Yüksek Lisans Tezi, Haliç Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2020.
- [2] Özçelik Ö, Kaprol T. Dar Mekân Perspektifinden Özgün Sehpa ve Sandalye Tasarımları 2017; 6(3): 289-300.
- [3] <http://www.tdk.gov.tr/>. 12 Mayıs 2021.
- [4] Savaş, S. Kısıtlı Mekân-Mobilya Çözümlerinde Çağdaş Yaklaşımlar, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [5] Salebi, S. Konutlarda Kısıtlı Mekân Tasarımına Çağdaş Yaklaşımlar, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [6] Taşkesen, G. M. Mobil Konutlar ve İç Mekân Biçimlenişi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Ana Bilim Dalı İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Yüksek Lisans Programı, Ankara, 2019.
- [7] Açıcı, K.F. İç Mekân Örgütlenmesinde Sınır Öğeleri: Post Modern ve Minimal Mekânlar, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2006
- [8] Ching F.D.K. Architecture: Form, Space, Order. USA, John Wiley&Sons.
- [9] Üst S. Konutlarda İç Mekân ile Mobilya Etkileşimi Bağlamında Mobilyaya Dair Özelliklerin İncelenmesi 2015; 1(15):103-118.

- [10] Özçelik, Ö. Esnek Mekân ve Mobilya Anlayışı İçinde Dönüşebilirlik, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2016.
- [11] Arı, E. Mobil Mekân Kavramı Kapsamında Taşınabilir Mekân Organizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2019.
- [12] Bayram, Z. İşlevsellik ve Esneklik Bağlamında Konut İç Mekân Tasarımında Mobilya Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, 2011.
- [13] <https://tinyliving.com/rustic-modern-ana-white/> Erişim Tarihi 04 Haziran 2021.
- [14] <https://ana-white.com/woodworking-projects/open-concept-rustic-modern-tiny-house-plans-sources> Erişim Tarihi 04 Haziran 2021.
- [15] <https://tinyhouseplans.com/minim-tiny-house/> Erişim Tarihi 19 Ağustos 2022.

Biyokütle Kaynaklarından Bazı Platform Kimyasallarının Birlikte Üretimi

Abdulkadir GÜL^{1*}, Muhammet Şaban TANYILDIZI²

^{1,2} Firat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölü, Elazığ, Türkiye

*¹ a.gul@firat.edu.tr, ² mtanyildizi@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 09/08/2022;

Kabul/Accepted: 04/09/2022)

Öz: Günümüzde fosil kaynaklar, özellikle kimya ve yakıt endüstrileri için hala en önemli kimyasal karbon iskeleti kaynağıdır ve giderek azalmaktadır. Bu durum araştırmacıları yenilenebilir kaynakların çeşitli yakıtlara, kimyasallara ve malzemelere dönüştürülmesi için yeni ekonomik süreçler geliştirmeye zorlamıştır. Son dönemlerdeki araştırmalara bakıldığında, biyo-temelli hammaddelerden bazı platform kimyasallarının birlikte üretiminin girdi maliyetlerinin düşürülmesi bakımından büyük önem arz ettiği görülmektedir. Platform kimyasallarının içerisinde özellikle Glukonik asit (GA) ve 5-hidroksimetilfurfural (HMF)'in birlikte üretimi gelecekte sürdürülebilir bir kimya endüstrisi için büyük önem taşımaktadır. GA, glikozun oksidasyonu sonucu açığa çıkan, ticari olarak en fazla üretilen organik asitlerden biridir. Kimya, farmasötik, yiyecek, içecek, tekstil ve deterjan endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. HMF, gelecek vaat eden biyoyakıtların yanı sıra farklı faydalı kimyasallara dönüştürülebilir önemli bir başlangıç maddesidir. Ayrıca, polimerler, farmasötikler, kimyasallar ve yakıtlar için kullanılan çok yönlü ve işlevsel bir ara maddedir. Bu derleme, halihazırda farklı tesis ve hammaddelerle üretilen GA ve HMF'nin aynı biyokütle kaynağından daha düşük maliyetlerle tek proseste birlikte üretim çalışmalarının incelenmesinin yanında kimya endüstrisindeki önemi, özellikleri ve uygulamaları hakkında bir inceleme sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Biyokütle, glukonik asit, 5-hidroksimetilfurfural, platform kimyasalı.

Co-production of Some Platform Chemicals from Biomass Sources

Abstract: Today, fossil resources are still the most important source of chemical carbon skeletons, especially for the chemical and fuel industries, and they are gradually decreasing. This situation has forced researchers to develop new economic processes for the conversion of renewable resources into various fuels, chemicals and materials. Considering to recent research, it is seen that the co-production of some platform chemicals from bio-based raw materials is of great importance in terms of reducing the input costs. Among platform chemicals the co-production of especially Gluconic acid (GA) and 5-hydroxymethylfurfural (HMF) is of great importance for a sustainable chemical industry in the future. GA is one of the most commercially produced organic acids, which is released as a result of the oxidation of glucose. It is widely used in chemical, pharmaceutical, food, beverage, textile and detergent industries. HMF is an important starting material that can be converted into different useful chemicals as well as promising biofuels. It is also a versatile and functional intermediate used for polymers, pharmaceuticals, chemicals and fuels. This review provides an overview of the importance, characteristics and applications of GA and HMF in the chemical industry, as well as an examination of the co-production activities of GA and HMF, which are currently produced with different plants and raw materials, in a single process at lower costs than the same biomass source.

Key words: Biomass, gluconic acid, 5-hydroxymethylfurfural, platform chemical.

1. Giriş

Büyük ölçekte üretim yapan endüstriler için ekonomik değeri olan ürünlerin aynı biyokütle kaynağından birlikte üretimi maliyetlerin düşürülmesi bakımından önemli bir yaklaşımdır. Literatürde bu amaçla yapılan çalışmalar giderek önem kazanmaktadır. Sodyum glukonat, inşaat endüstrisinde çimento hamurunun priz süresini geciktirmek için kullanılan başlıca çimento katkı maddesidir [1]. Sodyum ksilonat ise çimento granüllerini ayrıştırarak daha iyi akışkanlık için kullanılan bir çimento katkı maddesidir [2]. Bir çalışmada ekonomik değeri olan bu ürünlerin *Gluconobacter oxydans* kullanılarak mısır sapından birlikte üretimi araştırılmıştır. Belirli şartlarda gerçekleştirilen mikrobiyal fermantasyon ile sodyum glukonat (132,46 g/L) ve sodyum ksilonat (38,86 g/L) elde edilmiştir. Elde edilen sodyum glukonat ve ksilonat ürünleri çimento geciktirici olarak test edilmiş, ticari sodyum glukonattan daha iyi bir performans gösterdiği ve daha ekonomik olduğu ifade edilmiştir [3]. Değerli ürünlerin birlikte üretimine yönelik yapılan başka bir çalışmada, ksilooligosakkaritlerin (XOS) ve GA'nın birlikte üretilmesi için entegre ve yeşil süreç, şeker kamışı küspesi kullanılarak geliştirilmiştir. Hammadde olarak 1 kg kurutulmuş şeker kamışı küspesinden yaklaşık 105 g XOS ve 340 g GA, birlikte üretilmiştir. Bu nedenle, katma

* Sorumlu yazar: a.gul@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-4879-6194, ² 0000-0001-6456-1593

değerli ürünlerin (GA ve XOS) birlikte üretilmesi için şeker kamışı küspesinin kapsamlı kullanımı için uygun maliyetli bir seçenek olduğunu göstermiştir [4]. Son yapılan çalışmalarda ise birlikte üretilen ürünler içerisinde organik asitler ve bazı platform kimyasallarının üretimine yoğunlaşıldığı ve birçok araştırmanın yürütüldüğü görülmektedir. Biyokütle kaynağından çıkılarak en çok üretilen organik asitlerden biri olan ve önemli bir platform kimyasalı olarak da kabul edilen Glukonik Asit (GA)'tir [5]. GA, glikozun 1. karbon atomu üzerindeki aldehit grubunun karboksil grubuna oksidasyonu ile elde edilir [6]. GA ve tuzları, gıda katkı maddesi, beton için bir bileşen, ilaçlar ve polimerler için hammadde olarak kullanılır. Ayrıca, biyolojik olarak uyumlu ve kolayca parçalanabilen kimyasallardır [7]. GA, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) gibi gıda katkı maddelerinde uzman komiteler tarafından onaylandığı üzere, genel olarak güvenli (GRAS) olarak kabul edilmektedir [8, 9]. GA üretiminde mikrobiyal fermantasyon, enzimatik kataliz, kimyasal ve elektrokimyasal gibi çeşitli üretim yöntemleri bulunmaktadır [10]. Mikrobiyal fermantasyon yöntemiyle GA üretimi, ucuz ve bol miktarda karbon kaynağı temini, hafif çalışma şartları, yan ürün oluşumunun az miktarda olması ve zararsız atıklar oluşturması ve düşük enerji gerektirmesi gibi avantajlarından dolayı diğer yöntemlere göre endüstriyel olarak etkili ve baskın bir yöntemdir [11]. Glikoz genellikle GA'nın mikrobiyal üretimi için ana karbon kaynağı olarak kullanılır. Bununla birlikte, glikoz yüksek maliyeti nedeniyle genellikle nişasta veya selülozdan uygun teknolojilerle üretilmektedir [12].

Günümüzde kimyasal ürünler ve yakıt üretmek için mevcut kaynakların büyük çoğunluğunu fosil kaynaklar oluşturmaktadır. Bununla birlikte, fosil kaynaklı ürünlerin tükenmesi ve bu ürünlerin doğaya verdiği zararlar nedeniyle araştırmacılar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Bu bağlamda biyokütle kaynaklı 6 karbonlu karbonhidratların dehidrasyonundan üretilen 5-Hidroksimetil Furfural (HMF) gelecek neslin kimyasal ve yakıt ihtiyaçlarını karşılamak için önemli platform kimyasalı olarak ortaya çıkmıştır [13]. HMF'nin katalitik oksidasyonu, 2,5-diformilfuran (DFF), 5-hidroksimetil-2-furankarboksilik asit (HFCA), 5-formil-2-furankarboksilik asit (FFCA) ve 2,5 furandikarboksilik asit (FDCA) dahil olmak üzere çeşitli katma değerli kimyasalların üretimini sağlamıştır [7]. HMF, glikoz, fruktoz, sakaroz, nişasta ve selüloz gibi her türlü monomerik veya polimerik biyokütleden üretilebilir [14]. Günümüzde HMF üretimi için en yüksek verimi sağlayan biyokütle kaynağı fruktozdur. Fruktoz, bifazik ve monofazik sistemlerde farklı katalizörlerin kullanıldığı reaksiyon ortamlarında HMF'ye dönüştürülebilir iyi bir başlangıç malzemesidir. Ancak, HMF ortamda hammadde olarak glikoz gibi heksozun dehidrasyonu ile de üretilir. Doğal furanoz yapısı nedeniyle fruktoz, hemen hemen tüm çözücü sistemlerinde glikozdan daha yüksek bir katalitik verime sahiptir. Bununla birlikte, HMF'nin endüstriyel üretiminde genellikle hammadde olarak glikozun kullanılması fazladan maliyet oluşturmaktadır. Çünkü üretim glikozun iki aşamalı katalitik bir dönüşümle yani önce glikozun fruktoza izomerizasyonu ve daha sonra fruktozun HMF'ye dönüştürülmesi şeklinde gerçekleşir. Bu işlemler de fazladan maliyet ve enerji kaybına yol açmaktadır [15].

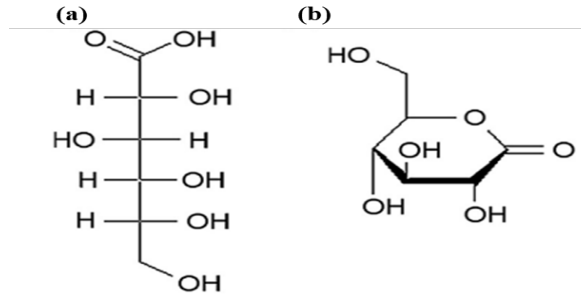
Sonuç olarak, iklim değişiklikleri, petrol gibi yenilenemeyen fosil kaynaklarının hızla tükenmesi ve arz-talep dengesizliğinin neden olduğu ham petrol fiyatındaki yüksek değişiklikler, küresel ekonomi üzerinde büyük baskı yaratmıştır. Böylece, fosil olmayan karbon kaynaklarından kimyasal ve yakıt üretmek için çevresel ve ekonomik olarak uygun sentetik yolların ve ilgili teknolojilerin geliştirilmesi son yıllarda yeniden büyük önem kazanmış, platform kimyasallarına olan ilgiyi arttırmıştır. Endüstriyel olarak değerli platform kimyasallarından GA ve HMF'nin farklı tesis ve biyokütle kaynaklarıyla üretilmektedir ancak bu durum üretim maliyetini ve enerji ihtiyacını arttırmaktadır. Bu nedenle, GA ve HMF'nin düşük maliyetli her iki üründe başlangıç maddesini ihtiva eden biyokütle kaynaklarından birlikte üretimi ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir ve bu yöndeki çalışmalar incelendiği çalışma sayısının sınırlı olduğu görülmektedir. Halihazırda farklı tesisler, mekanizmalar ve hammaddelerle üretilen bu değerli platform kimyasallarının özellikleri, üretim yöntemleri, kullanım alanları ve aynı biyokütle kaynağından birlikte üretiminin ve birbirinden ayırımının incelenmesi bu derleme makalenin hedefini oluşturmaktadır.

2. Glukonik Asit (GA)

GA (penta-hidroksi-kaproik asit), glikozun 1. karbon molekülünde bulunan aldehid grubunun bakterilerde glikoz dehidrogenaz (GDH), funguslarda ise glikoz oksidaz (GO) enzimi yardımıyla karboksil grubuna oksidasyonu ile türetilir (Şekil 1a). GA, aşındırıcı, uçucu ve toksik olmayan hafif bir organik asittir [11]. Beyaz ve kokusuz olan katı GA, kristal bir tozdur ancak serbest GA'nın kristal formda hazırlanması zordur. GA'nın erime noktası 120-131°C arasındadır. Erime noktası aralığının genişlemesinin sebebi molekül içi anhidritlerin oluşumunun erime noktasını düşürmesidir. GA, suda serbestçe çözünürken, eter ve diğer birçok organik solventte çözünmez. GA, 1,82 pH ve 1,23 g/cm³ yoğunlukta %50 sulu çözelti formunda ticari olarak mevcuttur. GA'nın 50 °C'nin üzerinde ısıtılması lakton (Şekil 1b) oluşumuna yol açar [16]. Şarap ve meyve suları gibi birçok gıda

maddesine ferahlatıcı ekşi bir tat verir. Biyolojik olarak kolayca parçalanabilir (48 saatte %98). GA bitkilerde, meyvelerde ve pirinç, et, süt ürünleri, şarap (% 0,25'e kadar), bal (% 1'e kadar) ve sirke gibi diğer gıda maddelerinde bol miktarda bulunur. GA, *Pseudomonas ovalis*, *Acetobacter methanolicus*, *Zymomonas mobilis*, *Gluconobacter oxydans* ve *Gluconobacter suboxydans* gibi bakteriler, *Aspergillus niger*, *Penicillium funiculosum*, *Penicillium variabile* gibi küfler ve *Aureobasidium pullulans* gibi mayaları içeren farklı mikroorganizmalar tarafından üretilmektedir [9].

GA pazarı, geçmiş yıllardan beri önemli derecede büyümektedir. Bu büyüme, ev deterjanları, endüstriyel temizleyiciler, kişisel bakım ürünleri ve tarım kimyasalları endüstrilerindeki artan ürün talebine bağlanmaktadır. En yaygın olarak pazarlanan GA türevi olan sodyum glukonat, üretiminin %80'inden fazlasını oluşturmaktadır. Küresel GA Pazar Araştırma Raporlarına göre, GA pazarının 2022-2028 döneminde tahmini %3,1'lik bir bileşik yıllık büyüme oranında (CAGR) büyüyerek 2028 yılına kadar 185 milyon dolara ulaşması beklenmektedir [17]. Dünya genelinde her yıl ortalama 100.000-ton GA üretimi gerçekleştirilmektedir [18].



Şekil 1. (a) GA ve (b) glukono-δ-laktonun moleküler yapıları [16]

2.1. GA üretimi

GA üretiminde mikrobiyal fermantasyon, enzimatik kataliz, kimyasal ve elektrokimyasal gibi çeşitli üretim yöntemleri mevcut olmasına rağmen bu yöntemleri temel olarak kimyasal ve enzimatik kataliz olarak ikiye ayırmak mümkündür [10, 19]. Glikozun GA'ya kimyasal katalizi, alkali bir glikoz çözeltisi (pH 8-11, tercihen 9) içerisinde platin veya paladyum gibi soy metallerin katalizör olarak kullanılması ile gerçekleştirilir. Aktif kömür, alüminyum oksit gibi taşıyıcıların ilavesi ile de oksidasyondan sonra bu katalizörler ortamdaki uzaklaştırılır. Başka bir yöntemde ise GA üretimi, 1-2 mol/L konsantrasyondaki yine alkali bir glikoz çözeltisinin oksidasyonu ile gerçekleştirilir. Reaksiyon boyunca yükseltgenme işlemi yüksek sıcaklık ve basınçta, oksijen, ozon ve hidrojen peroksit (H_2O_2) gibi oksidantlar kullanılarak sağlanır [20]. Elektrokimyasal kataliz yöntemiyle GA üretiminde, bromür içeren glikoz çözeltisi (glikozun molce yaklaşık %10'u) 1-20 A/dm² akım yoğunluğunda elektroliz edilir. Enzimatik yöntemlere göre daha masraflı ve dönüşüm verimlerinin (%60-80) daha düşük olması nedeniyle kimyasal kataliz yöntemlerinin endüstriyel uygulaması bulunmamaktadır [21, 16]. Geleneksel fermantasyon yöntemlerine göre enzimatik katalizle yürütülen proseslerde reaksiyonlar daha hızlı gerçekleşir ve ürün oluşum verimi neredeyse %100'dür. GA'nın enzimatik olarak üretimi GO enzimi (EC 1.1.3.4) kullanılarak belirli sıcaklık ve pH'da gerçekleştirilmektedir. Ancak, büyük miktarlarda endüstriyel GA üretiminde glikozun GA'ya oksidasyon reaksiyonunu katalizleyen GO enziminin yüksek maliyeti nedeniyle kullanımı hemen hemen yoktur [22].

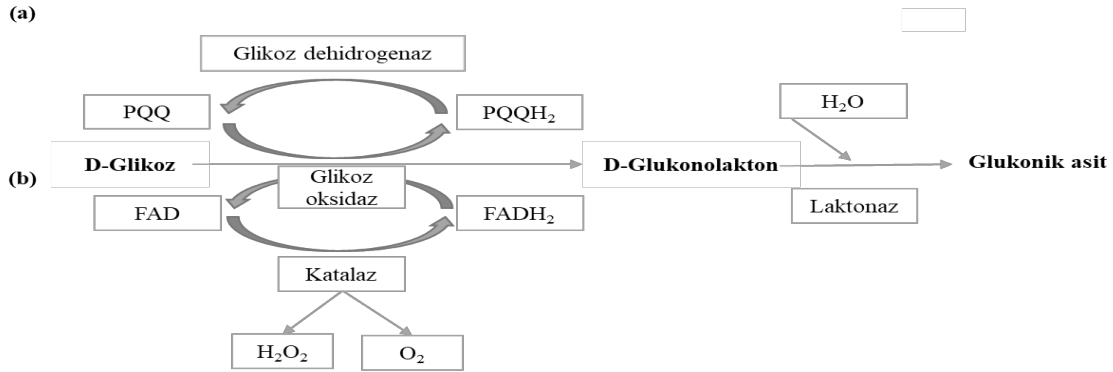
Mikrobiyal fermantasyon yöntemiyle GA üretimi, ucuz ve bol miktarda karbon kaynağı temini, hafif çalışma şartları, yan ürün oluşumunun az miktarda olması, zararsız atıklar oluşturması ve düşük enerji gerektirmesi gibi avantajlarından dolayı diğer yöntemlere göre endüstriyel olarak etkili ve baskın bir yöntemdir [16]. GA'nın mikrobiyal üretimi için temel karbon kaynağı olarak genellikle glikoz kullanılmaktadır. Özellikle iplikli funguslar başta olmak üzere geniş bir mikroorganizma grubu GA üretim yeteneğine sahiptir. Günümüzde mikrobiyal fermantasyonla GA üretiminde kullanılan ana mikroorganizmalar funguslardır [23]. Mikrobiyal fermantasyon proseslerinde *A. niger*, *A. terreus*, *Penicillium*, *Gliocadium*, *Scopulariopsis* ve *Gonatabotrys* küfleri kullanılarak GA üretimi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [24]. *A. niger* suşunun GA üretiminde yaygın olarak kullanılması yanında diğer *Aspergillus* türleri de benzer bir GA üretme potansiyeline sahip olduğu ifade edilmektedir [25]. *A. niger* suşu GA üretimi için gerekli olan temel enzimleri (GO, katalaz, laktonaz ve mutarotaz) içermektedir. Endüstriyel olarak GA üretiminde *A. niger*'in kullanıldığı fermantasyonlarda optimum verim için ortam şartları 4,5-5,5 civarında pH, 100-250 g/L glikoz, çok düşük konsantrasyonlarda (20 mM) azot ve fosfor kaynağı, 30 g/L Manganez (II) sülfat ($MnSO_4$) olarak belirlenmiştir [26]. Funguslarda özellikle *A. niger*'in kullanıldığı GA üretiminde, Şekil 2'de görüldüğü gibi GO enzimine bağlı koenzim olarak flavin adenin dinükleotit

(FAD) ve ortamdaki oksijenle $FADH_2$ 'deki hidrojen iyonlarının tepkimesi sonucu oluşan H_2O_2 'i hidrolize eden katalaz enzimi rol almaktadır. Bunun yanı sıra glikoza fosfat bağlanmasını sağlayan mutarotaz ve glukon- δ -laktonu GA'ya dönüştüren laktonaz enzimleri de üretim ortamında bulunabilmektedir [9]. Literatürde funguslar ile GA üretimi, katı, yarı katı ve derin fermantasyon yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır [27]. Singh vd. [28] yaptıkları bir çalışmada, *A. niger* suşu kullanılarak çeşitli fermantasyon şekilleriyle glikozdan GA üretim verimini incelemişlerdir. Çalışmada katı hal fermantasyonu, yarı-katı hal fermantasyonu, derin fermantasyon ve yüzey fermantasyonu yöntemleri GA üretimi için karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. İnokulum oranı %2, pH 6,6, sıcaklık 30 °C ve glikoz konsantrasyonu için 120 g/L olarak optimum şartlar belirlenmiştir. Bu şartlarda gerçekleştirilen denemeler sonucunda GA üretim veriminin katı hal fermantasyonunda 106,5 g/L, yarı-katı hal fermantasyonda 86 g/L, derin fermantasyonda 85,9 g/L ve yüzey fermantasyonunda 62 g/L olduğu ifade edilmiştir. *A. niger* için optimal GA üretiminde %90 dan fazla hava doygunluğunun olması istenir. Ancak, funguslar kullanılarak yürütülen fermantasyonlarda mikroorganizmasının hifli yapısı, ortam reolojisini ve enerji tüketimini etkilemektedir. Bu durum özellikle endüstriyel üretimlerde maliyet ve ortamda çözünmüş oksijen konsantrasyonu açısından sorun oluşturabilmektedir. Bakterilerde glikozdan GA'ya oksidasyon reaksiyonu GDH enzimiyle katalizlenmektedir. Bakterilerde de funguslarda olduğu gibi glikoz oksidasyonu büyük ölçüde ortam pH'sına bağlıdır [29]. Funguslarda optimum üretim için pH 4,5-5,5 civarındayken, bakteriyel üretimde ortam pH'sının 3,5-4,0 arasında olması istenmektedir. Endüstriyel üretimlerde bu pH değerlerinde glikozdan 2-ketoglukonik asit (2-KGA)'e dönüşümün daha yüksek olduğu (yaklaşık %87) bilinmektedir [30]. Ortamda GA'nın birikimini sağlamak için glikoz konsantrasyonun 15 mM'ın üstünde ve pH değeri 3,5'in altında tutularak keto-asitlerin oluşumu baskılanır. Dönüşümün son aşamasında 2-KGA dehidrogenaz enzimi ile 2,5-diketoglukonik asit elde edilmektedir [20].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde çeşitli kaynaklardan GA üretimi için fungusların yaygın bir şekilde kullanıldığı görülse de bakterilerin GA üretimi için kullanıldığı önemli çalışmalar da bulunmaktadır [9]. *G. oxydans* bakterisi, uygun şartlarda glikozu GA'ya ve ardından 2-keto-D-glukonik aside (2-KGA) ve 5-keto-D-glukonik aside (5-KGA) dönüştürmektedir. Bu bakteri tarafından GA üretimi gerçekleştirilen bir çalışmada, pH kontrolü yapılmadan sıcaklık 32 °C, havalandırma hızı 2 vvm ve 1000 rpm karıştırma hızı koşulları altında maksimum dönüşüm %90,4 olarak elde edilmiştir. Maksimum spesifik büyüme hızı 0,39 st^{-1} ve hacimsel verimlilik 53 mmol/st olarak bulunmuştur [29]. *Pseudomonas fluorescens* AR4 suşu kullanılarak 20 L hacimli mekanik karıştırmalı bir reaktörde mısır nişastası hidrolizatının kullanıldığı bir çalışmada ise 2-KGA üretimi araştırılmıştır. Kesikli olarak gerçekleşen fermantasyonda %2 inokulum miktarı, pH 5,0-6,5, 30°C sıcaklık ve glikoz konsantrasyonu 180 g/L olarak belirlenen optimum şartlarda 16 saat sonunda 135,92 g/L konsantrasyonunda ve 8,83 g/L.st hacimsel verimlilikle üretim verimliliğinin 0,95 g KGA/g glikoz olduğu bildirilmiştir [31]. Bununla birlikte, bakteriler ile yapılan üretimlerde GA'nın daha ileri seviyelerde oksidasyonu endüstriyel üretimi sınırlandırmaktadır. Rekombinant DNA teknolojisindeki ilerlemeler, fermantasyon üretim proseslerinde bu sorunun aşılmasında önemli gelişmelerden biri oluşmuştur. Tanyıldızı vd. [22] tarafından yapılan bir çalışmada yabani tip *E. coli* Waksman suşları GA üretimi için apo-GDH enzimini sentezleyebilirken enzimin aktif forma (holoenzim) dönüşümünü sağlayan PQQ'yu sentezleyemediği görülmüştür. Bu tür mikroorganizmalara eksojen PQQ ilavesi, apo-GDH enzimini holoenzim (holo-GDH) yapısına dönüştürerek GA üretimi için aktif forma dönüştürülebileceği öne sürülmüştür. Bu amaçla holo-GDH enziminin sentezlenmesi için *Klebsiella pneumoniae* bakterisindeki altı gen içeren bütün *pqq* operonu ilgili hücreye aktarılmıştır. Böylece GA üretim yoluyla açılarak elde edilmiş olan *E. coli* W *pqq*⁺ rekombinant suşu ile 150 g/L glikoz, 1,5 g/L Na_2HPO_4 , 7,5 g/L, yeast ekstrakt ve 30 g/L $CaCO_3$ bileşenlerini içeren sentetik biyoreaktör ortamında GA verimliliği 0,031 g GA/g glikoz.st olarak bulunmuştur. Bu çalışmanın en dikkat çekici tarafı rekombinant suşların herhangi bir ileri seviye oksidasyon enzimine sahip olmadığından ortamda sadece GA'nın üretilmesidir. Ayrıca, GA üretiminde rekombinant *E. coli* W *pqq*⁺ suşunun hif yapılı funguslara göre daha uygun ortam reolojisi, daha kısa fermantasyon süresi, havalandırma kolaylığı ve daha yüksek verimlilik gibi ekonomik avantajlara sahip olduğu da görülmüştür.

Funguslarda D-glukonolakton elde etmek için glikozun oksijen ile oksidasyonu, GO enzimi tarafından katalize edilir. Genellikle hücre içi olan bu enzim, özellikle *Aspergillus* ve *Penicillium*'da, belirli filamentli fungusların membranı ile kısmen hücre dışına salgılanır veya hücre dışı olarak tutulur. Daha sonra D-glukonolakton kendiliğinden glukonata hidroliz edilir ve yukarıda bahsedilen funguslarda bulunan katalaz enziminin etkisiyle ayrıştırılan H_2O_2 açığa çıkar. Bakteriyel GDH enzimi pirolokinolin kinon (PQQ) ile birlikte sitoplazmik zarın dış yüzeyinde bulunurlar. GDH enzimi sitoplazmada yer alan NADP-bağımlı bir proteindir [32]. Membrana bağlı bir enzim olan GDH, koenzim olarak PQQ'yu kullanır ve glikozu GA oluşturmak için hidrolize uğrayacak D-glukonolaktone dönüştürür. Bununla birlikte, fungusların kullanıldığı üretimlerde glikoz, GO tarafından oksitlenerek D-glukonolaktone dönüştürülür ve daha sonra kendiliğinden veya laktonaz enzimi ile GA'ya

dönüştürülür. *G. suboxidans* (bakteri) ve *A. niger* (fungus) mikroorganizmalarındaki GA oluşumu için enzimatik reaksiyonlar Şekil 2’de gösterilmektedir [33].



Şekil 2. (a)Bakteri ve (b)Funguslardaki GA üretimi için metabolik yollar [33]

Glikozdan yüksek dönüşümlerle gerçekleşen GA üretim verimini etkileyen en önemli iki değişken fermantasyon ortamı pH’sı ve çözünmüş oksijen konsantrasyonudur [9]. GA üretimi oksidasyonu sağlayan enzimin etkinliğine bağlı olduğundan ortamdaki asitliğin artması sonucu GA üretim reaksiyonunu katalizleyen enzim inaktif hale gelmekte ve oksidasyon mekanizması bozulmaktadır. Fermantasyon ortamının pH’sının artmasıyla oluşan asidik ortam problemi uygulamaya bağlı olarak kalsiyum karbonat (CaCO₃) veya sodyum hidrosit (NaOH) gibi kimyasal nötrale edici ajanların ortama eklenmesiyle çözülebilmektedir. Ortama bu nötrale edici ajanlarının katılmasıyla da sodyum veya kalsiyum glukonat tuzlarının üretimi gerçekleşmektedir. Ancak, ortama katılan bu ajanların belirli konsantrasyonlarının GA üretimi için indükleyici bir etki de yarattığı bilinmektedir. GA üretilen fermantasyon ortamının çözünmüş oksijen konsantrasyonunu arttırmak için ise ortama oksijence zengin hava beslenilmesi veya basınçlı fermentörlerin (4-6 bar) kullanılması gerekmektedir [22].

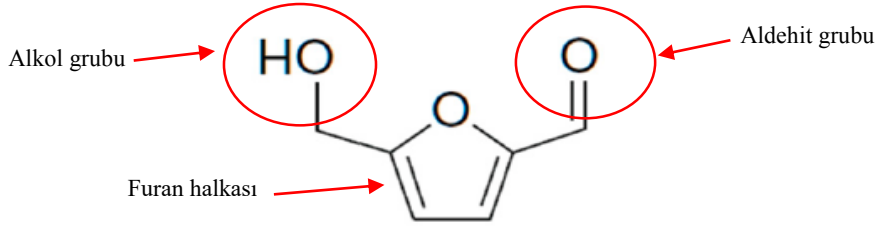
2.2. GA kullanım alanları

GA ve türevleri (tuzlar veya esterler) gıda, ilaç ve kozmetiklerin formülasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. Et ve süt ürünleri ile özellikle unlu mamüllerde önceden mayalanmış ürünler için kabartma ajanlarının bir bileşeni olarak kullanılır. Ayrıca GA, süt endüstrisinde metal temizleme işlemlerinde, yüzey temizliği için deterjanlarda, metalürji endüstrisinde alkali pas giderme işlemlerinde ve tekstil endüstrisinde demir birikimini önleme işlemlerinde bir bileşen ve şelatlama maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [34].

Sodyum glukonat, kireç oluşumunun önlenmesine ve camdan uzaklaştırılmasına yardımcı olduğu için şişe yıkama formülasyonlarında deterjan görevi görür. Poliester ve poliamid kumaşların haşıl sökülmesinde de kullanılır. Metalurjide sodyum glukonat, alkali pas giderme, boyalı duvarların yıkanması ve metal karbonat çöktürmelerinin korozyona neden olmadan uzaklaştırılması için kullanılır. Çimentoya katkı maddesi olarak kullanılıp çimentonun mukavemetini ve su direncini artırarak donma ve çatlama direncinin artmasına yardımcı olur. Diğer uygulamaları, kağıt endüstrisinde su arıtmayı içerir. GA’nın kalsiyum ve demir tuzları, sırasıyla kalsiyum eksikliğini ve anemiyi önlemek için takviye besin maddesi olarak kullanılır. Kalsiyum glukonat ayrıca hayvan beslenmesinde de uygulama alanı bulur. Demir glukonat ve demir fosfolukonat demir tedavisinde kullanılmaktadır. Çinko glukonat, çinko eksikliklerinin tedavisinde uygulama bulur [16].

3. 5-Hidroksimetil Furfural (HMF)

HMF, C₆H₆O₃ molekül formülüne sahip sarı renkli düşük erime noktalı bir katıdır ve su, metanol, etanol, benzen ve etil asetat gibi bir dizi çözücüde çözünürlüğü vardır. Hem aldehit hem de alkol fonksiyonel grupları içeren bir furan halkasından oluşur (Şekil 3). Papatya çiçeği kokusuna sahip olan HMF molekülü, 114-116 °C/1 mmHg (lit.) arasında bir kaynama noktasına ve 25 °C’de 1,2 g/cm³ yoğunluğa sahiptir [35]. Son yıllarda kimya endüstrisinde yükselen bir hammadde olan HMF, polimerler, farmasötikler, reçineler, çözücüler, fungusitler ve yakıtların üretimi için çok yönlü bir platform kimyasalı olarak tanımlanmıştır. HMF, ABD Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından umut vaat eden ilk 12 yapı taşından biri olarak kabul edilmiştir. Bu bakımdan ilerleyen süreçlerde HMF üretiminin endüstride çok büyük bir ilgiye sahip olması beklenmektedir [36].

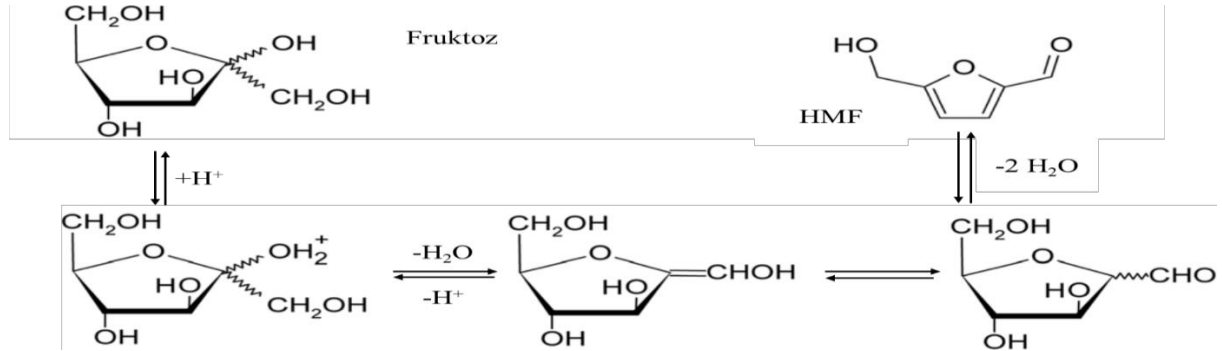


Şekil 3. HMF'nin kimyasal yapısı [37]

Nişasta, sakkaroz, inülin, selüloz, glikoz ve fruktoz gibi biyokütlelerden elde edilen HMF, gelecekte kimyasal ve yakıt ihtiyacını karşılama potansiyeline sahip önemli platform kimyasalı olarak dikkat çekmektedir. HMF oluşumuna uygun doğal furanoz yapısı nedeniyle fruktoz, HMF üretiminde en iyi başlangıç maddesidir. Bununla birlikte, fiyatı büyük ölçekli HMF üretiminde uygulanamayacak kadar yüksektir [14]. Fruktoz maliyeti HMF fiyatında baskın faktör olduğundan HMF fiyatının rekabetçi olması için daha verimli süreçlerin geliştirilmesinin yanı sıra daha düşük fruktoz maliyetlerinin gerekli olduğu görülmüştür [38]. HMF için küresel pazarın 2016'da yaklaşık 117 milyon dolardan 2022'ye kadar yaklaşık 123 milyon dolara ulaşması beklenmektedir. HMF'nin şu an üretilen teknoloji ile üretim maliyeti fosil kaynaklı dökme kimyasallardan 3 kat daha fazla olduğu bilinmektedir [5]. Bununla birlikte HMF'nin endüstriyel ölçekte üretim maliyetinin 1 dolar/kg seviyelerinde olması durumunda beklenen orandan (500-1500 dolar/kg) daha rekabetçi bir ürün olacağı belirtilmektedir [39].

3.1. HMF üretimi

HMF, fruktoz, glikoz, sakkaroz, nişasta, inülin ve selüloz gibi monomerik veya polimerik karbonhidratlar dahil olmak üzere her türlü 6 karbonlu karbonhidratlardan 3 molekül suyun ayrıldığı dehidrasyon reaksiyonları ile üretilir (Şekil 4) [40]. Ancak polisakkaritlerden direkt olarak HMF üretimi için öncelikle polisakkaritlerin monosakkaritlere hidroliz edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle monosakkaritlerin başlangıç maddesi olarak kullanılması daha avantajlıdır. Yapısında bulundurduğu furan halkasından dolayı fruktoz verim ve seçicilik açısından HMF üretimi için en çok tercih edilen substrat olmakla birlikte yüksek maliyeti nedeniyle endüstriyel üretimlerde pek fazla kullanılmamaktadır [41]. HMF'nin glikoz ve fruktoz gibi monosakkaritler ve inülin, nişasta ve selüloz gibi polisakkaritlerden üretilbilmesine yönelik yapılan birçok bilimsel araştırmalar sonucunda en iyi HMF veriminin fruktozun dehidrasyonu ile elde edildiği görülmüştür [37]. Fruktozun HMF'ye dönüşümü %100 iken glikoz ve sakkarozun HMF'ye dönüşümü %60-70 arasında olduğu ifade edilmiştir [42].



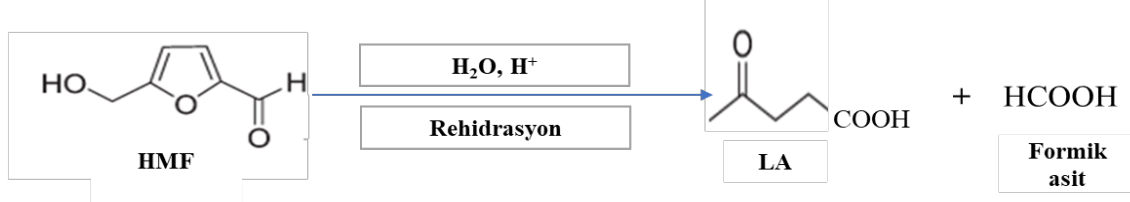
Şekil 4. Fruktozdan HMF'nin dehidrasyon ile üretilmesi [40]

HMF üretimi organik asitler, mineral asitler, Lewis asitleri ve iyon değiştirici reçine gibi çeşitli asit katalizörler ile gerçekleştirilebilir. 1950'lerden 1980'lere kadar, karbonhidratlardan HMF üretimi için etkili yöntemlerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar tamamen su bazlı mineral asitle katalize edilen sistemler üzerine olmuştur [41]. Geleneksel karbonhidrat kimyası için ortak bir çözücü olarak kullanılan su, bu süreçte HMF üretiminde de yaygın olarak kullanılmıştır. İlerleyen dönemlerde, HMF üretiminde mineral asit veya organik asit katalizörleri ile fruktoz, glikoz ve polisakkaritler (mısır nişastası vb.) gibi karbonhidratlar farklı koşullarda test edilmiştir. Bu çalışmalarda reaksiyon sıcaklığı 100°C ile 300 °C ve reaksiyon süresi saniye ile saat aralığında

değişmiştir. Bununla birlikte, sulu sistemin HMF üretimine etkisi düşük seçicilik ile sonuçlanmıştır. Fruktozdan HMF verimi % 50'den daha az olarak elde edilmiştir. Daha sonra HMF'nin asidik koşullar altında sulu ortamda stabil olmadığı anlaşılmıştır [43]. Ayrıca daha sonra çeşitli katı asit katalizörlerin bifazik sistemlerde karbonhidrat dehidrasyonu için yapılan çalışmalar da incelenmiştir. Fruktoz dehidrasyonu için Lewatitt SPC 108 (%61 mol) katalizörü, 15 saat boyunca 88 °C'de %56 HMF verimi, H-form zeolit (ağırlıkça % 29) katalizörü ile de 1 saat boyunca 165 °C'de %69 HMF verimi elde edilmiştir [41]. Glikozun dehidrasyonundan HMF üretiminde, niyobyum fosfat katalizör olarak incelendiği çalışmada maksimum %45 verime ulaşılmıştır. Aynı çalışmada fruktozun dehidrasyonundan maksimum HMF verimi Amberlyst 36 katalizörlüğünde %60, niyobyum fosfat katalizörlüğünde %53 olduğu ifade edilmektedir [44].

Organik asitlerin 6 karbonlu karbonhidratları HMF'ye katalize ettiği bildirilmişse de, düşük H^+ iyonizasyonlarından (yüksek pK_{a1} değerleri) dolayı tatmin edici katalitik verimlerde elde edilememiştir. Örneğin, katalizör olarak oksalik asit ($pK_{a1}= 1,22$) kullanıldığında sadece %27'lik bir HMF verimi elde edilmiştir. Formik asit ($pK_{a1}= 3,75$), asetik asit ($pK_{a1}= 4,76$) ve sitrik asit ($pK_{a1}= 3,13$) gibi diğer organik asitler de fruktoz dehidrasyonunu katalize etmede tatmin edici sonuçlar sağlayamamıştır. Bununla birlikte, sıcaklık ve tuz etkisi gibi faktörler zayıf asitlerin ayrışma derecesini düzenleyebilir ve HMF verimini arttırabilir. Organik asitlerin fermantasyon, enzimatik veya kimyasal oksidasyon ortamında *in situ* olarak oluşabilmeleri gibi önemli bir avantajı da vardır. Bu endojen asitler, dehidrasyon reaksiyonlarını katalize edebiliyorlarsa, eksojen protonik asitlerin eklenmesi azaltılmış hatta önlenmiş olacaktır [45]. Organik asitlerin katalizör olarak kullanıldığı bir çalışmada, HMF'nin oksidasyonu (γ -valerolakton (GVL)/ H_2O) bifazik ortamdan filtre edilerek ayrılabilen bir organik asit olan FDCA'nın ($pK_{a1}= 2,76$) çok az bir miktarı kullanılarak gerçekleştirilen fruktoz dehidrasyonunun yüksek verimde (% 70) HMF'ye dönüştüğü ve tüm süreçte korozif asitlerin kullanım ihtiyacının ortadan kaldırıldığı ifade edilmiştir [46].

Fruktoz dehidrasyonu için kullanılan çözücü sistemleri temel olarak monofazik sistemlere ve bifazik (iki fazlı) sistemlere ayrılabilir. Monofazik sistemler arasında dimetil sülfoksit (DMSO) şimdiye kadar yüksek HMF verimleri ile yüksek fruktoz dönüşümleri ve huminler de dahil olmak üzere nispeten daha düşük yan ürün içeriği sağlamıştır. Ayrıca, tetrahidrofuran (THF), aseton ve izopropil alkol gibi diğer düşük kaynama noktalı solventler de kullanılmıştır [47]. Su kullanılan monofazik sistemlerde HMF üretimi düşük verimde olup furan halkasının açılma ürünleri olan levulinik asit (LA) ve formik aside hızlı rehidrasyonu nedeniyle uygun bir reaksiyon ortamı değildir (Şekil 5). Bunlar asidik sulu sistemdeki HMF'nin düşük seçiciliğinin ana nedenleridir. HMF'nin sulu ortam içinde rehidrasyonu, oluşturulduğu sırada reaksiyon karışımından HMF'nin uzaklaştırılmasıyla azaltılabilir. Bu amaçla, sulu faz ile karışmayan ve tercihen suya göre HMF için daha yüksek bir dağılım katsayısına sahip olan bir ekstraksiyon fazı (organik faz) kullanılabilir. Daha sonra HMF organik fazdan geri kazanılır. Böyle bir sisteme bifazik sistem denir. Fazlar arasındaki dağılım katsayısı oldukça önemlidir, çünkü düşük bir değer büyük miktarlarda organik solventin kullanılmasını ve HMF geri kazanımı için büyük miktarlarda enerji harcanmasını gerektirecektir. Metil izobütül keton (MIBK), 2-metil tetrahidrofuran (2-MeTHF), diklorometan (DCM) ve saf-butanol gibi organik solventlerin ekstrakte edici solvent olarak etkili olduğu kanıtlanmıştır [48].



Şekil 5. Su ile HMF'nin rehidrasyonu [13]

Bifazik sistemlerde karbonhidratlardan HMF üretimi ilk olarak 1956 yılında Peniston tarafından yapılmıştır. Bu çalışma, 0,05 M sulu sülfürik asit (H_2SO_4) içinde ağırlıkça %2 fruktoz bulunduran sulu ortamla aynı miktarda n-butanol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 170 °C'de 8 dakika sonra %68 HMF verimi elde edildiği bildirilmiştir [49]. Bifazik sistemde HMF üretiminin en eski örneğini temsil eden bu deneysel çalışmadan sonra 1977'de Kuster ve Van der Steen, fruktozdan HMF üretimi için MIBK/su oranının 7,5 olarak seçildiği bifazik sistemler üzerinde çalışmışlardır. Reaksiyon, sürekli karıştırılmalı bir tank reaktöründe (CSTR) gerçekleştirilmiş ve 5 dakika boyunca 190 °C'de 1 M fruktoz ve 0,1 M fosforik asit (H_3PO_4) içeren ortamda %69'luk HMF verimi elde edilmiştir. Bu sonuçlar, HMF'nin organik faza sürekli olarak taşınmasının HMF seçiciliğini arttırdığını göstermiştir [41]. Başka bir üretim sistemi de katı katalizör olarak SPC-108 ve reaksiyon ortamı olarak su-MIBK iki fazlı bir çözücü sistemi ile tasarlanmıştır. Bu sistem çeşitli karbonhidratların dehidrasyonu için test edilmiştir. 78 °C'de fruktozdan %72

ve glikozdan %10'dan daha az bir HMF verimi elde edilmiştir. Bu sistem ayrıca inülin'den %67 verim, sakkarozdan %41 verim ve rafinozdan %27 verim ile HMF üretilmiştir [13].

3.2. HMF kullanım alanları

Bir furan halkasına bağlı aldehit ve hidroksil gruplarının varlığı nedeniyle HMF, çeşitli katma değerli kimyasalları sentezlemek için uygun başlangıç moleküllerinden biridir [50]. HMF biyoyakıt hammaddesi olarak kullanılan 2,5-dimetilfuran (DMF) ve diğer moleküllerin üretimi için sadece ara madde olarak değil, aynı zamanda levulinik asit (LA), 2,5-furandikarboksilik asit (FDCA), 2,5-diformilfuran (DFF), 2,5-dihidroksimetilfuran (DHMF) gibi yakıt ve polimer alanında yüksek potansiyele sahip önemli moleküller için de çok yararlı bir kimyasal maddedir [42]. HMF, biyokütle kaynakları ve biyokimyasallar arasındaki boşluğu kapatmak için anahtar bir araçtır. Örneğin, FDCA şu anda, polietilen tereftalat (PET) ile karşılaştırıldığında üstün bariyer özelliklerine sahip yeni polimer poli (etilen furanoat) (PEF) üretimi için tereftalik aside (TPA) alternatif bir monomer olarak geliştirilmektedir [47]. HMF'den türetilen DMF, etanol (23 MJ⁻¹)'den daha yüksek ve benzene (35 MJ L⁻¹) yakın bir enerjiye sahiptir [51]. Ayrıca, HMF türevi bazı plastik malzemelerin genellikle biyo-bozunur olması yeşil ve düşük karbonlu ekonomiler üzerinde büyük öneme sahiptir [41]. Tablo 2'de HMF'den üretilen kimyasallar ve bu kimyasalların kullanım alanları özetlenmiştir.

Tablo 2. HMF'den üretilen kimyasallar ve uygulamaları [38]

Kimyasal	Potansiyel Pazarı/Uygulama Alanları
Formik asit	Hammadde kimyasalı Tekstil Katalizörler
2,5-Furandikarboksilik asit (FDCA)	Polimerler İlaçlar
2,5-di (Hidroksimetil) furan (DHMF)	Solventler Polimerler
2,5-Dimetilfuran (DMF)	Biyoyakıtlar
2,5-Diformilfuran (DFF)	İlaçlar Fungus ilaçları
2,5-di (Hidroksimetil) tetrahidrofuran (DHM-THF)	Solventler
2,5-Furandikarboksiyaldehit (FDC)	Polimerler Reçineler

4. GA ve HMF'nin Birlikte Üretimi

GA ve HMF farklı tesis, metot, hammadde ve maliyetlerle üretilebilen küresel ekonomide ticari değeri olan iki platform kimyasalıdır. Bu iki kimyasalın üretimi çok eski zamanlardan beri büyük ilgi görmüştür ve farklı biyokütle kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yeni substrat kaynaklarının (peynir altı suyu, mısır nişastası, konserve melası vb.) araştırılmasına yönelik yapılan araştırmalara rağmen yüksek verimlilikte GA üretimi için karbon kaynağı olarak genellikle glikoz kullanıldığı görülmektedir [52]. Benzer şekilde HMF üretmek için ucuz hammaddeler araştırılmakla birlikte en uygun başlangıç materyali olarak furanoz yapısı nedeniyle fruktoz olduğu bilinmektedir. Fruktozun hammadde olarak kullanıldığı çalışmalarda daha yüksek reaksiyon hızına ve seçiciliğine ulaşıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, fiyatı büyük ölçekli ticari HMF üretiminde uygulanamayacak kadar yüksektir [40]. Fruktoz ile karşılaştırıldığında glikoz daha bol ve ucuz bir heksozdur. Fakat, glikozun piranoz halka yapısının kararlı doğası nedeniyle, yan reaksiyonları önlemek ve HMF verimini arttırmak için zor reaksiyon koşulları ve çeşitli katalizörler gereklidir [14].

GA ve HMF'nin birlikte üretiminde her iki ürününde başlangıç maddesini (GA'nın başlangıç maddesi olan glikoz ve HMF'nin başlangıç maddesi olan fruktoz) ihtiva eden biyokütle kaynaklarının kullanımı da son zamanlarda araştırılmaktadır. Bu biyokütle kaynaklarından biri şekerin kristalizasyonu sonucu oluşan bir yan ürün olan melastır. Melas, ucuz olması ve yüksek oranda sakkaroz (%48-51) içermesi gibi nedenlerden dolayı GA ve HMF'nin birlikte üretiminde kullanılabilecek karbon kaynaklarından biridir [53]. Bununla birlikte, içerdiği ağır

metaller ve renk bileşenleri fermantasyon çalışması sırasında ortam pH'sını etkileme, enzimleri inaktif hale getirme ve mikrobiyal gelişimi inhibe etme gibi önemli problemlere yol açmaktadır. Bu nedenle bazı kimyasal ve fiziksel ön işlemlere tabii tutularak biyoteknolojik üretim öncesi kullanıma uygun hale getirilir [54, 55]. Uygulanacak ön işlemler fazladan maliyet ve verim kaybına yol açmaktadır. Ayrıca, melasla taşınan şeker dışı bileşenlerin safsızlık oluşturması son ürüne bağlı olarak ayırma ve saflaştırma aşamalarında sorunlar oluşturabilmektedir. GA ve HMF'nin birlikte üretiminde yüksek fruktoz mısır şurubunu (HFCS) ve türevlerinin (HFCS-42 ve HFCS-55) kullanımı da üretim maliyetlerinin düşürülmesi bakımından dikkat çekmektedir. HFCS-42, yaklaşık %42 fruktoz, %53 glikoz içerirken, HFCS-55 yaklaşık %55 fruktoz, %41 glikoz içermektedir [56]. GA ve HMF'nin biyokütle kaynağı olarak HFCS-55'den birlikte üretimini amaçlayan bir çalışmada, HMF üretiminde enzimatik yolla üretilen GA'nın katalizör olarak kullanımı incelenmiştir. 2-MeTHF organik solventi ve ağırlıkça %2'lik $CaCl_2$ içeren fruktoz-GA çözeltisinden 200 W mikrodalga sistemi yardımıyla (10 dakika boyunca 150 °C'de) elde edilen HMF'nin verimi yaklaşık olarak %45 olarak bulunmuştur. Ortama eklenen $CaCl_2$ ilavesi ile GA'nın katalizör olarak kullanımının çok daha etkin olduğu (HMF verimi %85) bildirilmiştir [45].

GA ve HMF'nin birlikte üretiminde kullanılabilir diğer bir biyokütle kaynağı olan sakkaroz, ucuz ve yeryüzünde bol bulunan glikoz ve fruktoz birimlerinden oluşan bir disakkarittir. Birlikte üretimde diğer karbon kaynakları da kullanılabilirle beraber, sakkaroz düşük fiyatı nedeniyle oldukça cazip bir hammadde haline gelmektedir (Tablo 1). Ayrıca, sakkaroz hücrelerin ve protein yapısının oksidasyon, ısı ve asit gibi çevresel streslerden korunması üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir, bu nedenle biyo-ürün oluşumunu artırmak için uygun bir karbon kaynağı olmaktadır [57]. Son zamanlarda sakkarozun bu özellikleri bilim insanlarının dikkatini çekmiştir. Platform kimyasallarının daha düşük maliyetlerle elde edilmesinde sakkaroz hidrolizatından (glikoz-fruktoz çözeltisi) tek proste birlikte üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Wu vd. [14] tarafından gerçekleştirilen sakkaroz hidrolizatıyla GA ve HMF'nin birlikte üretimin incelendiği çalışmada, ilk olarak enzimatik oksidasyon yardımıyla glikozdan (GO/katalaz:1/4) GA elde edilmiştir. Ardından içerisinde GA ile birlikte fruktoz bulunan ortama ilave edilen H_2SO_4 katalizörlüğünde HMF üretimini incelenmiştir. Çalışma sonunda %73,8 HMF verimi elde edilirken fermantasyon sonrası elde edilen GA'nın %95'inin bozunmadan kaldığı ifade edilmiştir. Çalışmada, GA'nın üretildiği sulu faz ile uygun dağılım katsayısına sahip organik solventler ile bifazik sistem oluşturulmuştur. Bifazik ortamda GA'nın varlığı fruktoz dehidrasyonundan etkilenmeyerek sulu fazda kalmıştır. Dehidrasyon reaksiyonundan sonra, HMF organik faza geçeceğinden GA'dan ayrılması yüksek oranlarda gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, glikozun GA'ya fermantasyonu sonrası ortamda kalan fruktozdan da HMF'nin tek proste birlikte üretimi maliyetlerin düşürülmesini sağlamaktadır. Aynı biyokütle kaynağından bu değerli platform kimyasallarının üretimi ile ilgili çalışmaların oldukça sınırlı olduğu ve bu alanda yapılan çalışmaların devam ettiği görülmektedir.

Tablo 1. Güncel bazı biyokütle kaynakları ve fiyatları (cent (¢) / kg) [58]

Biyokütle	Fiyat (¢/kg)
Sakkaroz	50,59
Glikoz	90,39
HFCS-42	79,19
HFCS-55	93,76

5. Ürünlerin (HMF ve GA) Ayrılması ve Saflaştırılması

Son zamanlarda birçok araştırma yapılmış olmasına rağmen, HMF'nin yüksek üretim maliyeti ticari ölçekte halen önemli bir sorundur. Yüksek hammadde maliyeti, düşük ürün seçiciliği ve yüksek saflaştırma maliyeti başlıca kısıtlamalardır. Bu dezavantajları önlemek için, reaktif fazda (sulu faz) oluşumundan hemen sonra bir organik faza (ekstraksiyon fazı) HMF'nin eş zamanlı ekstraksiyonu için bifazik sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Bifazik sistemin organik katmanı, reaktif fazda oluşumundan hemen sonra organik fazda sürekli HMF birikimi için bir ekstraksiyon fazı görevi görür. Bunlar, sulu ortamda oluşan çözünür polimerler veya huminler gibi yan ürünlerin oluşumunu önleyerek HMF'nin üretim verimini arttırabilirler. Ayrıca bu yöntem, harcanan homojen veya heterojen katalizörleri içeren sulu fazdan kolayca ayrılmasına ve yeniden kullanılabilirliğine izin verir. Etkili ekstraksiyonun belirlenmesinde organik solventlerin seçimi oldukça önemlidir çünkü organik ve sulu faz arasındaki partiyon (dağılım) katsayısı uygun oranda olması gerekmektedir. Bu problem, etkili ekstraksiyon çözümleri olduğu bildirilen MIBK, DCM, etil asetat, THF, dietil eter ve aseton gibi organik çözümlerin kullanılmasıyla aşılmıştır [42]. HMF'nin bifazik sistemlerden saflaştırılması, esas olarak sulu

fazın organik fazdan izolasyonunu ve ardından HMF'yi organik fazdan ayırmak için organik fazın distilasyonunu gerektirir. Bir çalışmada, fruktozu HMF'ye dönüştürmek için formik asit katalizörü içeren sulu faz kullanılmış ve oluşan HMF, kendiliğinden organik faza (1-butanol) aktarılmıştır. Daha sonra, saflaştırılmış HMF üretmek için HMF damıtılmıştır. HMF'nin saflaştırılmasıyla bağlantılı damıtma maliyetini azaltmak için, daha düşük kaynama noktasına sahip organik çözücülerin kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Bu solventlerin HMF verimini arttırmasının yanı sıra düşük kaynama noktalarına sahip olmaları distilasyon işlemlerinde onları daha kullanışlı ve ekonomik yapmaktadır [59].

GA'nın fermantasyon ortamından saflaştırılması hem fungus hem de bakteri sistemlerinde benzerdir ve büyük ölçüde kullanılan karbon kaynağı türlerine ve fermantasyon ortamının nötralizasyonu için izlenen yöntemlere bağlıdır. Geri kazanım süreci GA, glukono-d-lakton, kalsiyum glukonat ve sodyum glukonat gibi ürünlerin türüne göre farklılık gösterebilir. Örneğin ortamda sodyum glukonat elde etmek için, fermantasyondan sıvısı filtre edilir, daha sonra aktif karbon kolonu kullanılarak rengi giderilir, vakumlu kurutucu altında konsantre edilir. Sodyum glukonat elde edilene kadar NaOH ile pH 7,5'e nötrleştirilir. Daha sonra sprey veya tamburlu kurutucu kullanılarak kurutulur [27]. Fermantasyon sıvısından GA ekstraksiyonu için iyon değiştirme yöntemleri de kullanılmaktadır [60].

6. Sonuç

Biyokütle kaynaklarından değerli ürünlerin birlikte üretilmesi üretim maliyetlerinin düşürülmesi bakımından önemlidir. Farklı metotlarla üretilen değerli ürünlerin birlikte üretilmesine yönelik araştırmalar, yeni alternatif üretim yöntemleri arasında görülmektedir. Birçok uygulama alanına sahip olan HMF ve GA, farklı prosesler ile üretilen biyokütle kaynaklı gelecek vaat eden önemli platform kimyasallarıdır. Fruktoz, HMF oluşumuna faydalı olan doğal furanoz yapısı nedeniyle HMF hazırlanmasında kullanılan en iyi hammaddedir. Bununla birlikte, fiyatı büyük ölçekli HMF üretiminde uygulanamayacak kadar yüksektir. Diğer platform kimyasalı olan GA üretimi mikrobiyal fermantasyon, enzimatik kataliz, kimyasal ve elektrokimyasal gibi çeşitli yöntemler ile gerçekleşen basit bir oksidasyon işlemi olmasına rağmen, ticari olarak GA üretiminde ana hammadde kaynağı olan glikozun kullanılması prosesin maliyetini arttırmaktadır. Ayrıca, halihazırda üretimleri farklı tesis ve metotlarla gerçekleştiğinden bu durum üretim maliyetini ve enerji ihtiyacını daha da arttırmaktadır. Bunların ekonomik bir şekilde ticarileştirilebilmesi için nispeten daha düşük maliyetli biyokütle kaynaklarından yüksek verimler elde edilerek birlikte üretilmeleri önemli bir alternatif yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır. Farklı mekanizmalar ve hammaddelerle üretilen bu değerli platform kimyasallarını tek bir prosesle sakkarozdan başlayarak üretilmesi, farklı metotlarla üretilmelerine kıyasla düşük maliyetlerle ve daha sürdürülebilir bir yöntem olacaktır. Bu yönde yapılacak çalışmaların GA ve HMF'nin farklı sistemlerden üretildikleri maliyetin altında elde edilmelerinin yakıt, kimyasal maddeler ve polimer endüstrileri gibi ekonomilere katkı sağlayacağı açıktır.

Kaynaklar

- [1] Ma S, Li W, Zhang, S, Ge D, Yu J, Shen, X. Influence of sodium gluconate on the performance and hydration of Portland cement. *Constr Build Mater* 2015; 91, 138–144.
- [2] Chun B, Dair B, Macuch P, Wiebe D, Porteneuve C, Jeknavorian A. The development of cement and concrete additive: based on xylonic acid derived via bioconversion of xylose. *Appl Biochem Biotechnol* 2006; 131, 645–658.
- [3] Zhang H, Liu G, Zhang J, and Bao J. Fermentative production of high titer gluconic and xylonic acids from corn stover feedstock by *Gluconobacter oxydans* and techno-economic analysis. *Bioresource Technology* 2016; 219, 123-131.
- [4] Zhou X, and Xu Y. Integrative process for sugarcane bagasse biorefinery to co-produce xylooligosaccharides and gluconic acid. *Bioresource technology* 2019; 282, 81-87.
- [5] Mika LT, Csefalvay E, and Nemeth A. Catalytic conversion of carbohydrates to initial platform chemicals: chemistry and sustainability. *Chemical reviews* 2018; 118(2): 505-613.
- [6] Singh OV, and Kumar R. Biotechnological production of gluconic acid: future implications. *Applied microbiology and biotechnology* 2007; 75(4): 713-722.
- [7] Zhang Z, and Huber GW. Catalytic oxidation of carbohydrates into organic acids and furan chemicals. *Chemical Society Reviews* 2018; 47(4): 1351-1390.
- [8] Kirimura K and Yoshioka I. Gluconic and itaconic acids (2019).
- [9] Ramachandran S, Fontanille P, Pandey A, Larroche C. Gluconic acid: Properties, applications and microbial production. *Food Technology and Biotechnology* 2006; 44(2): 185-195.
- [10] Roehr M, Kubicek CP, Komínek J. Gluconic acid. *Biotechnology: Products of Primary Metabolism* 1996; 347-362.
- [11] Hustede H, Haberstroth HJ, Schinzig E. Gluconic acid. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* 1989; 449–56.
- [12] Gehring M, Vogel D, Tennhardt L, Weltin D, and Bilitewski B. Bisphenol A contamination of wastepaper, cellulose and recycled paper products. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 2004; 78.

- [13] Saha B, and Abu-Omar M. Advances in 5-hydroxymethylfurfural production from biomass in biphasic solvents. *Green Chemistry* 2014; 16(1): 24-38.
- [14] Wu H, Huang T, Cao F, Zou Q, Wei P, Ouyang P. Co-production of HMF and gluconic acid from sucrose by chemo-enzymatic method. *Chemical Engineering Journal* 2017; 327, 228-234.
- [15] Ishag OAO, Mohammed AM, Ali MM, Omer AB. Catalytic Conversion of Sugarcane Bagasse into 5-Hydroxymethylfurfural. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry* 2019; 1-9.
- [16] Ramachandran S, Nair S, Larroche C, Pandey A. Gluconic Acid. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* 2017; 577-599.
- [17] Gluconic Acid Market Size. <https://www.marketwatch.com/press-release/global-gluconic-acid-market-size-2022-analysis-by-recent-development-geographical-regions-trends-and-forecast-to-2028-research-report-by-absolute-reports-15.05.2022>
- [18] Canete-Rodriguez AM, Santos-Duenas IM, Jimenez-Hornero JE, Ehrenreich A, Liebl W, Garcia-Garcia I. Gluconic acid: properties, production methods and applications-an excellent opportunity for agro-industrial by-products and waste biovalorization. *Process Biochemistry* 2016; 51(12): 1891-1903.
- [19] Bankar SB, Bule MV, Singhal RS, and Ananthanarayan L. Glucose oxidase-an overview. *Biotechnology advances* 2009; 27(4): 489-501.
- [20] Deller K, Krause H, Peldszus E, Despeyroux B. U.S. Patent No. 5,132,452. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office 1992.
- [21] Schinzing E, Hustede H. and Haberstroth H. Gluconic acid. *ULLMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry* 1989; 449, 456.
- [22] Tanyıldızı MŞ, Altundoğan, HS ve Çelik V. Glukonik asit üretim yolağı aktifleştirilmiş ve endojenik oksijen kaynağı sağlanmış rekombinant suşlar kullanılarak glukonik asit üretimi. TUBİTAK 1001 Ar-Ge Projesi Sonuç Raporu (117R003) 2020; Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [23] Lockwood LB. Organic acid production of acids. *Filamentous fungi* 1975; 1, 140-157.
- [24] Purane NK, Sharma SK, Salunkhe PD, Labade DS, Tondlikar MM. Gluconic acid production from golden syrup by *Aspergillus niger* strain using semiautomatic stirred-tank fermenter. *J Microb Biochem Technol* 2012; 4, 92-95.
- [25] Ahmed K, Valeem EE, Mahmood T. Optimal cultural conditions for industrial enzyme production by using shaken flask technique of submerged fermentation. *Journal of Biology* 2015; 5(1): 21-26.
- [26] Roehr M, Kubicek CP, and Kominek J. Gluconic acid. *Biotechnology: Products of Primary Metabolism* 1983; 347-362.
- [27] Pal P, Kumar R, and Banerjee S. Manufacture of gluconic acid: A review towards process intensification for green production. *Chemical Engineering and Processing Process Intensification* 2016; 104, 160-171.
- [28] Singh OV, Jain RK, Singh RP. Gluconic acid production under varying fermentation conditions by *Aspergillus niger*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology: International Research in Process, Environmental and Clean Technology* 2003; 78(2-3): 208-212.
- [29] Velizarov S, and Beschkov V. Production of free gluconic acid by cells of *Gluconobacter oxydans*. *Biotechnology Letters* 1994; 16 (7): 715-720.
- [30] Ano Y, Shinagawa E, Adachi O, Toyama H, Yakushi T, Matsushita K. Selective, high conversion of d-glucose to 5-keto-d-gluconate by *Gluconobacter suboxydans*. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry* 2011; 75(3): 586-589.
- [31] Sun WJ, Yun QQ, Zhou YZ, Cui FJ, Yu SL, Zhou Q, Sun L. Continuous 2-keto-gluconic acid (2KGA) production from corn starch hydrolysate by *Pseudomonas fluorescens* AR4. *Biochemical engineering journal* 2013; 77, 97-102.
- [32] Klasen R, Bringer-Meyer S, Sahm H. Biochemical characterization and sequence analysis of the gluconate: NADP 5-oxidoreductase gene from *Gluconobacter oxydans*. *Journal of bacteriology* 1995; 177(10): 2637-2643.
- [33] Cardenas LZ, and Cardenas BZ. Production of organic acids via fermentation of sugars generated from lignocellulosic biomass. *Lignocellulosic Biorefining Technologies* 2020; 203-246.
- [34] Tarekegn F, and Jabasingh SA. Gluconic acid production from cane molasses using *Aspergillus carneus*. *Emerging Trends in Chemical Engineering* 2019; 6(3): 37-44.
- [35] Chatterjee S, Gangopadhyay S, Patra S, Chowdhury SP. An overview of different approaches for sustainable production and convertibility of hydroxymethylfurfural. *IJRET* 2016; 5(1): 45-52.
- [36] Zhang Z, O'Hara IM, Rackemann DW, and Doherty WO. Low temperature pretreatment of sugarcane bagasse at atmospheric pressure using mixtures of ethylene carbonate and ethylene glycol. *Green Chemistry* 2013; 15(1): 255-264.
- [37] Menegazzo F, Ghedini E, Signoretto M. 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) production from real biomasses. *Molecules* 2018; 23(9): 2201.
- [38] Mukherjee A, Dumont MJ, Raghavan V. Sustainable production of hydroxymethylfurfural and levulinic acid: Challenges and opportunities. *Biomass and Bioenergy* 2015; 72, 143-183.
- [39] Kong QS, Li XL, Xu HJ, and Fu Y. Conversion of 5-hydroxymethylfurfural to chemicals: A review of catalytic routes and product applications. *Fuel Processing Technology* 2020; 209, 106528.
- [40] Steinbach D, Kruse A, Sauer J. Pretreatment technologies of lignocellulosic biomass in water in view of furfural and 5-hydroxymethylfurfural production-a review. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2017; 7(2): 247-274.
- [41] Teong SP, Yi G, Zhang Y. Hydroxymethylfurfural production from bioresources: past, present and future. *Green Chemistry* 2014; 16(4): 2015-2026.
- [42] Rosatella AA, Simeonov SP, Frade RF, and Afonso CA. 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) as a building block platform: Biological properties, synthesis and synthetic applications. *Green Chemistry* 2011; 13(4): 754-793.

- [43] van Putten RJ, Van Der Waal JC, De Jong ED, Rasrendra CB, Heeres HJ, de Vries JG. Hydroxymethylfurfural, a versatile platform chemical made from renewable resources. *Chemical reviews* 2013; 113(3): 1499-1597.
- [44] Souzanchi S. Catalytic conversion of fructose, glucose and industrial grade sugar syrups to 5-hydroxymethylfurfural, a platform for fuels and chemicals. *Electronic Thesis and Dissertation Repository* 2016; 4070.
- [45] Lin C, Wu H, Wang J, Huang J, Cao F, Zhuang W, and Ouyang P. preparation of 5-hydroxymethylfurfural from high fructose corn syrup using organic weak acid in situ as catalyst. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 2020; 59(10): 4358-4366.
- [46] Motagamwala AH, Won W, Sener C, Alonso DM, Maravelias CT, and Dumesic JA. Toward biomass-derived renewable plastics: Production of 2, 5-furandicarboxylic acid from fructose. *Science advances* 2018; 4(1): 9722.
- [47] Pyo SH, Sayed M, Hatti-Kaul R. Batch and continuous flow production of 5-hydroxymethylfurfural from a high concentration of fructose using an acidic ion exchange catalyst. *Organic Process Research and Development* 2019; 23(5): 952-960.
- [48] Sweeygers N, Alewaters N, Dewil R, Appels L. Microwave effects in the dilute acid hydrolysis of cellulose to 5-hydroxymethylfurfural. *Scientific reports* 2018; 8(1): 1-11.
- [49] Peniston QP. U.S. Patent No. 2,750,394. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office 1956.
- [50] Zou X, Zhu C, Wang Q, Yang G. Catalytic dehydration of hexose sugars to 5-hydroxymethylfural. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2019; 13(1): 153-173.
- [51] Shamsul NS, Kamarudin SK, Rahman NA. Study on the physical and chemical composition of agro wastes for the production of 5-hydroxymethylfurfural. *Bioresource technology* 2018; 247, 821-828.
- [52] Sirianuntapiboon S, Phothilangka P, Ohmomo S. Decolorization of molasses wastewater by a strain No. BP103 of acetogenic bacteria. *Bioresource Technology* 2004; 92(1): 31-39.
- [53] Arimi MM, Zhang Y, Götz G, Kiriamiti K, Geißen SU. Antimicrobial colorants in molasses distillery wastewater and their removal Technologies. *International Biodeterioration and Biodegradation* 2014; 87, 34-43.
- [54] Küçüktaşık F, Kazak H, Güney D, Finore I, Poli A, Yenigün O, Öner ET. Molasses as fermentation substrate for levan production by *Halomonas* sp. *Applied Microbiology and Biotechnology* 2011; 89(6): 1729– 1740.
- [55] Roukas T. Pretreatment of beet molasses to increase pullulan production. *Process Biochemistry* 1998; 33(8): 805–810.
- [56] Khorshidian N, Shadnoush M, Zabihzadeh Khajavi M, Sohrabvandi S, Yousefi M, and Mortazavian AM. Fructose and high fructose corn syrup: are they a two-edged sword. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 2021; 72(5): 592-614.
- [57] Akdağ B, Investigation of thermostable recombinant glucose isomerase production by sucrose utilizing *Escherichia coli*. M. Sc. Thesis, Middle East Technical University, 2013.
- [58] Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA). Şeker ve Tatlandırıcılar Yıllığı Tabloları. <https://www.ers.usda.gov/data-products/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/> 10.06.2022.
- [59] Dashtban M, Gilbert A, and Fatehi P. Recent advancements in the production of hydroxymethylfurfural. *Rsc Advances* 2014; 4(4): 2037-2050.
- [60] Kumar R, Vikramachakravarthi D, and Pal P. Production and purification of glutamic acid: A critical review towards process intensification. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 2014; 81, 59-71.

Yeni CuAlCrMg Yüksek Sıcaklık Şekil Hafızalı Alaşımının (YSSHA) Termal, Yapısal ve Manyetik Karakterizasyonu

Güneş BAŞBAĞ¹, Oktay KARADUMAN², İskender ÖZKUL³, Mustafa BOYRAZLI¹,
Canan Aksu CANBAY^{2,*}

¹ Department of Metallurgical and Materials Engineering, Engineering Faculty, Firat University, Elazığ, TURKEY

² Department of Physics, Faculty of Science, Firat University, 23119 Elazığ, TURKEY

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mersin University, Mersin/TURKEY

¹ gunesbasbag@gmail.com, ² oktaykaraduman23@gmail.com, ³ iskender@mersin.edu.tr, ¹ mboyrazli@firat.edu.tr,

^{*2} caksu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 16/08/2022;

Kabul/Accepted: 13/09/2022)

Öz: Fonksiyonel malzemeler arasında şekil hafızalı alaşımların (ŞHA) kullanım şekline göre endüstride değişen talepler ortaya çıkmıştır. Bu talepler bu çok yönlü akıllı alaşımların maliyetini düşürmek veya performanslarını arttırmak ve özelliklerini değiştirmek şeklinde olabilir. Bu çalışmada, bakır bakımından zengin ve yeni ve benzersiz 73.33Cu-21.85Al-4.26Cr-0.56Mg (at.%) kimyasal kompozisyonuna sahip CuAlCrMg yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımı (YSSHA) ark eritme yöntemi kullanılarak külçe halinde dökümü yapılarak üretilmiştir. Elde edilen külçe alaşımından küçük numuneler kesilerek yüksek sıcaklıkta homojenize edilmiş ve tuzlu-buzlu suda söndürme işlemi yapılarak alaşıma şekil hafıza etkisi özelliği kazandırılmıştır. Alaşımın; termal şekil hafıza etkisi karakterizasyonu diferansiyel kalorimetri (DSC ve DTA) ölçümleri ile, kimyasal kompozisyon analizi enerji dağılım x-ışını (EDX) ölçümü ile, yapısal martensit fazları x-ışını difraksiyonu (XRD) testi ile ve manyetik özellikleri de titreşimli numune manyetometresi (VSM) ölçümü ile yapılarak incelenmiştir. DSC ve DTA ölçüm sonuçlarında (termogramlarda) alaşımdaki şekil hafıza etkisi özelliğinin varlığına işaret eden direkt ve ters martensitik faz dönüşümlerinin oluştuğunu gösteren pikler gözlenmiştir. XRD difraksiyon deseninde martensit fazlarına ait piklerin oluştuğu görülmüştür. VSM ölçümü alaşımın paramanyetik olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada üretilen yeni bakır bazlı CuAlCrMg yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımı literatüre dahil edilerek yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımlarla ilgili uygulamalarda fayda sağlayabilir.

Anahtar kelimeler: Yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşım (YSSHA), CuAlCrMg alaşımı, Diferansiyel kalorimetri, XRD, Optik mikroskopi, Martensitik dönüşüm, VSM.

Thermal, Structural and Magnetic Characterization of the New CuAlCrMg High Temperature Shape Memory Alloy

Abstract: Among functional materials, changing demands have emerged in the industry according to the way shape memory alloys (SHA) are used. These demands can be to reduce the cost of these versatile smart alloys or to increase their performance and change their properties. In this study, the CuAlCrMg high temperature shape memory alloy (HTSMA) with a new and unprecedented chemical composition of 73.33Cu-21.85Al-4.26Cr-0.56Mg (at.%) rich in copper was produced as cast-ingot using arc melting method. Small samples of the obtained ingot alloy were cut and homogenized at high temperature, and the shape memory effect property was installed in the alloy by quenching in salt-brine water. For the alloy; differential calorimetry (DSC and DTA) measurements to make thermal shape memory effect characterization, energy dispersion x-ray (EDX) measurement to determine the chemical alloy composition and x-ray diffraction (XRD) test to reveal structural martensite phases and vibrational magnetometry (VSM) measurement to see magnetic properties have been carried out. In the DSC and DTA measurement results (thermograms), peaks showing the occurred direct and reverse martensitic phase transformations indicating the presence of shape memory effect in the alloy were observed. It was observed that the peaks of the martensite phases were formed in the XRD diffraction pattern. VSM measurement showed that the alloy is paramagnetic. The new copper-based CuAlCrMg high temperature shape memory alloy produced in this study can be included in the literature and may provide benefits in applications related to high temperature shape memory alloys.

Key words: High temperature shape memory alloy (HTSMA), CuAlCrMg alloy, Differential calorimetry, XRD, Optical microscopy, Martensitic transformation, VSM.

*Sorumlu yazar: caksu@firat.edu.tr. Yazarların ORCID numaraları: ¹ 0000-0001-6766-1741, ² 0000-0002-6947-7590, ³ 0000-0003-4255-0564, ¹ 0000-0002-2340-6703 ² 0000-0002-5151-4576

1. Giriş

Şekil hafızalı alaşımlar (SHA'lar), martensitik faz değişikliği (dönüşümü) veya yüksek sıcaklıklarda indüklenebilen elastikiyet ile sonuçlanan ısı veya mekanik zor uygulanması gibi dış etkilerle uyarılarak büyük distorsiyonlar (şekil değişikliği) yapabilen ve dış etkiler kaldırıldığında ilk şekillerini geri kazanılabilen tasarlanmış akıllı malzemelerdir [1]. SHA'lar iki katı faz arasında faz dönüşümleri yaparak şekil hafıza olayını gerçekleştirirler: bu fazlar düşük sıcaklıklarda meydana gelen ürün fazı da denilen martensit (M) faz ve yüksek sıcaklıklarda meydana gelen ana faz da denilen austenit (A) fazdır. Martensit ve austenit arasındaki gerilim ve ısıtma veya soğutmanın neden olduğu faz değişikliğinden kaynaklanan şekil hafıza etkisi (SHE) ve süperelastikiyet bu fonksiyonel alaşımların iki önemli eşsiz özelliğidir. SHA'ların bu çok yönlü özellikleri ve çeşitli boyut ve geometri, mühendislik tasarımı ve istenilen özelliklerde özelleştirilmiş SHA'ları uyarlamak, alaşımların medikal, aktuatör, sensör, robotik, otomotiv veya uzay uygulamaları gibi birçok mikro/makro termo- mekanik, güneş enerji dönüşüm sistemleri, tekstil ve opto elektronik uygulamalarında aşamalı olarak kullanılmasını sağlamıştır [2–6]. Endüstride ve teknolojik uygulamalarda en çok kullanılan üstün şekil hafıza özelliklerine sahip NiTi alaşımları pahalı ve üretim- işleme proseslerinin daha zor oluşları araştırmacıları en yakın alternatif olarak gördükleri bakır bazlı alaşımlara yönelmiştir [2,4,7]. Cu bazlı SHA'ların avantajları arasında diğer özelliklerinin yanı sıra yüksek dönüşüm sıcaklığı, düşük üretim maliyeti, üretim süreçlerinde kolaylık ve alaşım ilaveleri yoluyla ilave edilen özellikleri değiştirebilme yeteneği yer alır. Katı katı faz dönüşümü olan ve deformasyonların eşlik ettiği tersinir martensitik dönüşüm mekanizmasına sahiptirler. Bunlar ısıtılarak veya stres uygulanarak geri kazanılabilir. Cu bazlı SHA'lar soğutmada martensit faza dönüşüm ve ısıtmada austenit faza dönüşüm sergilerler. Cu bazlı SHA'larda sıralı bir DO₃ yada L₂₁ yapısına sahip β1 (esasen β3 fazı ancak genellikle β1 de denilmektedir) sahip yüksek sıcaklıktaki ana faz, daha düşük sıcaklıklarda martensite dönüşebilir [2,7]. Martensit yapısının cinsi ve dönüşüm sıcaklıkları kimyasal bileşime oldukça hassas biçimde bağlı olup yaşlandırma vb. gibi uygulanan işlemler de etkilemektedir [2,8–16]. Cu bazlı SHA'ların avantajları arasında yüksek dönüşüm sıcaklıkları, düşük üretim maliyeti, üretim kolaylığı ve elde edilen özellikleri alaşım ilaveleriyle değiştirebilme yeteneği yer alır. Ancak Cu bazlı alaşımlar genellikle alaşım matrisindeki iri tane boyutlarından kaynaklı kırılğandırılar. Tane boyutunu küçültmek ve alaşımların dönüşüm sıcaklıklarını değiştirmek için sıklıkla kullanılan pratik bir yol Ti, Fe, Mg, Mn, Ni, Cr, Co, Be, V vb. gibi tane inceltici elementleri az miktarlarda eklemektir [2,8,15,17–23]. Bu sayede süneklik, sertlik, dayanım, mikroyapısal değişiklikler, farklı dönüşüm sıcaklıkları gibi bu tür eklemelerden kaynaklanan değişiklikler ve iyileştirmeler sağlanabilir. Literatürde bu amaçla yapılan çalışmalardan birinde [24] CuAlMn üçlü alaşımına 1.8-4.1 (wt%) arasındaki değişen oranlarda Cr elementi katkılanmış ve en yüksek Cr oranına sahip alaşımın en iyi şekil hafıza etki özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir. Bir diğer çalışmada [25] CuAlMn alaşımına at.%1 civarı kadar Cr katkılama ile β-fazın taneleri 200 µm'nin altına kadar inceltilebildiği, artan Cr katkı oranı ile Ms sıcaklığının düştüğü ve mekanik özelliklerin de iyileştiği rapor edilmiştir. Bir başka çalışmada [26] CuAlMn alaşımına at.% 0.02-0.4 arasında artarak değişen minör oranlardaki Mg elementi katkılanmış ve Mg oranı arttıkça termal şekil hafıza etkisi karakteristiklerinin iyileştiği bildirilmiştir.

Bu çalışmada, ikili CuAl bazlı alaşıma magnezyum ve krom elementleri eklenmiştir. Alaşım ark eritme yöntemi ile üretilmiş ve ısıtma işlemi (homojenleştirme) ve buzlu su ile söndürme işlemleri yapılarak şekil hafıza etkisi özelliği kazandırılmıştır. Alaşımın şekil hafıza etki özellikleri, termal ve yapısal karakterizasyonu ve manyetik özellikleri yapılan ölçümler ile ortaya çıkarılmış ve detaylı olarak incelenmiştir.

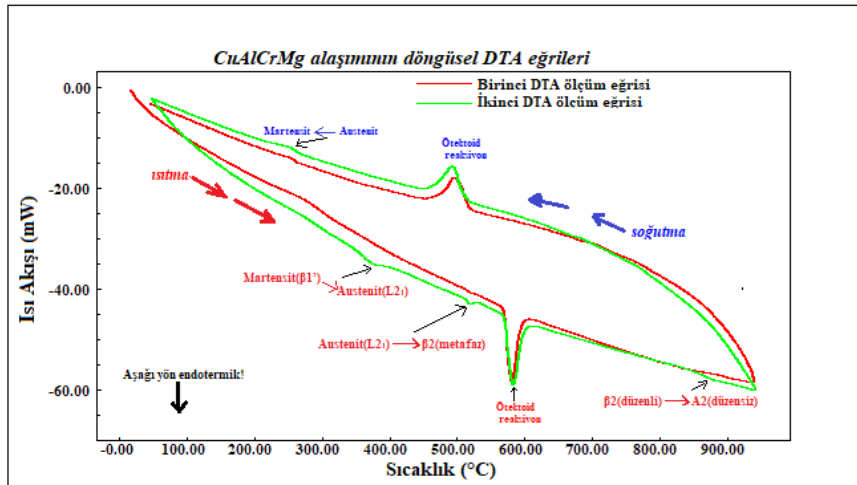
2. Materyal Metod

Bu çalışmada, yeni ve benzersiz olan 73.33Cu-21.85Al-4.26Cr-0.56Mg (at.%) kimyasal kompozisyonuna sahip CuAlCrMg yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımını üretmek için ilk etapta yüksek saflıktaki (%99.99) bakır, alüminyum, krom ve magnezyum element tozlarının önce tartılarak bir manyetik mikserde 10 dk boyunca karıştırılmış ve sonrasında bu toz karışımın hidrolik el presi ile (~4 ton) basınç uygulanarak peletler haline getirildikten sonra bu peletlerin ark eritme cihazında argon plazma ortamında eritilip külçe alaşım halinde dökümü yapılarak elde edilmiştir. Sonraki etapta elde edilen ham külçe alaşımı uygun ölçütlerde kesilerek (yaklaşık 3×4×5 mm ebatlarında, 30-60 mg arasında) alaşım numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler bir saat yüksek β(beta)-faz (düzensiz A2 fazı) sıcaklık bölgesinde (yaklaşık 900 °C civarı) bir fırında ısıtma işlemi tabi tutularak homojenleştirildiler ve bu işlem sonunda numuneler hemen hızlıca tuzlu-buzlu suya daldırılarak söndürme işlemi yapılmıştır. Bu gibi bazı belli alaşımlara şekil hafıza etkisi özelliğini kazandırmak için yapılan bu geleneksel söndürme işleminde yüksek beta-faz sıcaklığı bölgesindeki alaşım aniden hızlı soğutulmaya tabi tutularak ötektoid-altı ara fazların ve çökeltilerin oluşması engellenerek beta (β) fazından ötektoid bölgeye uğramadan direkt β1(DO₃ veya L₂₁) austenit fazına ve sonra β1' martensit fazına geçmesi sağlanmış olur ki bu sayede şekil hafıza

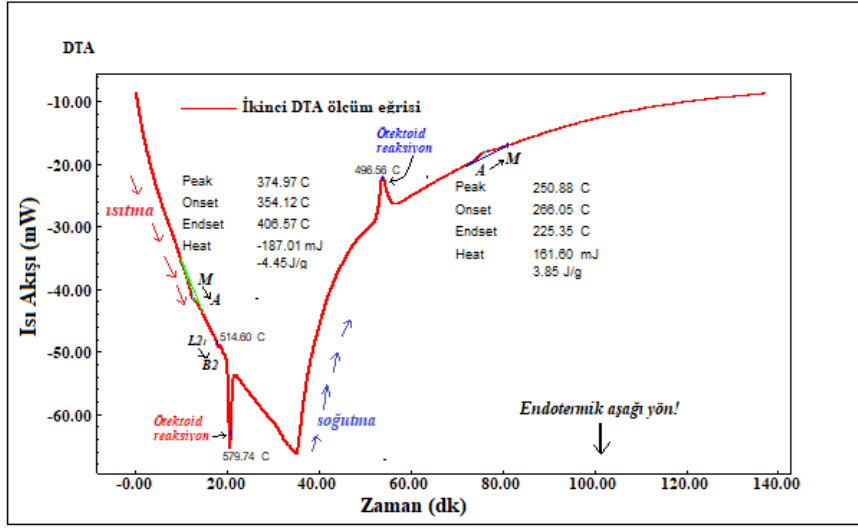
olayı için gerekli mikroyapı (martensit) oluşturulmuş olur. Termal karakterizasyon için, şekil hafıza etkisi özelliği yüklenmiş alaşım numunelerinden biri Shimadzu marka DTG-60AH model bir diferansiyel termal analiz (DTA) cihazı kullanılarak sabit 100 ml/dakika sabit akışlı argon gazı ortamında 25 °C/dakika ısıtma/soğutma hızı oda sıcaklığı ile 900 °C arasında ile ard arda iki kez döngüsel olarak ısıtılıp soğutulmuş yapılan ölçümlerde alaşımın termal etkiye karşı davranışını karakterize eden DTA eğrileri (termogramları) elde edilmiştir. Sonra benzer koşullarda bir başka termal ölçüm yine aynı 25 °C/dakika ısıtma/soğutma hızında Shimadzu marka DSC-60A model bir diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) cihazı kullanılarak oda sıcaklığı ile 500 °C arasında bir kez alınmıştır. Alaşımın kimyasal kompozisyonu oda sıcaklığında bir Zeiss Evo MA10 model EDX (energy dispersive X-ray) cihazında yapılan ölçümle belirlenmiştir. X-ışını difraksiyon (XRD) deseni oda sıcaklığında bir Rigaku RadB-DMAX II difraktometre cihazı ile elde edilmiştir. Yine oda sıcaklığında (300 K) yapılan titreşimli numune manyetometresi (VSM) ölçümü ise ± 3 T manyetik alan aralığında bir Quantum Design Physical Properties Measurement System (PPMS) with VSM ekipmanı ile yapılmıştır.

3. Deneysel Bulgular ve Tartışma

CuAlCrMg yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımının termal davranışını yansıtan DTA ölçüm eğrileri (termogramları) Şekil 1’de verilmiştir. Art arda iki kez 25 °C/dk ısıtma/soğutma hızı ile oda sıcaklığından 900 °C’ye çıkarılarak kesintisiz biçimde tekrar oda sıcaklığına soğutulan alaşım numunesine ait bu DTA termogram eğrilerinden birinci ölçümde alınan eğri üzerinde el solda (ısıtma başlangıcından sonra) martensitten austenite (M→A) şeklinde ters martensitik faz dönüşümü tam olarak belirli bir pik şeklinde gözlenmezken ikinci eğride alaşım örgüsünde dengelenme olduktan sonra belirgin bir endotermik austenitten martensite (A→M) şeklinde ters martensitik dönüşüm piki oluştuğu gözlenmiştir. Bu dönüşümler martensit (β' 1) fazı ile austenit (L_2) fazları arasında gerçekleşen katı↔katı faz dönüşümleri olup alaşımın ısıl uyarıyla şekil hafıza etkisi davranışını sergilediğini göstermektedir [2,27,28]. Alaşım soldan sağa doğru tüm DTA ısıtma eğrisi üzerinde Cu-bazlı ŞHA’ların yaygın olarak gösterdikleri $\beta'1 \rightarrow \beta_1(L_2) \rightarrow \beta_2$ (veya B2, metafaz) → ötektoid altı çökelti fazları ($\alpha+\gamma_2$) → ötektoid (çökeltilerin) çözünme reaksiyonu → β_2 (veya B2, kararlı ya da düzenli faz) → A2 (düzensiz faz) şeklindeki zincirleme reaksiyon piklerini ve dalgalanmaları göstermiştir [2,29,30]. Bu eğrilerin soğutma kısımlarında ise bu zincirleme reaksiyonlar tersine şekilde ilerlemiştir.

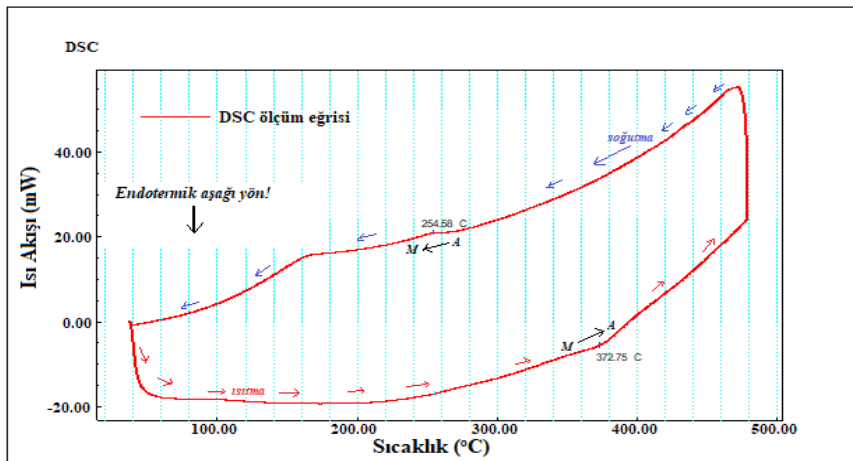


Şekil 1. CuAlCrMg şekil hafızalı alaşımın 25 °C/dakika ısıtma/soğutma hızında elde edilen ilk ölçüm ve ikinci ölçüm döngüsel DTA eğrileri.

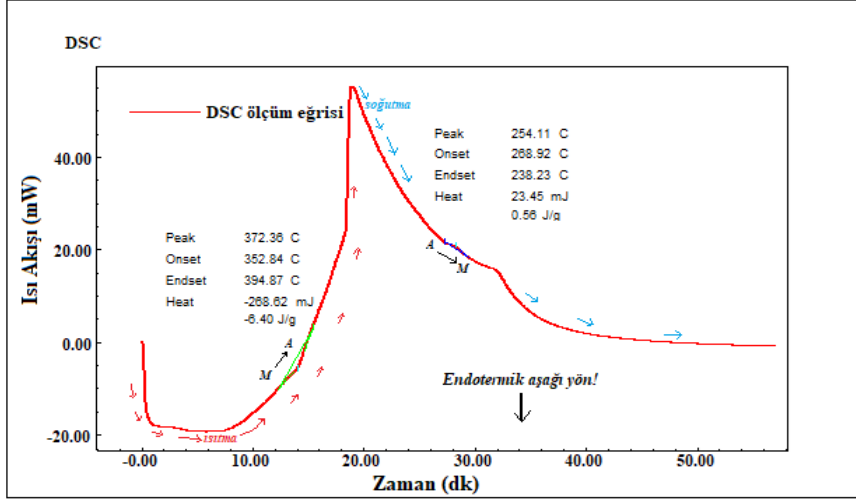


Şekil 2. CuAlCrMg şekil hafızalı alaşımın 25 °C/dakika ısıtma/soğutma hızında elde edilen ikinci ölçüm döngüsel DTA eğrisinin x-ekseninin zaman (dk) eksenine olduğu hali ve bu eğri üzerinde yapılmış olan pik analizleri.

Şekil 2’de ise Şekil 1’deki DTA eğrilerinden ikinci ölçüm eğrisinin x-ekseninin zaman eksenine yapılarak açıldığı hali üzerinde ısıtmadaki endotermik ters (M→A) ve soğutmadaki egzotermik direkt (A→M) martensitik dönüşüm piklerinin termal test cihazının yazılım programı ile manuel seçilen pik sınırları arasında kalan pik alanlarına tanjant diferansiyasyon metodu uygulanarak otomatik olarak pik analizleri yapılmış ve bu sayede alaşımın martensitik dönüşüm sıcaklıkları (A_s , A_f , M_s ve M_f), A_{max} ve bu faz dönüşümlerinde oluşan $\Delta H_{M \rightarrow A}$ veya $\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g) entalpi değişim değerleri doğrudan data insetleri olarak analizi yapılan piklerin yanlarına yerleştirilmiştir. Bu data insetlerinde PEAK değerleri minimum veya maksimum pik sıcaklıklarını (A_{max}), ONSET değerleri faz başlangıç sıcaklıklarını (A_s ve M_s), ENDSET değerleri pik bitiş sıcaklıklarını (A_f ve M_f), ve HEAT (J/g) değerleri ise entalpi değişim değerlerini göstermekte olup bu değerler Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de ek olarak, hesaplanan histeresiz aralıkları ($A_s - M_f$), martensit ve austenit fazı arasında her iki fazın Gibbs kimyasal serbest enerjilerinin eşit olduğu termodinamik denge sıcaklığı (T_0) değerleri ve $\Delta S_{M \rightarrow A}$ entropi değişim değerleri de verilmiştir. Bu parametrelerden T_0 ve $\Delta S_{M \rightarrow A}$ parametreleri $T_0 = 0.5 \times (A_f + M_s)$ and $\Delta S_{M \rightarrow A} = \Delta H_{M \rightarrow A} / T_0$ formülleri kullanılarak hesaplanmıştır [2]. Alaşımın Tablo-1’deki elde edilen entalpi değerleri alaşımdaki şekil hafıza etkisinin ne denli güçlü olduğunu göstermekle beraber bu değerler önceki [26] çalışmadaki bildirilen entalpi değerlerinden daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 3. CuAlCrMg şekil hafızalı alaşımın 25 °C/dakika ısıtma/soğutma hızında elde edilen döngüsel DSC ölçüm eğrisi.

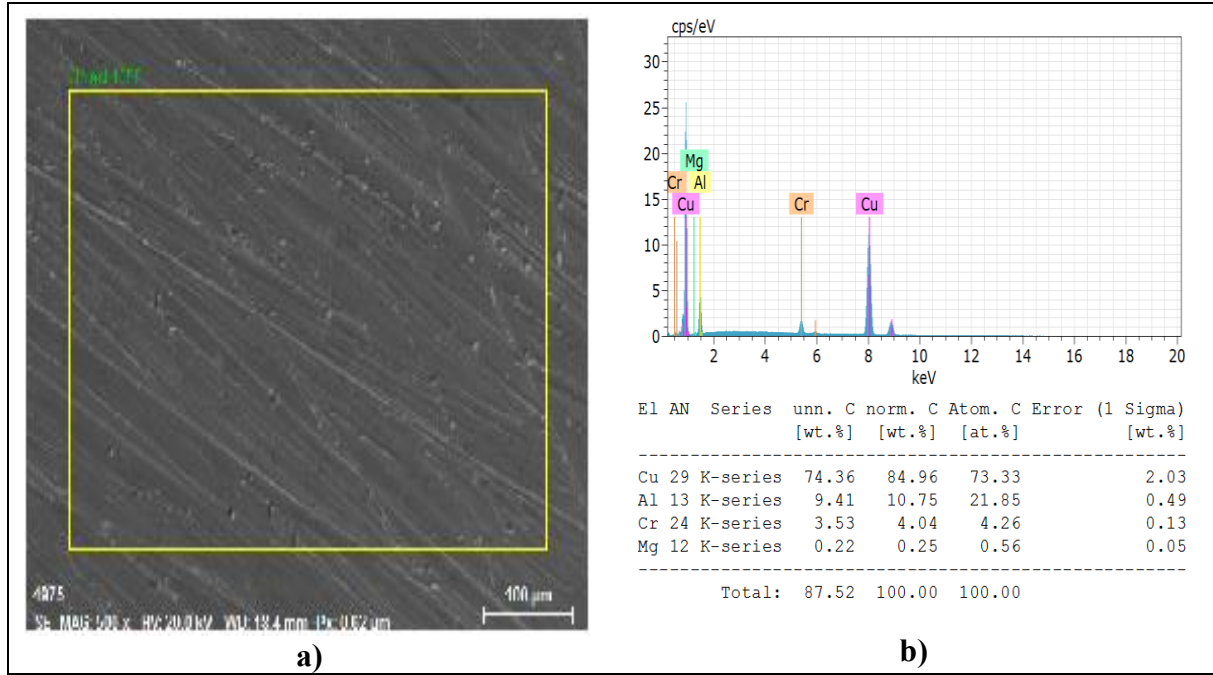


Şekil 4. CuAlCrMg şekil hafızalı alaşımın 25 °C/dakika ısıtma/soğutma hızında elde edilen aynı döngüsel DSC eğrisinin x-ekseninin zaman (dk) eksenine olduğu hali ve bu eğri üzerinde yapılmış olan pik analizleri.

Alaşımın martensit dönüşüm pikleri ayrıca Şekil 3'te verilen ve sadece 500 °C'ye kadar çıkılabilen döngüsel DSC eğrisinde de görülmekte olup bu DSC eğrisi üzerindeki piklerin de zaman (dk) ekseninde analiz edilmiş hali Şekil 4'te verilmiştir ve elde edilen değerler yine Tablo 1'de yazılmıştır. DTA ve DSC eğrilerinin pik analizinden elde edilen martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve diğer termodinamik parametre değerleri birbirlerine oldukça yakın değerler olup ölçümlerin tutarlılığının ve güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Neticede üretilen yeni CuAlCrMg alaşımının martensitik faz dönüşümlerini 100 °C'nin üzerinde yaklaşık 225 °C ile 406 °C sıcaklık aralığında yaptığından dolayı bir yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşım olduğu anlaşılmıştır.

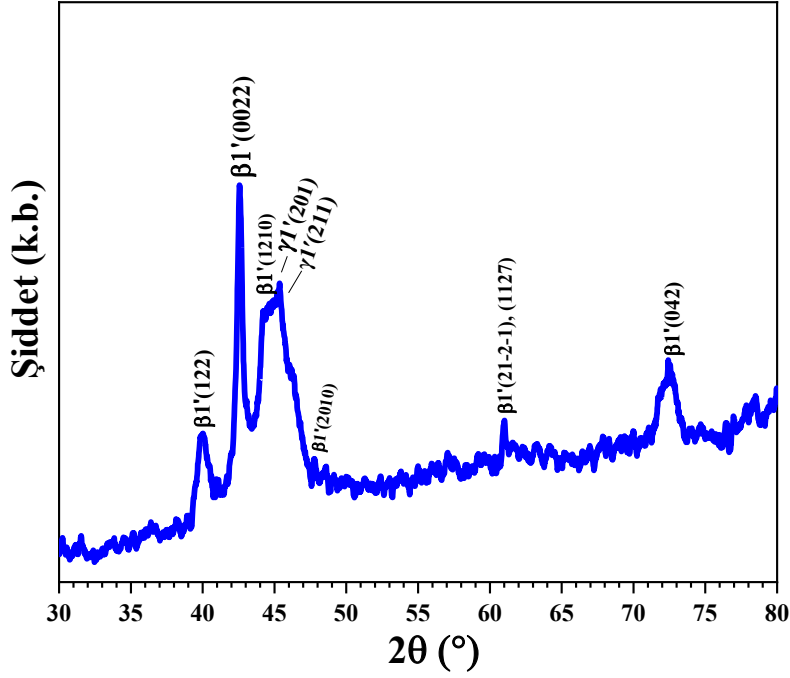
Tablo 1. CuAlCrMg yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımının martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve diğer termodinamik parametrelerinin değerleri.

Termal ölçüm metodu	Isıtma/soğutma hızı (°C/dk)	A _s (°C)	A _f (°C)	A _{max} (°C)	M _s (°C)	M _f (°C)	A _s -M _f (°C)	T ₀ (°C)	ΔH _{M→A} (J/g)	ΔS _{M→A} (J/g°C)
DTA	25	354.12	406.57	374.97	266.05	225.35	128.77	336.31	4.45	0.01323
DSC	25	352.84	394.87	372.36	268.92	238.23	114.61	331.895	6.4	0.01928



Şekil 5. CuAlCrMg alaşımlarının a) SEM görüntüsü b) EDX ölçümü sonucu.

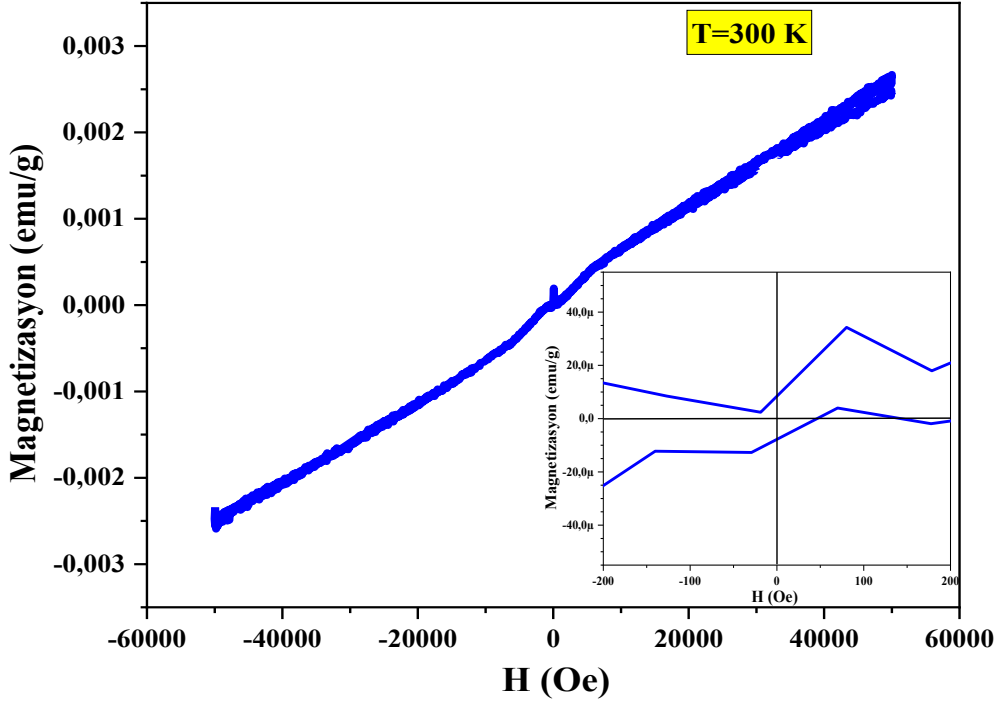
CuAlCrMg alaşımlarının SEM görüntüsü EDX sonucu Şekil 5'te verilmiştir. Bu EDX sonucunda alaşımların kimyasal kompozisyonunu oluşturan elementlerin atomik yüzdece (at.%) oranları görülmektedir. ŞHA'ların çoğu karakteristik parametresi kompozisyonlarına oldukça hassas biçimde bağlıdır. Alaşım kristal ortalama periyodik kafes oluşumlarındaki titreşimsel entropi değişimleri (ΔS) alaşımların atom başına ortalama valans elektron konsantrasyonları olan e/a parametresine güçlü biçimde bağlı bir fonksiyondur [31] ve Cu-bazlı şekil hafızalı alaşımlar genellikle yaklaşık 1.45 ile 1.51 aralığı içerisindeki veya bu aralığa çok yakın e/a değerlerine sahip olduklarında şekil hafıza etkisi gösterirler [2,29]. Bu aralığın alt değeri (1.45) yönüne doğru β' 1(18R) tip martensit fazı, aralığın üst değeri (1.51) yönüne doğru ise γ' 1(2H) tip martensit fazı alaşımda hacimce artarak dominant hale gelmektedir [2,32,33]. CuAlCrMg alaşımlarının e/a oranı $e/a = \sum f_i v_i$ formülü [2] kullanılarak hesaplanmış ve 1.4426 olarak bulunmuştur. 1.45 değerine çok yakın olan bu değer bize alaşımda bir arada bulunan β' 1 ve γ' 1 fazlarından dominant fazın β' 1(18R) tip martensit olduğuna işaret etmektedir ki bu teorik çıkarsama alaşımların aşağıda Şekil 6'da verilmiş olan mikroyapısal XRD difraksiyon testi sonucunda görüldüğü üzere doğrulanmıştır.



Şekil 6. CuAlCrMg alaşımının XRD difraksiyon deseni.

CuAlCrMg alaşımının CuK α ışınları kullanılarak oda sıcaklığında elde edilmiş XRD difraksiyon deseni Şekil 5'te verilmiştir. Bu XRD deseni üzerinde belirlenmiş olan en yüksek şiddetli pik ana pik olup β' 1(0022) martensit fazı piki olup diğer pikler ise β' 1(122), β' 1(1210), β' 1(2010), β' 1(21-2-1), β' 1(1127), β' 1(042), γ' 1(201) ve γ' 1(211) martensit fazlarına işaret eden piklerdir [2,24,34,35]. Bu sonuçlar yukarıda alaşımın EDX kompozisyonundaki alaşım oranları kullanılarak yapılan teorik elektron konsantrasyonu hesabı üzerinden yürütülen tahminin doğru olduğunu göstermiştir. XRD verilerinde en yüksek (%100) şiddetdeki pike ait 2θ açısı ve FWHM değerleri kullanılarak alaşımın ortalama kristalit boyutu (D) iyi bilinen $D=0.9\lambda/B_{1/2}\cos\theta$ şeklindeki Debye-Scherrer formülü [36] kullanılarak 23.24 nm olarak bulunmuştur [2,27]. Bu formülde; λ kullanılan CuK α X-ışınının dalgaboyu ($\lambda=0.15406$ nm), $B_{1/2}$ en şiddetli pikin FWHM değeri ve θ ise Bragg difraksiyon açısıdır. Tane boyutunun aksine tane boyutundan daha küçük olan kristalit boyutu ne kadar büyük ise alaşımın mikroyapısında o kadar tek kristallik artar ve bu şekil hafıza etkisinin derecesini de o oranda artırır.

CuAlCrMg alaşımının oda sıcaklığında (300 K'de) yapılan titreşimli numune manyetometri (VSM) testi ile elde edilen magnetizasyona (M) karşı manyetik alan şiddeti (H) grafiği şeklindeki manyetik histeresiz eğrisi Şekil 7'de verilmiştir. Burada magnetizasyon birim kütle başına manyetik momenttir (emu/g). Bu manyetik histeresiz eğrisi alaşımın uygulanan manyetik alana karşılık lineer bir magnetizasyon davranışı sergilediğini ve paramanyetik özelliğe sahip olduğunu göstermektedir [7,37]. Ayrıca alaşımın ± 200 Oe manyetik alan şiddeti değerleri arasında kalan manyetik zorlayıcılık histeresiz profilini gösteren grafiği Şekil 7'de küçük inset grafik olarak verilmiştir ve alaşımın paramanyetik özelliğine ek olarak oldukça zayıf bir ferromanyetik özelliğe sahip olduğunu da göstermektedir [7].



Şekil 7. CuAlCrMg alaşımının oda sıcaklığında elde edilmiş manyetik histeresiz çevrimi şeklindeki magnetizasyon (M-H) eğrisi. İnet grafik alaşımın ± 200 Oe manyetik alan şiddeti değerleri arasında kalan manyetik zorlayıcılık grafiğidir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, literatürde bulunmayan yeni ve benzersiz bir kimyasal kompozisyona sahip CuAlCrMg yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımı ark eritme yöntemi ile külçe halinde dökümü yapılarak sonrasında homojenleştirme ve söndürme işlemleri uygulanarak başarılı şekilde üretilmiştir. Alaşıma yapılan kalorimetrik DTA ve DSC karakterizasyon testlerinden elde edilen sonuçlar alaşımın şekil hafıza etkisini gösteren katı \leftrightarrow katı martensitik faz dönüşümlerini 100 °C'nin üzerinde yaklaşık 225 °C ile 406 °C sıcaklık aralığında yaptığını göstermiş dolayısıyla alaşımın bir yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşım olduğu anlaşılmıştır. Alaşımın şekil hafıza etkisini oluşturan temel kristalografik mekanizma olan alaşımdaki mikroyapısal martensit fazlarının varlığı teorik elektron konsantrasyon (c/a oranı) hesabı üzerinden yapılan tahmini doğrular biçimde XRD sonuçları ile ispatlanmıştır. Ek olarak yapılan VSM ölçümü ile elde edilen alaşıma ait manyetizasyon histeresiz çevrimi alaşımın paramanyetik özellikte olduğunu ve manyetik zorlayıcılığı ise çok zayıf bir ferromanyetik özelliğe sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen tüm sonuçlar göstermiştir ki, literatüre benzersiz kompozisyona sahip yeni CuAlCrMg alaşımı kazandırılmıştır ve bu yeni alaşım yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşım uygulamalarında fayda sağlayabilir.

Açıklamalar

Bu araştırma çalışması doktora öğrencisi Güneş BAŞBAĞ'ın Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde sürdürdüğü doktora tez çalışmaları arasında yer alan bir çalışmadır. Bu çalışmada G.B. fikir sahibi ve deneyleri gerçekleştirdi; O.K. makaleyi yazdı, deneyler ve analizler ile hesaplamalar ve grafikleri gerçekleştirdi ve sonuçları yorumladı; M.B. fikir sahibi, sonuçları yorumladı; İ.Ö. deneyleri gerçekleştirdi, sonuçları yorumladı; ve C.A.C. fikir sahibi, deneyleri gerçekleştirdi, sonuçları yorumladı.

Kaynaklar

- [1] Naresh C, Bose PSC, Rao CSP. Shape memory alloys: a state of art review. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2016;149:012054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012054>.
- [2] Canbay CA, Karaduman O, Ünlü N, Baiz SA, Özkul İ. Heat treatment and quenching media effects on the thermodynamical, thermoelastical and structural characteristics of a new Cu-based quaternary shape memory alloy. Compos B Eng 2019;174:106940. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106940>.
- [3] Kauffman GB. The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications. The Chemical Educator 1997;2:1–21. <https://doi.org/10.1007/s00897970111a>.
- [4] Dasgupta R. A look into Cu-based shape memory alloys: Present scenario and future prospects. J Mater Res 2014;29:1681–98. <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.189>.
- [5] Copaci D-S, Blanco D, Martin-Clemente A, Moreno L. Flexible shape memory alloy actuators for soft robotics: Modelling and control. Int J Adv Robot Syst 2020;17:1–15. <https://doi.org/10.1177/1729881419886747>.
- [6] Eschen K, Granberry R, Abel J. Guidelines on the design, characterization, and operation of shape memory alloy knitted actuators. Smart Mater Struct 2020;29:035036. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab6ba7>.
- [7] Özkul İ, Karaduman O, Şimşek T, Şimşek T, Canbay CA, Ibrahim PA, et al. Experimental investigation of the effects of different quaternary elements (Ti, V, Nb, Ga, and Hf) on the thermal and magnetic properties of CuAlNi shape memory alloy. J Mater Res 2022;37:2271–81. <https://doi.org/10.1557/s43578-022-00625-y>.
- [8] Karthick S, Shalini S, Mani Prabu SS, Suhel K, Vandan A, Puneet C, et al. Influence of quaternary alloying addition on transformation temperatures and shape memory properties of Cu–Al–Mn shape memory alloy coated optical fiber. Measurement (Lond) 2020;153. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107379>.
- [9] Aksu Canbay C, Karagoz Z, Yakuphanoglu F. Controlling of transformation temperatures of Cu–Al–Mn shape memory alloys by chemical composition. Acta Phys Pol A 2014;125:1163–6. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.125.1163>.
- [10] Yang J, Wang QZ, Yin FX, Cui CX, Ji PG, Li B. Effects of grain refinement on the structure and properties of a CuAlMn shape memory alloy. Materials Science and Engineering A 2016;664:215–20. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.009>.
- [11] Canbay CA, Karaduman O, Özkul İ, Ünlü N. Modifying Thermal and Structural Characteristics of CuAlFeMn Shape Memory Alloy and a Hypothetical Analysis to Optimize Surface-Diffusion Annealing Temperature. J Mater Eng Perform 2020;29:7993–8005. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05241-7>.
- [12] Alaneme KK, Anaele JU, Okotete EA. Martensite aging phenomena in Cu-based alloys: Effects on structural transformation, mechanical and shape memory properties: A critical review. Sci Afr 2021;12:e00760. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00760>.
- [13] Mallik US, Sampath V. Influence of quaternary alloying additions on transformation temperatures and shape memory properties of Cu–Al–Mn shape memory alloy. J Alloys Compd 2009;469:156–63. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.01.128>.
- [14] Canbay CA, Karaduman O, Ünlü N, Özkul İ, Çiçek MA. Energetic Behavior Study in Phase Transformations of High Temperature Cu–Al–X (X: Mn, Te, Sn, Hf) Shape Memory Alloys. Transactions of the Indian Institute of Metals 2021. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02241-6>.
- [15] Mallik US, Sampath V. Influence of quaternary alloying additions on transformation temperatures and shape memory properties of Cu–Al–Mn shape memory alloy. J Alloys Compd 2009;469:156–63. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.01.128>.
- [16] Chentouf SM, Bouabdallah M, Cheniti H, Eberhardt A, Patoor E, Sari A. Ageing study of Cu–Al–Be hypoeutectoid shape memory alloy. Mater Charact 2010;61. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.07.009>.
- [17] Canbay CA, Karaduman O, Özkul İ, Ünlü N. Modifying Thermal and Structural Characteristics of CuAlFeMn Shape Memory Alloy and a Hypothetical Analysis to Optimize Surface-Diffusion Annealing Temperature. J Mater Eng Perform 2020;29:7993–8005. <https://doi.org/10.1007/S11665-020-05241-7>.
- [18] Canbay C, Cicek M, ... OK-J of M, 2019 undefined. Investigation of Thermoelastical Martensitic Transformations and Structure in New Composition of CuAlMnTi Shape Memory Alloy. Dergi-FytronixCom 2019;1:60–4.
- [19] Yang J, Wang QZ, Yin FX, Cui CX, Ji PG, Li B. Effects of grain refinement on the structure and properties of a CuAlMn shape memory alloy. Materials Science and Engineering: A 2016;664. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.009>.
- [20] Najah Saud Al-Humairi S. Cu-Based Shape Memory Alloys: Modified Structures and Their Related Properties. Recent Advancements in the Metallurgical Engineering and Electrodeposition, IntechOpen; 2020, p. 25. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86193>.
- [21] Yang S, Zhang F, Wu J, Lu Y, Shi Z, Wang C, et al. Superelasticity and shape memory effect in Cu–Al–Mn–V shape memory alloys. Mater Des 2017;115. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.035>.
- [22] Aksu Canbay C, Keskin A. Effects of vanadium and cadmium on transformation temperatures of Cu–Al–Mn shape memory alloy. J Therm Anal Calorim 2014;118. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4034-6>.

- [23] Saud SN, Hamzah E, Abubakar T, Bakhsheshi-Rad HR, Zamri M, Tanemura M. Effects of Mn Additions on the Structure, Mechanical Properties, and Corrosion Behavior of Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys. *J Mater Eng Perform* 2014;23:3620–9. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1134-1>.
- [24] Yang S, Zhang F, Wu J, Zhang J, Wang C, Liu X. Microstructure characterization, stress–strain behavior, superelasticity and shape memory effect of Cu–Al–Mn–Cr shape memory alloys. *J Mater Sci* 2017;52:5917–27. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-0827-x>.
- [25] Sutou Y, Omori T, Okamoto T, Kainuma R, Ishida K. Effect of grain refinement on the mechanical and shape memory properties of Cu-Al-Mn base alloys. *Journal De Physique. IV : JP, vol. 11, EDP Sciences; 2001.* <https://doi.org/10.1051/jp4:2001832>.
- [26] Canbay CA, Başbağ G, Karaduman O, Boyrazlı M. Magnesium Effect on Characteristic Properties of Cu-based Smart Materials. *Journal of Materials and Electronic Devices* 2021;2:19–23.
- [27] Canbay CA, Karaduman O, Özkul İ. Lagging temperature problem in DTA/DSC measurement on investigation of NiTi SMA. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2020;31:13284–91. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03881-y>.
- [28] Ferreira RO, Silva LS, Silva RAG. Thermal behavior of as-annealed CuAlMnAgZr alloys. *J Therm Anal Calorim* 2021;146:595–600. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10002-8>.
- [29] Otsuka K, Wayman CM. *Shape memory materials.* Cambridge University Press; 1999.
- [30] Kainuma R, Satoh N, Liu XJ, Ohnuma I, Ishida K. Phase equilibria and Heusler phase stability in the Cu-rich portion of the Cu–Al–Mn system. *J Alloys Compd* 1998;266:191–200. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00425-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00425-8).
- [31] Ahlers M. Phase Stability of Martensitic Structures. *Le Journal de Physique IV* 1995;05. <https://doi.org/10.1051/jp4:1995808>.
- [32] Pelegrina JL, Ahlers M. The martensitic phases and their stability in Cu–Zn and Cu–Zn–Al alloys—I. The transformation between the high temperature β phase and the 18R martensite. *Acta Metallurgica et Materialia* 1992;40. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(92\)90033-B](https://doi.org/10.1016/0956-7151(92)90033-B).
- [33] Prado MO, Decorte PM, Lovey F. Martensitic transformation in Cu-Mn-Al alloys. *Scripta Metallurgica et Materialia* 1995;33. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(95\)00292-4](https://doi.org/10.1016/0956-716X(95)00292-4).
- [34] Karaduman O, Özkul İ, Canbay CA. Shape memory effect characterization of a ternary CuAlNi high temperature SMA ribbons produced by melt spinning method. *Advanced Engineering Science* 2021;1:26–33.
- [35] Aksu Canbay C, Dere A, Mensah-Darkwa K, Al-Ghamdi A, Karagoz Genç Z, Gupta RK, et al. New type of Schottky diode-based Cu–Al–Mn–Cr shape memory material films. *Appl Phys A Mater Sci Process* 2016;122. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0208-3>.
- [36] Patterson AL. The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination. *Physical Review* 1939;56. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978>.
- [37] Gutiérrez Castañeda EJ, Barreras Castro RE, Contreras Briseño A, Fernández Arguijo B, Torres Castillo AA, Salinas Rodríguez A, et al. Effect of quenching and normalizing on the microstructure and magnetocaloric effect of a Cu–Al–Mn–Zn alloy with 6.5 wt % Ni–2.5 wt % Fe. *Magnetochemistry* 2019;5. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry5030048>.

Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Manyetit Konsantresi Peletleme İşlemlerinde Bağlayıcı Olarak Kullanılması

Selçuk KARATAŞ¹, Emrah ÇELİK², Mustafa BOYRAZLI^{3*}, Elif Arancı ÖZTÜRK⁴, Gökhan DOĞANTEPE⁵, Canan Aksu CANBAY⁶

^{1, 2, 3} Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ/Türkiye

⁴ Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir Meslek Yüksekokulu, Makine Metal Teknolojileri Bölümü, Balıkesir/Türkiye

⁵ Kardemir Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret AŞ, Karabük /Türkiye

⁶ Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 23119, Elazığ/Türkiye

¹ skaratas@firat.edu.tr, ² emrahcelik@firat.edu.tr, ^{3*} mboyrazli@firat.edu.tr, ⁴ elif.ozturk@balikesir.edu.tr

⁵ gokhandogantepe@hotmail.com, ⁶ caksu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 19/08/2022;

Kabul/Accepted: 12/09/2022)

Öz: Demir cevherlerinden pik demir üretimi için yaygın olarak kullanılan fırın yüksek fırınlardır. Yüksek fırınlarda pik demir üretimi için; tenörünün uygun olması durumunda parça cevher, pelet, sinter gibi hammaddelerin yanı sıra cüruf yapıcılar ve redükleyiciler kullanılmaktadır. Pelet oluştururken en önemli malzemelerden biri toz malzemelerin bir araya gelip topaklanmasını sağlayan bağlayıcılardır. Bu çalışmada, granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) bağlayıcı olarak kullanılması durumunda pelet mukavemeti ve pelet porozitesi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Manyetit konsantresine %0.5, %1, %2, %4 ve %8 oranlarında GYFC ilave edilmiş ve bu karışımlar 1100 °C, 1150 °C, 1200 °C ve 1280 °C sıcaklıklarda 1 saat pişirilmiştir. Pişirilen peletlerin mukavemet değerlerinde en uygun sonuca 1280 °C sıcaklıkta işlem gören peletlerde ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Pik demir üretimi, granüle yüksek fırın cürufu, pelet bağlayıcı, yüksek fırın, mukavemet, porozite.

Use of Granulated Blast Furnace Slag as Binder in Magnetite Concentrate Pelletizing Processes

Abstract: Blast furnaces are widely used for producing pig iron from iron ores. For pig iron production in blast furnaces; If the grade is sufficient, slag makers and reducers are used as well as raw materials such as lump ore, pellets, and sinter. One of the most important materials when forming pellets is the binders that allow the powder materials to come together and become agglomerated. This study investigated the effect of granulated blast furnace slag (GBFS) on pellet strength and porosity when it is used as binder. 0.5%, 1%, 2%, 4%, and 8% GBFS were added to the magnetite concentrate in order to form pellets, and these pellets were fired at 1100 °C, 1150 °C, 1200 °C and 1280 °C for 1 hour. After the pellets were fired, the most suitable result with regard to the strength values was obtained at 1280 °C.

Key words: Pig iron production, granulated blast furnace slag, pellet binder, blast furnace, strength, porosity.

1. Giriş

Geleneksel metotla pik demir üretimi, cevher, pelet, sinter gibi demir oksitli malzemelerin, bir redükleyici ve ısı kaynağı olarak kullanılan kok ve cüruf yapıcı (flaks) ile birlikte yüksek fırınlara beslenmesi ile yapılır [1,2].

Demir cevheri konsantrelerinin peletleme işlemlerinde kullanılan bağlayıcı malzemelerde dikkate alınan husus, yüksek kalitede ve düşük maliyette pelet üretilebilmesi olup, aynı zamanda minimum kirletici özelliği olan ve minimum proses güçlüğü ile çalışılabilen özellikte olmalarıdır. Bu amaçla konsantrelerin peletlenmesinde yaygın olarak kullanılan bağlayıcı türü bentonit olmakla birlikte, bununla rekabet edebilecek hem organik hem de inorganik birçok bağlayıcı türü bulunmaktadır [3-6].

Yüksek fırında kullanılacak peletlerin bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu özelliklerin belirlenmesi için pelet numuneleri bazı testlerden geçirilir. Bu testlerden önemlileri, ham pelet mukavemet testleri, ürün pelet basma dayanımı, ürün pelet gözeneklilik testi, yük altında indirgenme testi, şişme indeksi testi vb. sayılabilir [6,7].

Standartlara göre, ham pelet basma dayanımları 1 kg/pelet'ten fazla olması gerekir. Ürün pelet basma dayanımının en az 250 kg/pelet olması, pelet gözenekliliğinin ise %20-35 arasında olması istenir[8].

Bu çalışmada, granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC)), bağlayıcı olarak kullanılması durumunda pelet mukavemeti ve pelet porozitesi üzerine olan etkisi incelenmiştir.

*Sorumlu yazar: mboyrazli@firat.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-8693-2487, ² 0000-0001-7443-0351, ³ 0000-0002-2340-6703, ⁴ 0000-0001-8362-7332, ⁵ 0000-0001-5456-0589, ⁶ 0000-0002-5151-4576

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Materyal-Metot

Deneylerde, cevher olarak Sivas Divriği Pelet Tesisi manyetit konsantresi ve bağlayıcı olarak Karabük Demir Çelik'den temin edilen granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Cüruf ve manyetit konsantresinin kimyasal bileşimleri aşağıdaki Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Karabük Demir Çelik'den temin edilen cüruf analizi.

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	S	Fe	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	KBAZ	BBAZ
38.79	27.43	13.93	11.06	2.62	0.93	0.43	1.31	0.45	2.88	0.707141	0.730083

Tablo 2. Sivas Divriği Pelet Tesisleri'nden temin edilen manyetit konsantresi kimyasal bileşimi.

Bileşen	%	Bileşen	%
Fe	68.03	K ₂ O	0.084
Fe ₃ O ₄	90	Na ₂ O	0.046
SiO ₂	1.66	Mn	0.06
CaO	0.55	P	0.022
Al ₂ O ₃	0.41	TiO ₂	0.059
MgO	0.03		

Deneylerde kullanılan cüruf, bilyeli öğütücüde 30 dakika öğütülüp 63 mikronluk elekten geçirilmiş ve elek altı cüruf tozları etüvde 105 °C' de 4 saat kurutulmuşlardır(Şekil 1 (a) ve (b)). Manyetit konsantresi ile %0.5, 1, 2, 4, 8 oranlarında kurutulmuş cüruf tozları 5 dakika boyunca bir mikser yardımıyla homojen bir şekilde karıştırılarak peletlenecek malzeme hazır hale getirilmiştir. Bu malzeme, laboratuvar ölçekli yatayla 45°'lik açı yapan kendi eksenini etrafındaki dönüş hızı değiştirilebilen küresel pelet tamburuna beslenmiş ve üzerine karışımın %10-15'i olacak şekilde su püskürtülerek pelet yapma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Pelet yapma işlemine 25 devir/dakika hızı ile başlanmış ve bu hızda ilk çekirdekler oluşturulup belirli bir boyuta geldikten sonra (2-3 mm çap) devir hızı 33 dev/dak'e çıkarılarak peletlerin büyümesi sağlanmıştır. Peletler 11-13 mm boyutlarına ulaştığında pelet tamburundan alınarak etüvde 150 °C'de sıcaklıkta 2 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonucu etüvden alınan numuneler 1600 °C sıcaklığa kadar çıkabilen bir kül tipi fırında pişirme (sinterleme) işlemine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 1. (a)Granüle yüksek fırın cürufu b)Granüle yüksek fırın cürufunun -63 µm boyutuna öğütülmüş hali.



Şekil 2. Peletleme Cihazı.

Çapları ölçülen peletler şamot potalar içerisine konularak kül fırına yerleştirilmişlerdir. Kül fırın, 10 dakikada 400 °C'ye çıkacak, 400 °C'de 10 dakika bekleyecek, sonra 15 dakikada 800 °C'ye çıkacak, 800 °C'de 10 dakika bekleyecek daha sonra 15 dakikada istenilen sıcaklığa çıkacak ve bu sıcaklıkta 60 dakika bekleyip soğumaya geçecek şekilde programlanmıştır. Peletlerin pişirilme sıcaklıkları 1100 °C, 1150 °C, 1200 °C ve 1280 °C olarak seçilmiştir. Fırın, oda sıcaklığına soğutulup peletler fırından çıkarıldıktan sonra mukavemetlerine ve porozitelerine bakılmıştır. Peletler üzerinde; kuru mukavemet, pişmiş pelet mukavemeti ve porozite testleri standartlara uygun bir şekilde yapılmış olup, tüm testler en az 10 pelet üzerinde tekrarlanmış ve ortalama değerler alınmıştır. Pişirme sonrası pelet mukavemet değerleri literatürde önerilen 150-300 kg/pelet, porozite ise %22-30 değerlerine göre yorumlanmıştır. Yaş pelet düşme testleri 4-5 pelet üzerinden yapılmıştır. Yaş pelet düşme sayıları, ham peletlerin 45 cm'den çelik bir plaka üzerine kırılıncaya kadar tekrar tekrar düşürülerek hesaplanmıştır. Hem kurutulmuş hem de pişirilmiş peletlerin mukavemetleri Şekil 3'te görülen mukavemet test cihazında yapılmıştır. Poroziteler suda kaynatma tekniği uygulanarak, Archimedes prensibine göre 5 pelet üzerinde yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Peletlerin gözeneklilikleri Ocak 1985 tarihli TS 4380 standardına göre suda kaynatma metodu uygulanarak

yapılmıştır. Pişirilmiş peletlerden 5 adet alınıp kuru olarak tartımları yapıldıktan sonra içinde 100ml. saf su olan behere konularak, bir hot plate üzerinde kaynayıncaya kadar ısıtılmıştır. Kaynama başladıktan 20 dakika sonra hot plate üzerinden alınan su dolu beherler oda sıcaklığında soğutulup içinden alınan peletlerin yüzeyindeki ıslaklık giderildikten sonra tartılarak yaş ağırlıkları kayıt edilmiştir. Suyun içinde askıda tartılarak ağırlıkları belirlenen peletlerin aşağıdaki (1) nolu denkleme göre gözeneklilik değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{Gözeneklilik (\%)} = \frac{W-D}{W-S} * 100 \quad (1)$$

Semboller;

W = Peletlerin Yaş Ağırlıkları

D = Peletlerin Kuru Ağırlıkları

S = Peletlerin Askıdaki Ağırlıkları



Şekil 3. Pelet mukavemet ölçüm cihazı.

2.2. Deneysel Sonuçlar

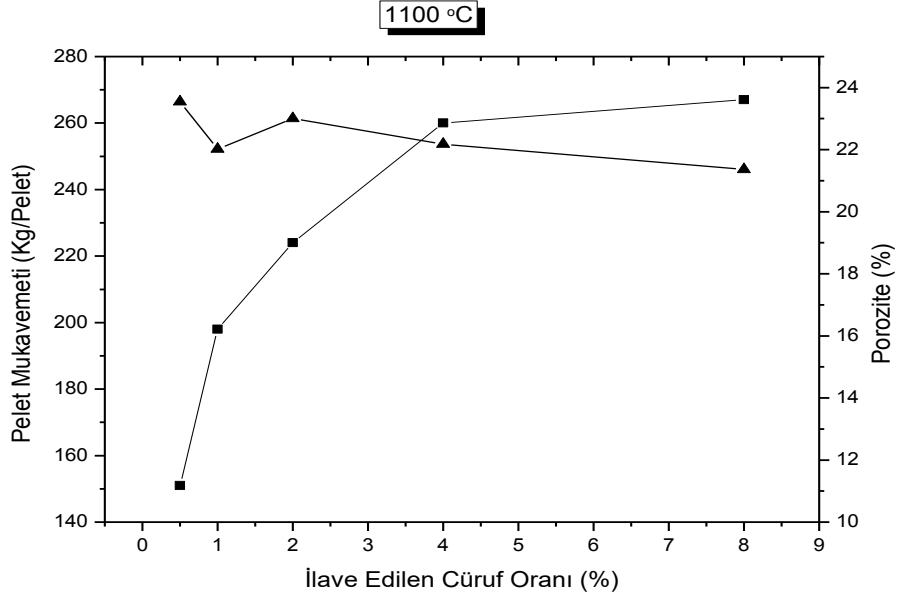
Yüksek fırın cürufu (YFC), demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan bir yan üründür. Yaklaşık 1500 °C sıcaklıkta alınan yüksek fırın cürufunun (YFC) tahliye edilmesinden sonra uygulanacak soğutma yöntemi, oluşacak ürünün özelliklerini ve kullanım yerini belirler.

YFC atmosferik koşullarda yavaş soğutulduğunda mineralojik olarak iri kristalli bir malzeme oluşur, bazalta benzer mekanik özellikleri vardır. Hızlı soğutma uygulanması sonucunda ise camsı yapıda cüruf elde edilip, granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) olarak adlandırılırlar. YFC kontrollü miktarda su, basınçlı hava ve buhar etkisiyle soğutulduğu takdirde gözenekli yapıda, iri kristal taneli bir daha hafif bir malzeme oluşur.

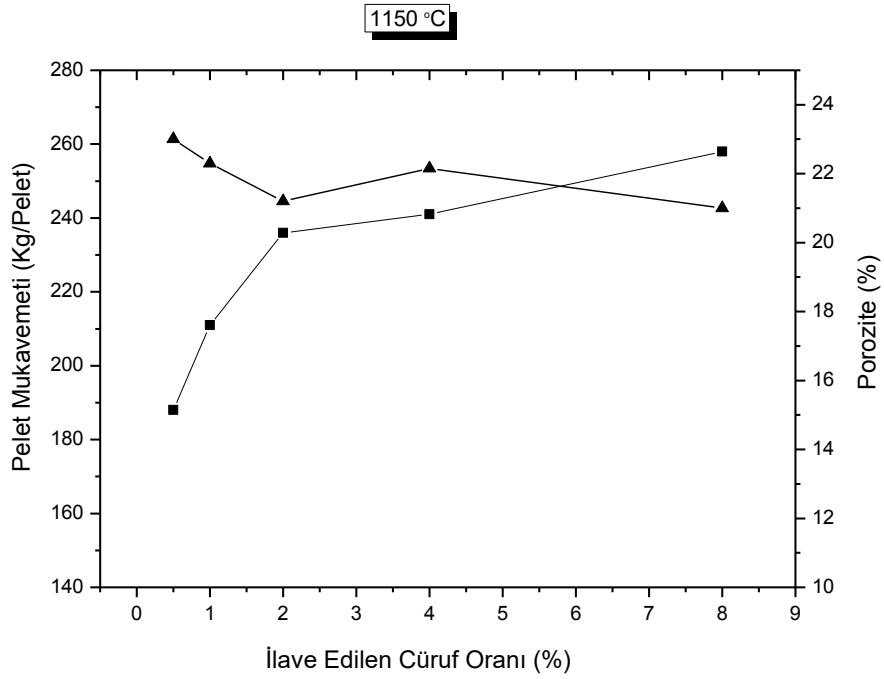
Deneylerde bağlayıcı olarak kullanılan GYFC -45µm tane boyutundaki manyetit konsantresine %0.5, %1, %2, %4 ve %8 oranlarında ilave edilmiştir. Peletler oluşturulup yaş düşme sayısına bakıldığında bağlayıcının artış oranına bağlı olarak 2-14 arasında değiştiği görülmüştür. En yüksek yaş düşme sayısı %8 GYFC ilave edilen peletlerde 14 olarak elde edilmiştir. Yaş peletler etüvde kurutulduktan sonra mukavemet değerlerine bakıldığında yine bağlayıcı oranının artışına bağlı olarak 0.5 kg ile 3 kg arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Manyetit konsantresine % 0.5, %1, %2, %4 ve % 8 oranlarında GYFC ilave edilerek 1100 °C ve 1150 °C sıcaklıkta 1 saat pişirilen peletlerin mukavemet ve porozite değerleri Şekil 4'te ve Şekil 5'te verilmektedir.

1200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda GYFC içinde bulunan bileşenlerin birçoğu katı formda bulunur, manyetit tanecikleri oksitleyici atmosferde bu sıcaklıklarda hematite dönüşecektir. Manyetit hematit dönüşümü ekzotermik bir reaksiyon olup ortamın sıcaklığını artırır. Ancak bu sıcaklık halen bağlayıcı bünyesinde bulunan bileşenlerin ergimesi ve cüruf bağlarını tam olarak oluşturması için yeterli değildir. Bu durum Şekil 4 ve Şekil 5'te görülen düşük mukavemet değerlerinin nedenini açıklamaktadır.

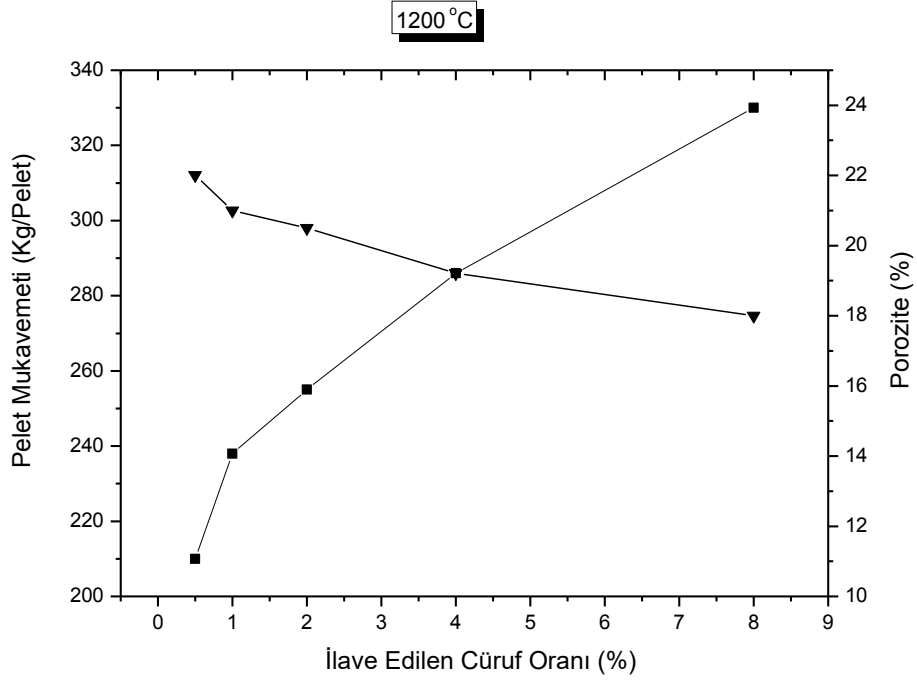


Şekil 4. Farklı oranlarda GYFC ilave edilerek 1100 °C sıcaklıkta 1 saat pişirilen peletlerin mukavemet ve porozite değerleri.

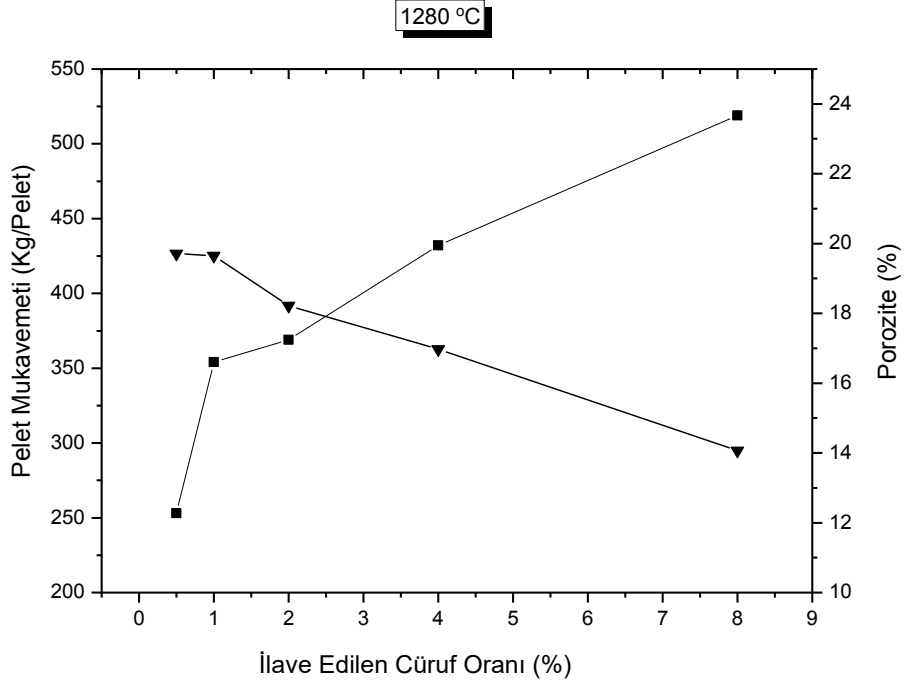


Şekil 5. Farklı oranlarda GYFC ilave edilerek 1150 °C sıcaklıkta 1 saat pişirilen peletlerin mukavemet ve porozite değerleri.

Manyetit konsantresine yine aynı oranlarda GYFC ilave edilerek 1200 °C ve 1280 °C sıcaklıkta 1 saat pişirilen peletlerin mukavemet ve porozite değerleri Şekil 6'da ve Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Farklı oranlarda GYFC ilave edilerek 1200 °C sıcaklıkta 1 saat pişirilen peletlerin mukavemet ve porozite değerleri.



Şekil 7. Farklı oranlarda GYFC ilave edilerek 1280 °C sıcaklıkta 1 saat pişirilen peletlerin mukavemet ve porozite değerleri.

1200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda silikatların, kalsiyum oksit, FeO ve diğer gang minerallerinin varlığında cevher taneciklerinin arasında ergimiş halde bulunan cüruf köprüleri oluşur ve bunlar soğuma sonrası cevher

tanelerini tutarlar. CaO ve Fe₂O₃ arasında oluşan silikat bağı köprüleri yeniden kristalleşme köprülerine göre daha zayıftır. Pişirme sırasında yeterli hava yoksa manyetit kristallerinin rekristalizasyonu oluşacaktır. Kalsiyum oksitin cüruf ergiyik miktarını arttırması dolayısıyla sinterlenmiş pelet mukavemetinde yüksek değerler elde edilirken, pelet gözenekliliğinin ise mukavemetle ters orantılı olarak %14.07'e kadar düştüğü görülmüştür. Oluşan cüruf bağlarının gözeneklerin oluşumunu engellediği ve hatta oluşan gözeneklerin kapanmasına neden olduğu söylenebilir. Pelet mukavemetinin 500 kg/pelet değerinin üzerine çıkması da bu düşüncüyü destekler niteliktedir. Bu safhadan sonra, bağlayıcı-konsantre harmanı içerisine farklı oranlarda puzzolanik malzeme ya da karbon ilave edilerek bu mukavemet değeri fazla bir değişikliğe uğramadan, porozitede artış sağlanabilir. Yapılan bu çalışma yüksek fırın cüruflarının yine yüksek fırınlara beslenecek bir malzeme olan peletin oluşturulmasında Na-bentonit yerine bağlayıcı olarak kullanılması ve ekonomik bir kazanç sağlaması açısından önemlidir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) bağlayıcı olarak kullanılması durumunda pelet mukavemeti ve pelet porozitesi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, manyetit konsantresine %0.5, %1, %2, %4 ve %8 oranlarında GYFC ilave edilerek 1100 °C ve 1150 °C, 1200 °C ve 1280 °C sıcaklıkta 1 saat pişirilen peletlerin mukavemet ve porozite değerleri incelenmiştir.

1200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda bağlayıcı bünyesinde bulunan bileşenlerin ergimesi ve cüruf bağlarını tam olarak oluşturması için yeterli olmadığından mukavemet değerleri standartların (250 kg/pelet) altında kalmıştır. 1200 °C ve 1280 °C sıcaklıklarda yapılan pişirme işlemi sonucu mukavemet değerlerinde 500 kg/pelet'den daha yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak bu sıcaklıklarda pişirilen peletlerin bünyesinde bulunan silikatların, kalsiyum oksit, FeO ve diğer gang minerallerinin varlığında cevher taneciklerinin arasında ergimiş halde bulunan cüruf köprülerini oluşturduğu, bu cüruf bağlarının soğuma sonrası cevher taneciklerinin kendi aralarındaki mikro-nano gözenekleri de kapatarak birbirlerine yapıştıkları söylenebilir.

Bu çalışma yüksek fırında kullanılan peletlerin oluşturulmasında bağlayıcı olarak kullanılan bentonitlere alternatif bir bağlayıcı geliştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Yüksek fırın cüruflarının yine yüksek fırınlara beslenecek bir malzeme olan peletin oluşturulmasında Na-bentonit yerine bağlayıcı olarak kullanılabilmesi entegre tesislerimiz için bir tasarruf sağlayacağı söylenebilir.

Kaynaklar

- [1] Boyrazlı M., Öztürk E.A., Benkli Y.E., Çizmecioglu Z., 2015 "Soğukta Sertleşen Pelet Üretiminde Pelet Mukavemetine Na-Bentonit ve Organik Bağlayıcıların Etkilerinin Karşılaştırılması" Metal Dünyası Dergisi Sayı: 262 / Nisan 2015
- [2] Öztürk E.A., Bostancı B., Başgöz Ö., Boyrazlı M., Benkli Y. E., Çizmecioglu Z., 2017, Manyetit Konsantrelerinin Peletlenmesi İşlemlerinde Bağlayıcı Olarak Kemik Tozunun Kullanılması, Metalurji Dergisi, TMMOB, Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası Yayın Organı, sayı 183, Mart, 2017, pp:24-27, ISSN:1300-4824
- [3] Davis C.G., McFarlin J.F., and Pratt H.R., (1982), "Direct Reduction Technology and Economics" Ironmaking and Steelmaking, 9 (3): 93-129
- [4] Sarıdede M.N., (1998), "Döner Fırında Sünger Demir Üretimi" Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [5] Benkli, Y.E., Boyrazlı M., Artır R., Çizmecioglu Z., 2012, "Soğuk Bağlı Kompozit Demir Peletlerde Farklı Bağlayıcıların Basma Dayanımı Üzerine Etkilerinin Araştırılması" Teknolojik Araştırmalar, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 9, No: 2, 2012 (15-26)
- [6] Eisele T.C., and Kawatra S.K. (2003), "A Review of Binders in Iron ore Pelletization" Mineral Processing & Extractive Metall. Rev., 24:1-90, 2003.
- [7] Habashi F., (1997), "Handbook of Extactive Metallurgy" Volume I, VCH Verlagsgesellschaft mbH-A, Wiley Company D-69451 Weinheim, Federal Republic of Germany, 35-60
- [8]. ASTM E 279-97, (2005), "Standard Test Method for Determination of Abrasion Resistance of Iron Ore Pellets and Sinter by the Tumbler Test" American Society for Testing and Materials Standards, U.S.A.

Ultrason Tabanlı Meme Kanseri Görüntülerinin Derin Öğrenme Yaklaşımları ile Sınıflandırılması

Abidin ÇALIŞKAN¹, Feyzi Ferat ATEŞ², Mesut TOĞAÇAR^{3*}

¹ Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

² Elektrik Elektronik Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

³ Yönetim Bilişim Sistemleri, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ abidin.caliskan@batman.edu.tr, ² feratates@gmail.com, ³ mtogacar@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 04/09/2022;

Kabul/Accepted: 12/09/2022)

Öz: Meme kanseri bayanlar arasında en sık görülen kanser türlerinden biridir. Diğer kanser türlerinde olduğu gibi meme kanseri hastalarının tedavisinde erken tanı önemlidir. Son zamanlarda yapay zekâ birçok alanda adını duyurmuştur. Sağlık alanında da yapay zekâ tanı ve tedavi süreçlerinde teknolojik alt yapı olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışma da ultrason tabanlı görüntüler kullanılarak meme kanseri teşhisini gerçekleştirebilecek yapay zeka tabanlı bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşım önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağlarından oluşmaktadır. Her bir evrişimsel sinir ağının son katmanına yeni bir tam bağlantılı katman eklenmiştir. Tam bağlantılı katmanı önceki tam bağlantılı katmanlardan ayırt eden özelliği girdi türü sayısı kadar öznelik vermesidir. Ardından evrişimsel sinir ağlarının tam bağlantılı katmanları birleştirilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada iyi huylu, kötü huylu ve normal olmak üzere üçlü bir sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel analiz sonucunda önerilen yaklaşım ile %99,57 genel doğruluk başarısı elde edilmiştir. Önerilen yaklaşım deneyde kullanılan evrişimsel sinir ağı modellerinden daha iyi performans göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, özellik seçimi, özellik birleştirme, meme kanseri, sınıflandırma.

Classification of Ultrasound-Based Breast Cancer Images with Deep Learning Approaches

Abstract: Breast cancer is one of the most common types of cancer among women. As with other types of cancer, early diagnosis is important in the treatment of breast cancer patients. Recently, artificial intelligence has made its name in many fields. In the field of health, artificial intelligence has started to be used as a technological infrastructure in diagnosis and treatment processes. In this study, an artificial intelligence-based approach that can diagnose breast cancer using ultrasound-based images is proposed. The proposed approach consists of pre-trained convolutional neural networks. A new fully connected layer is added to the last layer of each convolutional neural network. The feature that distinguishes the fully connected layer from the previous fully connected layers is that it gives as many features as the number of input types. Then, the classification process was carried out by combining the fully connected layers of the convolutional neural networks. In this study, a triple classification process was carried out as benign, malignant and normal. As a result of the experimental analysis, 99.57% overall accuracy was achieved with the proposed approach. The proposed approach outperformed the convolutional neural network models used in the experiment.

Key words: Deep learning, feature selection, feature merging, breast cancer, classification.

1. Giriş

Meme kanseri dünya genelinde 2 milyonun üzerinde bayanda teşhis edilen ve yılda ortalama 685 bin ölüm ile sonuçlanan bir kanser türüdür. Bayanlarda en sık görülen kanser türleri arasında meme kanseri de yer almaktadır. Sağ kalım oranını iyileştirebilmek için kanser türünün erken teşhisi önemlidir. Meme kanseri hastalarının erken tanı ve tedavisi sağ kalım oranlarını artırmaktadır [1]. Bu hastalığın teşhisinde birçok görüntüleme yöntemi kullanılır. Görüntüleme yöntemlerinden bazıları; mamografi, manyetik rezonans (MR), ultrason etkin bir şekilde hastanın tanı-tedavi sürecinde kullanılmaktadır [2].

Meme kanseri teşhisi sürecinde tarama programları birçok ülkede uygulanmaktadır ve artan meme kanseri vakalarının sayısı uzmanlara (doktor, radyolog, vb.) iş yükü getirmektedir. Ayrıca artan maliyet, zamandan kayıplarda düşünüldüğünde teknolojik tabanlı sistemlerin insanların karar verme süreçlerinde etkin bir rol oynamaları kaçınılmaz olmuştur. Geleneksel tabanlı bilgisayar destekli tanı sistemleri mevcut gereksinimleri

* Sorumlu yazar: mtogacar@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5039-6400, ² 0000-0002-9153-5080, ³ 0000-0002-8264-3899

karşılayamaz hale gelmiştir. Teknolojik gelişmeler bilgisayar destekli tanı sistemlerini yapay zekâ tabanlı yaklaşımlarla buluşturmuştur. Son zamanlarda yapay zekâ yaklaşımlarıyla geliştirilen sistemler insan iş yükünü azaltmaya başarmış ve daha başarılı analiz sonuçları alarak diğer alanlarda da olduğu gibi sağlık alanında da adını duyurmuştur [3].

Yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar insan duygu ve düşünme yetilerini makine ortamlarına aktarılmasını öngören, insanüstü kararlar vermeyi amaç edinen teknik, yöntem ve modellerden oluşmaktadır. Yapay zekâ makine öğrenmesi, derin öğrenme gibi alt katmanlardan oluşmaktadır. Bilgisayar görüşü, regresyon, sınıflandırma, bölütleme gibi birçok işlemi gerçekleştirebilen bu yaklaşım (yapay zekâ) hastalıkların tanı ve tedavi süreçlerinde de kullanılmaya başlamıştır [4,5]. Literatürde yapay zekâ destekli birçok tanı sistemi geliştirilmiştir. Aljuaid, Hanan vd. [6] “BreakHis” veri kümesini kullanarak derin öğrenme modelleri ile analizler gerçekleştirdi. ResNet-18, İnceptionV3 ve ShuffleNet modelleriyle sınıflandırma girdi görüntülerini sınıflandırdılar. Aljuaid, Hanan vd. [6] deneysel analizlerde ResNet modeliyle en iyi başarıyı sağladılar ve %99,7 genel doğruluk başarıları elde ettiler. Saliha Zahoor vd. [7] meme kanseri türlerini sınıflandırabilmek için derin öğrenme modelleri ile birlikte meta-sezgisel optimizasyon yöntemini birlikte kullandılar. Analizlerden çıkardıkları öznelikleri sınıflandırmak için çoklu makine öğrenme yöntemlerini kullandılar. Açık erişimli üç farklı veri kümesini kullanarak gerçekleştirdikleri analizlerde sırasıyla; %99.7, %99.8 ve %93.8 doğruluk başarıları elde ettiler. Essam Houssein vd. [8] meta-sezgisel yöntemleri özellik seçim işlemlerini gerçekleştirmek için önerdikleri yaklaşımda kullandılar. Essam Houssein vd. [8] meme kanseri türlerini sınıflandırma işlemlerinde iki veri kümesi kullandılar ve özneliklerin çıkarımında artık bloklara dayalı bir ESA modeli geliştirdiler. Analiz sonuçlarına göre iki veri kümesi için elde ettikleri genel doğruluk başarıları sırasıyla, %98,32 ve %98,88’di. M. Thilagaraj vd. [9] meme kanseri türlerini sınıflandırma işleminde radyal tabanlı ESA modelini kullandılar. Özneliklerin indirgenmesi işleminde yapay balık okulu optimizasyon yöntemini kullandılar. Sınıflandırma sürecinde elde ettikleri en iyi genel doğruluk başarıları %98,66’ydı.

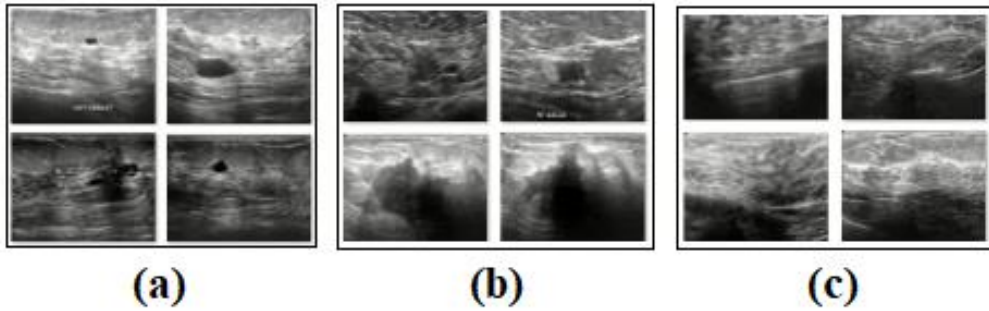
Bu çalışmada meme kanseri görüntülerinden oluşan veri kümesini kullanarak türlerine göre sınıflandırabilen, derin öğrenme tabanlı bir model önerilmiştir. Önerilen yaklaşım;

- Uzmanların daha kolay karar verebilme,
- Zamandan kazanç ve performanstan artış sağlayabilme
- Eş zamanlı birçok girdi verisini karar destek sistemi tabanlı sonuçlandırabilme, vb. katkılar sağlamıştır.

Makalenin diğer bölümleri şu şekilde özetlenir; veri kümesi hakkında detaylı bilgiler ikinci bölümde verilmiştir. Önerilen yaklaşım ve bu yaklaşımda kullanılan yöntem ve modeller üçüncü bölümde detaylandırılmıştır. Deneysel analizler, analiz sonuçları ve tartışma dördüncü bölümde yer almıştır. Sonuç bölümü en son bölüm başlığı olarak bu makalede yer almıştır.

2. Veri Kümesi

Veri kümesi, erişime açık meme kanseri görüntülerinden oluşmaktadır. Görüntüler, 2018 yılında toplanmıştır ve 25 ile 75 yaş aralığındaki kadın hastalardan elde edilen ultrason tabanlı imgelerden oluşmaktadır. Görüntülerin oluşturulmasında kullanılan hasta sayısı 600’dür. Görüntüler PNG formatında olup, görüntü çözünürlükleri ortalama 500×500 pikseldir [10]. Veri kümesi iyi huylu, kötü huylu ve normal olmak üzere üç sınıf türünden oluşmaktadır [11]. Veri kümesinin sınıflarını temsil eden örnek görüntüler Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Veri kümesi sınıflarına ait örnek görüntüler; a) İyi huylu, b) Kötü huylu, c) Normal.

Veri kümesi hakkında istatistiksel bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Toplam 780 görüntüden oluşmaktadır. İyi huylu kanser türüne ait görüntü sayısı 437, kötü huylu kanser türüne ait görüntü sayısı 210 ve normal türlü görüntü sayısı 133’tür. Bu çalışmanın deneysel analizlerinde veri kümesindeki eğitim verisi oranı 0.7 ve test verisi oranı 0.3 olarak ayarlanmıştır.

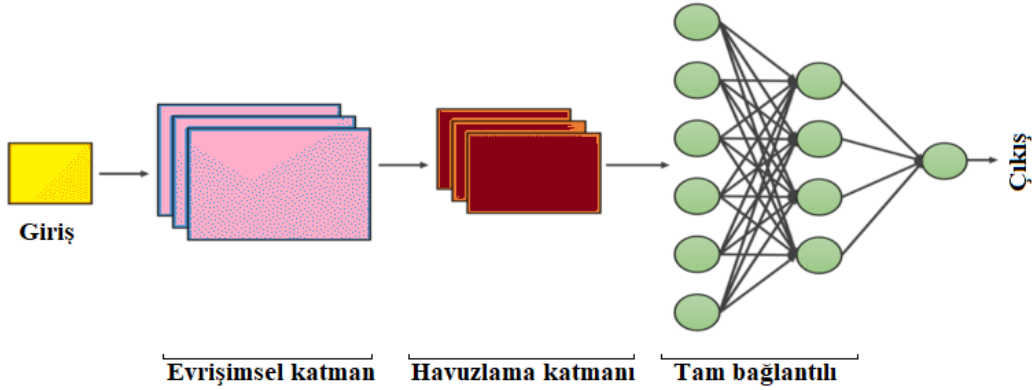
Tablo 1. Veri kümesinin sınıflarına ait görüntü sayısı.

Sınıf	Görüntü Sayısı
İyi huylu	437
Kötü huylu	210
Normal	133
Toplam	780

3. Yapay Zekâ Yaklaşımları

3.1. Derin öğrenme modelleri

Derin öğrenme, girdi verilerini otomatik bir şekilde işleyebilen, öznitelikler çıkartabilen, mimari yapısında gizli katmanlar bulunduran; sınıflandırma, bölütleme, regresyon, vb. işlemleri gerçekleştirebilen yapay zekânın alt dalıdır. Kullanım amaçlarına göre derin öğrenme modelleri bulunmaktadır ve sınıflandırma süreçlerinde genellikle evrişimsel sinir ağı (ESA) modelleri tercih edilmektedir [12]. ESA modellerinin genel yapısı; evrişimsel katmanlar, havuzlama katmanları ve tam bağlantılı katmanlardan oluşur [13]. Bir ESA modeli genel olarak giriş katmanı, gizli katmanlar ve çıkış katmanlarından oluşur. ESA modellerini makine öğrenme yöntemlerinden ayırt eden en önemli özelliği girdi verilerinde öznitelikleri otomatik olarak çıkartabilmesi ve gizli katmanlardan öznitelikleri işleyebilmesidir [4,14]. ESA modelinin genel yapısı Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. ESA modelinin genel mimari yapısı.

Evrişimsel katman, girdi görüntüleri üzerinde $n \times n$ boyutunda filtre dolaştırarak aktivasyon haritalarının oluşturulmasını sağlar. Girdi boyutu küçültülerek modelin daha kolay eğitim görmesine yardımcı olur. Havuzlama katmanı, genellikle evrişimsel katmanlardan sonra kullanılır ve girdi verisinin boyutunu küçültür. Havuzlama katmanı bunu gerçekleştirirken (2×2 , 3×3 , vs.) boyutlu filtreler kullanır. Tam bağlantılı katman, önceki katmanlardan elde edilmiş öznitelikleri tek bir boyutta toplayarak düzleştirir (flatten) ve girdi verilerinin olasılıklı değerlerinin oluşmasına yardımcı olur [15–17]. ESA’ya örnek olarak; AlexNet, VGG-16, GoogLeNet, DarkNet, ResNet, Inception gibi modeller verilebilir. Bu çalışmada AlexNet, DarkNet-19, ResNet-18 modelleri kullanıldı.

AlexNet, yaklaşık 650 bin nörondan oluşan, toplam 60 milyon parametreden oluşan ve 2012 yılında ImageNet görüntü sınıflandırması yarışmasında üstün başarı gösteren bir derin öğrenme modelidir. AlexNet 8 katmanlı bir

ESA'dır. Bu mimari 5 evrişim katmanı ve 3 tam bağlantı katmanından oluşur. Maksimum havuzlama katmanı ile gerçekleşen işlemler, evrişim katmanlarından sonra gerçekleşir. Önceki sinir ağlarından farklı olarak, AlexNet, geleneksel sigmoid ve tanh işlevleri yerine etkinleştirme işlevi olarak ReLU'yu kullanır. ReLU, yalnızca modelin eğitim hızını etkili bir şekilde geliştirmekle kalmayıp aynı zamanda gradyandan meydana gelebilecek problemi daha iyi kontrol edebilen, doymamış bir aktivasyon fonksiyonudur. Bu modelin genel mimari yapısı 8 katmanlı bir ESA'dır. Evrişimsel katman sayısı 5 ve tam bağlantılı katman sayısı 3'tür. Evrişimsel katmanlardan sonra havuzlama katmanını da kullanılmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU tercih edilmiştir. ReLU, AlexNet modelini hızlandırmakla kalmayıp, oluşabilecek gradyan problemlerinin de önüne geçmiştir [18]. AlexNet modelinin girdi boyutu 227×227 çözünürlüktedir. Tam bağlantılı katmanları arasında en son sırada yer alan FC-8 katmanı girdi verisinden toplam 1000 öznitelik çıkartır ve bir sonraki katmana aktarır [19].

DarkNet, mimarisinde ESA model yapısını kullanan bir derin öğrenme yaklaşımıdır. Bu model esas olarak gerçek zamanlı görüntülerde/videolarda nesnelere algılamak için tasarlanmıştır. DarkNet modeli, YOLO modelini temel alıp geliştirilmiş bir mimariye sahiptir. DarkNet-19 modelinin giriş çözünürlüğü 256×256 pikseldir. Bu model, YOLO-v2'nin özellik çıkarımı işlevini mimari yapısında tutar ve 19 katmanlı derin ağ yapısına sahiptir [20,21].

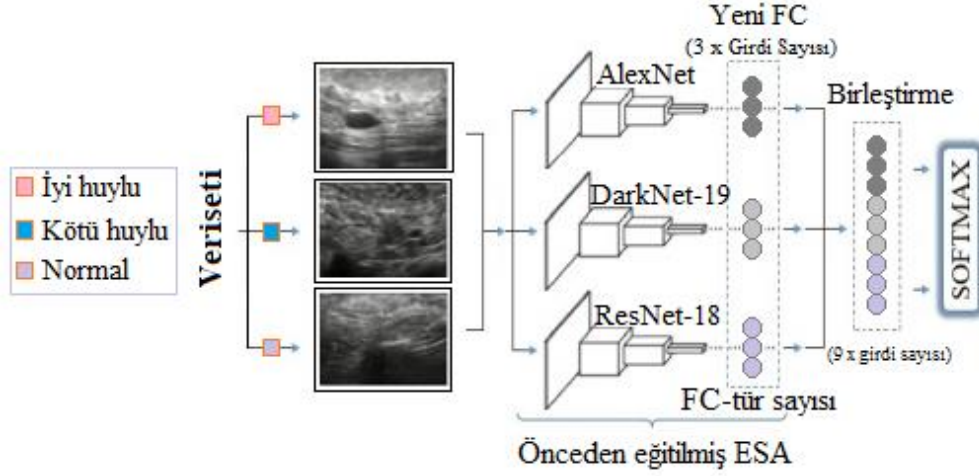
ResNet, yayılım işlemini başarıyla gerçekleştiren bir mimaridir. Başka bir deyişle, ResNet, sonraki artık değer katmanlarını besleyen artık bloklardan oluşur. Bu özelliği ile ResNet klasik bir model değildir. ResNet-18, ResNet-34, ResNet-50, vb. mimari türleri vardır. Bu türlerin model yapısı aynı olmasına rağmen ResNet modelinin yanındaki sayılar katman sayısını ifade eder. ResNet-18 modeli 18 katmanlı bir derin evrişimsel ağ yapısına sahiptir ve bu modelin girdi boyutu 224×224 'tür. Artık ağlar, normal yapay sinir ağından daha derin ve daha derin olan ağı eğitimi kolaylaştırmaya yardımcı olur [22].

3.2. Softmax sınıflandırıcı

ESA modellerin genel yapısında ek bir sınıflandırma yöntemi eklenmediği sürece genellikle sınıflandırma rolünü softmax fonksiyonu üstlenir. ESA modellerinin sınıflandırma işlemini gerçekleştiren ve modellerin son katmanda yer alan aktivasyon fonksiyonu olarak ta bilinen Softmax, tam bağlantılı katmanlardan işlenerek elde edilen giriş değerlerini olasılıksal $[0, 1]$ değerlere dönüştürür. Ardından girdi verisini olasılıksal değerlere göre karşılaştırarak ilgili sınıfa aktarılmasını sağlar. Kısacası softmax, genellikle iki ve çok tipli veri setlerini sınıflandırmak için ESA modellerinde tercih edilir [23].

3.3. Önerilen yaklaşım

Önerilen yaklaşım, ultrason görüntülerini kullanarak meme kanseri tanı sistemine katkı sunan ve kanser tümörü türleri arasında başarılı bir şekilde sınıflandırmayı amaçlayan derin öğrenme tabanlı bir modeldir. Önerilen yaklaşımın literatüre katkısı, tür tabanlı yeni bir tam bağlantılı katman ESA modellerine ekleyerek modellerin daha verimli ve başarılı sınıflandırma yapabilmelerini sağlamıştır. Bu çalışmada transfer öğrenme tabanlı ESA modellerinin son katmanından önce yeni bir tam bağlantılı katman modellere eklendi. Böylece softmax öncesi, sınıf tipi sayısı kadar aktivasyon setleri tam bağlantılı katmandan elde edildi. Örneğin 3 sınıflı bir veri setinin transfer öğrenme tabanlı ESA modeli ile eğitiminden sonra tam bağlantılı katmanlardan işlenmekte, yine sınıflandırma işlemi öncesi oluşturulmuş yeni tam bağlantılı katman sayesinde; ($3 \times$ girdi veri sayısı) kadar aktivasyon setleri oluşturulmaktadır. Toplam 3 ESA modeli bu çalışmanın deneysel kısmında kullanıldı ve $3 \times$ ($3 \times$ girdi veri sayısı) kadar birleştirilmiş bir aktivasyon seti elde edildi. Ardından ($9 \times$ girdi veri sayısı) boyutundaki birleştirilmiş aktivasyon seti yeniden softmax yöntemine girdi olarak verilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirildi. Tür sayısı kadar aktivasyon seti verebilen tam bağlantılı katmanlar ($FC_{\text{tür sayısı}}$) ESA modellerin iş yükünü (zaman, hız maliyeti) azaltmayı sağladı. $FC_{\text{tür sayısı}}$ katmanlarının birleştirilerek yeni bir özellik setinin oluşturulması ve yeniden sınıflandırılması işlemi de önerilen yaklaşımın performansını pozitif yönde artırdı. Bu yaklaşımın genel mimarisi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Önerilen yaklaşımın mimari tasarımı.

4. Deneysel Analizler ve Tartışma

Bu çalışmanın deneysel analizleri MATLAB 2020 programı kullanılarak gerçekleştirildi. Deneysel analizler için gereksinim duyulan donanım bilgileri şunlardır; 8 GB geçici hafıza birimi, Intel® Xeon® CPU @3.20 GHz işlemci birimi ve 4 GB GPU destekli ekran kartı kullanıldı. MATLAB yazılımında derlenen ESA modelleri için tercih edilen parametreler ve değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. ESA modellerinin eğitimi sürecinde tercih edilmiş parametre değerleri.

Parametre	Tercih / Değer
İterasyon sayısı	194
Dönem/Devir sayısı	2
Öğrenme oranı	0,0001
Optimizasyon	SGD
Donanım kaynağı	Tekli GPU
Mini – topluluk (mini-batch)	4
Eğitim oranı: test oranı	0.7:0.3

Deneysel analizlerin ölçüm işlemleri için birçok makalenin deneysel analizlerinde tercih edilen karmaşıklık matrisi kullanıldı. Karmaşıklık matrisini oluşturan metriklerin (f-skör, kesinlik, geri çağırma, vb.) hesaplanmasında aşağıda verilen denklemler kullanıldı. Denklem 1-4 arasında kullanılan kısaltmaların anlamları şunlardır; (D): doğru, (Y): yanlış, (N): negatif, (P): pozitifdir [24-26].

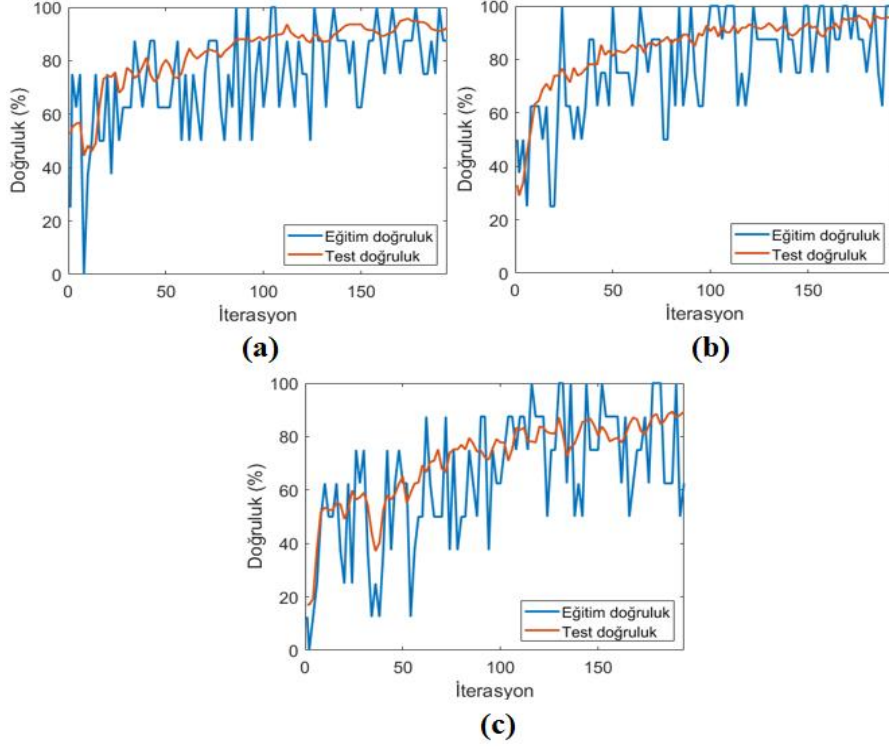
$$\text{Geri çağırma} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (2)$$

$$\text{F-skör} = \frac{2 \times DP}{2 \times DP + YP + YN} \quad (3)$$

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (4)$$

DeneySEL analizler iki aşamadan oluşmuştur. Birinci aşamada veri kümesi sırasıyla AlexNet, DarkNet-19 ve ResNet-18 modelleri ile eğitildi. Bu modeller tarafından elde edilmiş eğitim-test başarı grafikleri Şekil 4'te gösterildi. Modellerden elde edilmiş karmaşıklık matrisleri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. ESA modellerinin eğitim-test doğruluk grafikleri; a) AlexNet, b) DarkNet-19, c) ResNet-18.

		Tahmini Sınıf				
		İyi huylu	Kötü huylu	Normal		
Gerçek Sınıf	İyi huylu	128	1	2	İyi huylu	129
	Kötü huylu	8	55		Kötü huylu	63
	Normal			40	Normal	1
		İyi huylu	Kötü huylu	Normal		

(a)

		Tahmini Sınıf				
		İyi huylu	Kötü huylu	Normal		
Gerçek Sınıf	İyi huylu	124	6	1	İyi huylu	129
	Kötü huylu	3	60		Kötü huylu	63
	Normal	2	1	37	Normal	1
		İyi huylu	Kötü huylu	Normal		

(b)

		Tahmini Sınıf				
		İyi huylu	Kötü huylu	Normal		
Gerçek Sınıf	İyi huylu	124	6	1	İyi huylu	124
	Kötü huylu	3	60		Kötü huylu	63
	Normal	2	1	37	Normal	1
		İyi huylu	Kötü huylu	Normal		

(c)

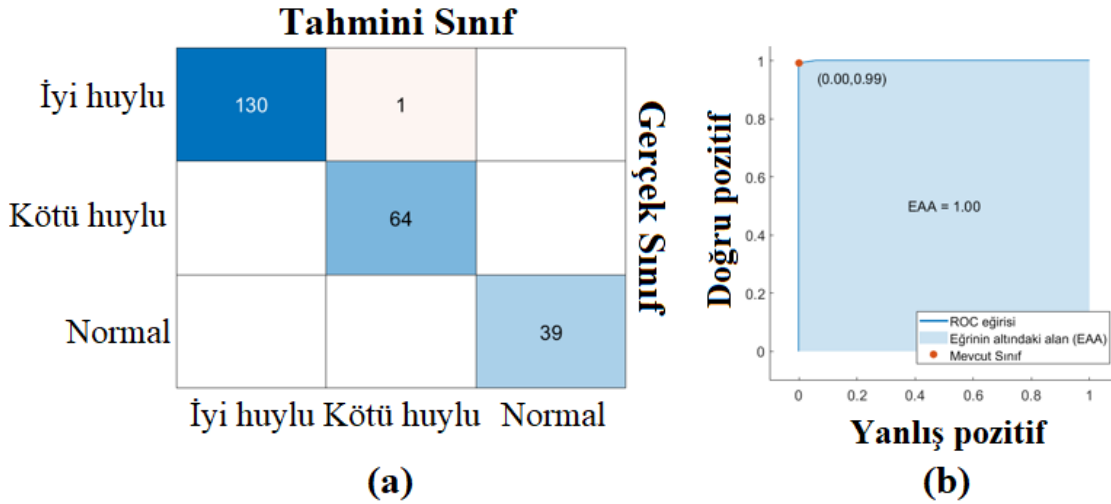
Şekil 5. ESA modellerinden elde edilmiş karmaşıklık matrisleri; a) AlexNet, b) DarkNet-19, c) ResNet-18.

Şekil 5'te gösterilen karmaşıklık matrislerin metrik sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde AlexNet model ile %95.30, DarkNet-19 model ile %98.72 ve ResNet-18 model ile %94.44 genel doğruluk başarıları elde edilmiştir. En iyi performansı modeller arasında DarkNet-19 vermiştir. Üç modelinde sınıflandırma sürecinde softmax yöntemi kullanıldı ve bu modellerin tam bağlantılı son katmanından elde edilmiş 1000 özellik seti softmax yöntemine girdi verisi olarak verildi. Sonuç olarak ESA modellerinden Tablo 3'teki skorlar elde edildi.

Tablo 3. ESA modellerinin karmaşıklık matris metrik sonuçları.

ESA model	Sınıf	Kesinlik	Geri çağırma	F1-skor	Doğruluk (%)	Genel Doğruluk (%)
AlexNet	İyi huylu	0,98	0,94	0,96	95,30	95,30
	Kötü huylu	0,87	0,98	0,92	96,15	
	Normal	1,0	0,95	0,98	99,15	
DarkNet-19	İyi huylu	0,98	0,99	0,99	98,72	98,72
	Kötü huylu	1,0	0,97	0,98	99,15	
	Normal	0,97	1,0	0,99	99,57	
ResNet-18	İyi huylu	0,95	0,96	0,95	94,87	94,44
	Kötü huylu	0,95	0,90	0,92	95,73	
	Normal	0,93	0,97	0,95	98,29	

DeneySEL analizlerin ikinci aşamasında ESA modellerin tam bağlantılı katmanlarının yer aldığı bloka yeni bir tam bağlantılı katman / FC_{tür sayısı} eklendi. FC_{tür sayısı} sayesinde ESA modellerinden girdi türü sayısı kadar (3 sınıf türü var) öznitelik setleri elde edildi. Her bir modele ait öznitelik setleri tür sayısı × girdi sayısı boyutunda iki boyutlu matris değerler içermektedir. Üç modelinde öznitelik setleri birleştirilerek yeni bir öznitelik seti oluşturuldu. Yani, “ $3 \times [\text{tür sayısı} (3\text{'tür}) \times \text{girdi sayısı}] = 9 \times \text{girdi sayısı}$ ” boyutlarında yeni bir öznitelik seti oluşturuldu. Oluşturulmuş öznitelik seti yeniden softmax yöntemi ile sınıflandırıldı ve sınıflandırma sürecinde elde edilmiş karmaşıklık matrisi ve ROC eğrisi Şekil 6'de gösterildi. Önerilen yaklaşımın analiz sonuçları Tablo 4'te verildi. Sonuç olarak önerilen yaklaşım ile %99,57 genel doğruluk başarıları elde edildi. DeneySEL analizlerin iki aşamasından elde edilmiş sonuçlar bize önerilen yaklaşımın ESA modellerinden daha başarılı olduğunu göstermiştir.



Şekil 6. Birleştirilmiş öznitelik setinin softmax yöntemi ile gerçekleştirilen analiz sonucu; a) karmaşıklık matrisi, b) ROC eğrisi.

Tablo 4. Önerilen yaklaşımın analiz sonuçları.

ESA model	Sınıf	Kesinlik	Geri çağırma	F1-skor	Doğruluk (%)	Genel Doğruluk (%)
Önerilen yaklaşım	İyi huylu	0,99	1,0	1,0	99,57	99,57
	Kötü huylu	1,0	0,98	0,99	99,57	
	Normal	1,0	1,0	1,0	100	

5. Sonuç

Meme kanseri dünya genelinde kadınlar arasında sıkça rastlanılan ve ölümcül neticeler ile sonuçlanabilen bir hastalık türüdür. Erken tanı, bu hastalığın sağ kalım oranını artırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı erken tanı üzerine kurgulanan birçok çalışma literatürde yer almıştır ve son zamanlarda bu çalışmalar arasında yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar da mevcuttur. Bu makalede meme kanseri türleri arasında (iyi huylu-kötü huylu) ve normal/sağlıklı görüntüleri de dâhil ederek üç tür üzerinde sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın literatüre katkısı, tür tabanlı yeni bir tam bağlantılı katman ESA modellerinin son aşamasına ekletilerek daha az öznelikte fakat daha başarılı analizler elde edebilmesini sağlamıştır. Ayrıca önerilen yaklaşım da ESA modellerinden elde edilmiş özneliklerin birleştirilmesi, sınıflandırma başarısını artırmıştır. Sonuç olarak bu çalışmanın deneysel analizlerinde %99,57 oranında genel doğruluk başarısı elde edilmiştir.

Gelecek çalışmada farklı türden veri setleri kullanarak meme kanserinin tanı sürecinde derin öğrenme tabanlı yeni yaklaşımlar tasarlanacaktır. Ayrıca öznelik seçiminde daha verimli özelliklerin ön plana çıkartılabilmesi için meta-sezgisel yöntemler de tasarlanacak yaklaşıma ilave edilecektir.

Teşekkür

Bu makale, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tarafından yürütülmüş “Meme Kanserinin İyi Huylu veya Kötü Huylu Durum Tespitinde Derin Öğrenme Modellerinin Kullanılması” adlı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. A.Ç., fikir sahibidir. F.F.A. ve M.T. deneyleri gerçekleştirdi. A.Ç. ve F.F.A., sonuçları yorumladı ve F.F.A. ve M.T., makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] S. Ortega-Martorell, P. Riley, I. Olier, R.G. Raidou, R. Casana-Eslava, M. Rea, L. Shen, P.J.G. Lisboa, C. Palmieri, Breast cancer patient characterisation and visualisation using deep learning and fisher information networks, *Sci. Rep.* 12 (2022) 14004. doi:10.1038/s41598-022-17894-6.
- [2] Y. Gao, B. Reig, L. Heacock, D.L. Bennett, S.L. Heller, L. Moy, Magnetic Resonance Imaging in Screening of Breast Cancer, *Radiol. Clin. North Am.* 59 (2021) 85–98. doi:10.1016/j.rcl.2020.09.004.
- [3] L. Balkenende, J. Teuwen, R.M. Mann, Application of Deep Learning in Breast Cancer Imaging, *Semin. Nucl. Med.* 52 (2022) 584–596. doi:10.1053/j.semnuclmed.2022.02.003.
- [4] C. Janiesch, P. Zschech, K. Heinrich, Machine learning and deep learning, *Electron. Mark.* 31 (2021) 685–695. doi:10.1007/s12525-021-00475-2.
- [5] F. Emmert-Streib, Z. Yang, H. Feng, S. Tripathi, M. Dehmer, An Introductory Review of Deep Learning for Prediction Models With Big Data, *Front. Artif. Intell.* 3 (2020). doi:10.3389/frai.2020.00004.
- [6] H. Aljuaid, N. Alturki, N. Alsubaie, L. Cavallaro, A. Liotta, Computer-aided diagnosis for breast cancer classification using deep neural networks and transfer learning, *Comput. Methods Programs Biomed.* 223 (2022) 106951. doi:https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.106951.
- [7] S. Zahoor, U. Shoaib, I.U. Lali, Breast Cancer Mammograms Classification Using Deep Neural Network and Entropy-Controlled Whale Optimization Algorithm, *Diagnostics.* 12 (2022) 557. doi:10.3390/diagnostics12020557.
- [8] E.H. Houssein, M.M. Emam, A.A. Ali, An optimized deep learning architecture for breast cancer diagnosis based on improved marine predators algorithm, *Neural Comput. Appl.* (2022). doi:10.1007/s00521-022-07445-5.

- [9] M. Thilagaraj, N. Arunkumar, P. Govindan, Classification of Breast Cancer Images by Implementing Improved DCNN with Artificial Fish School Model, *Comput. Intell. Neurosci.* 2022 (2022) 6785707. doi:10.1155/2022/6785707.
- [10] W. Al-Dhabyani, M. Gomaa, H. Khaled, A. Fahmy, Dataset of breast ultrasound images, *Data Br.* 28 (2020) 104863. doi:10.1016/j.dib.2019.104863.
- [11] A. Shah, Breast Ultrasound Images Dataset, Kaggle Web. (2021). <https://www.kaggle.com/datasets/aryashah2k/breast-ultrasound-images-dataset?resource=download>.
- [12] I.H. Sarker, Deep Learning: A Comprehensive Overview on Techniques, Taxonomy, Applications and Research Directions, *SN Comput. Sci.* 2 (2021) 420. doi:10.1007/s42979-021-00815-1.
- [13] B. Ait Skourt, A. El Hassani, A. Majda, Mixed-pooling-dropout for convolutional neural network regularization, *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.* 34 (2022) 4756–4762. doi:https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.05.001.
- [14] N. Sharma, R. Sharma, N. Jindal, Machine Learning and Deep Learning Applications-A Vision, *Glob. Transitions Proc.* 2 (2021) 24–28. doi:10.1016/j.gltp.2021.01.004.
- [15] W. Alsaggaf, Z. Cömert, M. Nour, K. Polat, H. Brdesec, M. Toğaçar, Predicting fetal hypoxia using common spatial pattern and machine learning from cardiocotography signals, *Appl. Acoust.* 167 (2020) 107429. doi:10.1016/j.apacoust.2020.107429.
- [16] A. Diker, Z. Comert, E. Avci, M. Togacar, B. Ergen, A Novel Application based on Spectrogram and Convolutional Neural Network for ECG Classification, in: 2019 1st Int. Informatics Softw. Eng. Conf., IEEE, 2019: pp. 1–6. doi:10.1109/UBMYK48245.2019.8965506.
- [17] M. Toğaçar, B. Ergen, Z. Cömert, Tumor type detection in brain MR images of the deep model developed using hypercolumn technique, attention modules, and residual blocks, *Med. Biol. Eng. Comput.* 59 (2021) 57–70. doi:10.1007/s11517-020-02290-x.
- [18] C. Banerjee, T. Mukherjee, E. Pasilio, An Empirical Study on Generalizations of the ReLU Activation Function, in: Proc. 2019 ACM Southeast Conf., Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2019: pp. 164–167. doi:10.1145/3299815.3314450.
- [19] S. Li, L. Wang, J. Li, Y. Yao, Image Classification Algorithm Based on Improved AlexNet, *J. Phys. Conf. Ser.* 1813 (2021). doi:10.1088/1742-6596/1813/1/012051.
- [20] J. Redmon, A. Farhadi, YOLO9000: Better, faster, stronger, Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, CVPR 2017. 2017-Janua (2017) 6517–6525. doi:10.1109/cvpr.2017.690.
- [21] P. Sowa, J. Izydorczyk, Darknet on OpenCL: a multi-platform tool for object detection and classification, (2020) 1–22. doi:10.20944/preprints202007.0506.v1.
- [22] A. Venkata, S. Abhishek, Resnet18 Model With Sequential Layer For Computing Accuracy On Image Classification Dataset, *10* (2022) 176–181.
- [23] M. El, A. Seddik, C. Louart, R. Couillet, M. Tamaazousti, The Unexpected Deterministic and Universal Behavior of Large Softmax Classifiers, *Int. Conf. Artif. Intell. Stat.* (2021). <https://melaseddik.github>.
- [24] M. Toğaçar, Z. Cömert, B. Ergen, Enhancing of dataset using DeepDream, fuzzy color image enhancement and hypercolumn techniques to detection of the Alzheimer’s disease stages by deep learning model, *Neural Comput. Appl.* 33 (2021) 9877–9889. doi:10.1007/s00521-021-05758-5.
- [25] E. Başaran, A new brain tumor diagnostic model: Selection of textural feature extraction algorithms and convolution neural network features with optimization algorithms, *Comput. Biol. Med.* 148 (2022) 105857. doi:https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105857.
- [26] A. Çalışkan, Classification of Tympanic Membrane Images based on VGG16 Model, *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, 5(1), 105-111. doi:https://doi.org/10.34088/kojose.1081402

Meme Kanserinin Tespiti için Yapay Zekâ Tabanlı Hibrit Bir Model Önerisi

Abidin ÇALIŞKAN¹, Feyzi Ferat ATEŞ², Mesut TOĞAÇAR^{3*}

¹ Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye
² Elektrik Elektronik Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye
³ Yönetim Bilişim Sistemleri, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ abidin.caliskan@batman.edu.tr, ² feratates@gmail.com, ³ mtogacar@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 07/09/2022;

Kabul/Accepted: 12/09/2022)

Öz: Meme kanseri genellikle memenin lobül, kanal ve bağ dokusu bölgelerinde meydana gelen ve bu bölgelerdeki hücrelerin anormal bir şekilde hareketinden meydana gelen kanser türüdür. Genel olarak bayanlar arasında en sık görülen kanser türleri arasında yer almaktadır. Hastalık erkenden fark edilmediği zaman kan ve lenf damarları yoluyla diğer organlara kanserli hücreler etki edebilir (metastaz durumu). Dolayısıyla meme kanserinin erken tanı ve tedavisi önemlidir. Bu çalışmada meme kanserinin iyi huylu ve kötü huylu türleri arasında sınıflandırma yapabilen yapay zekâ tabanlı erken tanı sistemi önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda artık bloklu evrişimsel sinir ağı modelleri kullanıldı. ResNet modellerinin son katmanına yeni bir tam bağlantılı katman eklenerek tür tabanlı öznelikler çıkartıldı. Bir sonraki aşamada tam bağlantılı katmanlardan elde edilmiş öznelikler birleştirilerek yeni bir özellik seti oluşturuldu. Sınıflandırma sürecinde softmax ve makine öğrenme yöntemleri (destek vektör makineleri, en yakın komşu yöntemi, vb.) kullanıldı. Önerilen yaklaşım ile sınıflandırma sürecinde kullanılan tüm yöntemlerden %100 genel doğruluk başarıları elde edildi. Bu çalışmada tür tabanlı tam bağlantılı katmanların elde edilmesi ve birleştirilmesi deneysel analizlerin performansını olumlu etkilediği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapay zekâ, özellik seçimi, makine öğrenmesi, meme kanseri, sınıflandırma.

An Artificial Intelligence Based Hybrid Model Proposal for the Detection of Breast Cancer

Abstract: Breast cancer is a type of cancer that usually occurs in the lobule, duct and connective tissue regions of the breast and is caused by the abnormal movement of cells in these regions. It is among the most common types of cancer among women in general. When the disease is detected early, cancerous cells can affect other organs through the blood and lymphatic vessels (metastasis state). Therefore, early diagnosis and treatment of breast cancer is important. In this study, an artificial intelligence-based early diagnosis system that can classify between benign and malignant types of breast cancer is proposed. Residual blocky neural network models are used in the proposed approach. Type-based features were extracted by adding a new fully connected layer to the last layer of ResNet models. In the next step, a new feature set was created by combining the features obtained from the fully connected layers. Softmax and machine learning methods (support vector machines, nearest neighbor method, etc.) were used in the classification process. With the proposed approach, 100% overall accuracy was obtained from all the methods used in the classification process. In this study, it was observed that obtaining and combining type-based fully connected layers positively affected the performance of experimental analyzes.

Key words: Artificial intelligence, feature selection, machine learning, breast cancer, classification.

1. Giriş

Kanser, insan vücudunun organındaki veya doku bölgesindeki hücrelerin anormal bir şekilde bölünüp çoğalması ile meydana gelen ölümcül bir hastalıktır. Günümüzde davranış türlerine ve tedaviye verdiği yanıtlara göre 100'ün üzerinde kanser türü bulunmaktadır. Kanser patolojisinde en önemli konu tümörlü hücrelerin iyi ya da kötü huylu olduğunun tespit edilmesidir. Bu durum tanı-tedavi sürecinde önemlidir [1]. İyi huylu tümör kendi bulunduğu alanda sınırlı kalır ve çevre dokulara zarar vermez. Kötü huylu tümör ise bulunduğu alanın dışına çıkmaya çalışır ve çevre dokulara zarar verir. Ayrıca lenf ve kan yolu üzerinden diğer organlara da yayılabilir. Tüm bu sebepler göz önünde bulundurulduğunda kanser tedavisinde erken tanı önemlidir [2].

Hastalıkların iyileştirme süreçlerinde gerçekleştirilen tarama programları, eğitim ve tedavi programları her ne kadar yaşam standardını pozitif yönde etkilese de meme kanseri dünyada her yıl artan bir oran teşkil etmektedir.

* Sorumlu yazar: mtogacar@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5039-6400, ² 0000-0002-9153-5080, ³ 0000-0002-8264-3899

Dünya Sağlık Örgütü'nün 2020 yılı verilerine göre dünyada 2 milyon 260 bin kişiye meme kanseri teşhisi konuldu ve yaklaşık 685 bin kadın meme kanserinden dolayı o yıl hayatını kaybetti [3]. Ölümcül bir hastalık olan meme kanserinin sağ kalım oranını artırabilmek için erken tanı son derece önemlidir. Meme kanserinin alt tipleri tedavi süreciyle doğrudan ilişkilidir [4]. Hastalığın tanı-tedavi sürecini daha sağlıklı ve hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmek için teknolojik tabanlı birçok sistem geliştirilmiştir. Bu sistemler arasında son zamanlarda yapay zekâ teknolojileri daha çok ön plana çıkmaktadır. Yapay zekâ insan akıl ve becerilerini makine ortamına aktarabilen ve insanüstü kararlar alınmasını sağlayan bir yaklaşımdan oluşmaktadır [5]. Dolayısıyla meme kanseri tanı sürecinde bu yaklaşım uzmanların (doktor, radyolog, vb.) kararlarına bağlı olmadan otomatik bir şekilde karar verme iradesine sahiptir. Bu tür karar destek sistemleri günümüzde tanı-tedavi süreçlerinde kullanılmaktadır ve bu tür yaklaşımlar halen kendini geliştirmeye devam etmektedir [6]. Literatürde meme kanseri tanısını yapay zekâ destekli gerçekleştirebilen birçok çalışma yayımlanmıştır. Bunlardan bazıları incelenirse; MA. Najji vd. [7] makine öğrenme yöntemlerini kullanarak analizler gerçekleştirmiştir. Deneysel analizlerinde en iyi performansı destek vektör makineleri (DVM) ile sağlamışlardır ve bu yöntem ile %97,2 genel doğruluk başarısı elde etmişlerdir. CG. Yedjou vd. [8] çalışmasında hücre dokusunun yapısal (çap, büyüklük, iç bükey, dış bükey, vb.) özelliklerini kullanarak makine öğrenme yöntemleriyle analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında hücrelerin iyi huylu-kötü huylu sınıflandırılmasını başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Ahmad Kazemi vd. [9] meme kanseri teşhisinde paralel mimari yapısına sahip derin öğrenme modellerini (AlexNet, VGGNet) birleştirerek analizler gerçekleştirdi. Önerdikleri modelde %99,7 genel doğruluk başarısı elde ettiler. DA. Ragab vd. [10] meme kanseri teşhisinde derin evrimsel sinir ağı (D-ESA) modelini önerdiler ve onlar tasarladıkları modelin son katmanına DVM sınıflandırıcısını eklediler. Sonuç olarak, DVM ile %94 genel doğruluk başarısı elde ettiler.

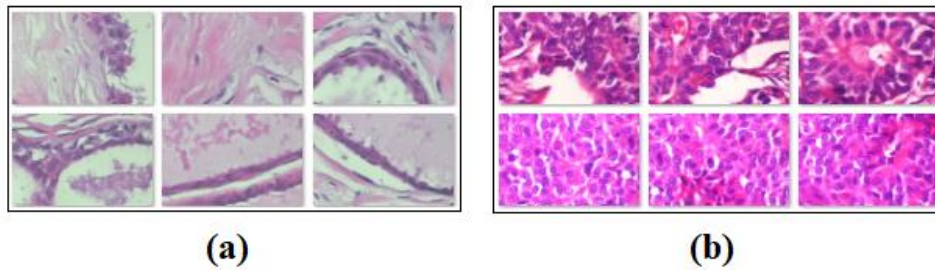
Bu çalışmada, tümör türleri arasında ayrımı başarılı bir şekilde gerçekleştirebilen yapay zekâ tabanlı hibrit bir model önerilmiştir. Önerilen model, tanı süreçlerinde doğru karar verebilen ve uzmanlara yardımcı olabilecek karar destek sistemi tabanlı algoritmalar ile tasarlanmıştır. Önerilen yaklaşım ayrıca diğer maliyetler (zaman, maaş, hız, doğruluk, vb.) ile karşılaştırıldığında performans kazancı sağlayabilmektedir ve nesnel olarak karar verebilme yapısına sahiptir.

Makalenin diğer bölümleri şu şekilde özetlenir; veri kümesi hakkında detaylı bilgiler ikinci bölümde verilmiştir. Derin öğrenme tabanlı hibrit yaklaşım ve bu yaklaşımda kullanılan makine öğrenme yöntemleri ve ESA modelleri üçüncü bölümde detaylandırılmıştır. Deneysel analizler, analiz sonuçları ve tartışma dördüncü bölümde yer almıştır. Sonuç bölümü en son bölümde yer almıştır.

2. BreakHis Veri Kümesi

BreakHis, iyi huylu ve kötü huylu meme tümörlerinin mikroskopik biyopsi görüntülerini içeren açık erişimli veri kümesidir. Veri kümesi, 2014 yılında Brezilya'daki P&D Laboratuvarında başlatılmış kliniksel çalışma yoluyla toplanmıştır ve erişime sunulmuştur. Görüntüler üç kanallı kırmızı renkte alınır ve her bir kanal 8 bittir. BreakHis veri kümesi, 4x, 10x, 100x, 200x, 400x büyütme faktörleri kullanılarak oluşturulmuştur. Her bir görüntü RGB formatında olup, 700×460 piksel çözünürlüğe sahiptir ve görüntü formatları PNG uzantılıdır [11].

Bu çalışmada, orijinal BreakHis veri kümesinin 400x büyütme faktörü ile işlenmiş görüntü kümesinin belirli bir kısmı kullanılarak analizler gerçekleştirildi. 547 adet iyi huylu, 1146 adet kötü huylu olmak üzere toplam 1693 adet görüntü kümesinden oluşmaktadır [12]. Deneysel analizlerde veri kümesinin dağılımı 0,7 oranında eğitim verisi ve 0,3 oranında test verisi olarak ayrılmıştır. Veri kümesinin sınıflarını temsil eden alt görüntü kümesi Şekil 1'de gösterilmiştir.



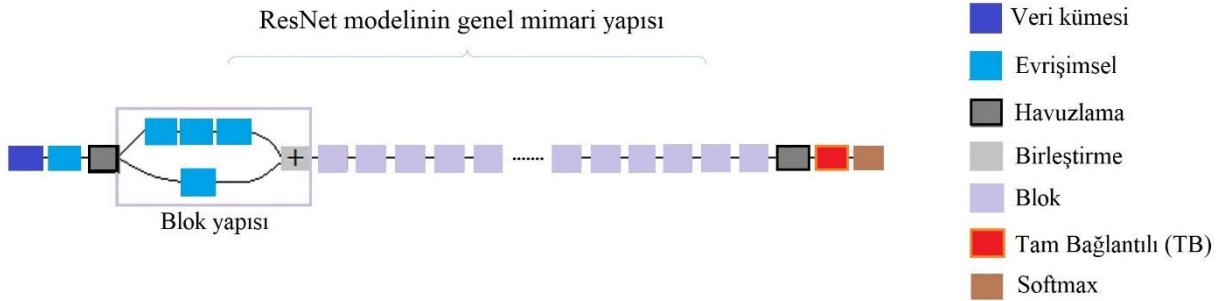
Şekil 1. BreakHis 400x veri kümesinin sınıfları; a) iyi huylu, b) kötü huylu.

3. Yapay Zekâ Modelleri ve Yöntemleri

3.1. Artık tabanlı derin öğrenme modelleri

Derin öğrenme, mimari yapısında gizli evrişimsel katmanlar barındıran ve girdi verilerini işleyerek otomatik bir şekilde özniteliklerin çıkartılmasını sağlayan; sınıflandırma, regresyon, kategorize edebilme, vb. işlemleri çıkış katmanına aktaran, yapay zekânın bir alt dalıdır [13,14]. ESA modellerinin genel yapısı evrişimsel katmanlar, havuzlama katmanları ve tam bağlantılı (TB) katmanlardan oluşmaktadır. Evrişimsel katman, girdi verisinde özniteliklerin çıkartılmasını sağlayarak aktivasyon haritalarını oluşturmaktadır. Havuzlama katmanı, genellikle evrişimsel katmanlardan sonra kullanılır ve girdi boyutunu düşürerek modelin daha kolay eğitilmesini sağlar. TB katmanı diğer katmanlardan elde edilmiş öznitelikleri bütünleştirerek girdi verilerinin çıkış işlemlerini gerçekleştirebilmek için olasılık tabanlı değerlerin oluşmasına yardımcı olur [15,16].

ResNet, yayılım işlemini başarıyla gerçekleştiren bir mimaridir. Başka bir deyişle, ResNet, sonraki artık değer katmanlarını besleyen artık bloklardan oluşur. Bu özelliği ile ResNet klasik bir model değildir. ResNet-18, ResNet-50, ResNet-101, vb. mimari türleri vardır. Bu türlerin model yapısı aynı olmasına rağmen ResNet modelinin yanındaki sayılar katman sayısını ifade eder. ResNet-18 modeli 18 katmanlı bir derin evrişimsel ağ yapısına sahiptir ve ResNet modellerin girdi boyutu 224×224 piksel çözünürlüktedir. Artık bloklar, normal yapay sinir ağından daha derin ve daha derin olan ağı eğitimi kolaylaştırmaya yardımcı olur. Artık bloklar artık özellikle derin ağlarda kullanılan, tahmin sağlayan ve modelin performansına katkı sağlamayan katmanlardan kaçınan katmanlardan oluşmaktadır. Normal evrişimli ağlarda katmanlar arası veri ve özellik aktarımı yapılırken bir önceki katman veya bir sonraki katman ile doğrudan iletişim sağlanır; artık blokların kullanıldığı evrişimsel ağlarda, iki veya üç katmandan sonra katmanlarla doğrudan iletişim sağlanır. Böylece model eğitilirken gereksiz görünen ağlar atlatılarak performansa katkı sağlanır. Evrişimli ağlarda derinlik arttıkça modelin hızı azalmakta ve zaman tüketimi artmaktadır. Ayrıca derin ağların modelde birleştirilmesi sonucunda doğruluk oranlarının düşmesine neden olabilir. Bu durumda artık blokları çözüm noktası olarak kullanmak mümkün olabilir. Derin ağlarda kullanılan artık bloklar sayesinde modelin performansını olumsuz etkileyen katmanlar atlanarak doğruluğa hızlı bir şekilde ulaşılmıştır [17,18]. ResNet-X modelinin genel mimari yapısı Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. ResNet-X modelinin gelen mimari yapısı.

Bu çalışmada ResNet-18, ResNet-50 ve ResNet-101 modelleri kullanılmıştır. Bu modellerin ortak özellikleri;

- Aynı mimari yapısına sahip olması (paralel yapılı ESA modeli)
- TB katmanların aynı sayıda öznitelik vermesi
- Giriş çözünürlüklerinin 224×224 olması, vs.
- Sınıflandırıcı olarak genellikle Softmax yönteminin son katmanda tercih edilmesi.

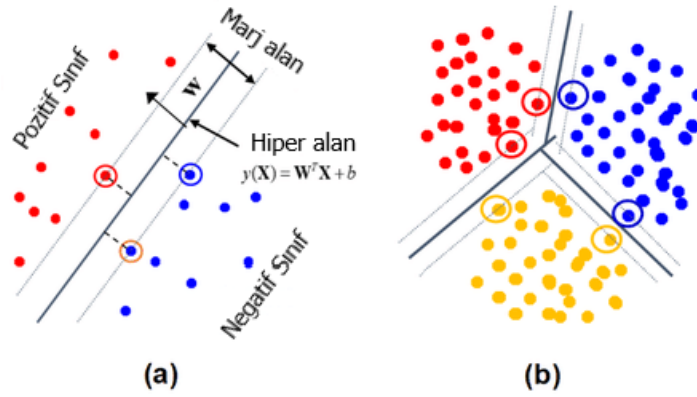
ESA modellerin genel yapısında ek bir sınıflandırma yöntemi eklenmediği sürece genellikle sınıflandırma rolünü softmax fonksiyonu üstlenir. ESA modellerinin sınıflandırma işlemini gerçekleştiren ve modellerin son katmanda yer alan aktivasyon fonksiyonu olarak ta bilinen softmax, tam bağlantılı katmanlardan işlenerek elde

edilen giriş değerlerini olasılık tabanlı [0, 1] değerlere dönüştürür. Ardından girdi verisini olasılık tabanlı değerlere göre karşılaştırarak ilgili sınıfa aktarılmasını sağlar [19,20].

3.2. Makine öğrenme yöntemleri

Makine öğrenmesi, deneyimlerden öğrenmeyi sağlayan ve hesaplama işlemini üst düzey algoritmalar kullanarak gerçekleştiren yapay zekânın alt dalıdır. Makine öğrenmesi denetimli ve denetimsiz olmak üzere işlemler gerçekleştirir. Denetimli makine öğrenmede girdi verilerinin tamamı etiketlidir ve etiketli veriler ilgili yöntem tarafından işlenerek sınıflandırma, regresyon gibi işlemleri gerçekleştirir. Denetimsiz makine öğrenmede ise veri kümesinde etiket kullanılmadan gruplaştırılması veya kümeleştirilmesi istenir [21]. Bu çalışma için DVM, en yakın komşu (EYK) yöntemi ve lineer diskriminant analizi (LDA) yöntemi kullanıldı. Bu yöntemlerden kısaca bahsetmek gerekirse;

DVM yöntemi, regresyon ve sınıflandırma işlemleri için tercih edilen popüler bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Bu yöntem girdi örneklerini işler, bunları koordinat düzlemine yerleştirir ve hiper çizgiler kullanarak türler arasında sınıflandırma yapar. Maksimum marj alanı (w) optimize edilerek belirlenir. DVM yönteminin ikili ve çoklu sınıflandırma işlemlerini gösteren açıklama Şekil 3'te verilmiştir. DVM yöntemlerinde en önemli ölçüt karar limitinin belirlenmesidir. Bu kritik adım için aşağıdaki denklemler kullanılır. Denklem 1'deki matematiksel formül sayesinde, sınıflandırma işlemi sürecinde oluşabilecek problemler en aza indirilmiştir. Önyargı değişkeni b ile temsil edilir. Denklem 2'deki X ve Y değişkenleri, öznelik değerlerini temsil eder ve bu denklem ile etiketleme işlemi gerçekleşir.



Şekil 3. DVM sınıflandırma süreci; a) ikili sınıflandırma, b) çoklu sınıflandırma [22].

$$u = w \cdot x - b \quad (1)$$

$$y_i (w \cdot x_i - b) \geq 1, \forall i \quad (2)$$

EYK yöntemi, denetimli öğrenme modeli içerisinde yer alan ve algoritma modelindeki girdi verilerinin sınıflandırma problemini çözebilen bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Sınıflandırma işleminde, veri özelliklerine benzer özellikler aynı sınıf içinde etiketlenir. Bu hesaplanırken örnek veri öznelikleri rastgele seçilir ve örnek veri özneliklerine göre diğer veri özneliklerinin uzaklıkları hesaplanır. Sonuç olarak, her özellik için EYK özellik sayısına (en fazla) bakılır. Burada parametre genellikle $\{2,3,\dots\}$ değerler seçilir. EYK yönteminin dezavantajı, her bir özellik verisi için mesafe bilgisini tutmak için bir hafıza gereksinimine ihtiyaç duymasındır. Özellikler arası mesafe ölçümleri için; "Öklid", "Manhattan", "Minkowski" yöntemlerinden biri tercih edilir [23]. Öklid formülü ile uzaklık (d) Denklem 3'e göre hesaplanır. Burada p ve q değişkenleri özellikleri temsil eder.

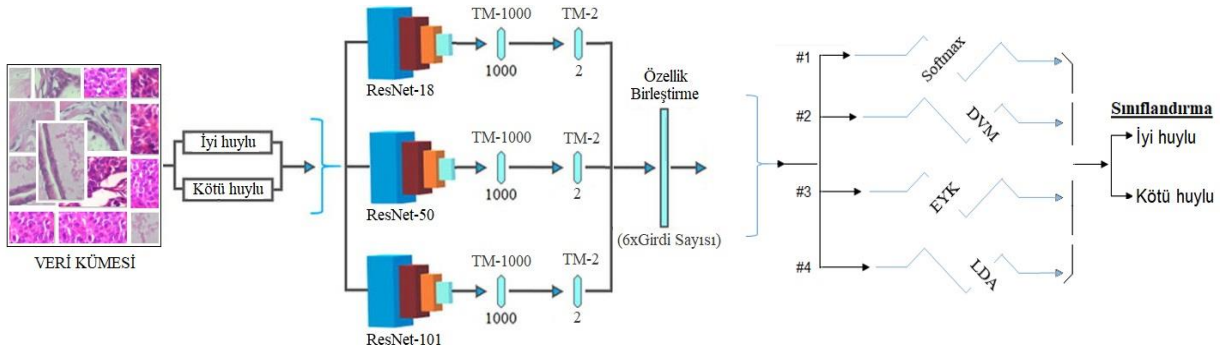
$$d(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2} \quad (3)$$

Diskriminant analizi, sınıflandırma ve boyut indirgemede kullanılacak hem sınıflandırma hem de boyut indirgeme yöntemlerini içerir. En popüler diskriminant analiz yöntemi LDA' dır. LDA, yorumlama olasılığı olan bir sınıflandırma yöntemidir. Başka bir deyişle, çok sınıflı etiketler için en iyi ayrımı sağlamak için değişkenleri doğrusal bir kombinasyonda aramaya dayanır [24].

Bu çalışmanın sınıflandırma sürecinde kullanılan makine öğrenme yöntemleri (DVM, EYK, LDA), MATLAB yazılımının hazır araç kutuları kullanılarak derlendi. Makine öğrenme yöntemlerinin parametre değerleri, MATLAB yazılımı tarafından tercih edilmiş varsayılan değerlerden oluşmuştur.

3.3. Önerilen hibrit yaklaşım

Önerilen yaklaşım, mikroskopik biyopsi görüntülerini kullanarak iyi huylu ve kötü huylu meme kanseri türlerinin sınıflandırılmasını gerçekleştiren, yapay zekâ tabanlı hibrit bir modeldir. Bu yaklaşım aynı mimariye sahip artık blokluk modellerin paralel bir yapıda kullanılmasına dayalıdır. ResNet-18, ResNet-50 ve ResNet-101 modellerinin TB katmanları aynı sayıda öznetelik vermektedir. Üç modele yeni bir TB_{tür sayısı} katmanı ekleyerek, veri kümesinin tür sayısı kadar çıkışa $TB_{tür\ sayısı} = [tür\ sayısı \times girdi\ sayısı]$ boyutunda öznetelik seti aktarılmaktadır. Örneğin iki sınıflı (iyi huylu-kötü huylu) bir veri setinin transfer öğrenme tabanlı ResNet modelleri ile eğitim sürecinde TB katmanları tarafından işlem görmekte ve sınıflandırma işlemi öncesi oluşturulmuş yeni tam bağlantılı katman (TB_2) sayesinde, $2 \times girdi\ veri\ sayısı$ boyutunda aktivasyon setleri oluşturulmaktadır. Buradaki amaç model maliyetini düşürmek ve verimliliği artırmaktır. Toplam 3 ResNet modeli bu çalışmanın deneysel analizlerinde kullanıldı ve $3x(2 \times girdi\ veri\ sayısı)$ kadar birleştirilmiş özellik seti yeniden softmax yöntemine girdi olarak verilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirildi. Ayrıca softmax'a alternatif olarak sınıflandırma işlemini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilen makine öğrenme yöntemleri de (DVM, EYK, LDA) sınıflandırma sürecinde kullanıldı. Tür sayısı kadar aktivasyon seti verebilen tam bağlantılı katmanlar ($TB_{tür\ sayısı}$) artık blokluk ESA modellerinin iş yükünü (zaman, hız maliyeti) azaltmayı sağlamıştır. $TB_{tür\ sayısı}$ katmanlarının birleştirilerek yeni bir özellik setinin oluşturulması ve yeniden makine öğrenme yöntemleri ile sınıflandırılması işlemi de önerilen yaklaşımın sınıflandırma sürecine katkı sunmuştur. Önerilen yaklaşımın genel mimari tasarımı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Önerilen yaklaşımın mimari yapısı.

4. Deneysel Analizler ve Tartışma

Bu çalışmanın analizleri için MATLAB 2020 yazılımı kullanıldı. Derin öğrenme modelleri ve makine öğrenme yöntemleri için MATLAB tarafından varsayılan değerler korunarak eğitimler gerçekleştirildi. Eğitimlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan donanımlar ve bilgileri şu şekildedir; Intel® Xeon® CPU @3.20 GHz CPU, 8 GB RAM ve 4 GB GPU destekli Nvidia Geforce ekran kartı kullanıldı. MATLAB yazılımında derlenen ResNet-18, ResNet-50 ve ResNet-101 modelleri için tercih edilmiş parametreler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. ResNet modellerinin eğitimi sürecinde tercih edilmiş parametre değerleri.

Parametre	Tercih / Değer
İterasyon sayısı	420
Dönem/Devir sayısı	4
Öğrenme oranı	0,0001
Optimizasyon	SGD
Donanım kaynağı	Tekli GPU
Mini – topluluk (mini-batch)	16
Eğitim oranı: test oranı	0.7:0.3

Karmaşıklık matrisi bu çalışmanın deneysel analizlerinde ölçüt olarak belirlenmiştir ve ölçütte kullanılan metrikler; doğruluk, kesinlik, f1-skor, geri çağırma'dır. Bu metriklerin hesaplanmasında Denklem 4-7'deki matematiksel formüller kullanıldı. Denklem 4-7 arasında kullanılan kısaltmalar; doğru (D), yanlış (Y), negatif (N), pozitif (P) anlamına gelir [25-27].

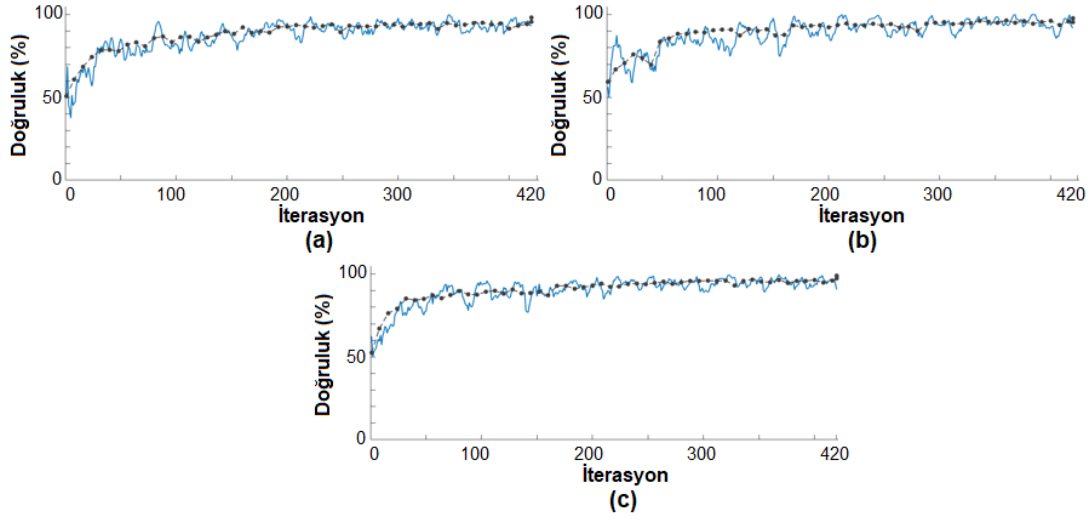
$$\text{Geri çağırma} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (4)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (5)$$

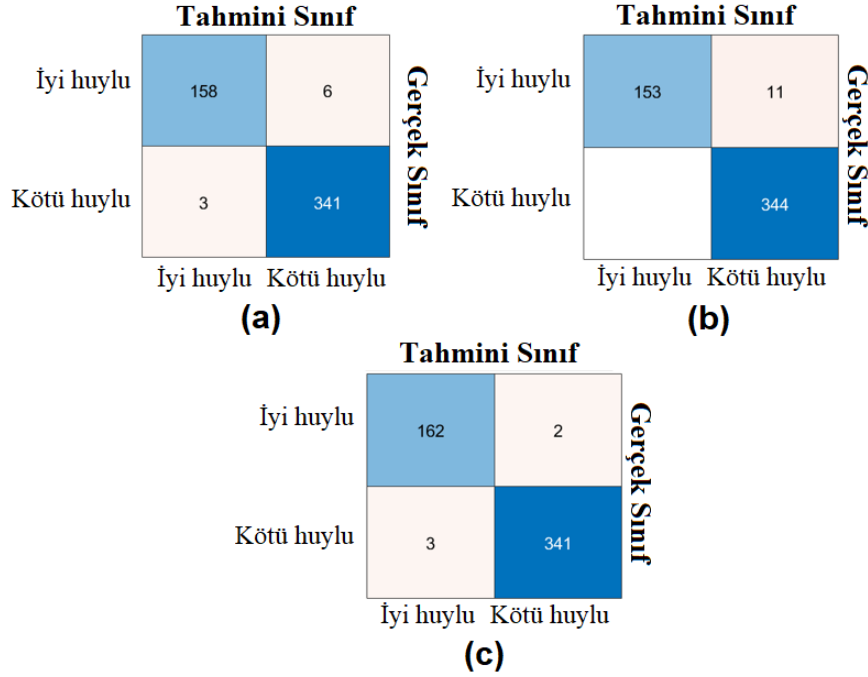
$$\text{F-skor} = \frac{2 \times DP}{2 \times DP + YP + YN} \quad (6)$$

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (7)$$

Bu çalışmada üç deney gerçekleştirildi. Birinci deney analizinde veri kümesi ResNet-18, ResNet-50 ve ResNet-101 modelleriyle eğitildi. Eğitim sürecinde sınıflandırma işlemi için softmax yöntemi kullanıldı ve softmax'a girdi verisi olarak her bir modelin TB_{1000} katmanından elde edilmiş 1000 özellik verildi. Bu deneyde modellerden elde edilmiş eğitim başarı grafikleri Şekil 5'te ve karmaşıklık matrisleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Birinci deneyin analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 5. ResNet modellerinin eğitim-test başarı grafikleri (1000 özellikli); a) ResNet-18, b) ResNet-50, c) ResNet-101.



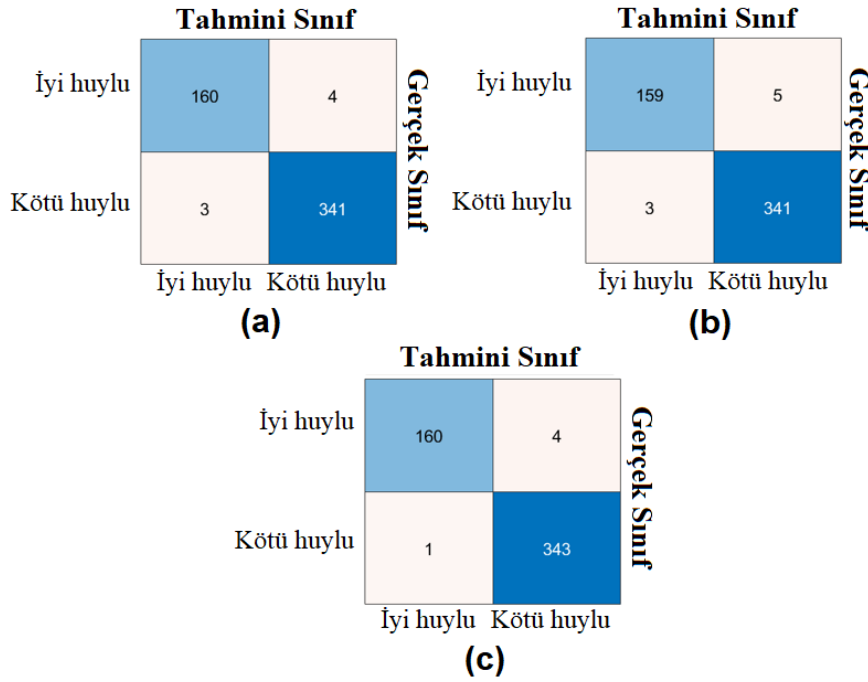
Şekil 6. ResNet modellerinden elde edilmiş karmaşıklık matrisleri (1000 özellikli); a) ResNet-18, b) ResNet-50, c) ResNet-101.

Tablo 2 incelendiğinde ResNet-18 model ile %98.23, ResNet-50 model ile %97.83 ve ResNet-101 model ile %99.02 genel doğruluk başarısı elde edilmiştir. En iyi performansı modeller arasında ResNet-101 vermiştir. Üç modelinde sınıflandırma sürecinde softmax yöntemi kullanıldı ve bu modellerin tam bağlantılı son katmanından elde edilmiş 1000 özellik seti softmax yöntemine girdi olarak verildi.

Tablo 2. ResNet modellerinden elde edilmiş karmaşıklık matrislerin (1000 özellikli) metrik sonuçları.

ESA model	Sınıf	Kesinlik	Geri çağırma	F1-skor	Doğruluk (%)
ResNet-18	İyi huylu	0,96	0,98	0,97	98,23
	Kötü huylu	0,99	0,98	0,99	
ResNet-50	İyi huylu	0,93	1,0	0,97	97,83
	Kötü huylu	1,0	0,97	0,98	
ResNet-101	İyi huylu	0,99	0,98	0,98	99,02
	Kötü huylu	0,99	0,99	0,99	

İkinci deneyde ResNet modellerin son katmanına yeni TB katman eklendi ve tür sayısı kadar çıkış veren özellik setleri elde edildi. Modeller eğitilerek TB_2 katmanından elde edilen ($2xgirdi$ sayısı) boyutundaki özellik setleri softmax yöntemi ile yeniden sınıflandırıldı. Bu deneyde modellerden elde edilmiş karmaşıklık matrisleri Şekil 7’de gösterilmiştir. İkinci deneyin analiz sonuçları Tablo 3’te verilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde ResNet-18 model ile %98.62, ResNet-50 model ile %98.43 ve ResNet-101 model ile %98.62 genel doğruluk başarısı elde edilmiştir. Üç modelinde sınıflandırma sürecinde softmax yöntemi kullanıldı ve bu modellerin tam bağlantılı son katmanından elde edilmiş 2 özellik seti softmax yöntemine girdi olarak verildi. Tablo 2 ve Tablo 3 analizleri karşılaştırıldığında tür tabanlı tam bağlantılı katmanın (TB_2) performans anlamında TB_{1000} katmanıyla yakın performans gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 7. ResNet modellerinden elde edilmiş karmaşıklık matrisleri (2 özellikli); a) ResNet-18, b) ResNet-50, c) ResNet-101.

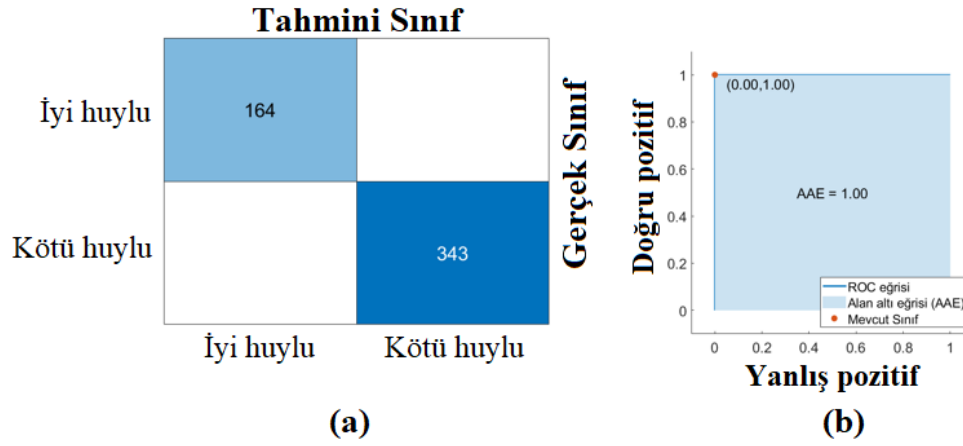
Tablo 3. ResNet modellerinden elde edilmiş karmaşıklık matrislerin (2 özellikli) metrik sonuçları.

ESA model	Sınıf	Kesinlik	Geri çağırma	F1-skor	Doğruluk (%)
ResNet-18	İyi huylu	0,98	0,98	0,98	98,62

	Kötü huylu	0,99	0,99	0,99	
ResNet-50	İyi huylu	0,97	0,98	0,98	98,43
	Kötü huylu	0,99	0,99	0,99	
ResNet-101	İyi huylu	0,98	0,98	0,98	98,62
	Kötü huylu	0,99	0,99	0,99	

Üçüncü deneyde önerilen yaklaşım veri kümesine uygulandı. Üç modelden elde edilmiş FC_2 katmanları birleştirilerek ($3 \times FC_2$) sırasıyla softmax, DVM, EYK ve LDA yöntemleri ile sınıflandırıldı. Sınıflandırma sürecinde softmax ve makine öğrenme yöntemlerinden %100 genel doğruluk başarısı elde edildi. Önerilen yaklaşımla elde edilmiş karmaşıklık matrisi ve ROC eğrisi Şekil 8’de gösterilmiştir. Üçüncü deneyin metrik sonuçları Tablo 4’te verilmiştir.

Deneyisel analizler önerilen yaklaşımın meme kanseri türlerini başarılı bir şekilde ayırt ettiğini göstermiştir. Bu çalışmada önerilen yaklaşımın her bir adımı deneylerde (deney 1, deney 2, deney 3) uygulanarak, tür tabanlı tam bağlantılı katmanın performanslarına katkı sağladığı görüldü. Ayrıca özellik setlerinin birleştirilmesi ile %100’lük genel doğruluk başarısı sınıflandırma yöntemleriyle elde edildi.



Şekil 8. Önerilen yaklaşımda, softmax ve makine öğrenme yöntemleri ile gerçekleştirilmiş analiz sonuçları; a) karmaşıklık matrisi, b) ROC eğrisi.

Tablo 4. Önerilen yaklaşımın analiz sonuçları.

ESA model	Sınıf	Kesinlik	Geri çağırma	F1-skor	Doğruluk (%)
Önerilen yaklaşım	İyi huylu	1,0	1,0	1,0	100
	Kötü huylu	1,0	1,0	1,0	

5. Sonuç

Kanser hastalığının oluşmasına sebep olan tümör, iyi huylu ve kötü huylu olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Bu çalışmada meme kanserine neden olabilecek iyi huylu ve kötü huylu tümörlerin sınıflandırılması gerçekleştirildi. Erken tanı, bu hastalığın sağ kalım oranını artırmaktadır. Bu çalışmada önerilen yaklaşım derin öğrenme modelleriyle makine öğrenme yöntemlerini bir araya getiren yeni bir karar destek sistemi sunmaktadır. Tür tabanlı yeni bir TB katmanının ESA modellerinin son katmanına entegre edilmesi, modellerin performansına katkı sağladığını göstermiştir. Ayrıca sınıflandırma sürecinde tek bir yöntem ile destek sağlanmamış, DVM, EYK, LDA yöntemleriyle de sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu seçim genel doğruluk başarısını sağlamlaştırmıştır, ancak önerilen modelin maliyetini artırmıştır. Son olarak önerilen yaklaşım da tür tabanlı TB katmanlarından elde

edilmiş özneliklerin birleştirilmesi, sınıflandırma başarısını artırmıştır. Sonuç olarak bu çalışmanın deneysel analizlerinde %100 genel doğruluk başarısı elde edilmiştir.

Gelecek çalışmada farklı görüntüleme yöntemiyle elde edilmiş veri setleri kullanılarak meme kanserinin tanı sürecinde derin öğrenme tabanlı yeni yaklaşımlar tasarlanacaktır. Veri kümelerine ön işlem adımları eklenerek girdi görüntüsünden daha verimli yararlanılacaktır. Ayrıca öznelik seçiminde daha verimli özelliklerin ön plana çıkartılabilmesi için meta-sezgisel yöntemler de önerilen yaklaşıma ilave edilecektir.

Teşekkür

Bu makale, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tarafından yürütülmüş “Meme Kanserinin İyi Huylu veya Kötü Huylu Durum Tespitinde Derin Öğrenme Modellerinin Kullanılması” adlı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. A.Ç., fikir sahibidir. F.F.A. ve M.T. deneyleri gerçekleştirdi. A.Ç. ve F.F.A., sonuçları yorumladı ve F.F.A., M.T., makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] G. Cooper, *The Development and Causes of Cancer*, 2nd ed., Sinauer Associates, Sunderland (MA), 2000. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK9963/>.
- [2] A. Patel, Benign vs Malignant Tumors, *JAMA Oncol.* 6 (2020) 1488. doi:10.1001/jamaoncol.2020.2592.
- [3] N.S. Ariffin, RUNX1 as a Novel Molecular Target for Breast Cancer, *Clin. Breast Cancer.* 22 (2022) 499–506. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clbc.2022.04.006>.
- [4] M.N. Uddin, X. Wang, Identification of Breast Cancer Subtypes Based on Gene Expression Profiles in Breast Cancer Stroma, *Clin. Breast Cancer.* 22 (2022) 521–537. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clbc.2022.04.001>.
- [5] K. Kersting, Machine Learning and Artificial Intelligence: Two Fellow Travelers on the Quest for Intelligent Behavior in Machines, *Front. Big Data.* 1 (2018). doi:10.3389/fdata.2018.00006.
- [6] A. Gastounioti, S. Desai, V.S. Ahluwalia, E.F. Conant, D. Kontos, Artificial intelligence in mammographic phenotyping of breast cancer risk: a narrative review, *Breast Cancer Res.* 24 (2022) 14. doi:10.1186/s13058-022-01509-z.
- [7] M.A. Naji, S. El Filali, K. Aarika, E.L.H. Benlahmar, R.A. Abdelouahid, O. Debauche, Machine Learning Algorithms For Breast Cancer Prediction And Diagnosis, *Procedia Comput. Sci.* 191 (2021) 487–492. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.062>.
- [8] C.G. Yedjou, S.S. Tchounwou, R.A. Aló, R. Elhag, B. Mochona, L. Latinwo, Application of Machine Learning Algorithms in Breast Cancer Diagnosis and Classification., *Int. J. Sci. Acad. Res.* 2 (2021) 3081–3086.
- [9] A. Kazemi, M. Ebrahim, A. Sheikahmadi, M. Khodamoradi, A new parallel deep learning algorithm for breast cancer classification, *12* (2021) 1269–1282.
- [10] D.A. Ragab, M. Sharkas, S. Marshall, J. Ren, Breast cancer detection using deep convolutional neural networks and support vector machines, *PeerJ.* 7 (2019) e6201. doi:10.7717/peerj.6201.
- [11] F.A. Spanhol, L.S. Oliveira, C. Petitjean, L. Heutte, A Dataset for Breast Cancer Histopathological Image Classification, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 63 (2016) 1455–1462. doi:10.1109/TBME.2015.2496264.
- [12] K. Muzaki, BreaKHis 400X, Kaggle Web. (2020). <https://www.kaggle.com/datasets/forderation/breakhis-400x?resource=download>.
- [13] W. Alsaggaf, Z. Cömert, M. Nour, K. Polat, H. Brdese, M. Toğaçar, Predicting fetal hypoxia using common spatial pattern and machine learning from cardiocography signals, *Appl. Acoust.* 167 (2020) 107429. doi:10.1016/j.apacoust.2020.107429.
- [14] M. Toğaçar, B. Ergen, Z. Cömert, Tumor type detection in brain MR images of the deep model developed using hypercolumn technique, attention modules, and residual blocks, *Med. Biol. Eng. Comput.* 59 (2021) 57–70. doi:10.1007/s11517-020-02290-x.
- [15] A. Diker, Z. Comert, E. Avci, M. Togacar, B. Ergen, A Novel Application based on Spectrogram and Convolutional Neural Network for ECG Classification, in: 2019 1st Int. Informatics Softw. Eng. Conf., IEEE, 2019: pp. 1–6. doi:10.1109/UBMYK48245.2019.8965506.
- [16] E. Başaran, A new brain tumor diagnostic model: Selection of textural feature extraction algorithms and convolution neural network features with optimization algorithms, *Comput. Biol. Med.* 148 (2022) 105857. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105857>.
- [17] A. Venkata, S. Abhishek, Resnet18 Model With Sequential Layer For Computing Accuracy On Image Classification Dataset, *10* (2022) 176–181.

- [18] S. Xie, R. Girshick, P. Dollár, Z. Tu, K. He, Aggregated Residual Transformations for Deep Neural Networks, (2016). doi:10.1109/cvpr.2017.634.
- [19] B. Gao, L. Pavel, On the Properties of the Softmax Function with Application in Game Theory and Reinforcement Learning, (2017). <http://arxiv.org/abs/1704.00805>.
- [20] Y. Luo, Y. Wong, M. Kankanhalli, Q. Zhao, Softmax: Improving Intra-class Compactness and Inter-class Separability of Features, *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.* 31 (2020) 685–699. doi:10.1109/tnnls.2019.2909737.
- [21] I. Olier, O.I. Orhobor, T. Dash, A.M. Davis, L.N. Soldatova, J. Vanschoren, R.D. King, Transformational machine learning: Learning how to learn from many related scientific problems, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 118 (2021) e2108013118. doi:10.1073/pnas.2108013118.
- [22] H. Wu, L. Wang, Z. Zhao, C. Shu, C. Lu, Support Vector Machine based Differential Pulse-width Pair Brillouin Optical Time Domain Analyzer, *IEEE Photonics J.* 10 (2018) 1–11. doi:10.1109/jphot.2018.2858235.
- [23] A. Niwatkar, Y.K. Kanse, Feature Extraction using Wavelet Transform and Euclidean Distance for speaker recognition system, in: 2020 Int. Conf. Ind. 4.0 Technol., 2020: pp. 145–147. doi:10.1109/I4Tech48345.2020.9102683.
- [24] H. Mandelkowitz, J.A. de Zwart, J.H. Duyn, Linear Discriminant Analysis Achieves High Classification Accuracy for the BOLD fMRI Response to Naturalistic Movie Stimuli, *Front. Hum. Neurosci.* 10 (2016). doi:10.3389/fnhum.2016.00128.
- [25] E. Başaran, Z. Cömert, Y. Çelik, Neighbourhood component analysis and deep feature-based diagnosis model for middle ear otoscope images, *Neural Comput. Appl.* 34 (2022) 6027–6038. doi:10.1007/s00521-021-06810-0.
- [26] A. Çalışkan, Classification of Tympanic Membrane Images based on VGG16 Model, *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, 5(1), 105-111. doi:<https://doi.org/10.34088/kojose.1081402>
- [27] H. Polat, M. Turkoglu, O. Polat, Deep network approach with stacked sparse autoencoders in detection of DDoS attacks on SDN-based VANET, *IET Commun.* 14 (2020) 4089–4100. doi:10.1049/iet-com.2020.0477.

Moleküler Kenetleme (Docking) Yöntemi ile Bakteriyel Bir Sinyal Kompleksi ve Peonidin Molekülü Etkileşiminin İncelenmesi

Arzu ÖZGEN¹, Nihan ÜNLÜ^{2*}

¹ İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü İstanbul, TÜRKİYE

² İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü İstanbul, TÜRKİYE

¹aozgen@gelisim.edu.tr

²nunlu@gelisim.edu.tr

(Geliş/Received: 16/08/2022;

Kabul/Accepted: 15/09/2022)

Öz: Gram-negatif bakterilerinden olan *Pseudomonas aeruginosa*, özellikle bağışıklık sistemi baskılanmış hastalarda önemli bir enfeksiyon sebebidir. Biyofilm oluşturma özelliği olan *P. aeruginosa* bu özelliği sebebi ile çoklu antibiyotik direncine sahiptir ve eradikasyonu güçtür. Üçlü bir sinyal dizisi olan YFiBRN, periplazmada alınan sinyallere cevap olarak yüzey adaptasyonu, biyofilm oluşumu gibi hücrel süreçlerde etkili olan c-di-GMP seviyelerini modüle eder. Antosiyantinler grubunda bulunan peonidin ise antibakteriyel özelliğe sahiptir. Bu çalışmada moleküler kenetleme (docking) metodu kullanılarak YFiR-YFiB (59-168) ile peonidin arasındaki etkileşim araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: *Pseudomonas aeruginosa*, YFiBRN, peonidin, moleküler kenetleme.

Investigation of the Interaction of a Bacterial Signal Complex and Peonidine Molecule by Molecular Docking Method

Abstract: *Pseudomonas aeruginosa*, one of the gram-negative bacteria, is an important cause of infection, especially in immunocompromised patients. *P. aeruginosa* with biofilm-forming feature has multiple antibiotic resistance due to this feature and its eradication is difficult. YFiBRN, a triple signal sequence, modulates c-di-GMP levels, which are effective in cellular processes such as surface adaptation and biofilm formation in response to signals received in the periplasm. Peonidine, which is in the group of anthocyanins, has antibacterial properties. In this study, the interaction between YFiR-YFiB (59-168) and peonidine was investigated using the molecular docking method.

Keywords: *Pseudomonas aeruginosa*, YFiBRN, peonidine, molecular docking.

1. Giriş

Farmasötik ürünlerin araştırılıp insan kullanımına sunulması bu ürünlerin in-vitro ve in-vivo doğrulama testlerini içeren karmaşık, uzun ve maliyetli bir süreçtir. Dahası aday moleküllerin ürün haline gelebilmesinden önce bu moleküller hakkında detaylı bir bilgiye sahip olmanın yanı sıra geliştirilmesi, kimyasal sentezi ve formülasyonunun optimizasyonu ve hayvanlarda olması muhtemel toksik etkilerinin çalışılması, klinik deneyler ve onay sürecini kapsamaktadır [1]. Dolayısıyla bir ilaç keşfi ortalama 12 yılı almakta ve maliyeti yaklaşık olarak 1,8 milyar ABD dolarını bulmaktadır [2]. Bu noktada ilaç geliştiriciler hem zamanı hem de maliyeti verimli kullanabilmek amacı ile bilgisayar ortamında gerçekleştirilen moleküler kenetleme uygulamaları ile aday molekülleri daha kısa zamanda belirleyebilmektedirler. Aynı zamanda moleküler kenetleme ile, potansiyel moleküllerin yan etkileri de tespit edilebilmektedir.

Pseudomonas aeruginosa, yaklaşık olarak 1-5 µm uzunluğunda ve 0.5-1.0 µm genişliğinde, hareketli, Gram negatif (-), çubuk şeklinde, aerobik ve fakültatif anaerobik solunum yapan bir bakteri türüdür [3]. 37°C'de iyi büyüyen *P. aeruginosa*, aynı zamanda 4°C-42°C arasındaki geniş bir sıcaklık aralığında da hayatta kalabilmektedir [4]. Polisiklik aromatik hidrokarbonları parçalayabilme özelliğine sahip bir toprak bakterisi olan *P. aeruginosa* bataklıklarda, deniz kıyılarında, bitki ve hayvan dokularında da büyüyebilmektedir [5].

Günümüzde antimikrobiyal direnç, çoklu ilaca dirençli (MDR) bakterilerin ortaya çıkması, yayılması ve sürekliliği ile beraber insan, hayvan ve çevre sağlığı için büyük bir tehdit haline gelmiştir [6].

* Sorumlu yazar: nunlu@gelisim.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-5410-6551, ² 0000-0003-2104-6019

Özellikle antibiyotiklerin bilinçsizce kullanımı, artan uluslararası seyahat, yetersiz hijyen ve metabolize olmayan antibiyotiklerin salınımı antibiyotik direncine zemin hazırlayan nedenler arasında bulunmaktadır [7]. Anormal antibiyotik kullanımı nedeniyle, aralarında *P. aeruginosa*'nın da bulunduğu çok sayıda bakteri MDR tiplerine dönüşmüştür. Öyle ki *P. aeruginosa* MDR fırsatçı patojeni, diğer birçok bakterinin yaşayamayacağı yüksek antibiyotik basıncı olan nişlerde büyüebilmekte ve hatta konakçı mikrobiyotasını da yerinden edebilmektedir [8].

Fırsatçı bir patojen olan *P. aeruginosa*, özellikle geç evre kistik fibrozisli hastalarda [9] ve başta kanser, AIDS gibi bağışıklık sistemi zayıf olan bireylerde ve diyabetik yaraları olan hastalarda hem akut hem de kronik enfeksiyona yol açmaktadır. Aynı zamanda kateter ve vantilatör gibi kalıcı sentetik medikal implantlarda da biyofilm oluşturmaktadır [10].

Biyofilm oluşturma özelliğine sahip olan *P. aeruginosa*, biyofilm ile ilgili araştırmalarda model organizma olarak kullanılmaktadır [3]. Biyofilm, mikroorganizmaların bir yüzeye tutunarak ekzopolisakarit "EPS" adı verilen jelsi bir tabaka içerisinde oluşturdukları topluluktur [11]. EPS içerisine gömülü olan bakteriler bu sayede fiziksel, kimyasal ve antimikrobiyal ajanlar, antikorlar ve fagositik hücrelerin üretmiş olduğu antimikrobiyal moleküller gibi biyolojik streslerden korunmuş olurlar [12]. Diğer bir deyişle biyofilmler patojenik bakterilere fiziksel koruma sağlayıp, konakçı bağışıklık sisteminden kaçmalarını kolaylaştırır ve antibiyotikleri de etkisiz hale getirir [13].

Bakteriyel ikinci haberci olan siklik-di-GMP (c-di-GMP), yüzey adaptasyonuna, biyofilm oluşumuna, hücre döngüsü ilerlemesine ve virülansa katkıda bulunur. Dolayısıyla çeşitli hücresel süreçleri etkilediği tespit edilen yaygın bir sinyal molekülüdür [14] ve *P. aeruginosa* bakterisinde de biyofilm oluşumu bu molekül tarafından düzenlenir. Son zamanlarda yapılan araştırmalar yfiBNR operonunun, periplazmada alınan sinyallere yanıt olarak hücre içi c-di-GMP seviyelerini düzenleyen üçlü bir sinyal sistemi olduğunu göstermiştir. yfiBNR operonunda bulunan YFiN, bir periplazmik PAS alanı, sitoplazmik HAMP ve katalitik GGDEF alanlarından oluşan iç zar diguanilat siklazıdır. YfiN aktivitesi, çözünür periplazmik bir protein ve negatif baskılayıcı olan YfiR'nin, PAS alanı ile etkileşime girmesi ile baskılanır [15]. YfiN aktivitesi, sistemin üçüncü bileşeni olan bir dış zar lipoproteinini YfiB tarafından da uyarılır [16].

Bir antosiyanin olan peonidin, yaban mersini, kıvılcık, mürver, ahududu tohumları ve çilek gibi meyvelerde bulunabilen flavonoidlerdendir [17]. Anti-inflamatuar aktivitesi bulunan peonidin aynı zamanda kemopreventif aktivite gösterdiği de rapor edilmiştir [18]. Ayrıca peonidin antibakteriyel özelliğe de sahip olduğu yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir [19].

Günümüz dünyasında çoklu ilaca dirençli mikroorganizmaların ortaya çıkışı ve bu mikroorganizmalar ile mücadelede yaşanan zorluklar antibiyotiklere alternatif bileşiklere olan ihtiyacı zorunlu hale getirmiştir. Çok sayıda biyolojik aktiviteye sahip olan flavonoidler aynı zamanda geniş antimikrobiyal aktiviteye de sahiptirler ve bu özellikleri ile antimikrobiyal moleküllere potansiyel adaylar olarak gösterilmektedirler. Bu sebeple çalışmamızda özellikle bağışıklık sistemi zayıf olan kişilerde enfeksiyona sebep olan *P. aeruginosa* MDR fırsatçı patojenine ait yfiBNR operonunun YFiR-YFiB (59-168) bölgesi ile bir antosiyanin olan peonidin'in moleküler kenetleme metodu ile protein-ligand etkileşimleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

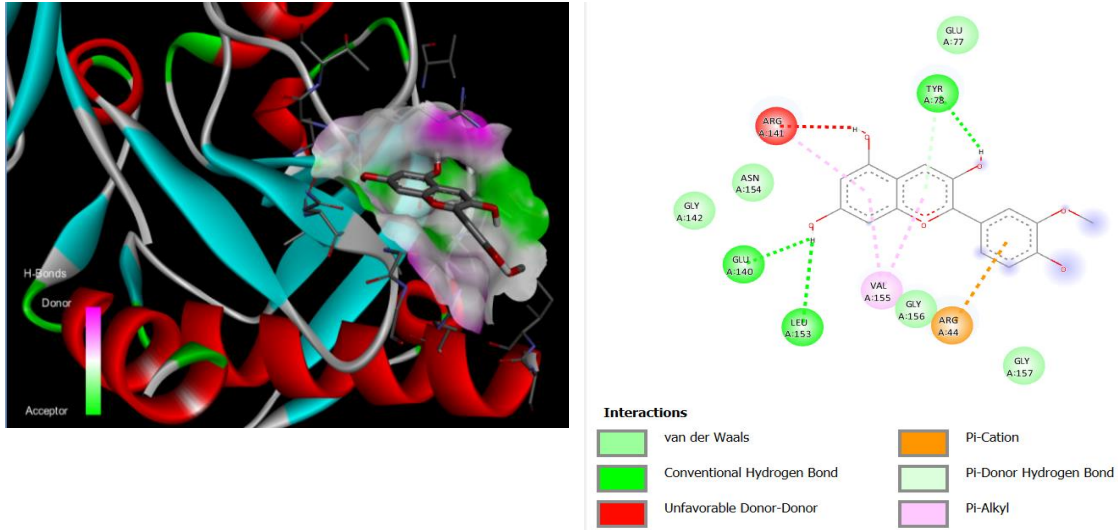
P. aeruginosa bakterisine ait YfiBNR üçlü sinyal dizisinde yer alan YFiR-YFiB (59-168) kristal yapısı (PDB ID: 4ZHY) Protein Data Bank'tan (PDB, <https://www.rcsb.org/>) temin edildi. 4ZHY'ye ait pdb dosyası A ve B zincirleri kullanılarak hazırlanmış ve AutoDockTools'a aktarılmıştır (ADT ver.1.5.6). Daha sonra su molekülleri protein yapısından uzaklaştırılmış ve 4ZHY kodlu domainin pdbqt dosyası kaydedilmiştir. Molekül yapısı C₁₆H₁₃O₆ olan Peonidin (PubChem CID: 441773) ligandının kimyasal yapısı Ulusal Tıp Kütüphanesinden (National Library of Medicine/National Center for Biotechnology Information, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) temin edilmiştir. Burulmaları incelenen ligandın dosyaları, AutodockTools (ADT ver.1.5.6) kullanılarak pdbqt formatında kaydedilmiştir.

Moleküler kenetleme çalışması Autodock 4.1 [20] kullanılarak yapılmıştır. Her yerleştirme, standart Autodock adımlarına [21] göre yapılmıştır. Moleküler yerleştirme işlemleri sonucunda elde edilebilecek en uygun bağlanma modları Autodock 4.1 ile belirlenmiş, Biovia Discovery Studio Visualizer 2021 programı ile analizler ve görseller elde edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Günümüzde gelişen teknolojiyle beraber moleküler düzeyde çalışmalarda önemli ölçüde ivme kazanmıştır ve birçok molekülün yapısı bilgisayar ortamına entegre edilebilmektedir. Dolayısıyla laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek birçok molekülün etkileşimi öncelikle bilgisayar simülasyonu ile araştırılmaktadır ve bu çalışmalar farmakoloji alanında oldukça önemlidir. Moleküler kenetleme çalışmaları sayesinde, moleküllerin birbirleri ile olması muhtemel etkileşimleri, bağlanma enerjileri, fizikokimyasal özellikleri ve biyolojik aktiviteleri gibi önemli parametreler hakkında bilgi elde edilebilmektedir [22, 23]. Moleküler kenetleme çalışmalarında birbirine bağlandığında kararlı bir kompleks oluşturması beklenen iki molekül kullanılır ve bu moleküller genellikle ligand ve reseptör olarak adlandırılmaktadır. Aynı zamanda moleküler kenetleme, protein-DNA, protein-RNA, protein-şeker, protein-peptid ve protein-küçük bileşikler gibi çift olasılıklarını da kapsamaktadır [2]. Farmasötik keşfinde genellikle ligand küçük molekül olup reseptör ise bir protein veya DNA gibi biyolojik bir makromoleküldür [24].

Bu çalışmada ligand-protein “Penoidin ve YFiR-YFiB (59-168)” etkileşimi neticesinde ortaya çıkan bağlanma enerjisi (Gibbs serbest enerji, ΔG) -5.3 kcal/mol olarak hesaplanmıştır. Sonucun negatif bir değer olması reaksiyonun ekzotermik olduğunu ve istemli bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Çalışmamızda YFiR-YFiB (59-168) reseptör ve Penoidin ise ligand olarak alınmıştır. Bu iki molekül arasında moleküler kenetleme metodu kullanılarak bir etkileşimin varlığı tespit edilmiştir. YFiR-YFiB (59-168) ve Penoidin arasındaki etkileşim Şekil 1’de gösterilmektedir. Şekildeki görsel, BIOVIA Discovery Studio Visualizer yazılım paketi kullanılarak simüle edilmiştir.

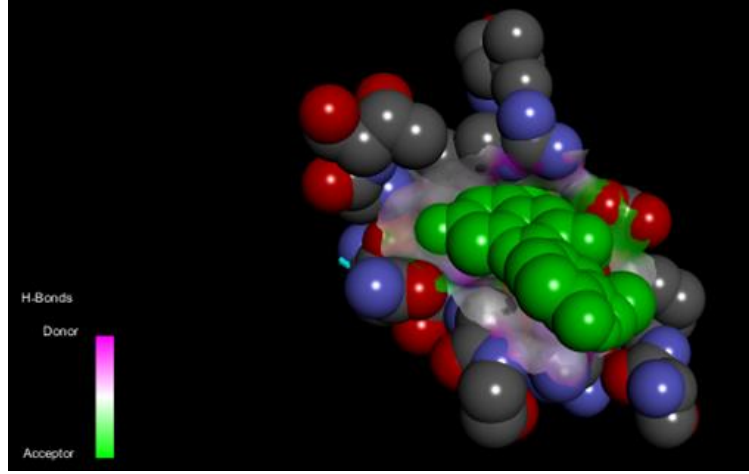


Şekil 1. YFiR-YFiB (59-168) bağlanma bölgesindeki aminoasitler ile ligand arasındaki etkileşimin 2D ve 3D gösterimi.

Ligand ile reseptör arasında van der Waals, konvansiyonel hidrojen bağı ve diğer etkileşimlerin olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 1). Moleküler kenetleme metodu kullanılarak sırasıyla üç konvansiyonel hidrojen bağı; peonidinin -O atomu ile Tyr78 rezidüsü (Uzunluk: 5.64 Å), Glu140 rezidüsü (Uzunluk: 4.50 Å) ve Leu153 rezidüsü (Uzunluk: 4.73 Å) arasında bulunmuştur. H-bağları, proteinler ve DNA da dahil olmak üzere birçok biyolojik molekülün yapısal bütünlüğünde önemli olduğu gibi ilaç-reseptör etkileşimlerinde de çok önemlidir [25]. Konvansiyonel hidrojen bağları (NH \cdots O, OH \cdots O, OH \cdots N ve NH \cdots N), biyomoleküler yapıdaki temel dengeleyici kuvvetleri temsil etmektedir [26]. Elde edilen bulgularda ayrıca ligand ile sırasıyla, bir pi-kation etkileşimi Arg44 rezidüsü (Uzunluk: 6.40 Å), bir pi-donor hidrojen bağı etkileşimi Tyr78 rezidüsü (Uzunluk: 5.64 Å) ve iki pi-alkil etkileşimi Val155 rezidüleri (Uzunluk: 4.45 Å ve 4.56 Å) arasında gerçekleşmiştir. pi-alkil bağı gibi etkileşim türleri, reseptörün bağlanma cebindeki ligandın hidrofobik etkileşimini artırmaya yardımcı olmaktadır [27]. Beş adet van der Waals etkileşimi peonidin ile reseptörün Glu77, Gly142, Asn154, Gly156 ve Gly157 rezidüleri arasında gerçekleşmiştir (Şekil 1). Van der Waals kuvvetleri, protein-ligand kompleks

oluşumunda belirleyici olmaktadır ve ligandın proteine bağlanma afinitesinde bu etkileşimlerin çok önemli olduğu çeşitli çalışmalar ile gösterilmiştir [28, 29].

Şekil 2’de ise ligandın reseptör içerisine yerleşmiş olduğu görülmektedir. Burada yeşil renk ile temsil edilen ligand ile 4HZY’nin arasında oluşan hidrojen bağı etkileşiminin varlığını gösteren yüzey verilmiştir. YFiR-YFiB (59-168) üzerinde koyu gri karbon atomunu, kırmızı oksijen atomunu, mavi nitrojeni temsil etmektedir.



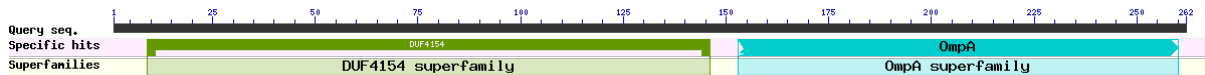
Şekil 2. 4ZHY bağlanma bölgeleri.

YFiR-YFiB (59-168) ile peonidin arasındaki bağlanma enerjisi (ΔG_{bind}), intermoleküler enerji ve toplam enerji Tablo 1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre peonidin ile YFiR-YFiB (59-168) etkileşime girmiştir.

Table 1. YFiR-YFiB (59-168) ile peonidin arasındaki moleküler doking analizi.

Reseptör	Ligand	Bağlanma enerjisi/ ΔG (kcal/mol)	Intermol enerji (kcal/mol)	Toplam internal enerji (kcal/mol)
YFiR-YFiB (59-168)	C ₁₆ H ₁₃ O ₆	-5.3	-7.09	-1.14

Peonidin, YFiR (1-150.) aminoasit dizisi üzerinde Arg44, Glu77, Tyr78, Glu140 ve Gly142 ile etkileşime girmiştir. Bu alanda DUF4154 olarak adlandırılan domain bulunmaktadır (Şekil 3) ve fonksiyonu bilinmemektedir. DUF4154 domaini üzerinde iki konvansiyonel hidrojen bağı olmak üzere bir pi-donor hidrojen bağı, iki van der Waals ve bir pi-kasyon etkileşimi bulunmaktadır. Peonidin, YFiB (151-262.) amino asit dizisi üzerinde ise Leu153, Asn154, Val155, Gly156 ve Gly157 rezidüleri ile etkileşime girmiştir. Bu alanda 153-260. aminoasit arasında OmpA-benzeri peptidoglikan-bağlanma domaini bulunmaktadır (Şekil 3) ve bu proteinler hücre morfolojisi, zar stabilitesi, biyofilm ve dış zar vezikül oluşumu için önemlidir. OmpA-benzeri peptidoglikan-bağlanma domaini üzerinde ise bir konvansiyonel hidrojen bağı olmak üzere üç van der Waals ve bir pi-alkil etkileşimi bulunmaktadır. OmpA proteinleri, doğuştan gelen bağışıklık sistemi (tamamlayıcı sistem) de dahil olmak üzere ökaryotik hücelere yapışmanın yanı sıra biyofilmlerdeki komşu bakteri hücreleriyle etkileşime girerek enfeksiyon sırasında bakteri ve konakçı arasındaki etkileşimlerde yer almaktadır [30].



Şekil 3. YFiR-YFiB (59-168) bölgesi üzerinde DUF4154 ve OmpA korunmuş domainlerinin gösterimi [31].

5. Sonuçlar

YFiBNR, *P. aeruginosa* bakterisinin biyofilm formasyonunda ve in vivo sürekliliğinde önemli bir regülatör sistemdir. Bağışıklık sistemi zayıf olan hastalarda *P. aeruginosa* ciddi enfeksiyonlara sebep olmakta ve biyofilm oluşturma özelliğine sahip olması bu bakteriye karşı tedaviyi zorlaştırmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü, karbapenem dirençli *P. aeruginosa* için yeni tedavi stratejilerine yönelik araştırma ve geliştirmeye yönelik ihtiyacın varlığını önemle vurgulamıştır [32]. Moleküler doking temelli çalışmalar ile ligand-protein etkileşim çalışmalarının hızlıca gerçekleştirilmesi yeni tedavi stratejileri için zaman ve maliyet açısından önem arz etmektedir. Yapılan bu çalışma ile bir antosiyanin olan peonidin ile YFiBNR üçlü sinyal dizisinin YFiR-YFiB (59-168) bölgesinin etkileşimi gösterilmiştir. Ligand ve protein arasında bir etkileşim meydana gelmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen sonuçların biyofilm formasyonunun inhibisyonu çalışmalarına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Sinha, S., & Vohora, D. (2018). Chapter 2 - drug discovery and development: An overview. Pharmaceutical medicine and translational clinical research (pp. 19-32). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802103-3.00002-X>
- [2] Crampon, K., Giorkallos, A., Deldossi, M., Baud, S., & Steffanel, L. A. (2022;2021;). Machine-learning methods for ligand-protein molecular docking. Drug Discovery Today, 27(1), 151-164. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2021.09.007>
- [3] Diggle, S. P., & Whiteley, M. (2020;2019;). Microbe profile: Pseudomonas aeruginosa : Opportunistic pathogen and lab rat. Microbiology (Society for General Microbiology), 166(1), 30-33. <https://doi.org/10.1099/mic.0.000860>
- [4] LaBauve, A. E., & Wargo, M. J. (2012). Growth and laboratory maintenance of pseudomonas aeruginosa. Current Protocols in Microbiology (Online), Chapter 6, Unit 6E.1.
- [5] Olson, M. V., Stover, C. K., Pham, X. Q., Erwin, A. L., Mizoguchi, S. D., Warrenner, P., Hickey, M. J., Brinkman, F. S. L., Hufnagle, W. O., Kowalik, D. J., Lagrou, M., Garber, R. L., Goltry, L., Tolentino, E., Westbrook-Wadman, S., Yuan, Y., Brody, L. L., Coulter, S. N., Folger, K. R., . . . Lory, S. (2000). Complete genome sequence of pseudomonas aeruginosa PAO1, an opportunistic pathogen. Nature (London), 406(6799), 959-964. <https://doi.org/10.1038/35023079>
- [6] Aslam, B., Wang, W., Arshad, M. I., Khurshid, M., Muzammil, S., Rasool, M. H., Nisar, M. A., Alvi, R. F., Aslam, M. A., Qamar, M. U., Salamat, M. K. F., & Baloch, Z. (2018). Antibiotic resistance: A rundown of a global crisis. Infection and Drug Resistance, 11, 1645-1658. <https://doi.org/10.2147/IDR.S173867>
- [7] Van Boeckel, T. P., Brower, C., Gilbert, M., Grenfell, B. T., Levin, S. A., Robinson, T. P., Teillant, A., & Laxminarayan, R. (2015). Global trends in antimicrobial use in food animals. Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS, 112(18), 5649-5654. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503141112>
- [8] Sohail, M., Rashid, A., Aslam, B., Waseem, M., Shahid, M., Akram, M., Khurshid, M., & Rasool, M. H. (2016). Antimicrobial susceptibility of acinetobacter clinical isolates and emerging antibiogram trends for nosocomial infection management. Revista Da Sociedade Brasileira De Medicina Tropical, 49(3), 300-304. <https://doi.org/10.1590/0037-8682-0111-2016>
- [9] Harrison, F. (2007). Microbial ecology of the cystic fibrosis lung. Microbiology (Society for General Microbiology), 153(4), 917-923. <https://doi.org/10.1099/mic.0.2006/004077-0>
- [10] Driscoll, J. A., Brody, S. L., & Kollef, M. H. (2007). The epidemiology, pathogenesis, and treatment of pseudomonas aeruginosa infections. Adis International. <https://doi.org/10.2165/00003495-200767030-00003>
- [11] Flemming, H., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. Nature Reviews. Microbiology, 8(9), 623-633. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
- [12] Hassan, A., Usman, J., Kaleem, F., Omair, M., Khalid, A., & Iqbal, M. (2011). Evaluation of different detection methods of biofilm formation in the clinical isolates. The Brazilian Journal of Infectious Diseases, 15(4), 305-311. <https://doi.org/10.1590/S1413-86702011000400002>
- [13] Newell, P. D., Boyd, C. D., Sondermann, H., & O'Toole, G. A. (2011). A c-di-GMP effector system controls cell adhesion by inside-out signaling and surface protein cleavage. PLoS Biology, 9(2), e1000587-e1000587. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000587>
- [14] Jenal, U., Reinders, A., & Lori, C. (2017). Cyclic di-GMP: Second messenger extraordinaire. Nature Reviews. Microbiology, 15(5), 271-284. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.190>
- [15] Malone, J. G., Jaeger, T., Spangler, C., Ritz, D., Spang, A., Arriemerlou, C., Kaefer, V., Landmann, R., & Jenal, U. (2010). YfiBNR mediates cyclic di-GMP dependent small colony variant formation and persistence in pseudomonas aeruginosa. PLoS Pathogens, 6(3), e1000804. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1000804>
- [16] Giardina, G., Paiardini, A., Fericola, S., Franceschini, S., Rinaldo, S., Stelitano, V., & Cutruzzolà, F. (2013). Investigating the allosteric regulation of YfiN from pseudomonas aeruginosa: Clues from the structure of the catalytic domain. PloS One, 8(11), e81324-e81324. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081324>
- [17] Mecocci, P., Tinarelli, C., Schulz, R. J., & Polidori, M. C. (2014). Nutraceuticals in cognitive impairment and alzheimer's disease. Frontiers in Pharmacology, 5, 147-147. <https://doi.org/10.3389/fphar.2014.00147>
- [18] Kwon, J. Y., Lee, K. W., Hur, H. J., & Lee, H. J. (2007). Peonidin inhibits phorbol-ester-induced COX-2 expression and transformation in JB6 P.sup.+ cells by blocking phosphorylation of ERK-1 and -2. Annals of the New York Academy of Sciences, 1095, 513. <https://doi.org/10.1196/annals.1397.055>

- [19] Sun, H., Zhang, P., Zhu, Y., Lou, Q., & He, S. (2018). Antioxidant and prebiotic activity of five peonidin-based anthocyanins extracted from purple sweet potato (*ipomoea batatas* (L.) lam.). *Scientific Reports*, 8(1), 5018-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23397-0>
- [20] Morris, G. M., Huey, R., & Olson, A. J. (2008). Using AutoDock for ligand-receptor docking. *Current Protocols in Bioinformatics*, Chapter 8, Unit 8.14.
- [21] Huey, R., Morris, G. M., & Forli, S. (2012). Using AutoDock 4 and AutoDock vina with AutoDockTools: a tutorial. *The Scripps Research Institute Molecular Graphics Laboratory*, 10550, 92037.
- [22] Baig, M. H., Ahmad, K., Roy, S., Ashraf, J. M., Adil, M., Siddiqui, M. H., Khan, S., Kamal, M. A., Provazník, I., & Choi, I. (2016). Computer aided drug design: Success and limitations. *Current Pharmaceutical Design*, 22(5), 572.
- [23] Scotti, L., & Scotti, M. T. (2015). Computer aided drug design studies in the discovery of secondary metabolites targeted against age-related neurodegenerative diseases. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 15(21), 2239.
- [24] Veit-Acosta, M., & de Azevedo Junior, W. F. (2021). The Impact of Crystallographic Data for the Development of Machine Learning Models to Predict Protein-Ligand Binding Affinity. *Current Medicinal Chemistry*, 28(34), 7006-7022.
- [25] Abelian, A., Dybek, M., Wallach, J., Gaye, B., & Adejare, A. (2021). *Pharmaceutical chemistry*. In Remington (pp. 105-128). Academic Press.
- [26] Horowitz, S., & Trievel, R. C. (2012). Carbon-oxygen hydrogen bonding in biological structure and function. *The Journal of Biological Chemistry*, 287(50), 41576-41582. <https://doi.org/10.1074/jbc.R112.418574>
- [27] Arthur, D. E., & Uzairu, A. (2019). Molecular docking studies on the interaction of NCI anticancer analogues with human phosphatidylinositol 4,5-bisphosphate 3-kinase catalytic subunit. *Journal of King Saud University. Science*, 31(4), 1151-1166. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.01.011>
- [28] Xavier, M. M., Heck, G. S., Avila, M. B. d., Levin, N. M. B., Pintro, V. O., Carvalho, N. L., & Azevedo, W. F. d. (2016). SAnDReS a computational tool for statistical analysis of docking results and development of scoring functions. *Combinatorial Chemistry & High Throughput Screening*, 19(10), 801.
- [29] Ducati, R. G., Basso, L. A., Santos, D. S., & de Azevedo, W. F. (2010). Crystallographic and docking studies of purine nucleoside phosphorylase from mycobacterium tuberculosis. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 18(13), 4769-4774. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2010.05.009>
- [30] Paulsson, M., Kragh, K. N., Su, Y., Sandblad, L., Singh, B., Bjarnsholt, T., & Riesbeck, K. (2021). Peptidoglycan-binding anchor is a pseudomonas aeruginosa OmpA family lipoprotein with importance for outer membrane vesicles, biofilms, and the periplasmic shape. *Frontiers in Microbiology*, 12, 639582-639582. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.639582>
- [31] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Structure/cdd/wrpsb.cgi>, Erişim: 12 Eylül 2022
- [32] Tacconelli, E. (2017). Global Priority List of Antibiotic-Resistant Bacteria to Guide Research, Discovery, and Development.

QR Algoritması Kullanarak Spektral Çizge Bölümleme

Mücahit Sülü^{1*}, Resul Daş²

¹Organize Sanayi Bölgesi MYO, Bilgisayar Programcılığı, İnönü Üniversitesi, 44280 Malatya, Türkiye

²Yazılım Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, 23119 Elazığ, Türkiye

*¹mucahit@inonu.edu.tr, ²rdas@firat.edu.tr,

(Geliş/Received: 07/07/2022;

Kabul/Accepted: 24/08/2022)

Öz: Bu makale çalışmasında, sayısal metotlar kullanılarak hesaplanan ve çizge analiz yöntemlerinden olan spektral çizge bölümleme algoritmasının uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulamada, 1963 yılından günümüze kadar 39 sezondur devam eden BBC yapımı Doctor Who televizyon dizisi verileri kullanılmıştır. Bu televizyon dizisinden elde edilen Doctor Who basit çizgesinde, düğümler karakterlerin dizideki isimlerini göstermektedir. i, j düğümleri arasındaki w ağırlığı ise karakterlerin aynı bölümde w kez beraber oynadığı yönsüz bir ayrıtı temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Bu veri setinde aynı bölümde beraber oynayan film oyuncularını, birlikte oynama yoğunluğuna göre iki gruba ayırmak istense nasıl bir ayrışma olurdu sorusundan yola çıkılmıştır. Bu verilerdeki ağırlıklı ilişkiler, çizge ile modellenerek, çizgenin Laplace matrisi hesaplanmıştır. Bu Laplace matrisine ait olan özdeğer ve özvektörler, QR algoritması yardımı ile elde edilmiş ve ikinci en küçük özdeğere karşılık gelen özvektör (Fiedler vektörü) satırındaki negatif ve pozitif değerler farklı gruplar oluşturacak şekilde çizge iki parçaya bölünmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çizge bölümleme, Çizge teorisi, Çizge görselleştirme.

Spectral Graph Partitioning Using QR Algorithm

Abstract: In this study, spectral graph segmentation algorithm, which is one of the graph analysis methods calculated using numerical methods, has been implemented. In practice, data from the BBC's Doctor Who television series, which continued for 39 seasons from 1963 to the present, were used. In the Doctor Who simple diagram from this television series, the nodes represent the characters' names in the series. The weight w between nodes i, j is created to represent an undirected edge where the characters play together w times in the same section. In this data set, the question of what kind of separation would be if the movie actors who played together in the same episode were to be divided into two groups according to the intensity of playing together was started. The weighted relations in these data were modeled with the graph, and the Laplace matrix of the graph was calculated. Eigenvalues and eigenvectors belonging to this calculated Laplace matrix were obtained with the help of QR algorithm and the graph was divided into two parts so that the negative and positive values in the eigenvector line corresponding to the second smallest eigenvalue (Fiedler vector) form different groups.

Keywords: Graph partitioning, Graph theory, Graph visualization.

1. Giriş

Çizge teorisi, çizge analizi, çizge ile derin öğrenme ve bunlara ait olan uygulamalara olan ilgi 21. yüzyılda büyük bir hızla artmaya devam etmektedir. Bu artışın birincil sebebi günlük hayatta karşılaştığımız ilişkiyel birçok probleme Çizge Teorisi ile çözüm bulunabilmesidir. Karşılaştığımız birçok problem, bir düğümler kümesi ve bu düğümleri birleştiren doğruların oluşturduğu ayrıtılar kümesi olarak ifade edilebilir [1]. Çizge analiz yöntemlerinden birisi olan çizge bölümleme, veri analizi ve paralel hesaplama gibi birçok alanda kullanılan bir yöntemdir. Çizge bölümlemede, çizgelerin nümerik olarak ifade edilip, hesaplama yapılması işlem kolaylığı sağlamaktadır. Birçok çizge bölümleme yöntemi vardır ve bunlardan yalnızca spektral çizge bölümleme yöntemi nümerik olarak çalışmaktadır. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte, çizgelerden elde edilen büyük matrislerin hesaplanmasında kolaylıklar

* Sorumlu Yazar: mucahit@inonu.edu.tr. Yazarların ORCID numaraları: ¹0000-0002-4114-1390, ²0000-0002-6113-4649,

sağlanmıştır. Bu matrislerin analiz edilmesinde kullanılan en iyi yöntemlerden birisi, o matrise ait olan özdeğer ve özvektörler üzerinde yapılan yorumlardır. Fiedler Laplace matrisine ait olan, ikinci en küçük özdeğere karşılık gelen özvektörü çizgenin cebirsel bağıllığı olarak isimlendirmiştir [2]. Özdeğerler bir matristeki en önemli nümerik ifadelerden birisidir ve özdeğer hesaplamak matematiksel olarak karmaşıktır. Özdeğer ve özvektör hesaplamada büyük kolaylık sağlayan QR algoritması 20.yüzyılın en iyi 10 algoritması arasında yer bulmuştur. QR algoritması 1950'lerin sonunda John G.F. Francis ve Vera N. Kublanovskaya tarafından birbirinden bağımsız olarak geliştirilmiştir [3]. QR algoritması büyük matrislerin özdeğer ve özvektör hesaplama işlemini kolaylaştırmıştır. Makale çalışmasının 2.bölümünde çizge bölümleme konusu ele alınmış, özellikle matematiksel denklemleri irdelenmiştir. 3.bölümde geliştirilen uygulamanın materyal ve metod kısımları sunulmuştur. 4. bölümde 1963 yılından günümüze kadar 39 sezondur devam eden BBC yapımı Doctor Who televizyon dizisi verileri kullanılarak düğümler karakterlerin dizideki isimleri, i, j düğümleri arasındaki w ağırlığı ise karakterlerin aynı bölümde w kez beraber oynadığı yönsüz bir ayrıtı temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Bu veri setinde aynı bölümde beraber oynayan film oyuncularını, birlikte oynama yoğunluğuna göre iki gruba ayırmak istense nasıl bir ayrışma olurdu sorusundan yola çıkılarak çizge bölümleme uygulaması adım adım gerçekleştirilmiş ve elde edilen çıktılar görsel olarak sunulmuştur. Son bölümde ise çalışmaya ait sonuç verilmiştir.

2. Çizge Bölümleme

Çizge bölümleme işlemi, çizge analiz metodlarından birisidir. Bazen bir çizgenin daha küçük bir çizge olarak ifade edilmesi işlem kolaylığı sağlar. Çizge kümeleme ile her kümenin kendi içerisinde analiz edilmesi kolaylaşır. Bir çizgedeki zayıf bağlantıları bulma, sosyal, patolojik ve biyolojik ağlardaki kliklerin kümelenmesi gibi problemler son dönemlerde önem kazanmıştır [4].

Bağlı ve yönsüz $G = (V, E)$ çizgesini ele alalım. Çizgenin düğümlerini biri birinden ayrık, birden fazla alt kümeyle ayırma işlemine **çizge bölümleme** denir. Bu alt kümeler A ve B olarak ele alalım ($A \cap B = \emptyset$), ($A, B \subset G$). $E(A, B)$ çizgenin ayracı olsun. Bölümlemenin kesme boyutu $|E(A, B)|$ olur ve buna çizgenin ayracının boyutu olarak adlandırılır.

Çizge bölümleme zor bir problemdir ve pratik çözümler buluşsal yöntemlere dayanır. İki geniş yöntem kategorisi bulunmaktadır, bunlardan birisi yerel ve diğeri küreseldir. İyi bilinen yerel yöntemler, yerel arama stratejilerinin ilk etkili 2 yönlü kesimleri olan Kernighan-Lin algoritması ve Fiduccia-Mattheyses algoritmalarıdır. Bunların en büyük dezavantajı, nihai çözüm kalitesini etkileyebilecek olan düğüm kümesinin keyfi ilk bölünmesidir. Global yaklaşımlar, tüm çizgenin özelliklerine dayanır ve rastgele bir başlangıç bölümüne dayanmaz. En yaygın örnek, bir bölümün bitişiklik matrisinin yaklaşık özvektörlerinden türetildiği spektral bölümleme veya çizge Laplacian matrisinin öz vektörlerini kullanarak çizge düğümlerini gruplayan spektral bölümlemedir.

2.1 Spektral Çizge Bölümleme

Spektral çizge bölümleme yöntemi, nümerik metotlar ile yapılmaktadır. Bu nümerik metotlardan biriside reel-simetrik olan matrislerin özdeğerleri ve özvektörlerinin hesaplanması olarak tanımlanabilir [5]. Bir çizgenin Laplace matrisi reel ve simetrik olan bir matristir. Bölümleme yapılabilmesi için ilk olarak bu matrise ait olan özdeğer ve özvektörlerin hesaplanması gerekir. Bu hesaplama sonucunda ikinci en küçük özdeğere karşılık gelen özvektör çizgenin iki parçaya bölünmesinde kullanılır. Bu yöntem ilk olarak Fiedler tarafından kullanılmıştır. Fiedler Laplace matrisine ait olan, ikinci en küçük özdeğere karşılık gelen özvektörü çizgenin cebirsel bağıllığı olarak isimlendirmiştir. Fiedler' in bu çalışması ile,

burada elde edilen özdeğe matrisin Fiedler değeri ve özvektör ise Fiedler vektörü olarak adlandırılmıştır [2]. Bu vektör çizgenin en küçük ayırıcı yani en zayıf ayrılma noktasını verir.

Çizge bölümlene işleminde, çizge kesme boyutunun minimum olması beklenir. **Kesme oranı** $\phi(A, B)$ Denklem 1 deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\phi(A, B) = \frac{|E(A, B)|}{\min(|A|, |B|)} \quad (1)$$

Bir çizgenin beklenen en iyi kesme oranına o çizgenin **izoperimetrik sayısı** denir ve Denklem 2 deki gibi hesaplanmaktadır:

$$\phi(G) = \min_{|A| \leq \frac{n}{2}} \left(\frac{|E(A, B)|}{\min(|A|, |B|)} \right) \quad (2)$$

2.2 Laplace Matrisi ve Fiedler Vektörleri

Bir çizgenin **bitişiklik matrisi** $|V| = n$ için, Denklem 3 ile verilen $n \times n$ boyutunda bir kare matristir. Burada i düğümü j düğümüne bitişik ise 1, diğer durumlarda 0 ile işaretlenir [6].

$$B_{i,j} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (3)$$

Bir çizgenin **derece matrisi** $n \times n$ boyutunda Denklem 4 ile verilen bir kare matristir. Burada i indeksi j indeksine eşit ise düğümün derecesi ile, diğer durumlarda 0 ile işaretlenir ve köşegen bir matris elde edilir [6].

$$D_{i,j} = \begin{cases} \text{deg}(v_i) & i = j \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (4)$$

Bir çizgenin bitişiklik matrisinden derece matrisinin çıkarılması ile elde edilen matris **Laplace matrisi** olarak adlandırılır, bu matris Denklem 5 teki gibi hesaplanmaktadır. Bu denkleme göre i indeksi j indeksine eşit ise düğümün derecesi, i indeksi j indeksine eşit değil fakat v_i düğümü v_j düğümüne bitişik ise -1 ve diğer durumlarda 0 ile işaretlenir [7].

$$L_{i,j} = \begin{cases} \text{deg}(v_i) & i = j \\ -1 & i \neq j \text{ } v_i v_j \text{ bitişik} \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (5)$$

3. Materyal ve Metot

G çizgesine ait olan Laplace matrisinin Fiedler vektörü $\bar{u} = (u_1, \dots, u_n)$ olsun, spektral çizge bölümlenmede s bölümlene değeri olmak üzere iki parçaya bölünen çizgede, bir parça için $u_i > s$ ve diğer parça için $s \leq u_i$ olur. Bu tip bir çizge kesmesine Fiedler kesmesi denir [1]. Bu Spektral bölümlene yöntemlerinden birisidir.

3.1 Matrislerin Özdeğer ve Özvektörünün Hesaplanması

Bir denklem sisteminde çözümün olabilmesi için, bu denklem sistemine ait katsayılar matrisi bulunduğundan sonra elde edilen vektörlerin bağımsız olması gerekir. U_1, \dots, U_n vektörleri lineer bağımsız ise;

$$c_1 U_1 + \dots + c_n U_n = 0$$

QR Algoritması Kullanarak Spektral Çizge Bölümleme

eşitliğindeki c_1, c_2, \dots, c_n katsayıları için, $c_1 = c_2 = \dots = c_n = 0$ eşitliği sağlanır. Eğer en az bir tane $c_i \neq 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$) bulunabiliyor ise bu vektörler lineer bağımsız değildir denir. X bir vektör ve A katsayılar matrisi olsun;

$$AX = \lambda X$$

eşitliğindeki λ , A matrisinin özdeğeri ve X ise λ ya karşılık gelen özdeğer vektörüdür. Buradan;

$$(a - \lambda I)X = 0$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitliğin determinantı hesaplandığında ise A matrisinin karakteristik polinomu elde edilmiş olur. Bu polinoma ait olan kökler A matrisinin özdeğerleridir[8]. Bir çok özdeğer hesaplama yöntemi vardır. Bu yöntemlerden bazıları *Kuvvet yöntemi*, *Jacobi yöntemi*, *Householder* olarak sıralanabilir. Kuvvet yöntemi ile en küçük özdeğere karşılık gelen özvektör hesaplanabilir. Jacobi yöntemi ile bütün özdeğerleri ve bunlara karşılık gelen bütün özvektörleri hesaplayabiliriz. House holder yönteminde ise, reel simetrik olan bir matris tree-diagonal bir matrise dönüşmektedir. Jacobi yönteminde bütün özdeğerler ve özvektörler bulunabildiğinden, bu çalışmada, bu yöntem yer verilmiştir. Jacobi yöntemi simetrik matrisler için özdeğer ve özvektör hesaplamada kullanılmaktadır. Bir çizgenin Laplace matrisi de simetrik bir matristir ve Jacobi yönteminin kullanılması için uygundur.

3.2 QR Algoritması

Bir matristeki en önemli nümerik ifadelerden biriside özdeğerlerdir ve özdeğer hesaplamak gerçekten karmaşık bir süreçtir. QR algoritması 20.yüzyılın en iyi 10 algoritması arasında kendisine yer bulmuştur. QR algoritmasının 1950'lerin sonunda John G.F. Francis ve Vera N. Kublanovskaya tarafından birbirinden bağımsız olarak geliştirildiği bilinmektedir [3]. QR algoritması, A matrisini, $A=QR$, Q üst köşegen ve R ortogonal matrisleri olmak üzere iki matrise ayrılarak ilerleyen bir takım işlemler dizisinden oluşur. 1960'ların ortalarından günümüze kadar QR algoritması büyük matrislerin özdeğer problemlerini kolaylaştırmış ve kolaylaştırmaya devam etmektedir.

3.2.1 Gram-Schmidt yöntemi ile QR dönüşümü

Gram-Schmidt iterasyonu ile Q matrisini aşağıdaki adımları takip ederek elde edebiliriz. $A = [a_1|a_2|, \dots, |a_n]$ matrisinin sütun vektörleri $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ olmak üzere;

$$\begin{aligned} u_1 &= a_1 & e_1 &= \frac{u_1}{\|u_1\|} \\ u_2 &= a_2 - (a_2^T e_1)e_1 & e_2 &= \frac{u_2}{\|u_2\|} \\ \vdots & & \vdots & \\ u_{k+1} &= a_{k+1} - (a_{k+1}^T e_1)e_1 - \dots - (a_{k+1}^T e_k)e_k & e_k &= \frac{u_k}{\|u_k\|} \end{aligned}$$

$$A = [a_1|a_2|, \dots, |a_n] = [e_1|e_2|, \dots, |e_n] \begin{vmatrix} a_1 e_1 & a_2 e_1 & \dots & a_n e_1 \\ 0 & a_2 e_2 & \dots & a_n e_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_n e_n \end{vmatrix}$$

Q matrisi elde edildikten sonra $A = QR \Rightarrow Q^T A = Q^T QR \Rightarrow R = Q^T A$ şeklinde R matriside elde edilebilir[9].

3.2.2 QR Algoritması ile Özdeğerler ve Özvektörlerin Hesaplanması

A matrisine ait olan özdeğer ve özvektörlerin QR ayrışımı ile hesaplayabilmek için önce A matrisi Q ortogonal ve R üst köşegen matrislere ayırmamız gerekir.

$$A = QR$$

Daha sonra elde ettiğimiz Q ortogonal ve R üst köşegen matrisler;

$$A_1 = RQ, S = Q$$

şeklinde çarpıldığında A_1 ve S matrisleri elde edilir. Elde edilen bu A_1 matrisi yeniden QR ayrışımı ile Q_1 ortogonal ve R_1 üst köşegen matrislere ayrılır. Daha sonra elde edilen Q_1 ortogonal ve R_1 üst köşegen matrisler;

$$A_2 = R_2Q_2, S_1 = QQ_1$$

şeklinde çarpıldığında A_2 ve S_1 matrisi elde edilir.

$$\begin{aligned} A &= QR \\ A_1 &= RQ & S &= Q \\ A_1 &= Q_1R_1 & S_1 &= QQ_1 \\ \vdots & & \vdots & \\ A_n &= Q_nR_n & S_n &= QQ_1Q_2\dots Q_n \end{aligned}$$

Bu işlemler dizisi A_n matrisi köşegen matris oluncaya kadar devam ettirilir. Bu işlemler dizisi sonunda, A_n özvektörler ve S_n özdeğerler olarak elde edilmiş olur [10].

4. Çizge Bölümleme Uygulaması

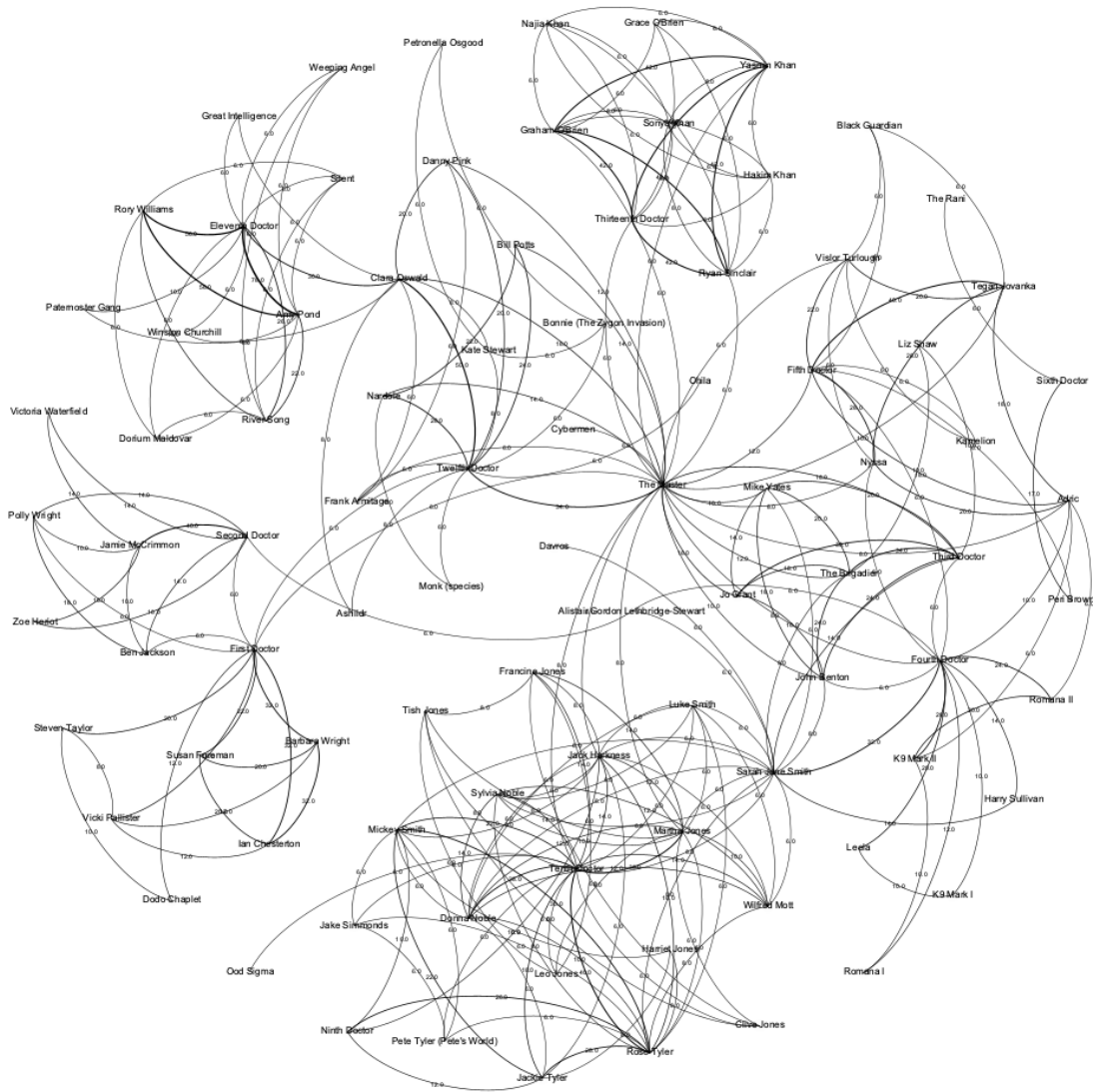
Doctor Who, 1963 yılından günümüze kadar uzanan 39 sezonluk, BBC yapımı televizyon dizisidir. Doctor Who basit çizgesinde, düğümler karakterlerin dizideki isimlerini ve i,j düğümleri arasındaki w ağırlığı ise karakterlerin aynı bölümde w kez beraber görüldüğü yönsüz bir ayrıtı temsil etmektedir[11]. Bu veri setinde $w > 5$ olacak şekilde filtreleme yapılmış ve en çok beraber oynayan oyuncular iki gruba ayrılmak istenseydi bu gruplaşma nasıl olurdu sorusundan yola çıkarak çizge bölümleme algoritması uygulanmıştır. Veri setimiz 90 adet düğüm ve 252 adet ayrıtı içermekte olup, düğümler kümesi şu şekildedir;

Adric, Fifth Doctor, Fourth Doctor, K9 Mark II, Nyssa, Romana II, Tegan Jovanka, The Master, Alistair Gordon Lethbridge-Stewart, Sarah Jane Smith, Second Doctor, Amy Pond, Dorium Maldovar, Eleventh Doctor, River Song, Rory Williams, Silent, Weeping Angel, Winston Churchill, Ashildr, Clara Oswald, Twelfth Doctor, Barbara Wright, First Doctor, Ian Chesterton, Susan Foreman, Vicki Pallister, Ben Jackson, Jamie McCrimmon, Polly Wright, Bill Potts, Nardole, Black Guardian, Vislor Turlough, Bonnie (The Zygon Invasion), Kate Stewart, Petronella Osgood, Danny Pink, Frank Armitage, Great Intelligence, Paternoster Gang, Clive Jones, Francine Jones, Martha Jones, Tenth Doctor, Tish Jones, Cybermen, Davros, Dodo Chaplet, Steven Taylor, Donna Noble, Jack Harkness, Jackie Tyler, Luke Smith, Mickey Smith, Rose Tyler, Sylvia Noble, Wilfred Mott, Kamelion, Peri Brown, Harry Sullivan, John Benton, K9 Mark I, Leela, Romana I, Third Doctor, Leo Jones, Grace O'Brien, Graham O'Brien, Ryan Sinclair, Thirteenth Doctor, Yasmin Khan, Hakim Khan, Najia Khan, Sonya Khan, Harriet Jones, Ninth

QR Algoritması Kullanarak Spektral Çizge Bölümleme

Doctor, Jake Simmonds, Pete Tyler (Pete's World), Victoria Waterfield, Zoe Heriot, Jo Grant, Mike Yates, The Brigadier, Liz Shaw, Monk (species), Ohila, Ood Sigma, Sixth Doctor, The Rani

Şekil 1 ile verilen ilişki çizgesi, oyuncuları gösteren düğümlerin diğer oyuncular ile w ağırlığı kez birlikte oynadığını gösterecek şekilde oluşturulmuş ve ağırlığı fazla olan ayrıtlar daha kalın olarak belirtilmiştir [12].



Şekil 1: Temizlenmiş verilerin ağırlıklı ilişki çizgesi

Şekil 1 ile verilen ilişki çizgesinin Laplacian matrisi Denklem 5 teki gibi hesaplandığında, Şekil 2 deki 90x90 boyutundaki matris elde edilir.

Mücahit Sülü, Resul Daş

1.054093e-01	-4.619987e-02	1.606018e-02	3.773949e-02	-1.232141e-02	-7.622596e-03
1.619086e-01	-1.952787e-02	-4.597660e-02	-1.714107e-02	-1.521206e-02	4.506028e-03
3.495194e-04	-2.036769e-02	-4.926652e-02	3.873384e-02	-2.697107e-16	-9.727252e-05
3.856585e-03	1.777260e-02	5.414384e-02	5.086024e-04	9.974660e-18	-6.722053e-17
1.318390e-16	-2.112485e-02	1.786368e-02	2.820680e-02	-3.857684e-03	3.970917e-02
8.236011e-03	-1.043003e-03	-3.221791e-02	-6.731917e-18	-4.747378e-17	2.135484e-17
4.219579e-03	1.092434e-02	-3.773767e-04	-9.364315e-18	7.134620e-17	-6.372918e-16
5.342231e-18	-5.566974e-03	5.473404e-02	4.736564e-04	-2.409180e-03	2.539855e-03
1.498665e-17	-2.541955e-18	3.784398e-17	1.291367e-19	-9.707111e-18	-1.445207e-17
-8.252136e-18	-2.899542e-03	4.574246e-02	5.163993e-04	3.650649e-02	-2.460517e-18
-7.758347e-16	-8.283647e-17	-1.078719e-01	-1.099622e-04	7.535367e-02	-2.451067e-02
2.256952e-18	7.882018e-02	-1.931047e-02	-1.141856e-03	-7.937662e-02	-6.657660e-16
5.618327e-17	-6.862183e-17	3.989211e-17	-8.778140e-17	2.176594e-03	-9.492689e-02
1.051754e-03	4.057707e-03	-5.701786e-03	3.529843e-03	-4.189202e-02	3.930740e-03
8.883252e-03	9.129640e-01	-1.476338e-01	-1.828812e-01	5.242424e-02	6.252110e-02

İkinci en küçük özdeğere karşılık gelen özvektörleri, düğüm listemiz ile sıralı olarak eşleştirip pozitifleri bir grupta ve negatifleri diğer grupta toplayacak olursak, aşağıda listelendiği gibi, pozitifler ve negatifler grupları elde edilir.

Pozitifler grubu;

Adric,Fourth Doctor,K9 Mark II,Tegan Jovanka,Amy Pond,Dorium Maldovar,Rory Williams,Winston Churchill,Ashildr,Clara Oswald,Twelfth Doctor,Barbara Wright,Ian Chesterton,Vicki Pallister,Ben Jackson,Polly Wright,Bill Potts,Kate Stewart,Petronella Osgood,Danny Pink,Paternoster Gang,Francine Jones,Tenth Doctor,Tish Jones,Davros,Dodo Chaplet,Donna Noble,Jack Harkness,Sylvia Noble,Wilfred Mott,Kamelion,Romana I,Leo Jones,Grace O'Brien,Hakim Khan,Sonya Khan,Ninth Doctor,Pete Tyler (Pete's World),Victoria Waterfield,Jo Grant,The Brigadier,Liz Shaw,Monk (species),Sixth Doctor,The Rani

Negatifler grubu;

Fifth Doctor,Nyssa,Romana II,The Master,Alistair Gordon Lethbridge-Stewart,Sarah Jane Smith,Second Doctor,Eleventh Doctor,River Song,Silent,Weeping Angel,First Doctor,Susan Foreman,Jamie McCrimmon,Nardole,Black Guardian,Vislor Turlough,Bonnie (The Zygon Invasion),Frank Armitage,Great Intelligence,Clive Jones,Martha Jones,Cybermen,Steven Taylor,Jackie Tyler,Luke Smith,Mickey Smith,Rose Tyler,Peri Brown,Harry Sullivan,John Benton,K9 Mark I,Leela,Third Doctor,Graham O'Brien,Ryan Sinclair,Thirteenth Doctor,Yasmin Khan,Najia Khan,Harriet Jones,Jake Simmonds,Zoe Heriot,Mike Yates,Ohila,Ood Sigma

Bu ayrışma işlemine göre, yeni oluşan çizgemiz, pozitifler grubu yeşil renk ve negatifler grubu kırmızı renk ile işaretlenerek, Şekil 5'de verilmiştir.

5. Sonuç

Sayısal metotlar kullanılarak hesaplanan spektral çizge bölümlene algoritması çizge analizinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Büyük verilerden elde edilen büyük matrisler ile yapılacak işlemler zor ve karmaşık gözükse de, günümüzde bilgisayarlar yardımı ile bu hesaplamalar rutin işlemlere dönüşmüştür. Uygulamamızda, 1963 yılından günümüze kadar 39 sezondur devam eden BBC yapımı Doctor Who televizyon dizisinden alınmış olan veriler kullanılmıştır. Bu televizyon dizisinden elde edilen Doctor Who basit çizgesinde, düğümler karakterlerin dizideki isimlerini göstermektedir. i, j düğümleri arasındaki w ağırlığı ise karakterlerin aynı bölümde w kez beraber oynadığı yönsüz bir ayrıtı temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. $w > 5$ olacak şekilde veri setinde filtreleme yapılmış, bunun sonucunda 90 adet düğüm ve 252 adet ayrıtı içeren bir veri seti elde edilmiştir. Bu veri setinde aynı bölümde beraber oynayan film oyuncularını, birlikte oynama yoğunluğuna göre iki gruba ayırmak istense nasıl bir ayrışma olurdu sorusundan yola çıkılmıştır. Bu verilerdeki ağırlıklı ilişkiler, çizge ile modellenmiş ve bu çizgenin Laplace matrisi elde edilmiştir. QR algoritması ile bu Laplace matrisinin özdeğer ve özvektörleri elde edilerek ikinci en küçük özdeğere karşılık gelen özvektör (Fiedler vektörü) çizgenin iki parçaya bölünmesinde kullanılmıştır. Çizge bölmeleme algoritmaları, çizge analiz yöntemlerinden birisidir ve tüm ilişkiler veriler üzerinde analiz amaçlı kullanılır.[5]

Kaynakça

- [1] N. Deo, *Graph theory with applications to engineering and computer science*. Courier Dover Publications, 2017.
- [2] A. Kaveh, *Structural mechanics: graph and matrix methods*. Macmillan International Higher Education, 1992, vol. 6.
- [3] J. G. F. Francis, “The QR Transformation A Unitary Analogue to the LR Transformation—Part 1,” *The Computer Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 265–271, Jan. 1961, ISSN: 0010-4620. DOI: 10.1093/comjnl/4.3.265. eprint: <https://academic.oup.com/comjnl/article-pdf/4/3/265/1080833/040265.pdf>. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/comjnl/4.3.265>.
- [4] A. Buluç, H. Meyerhenke, I. Safro, P. Sanders, and C. Schulz, “Recent advances in graph partitioning,” in *Algorithm Engineering: Selected Results and Surveys*, L. Kliemann and P. Sanders, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 117–158, ISBN: 978-3-319-49487-6. DOI: 10.1007/978-3-319-49487-6_4. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49487-6_4.
- [5] B. Hendrickson and R. Leland, “An improved spectral graph partitioning algorithm for mapping parallel computations,” *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 16, no. 2, pp. 452–469, 1995. DOI: 10.1137/0916028. eprint: <https://doi.org/10.1137/0916028>. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1137/0916028>.
- [6] T. Uçkan, C. Hark, E. Seyyarer, and A. Karcı, “Ağırlıklandırılmış çizgelerde tf-idf ve eigen ayrışımı kullanılarak metin sınıflandırma,” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 4, pp. 1349–1362, 2019, ISSN: 2147-3129. DOI: 10.17798/bitlisfen.531221.
- [7] R. Merris, “Laplacian matrices of graphs: A survey,” *Linear Algebra and its Applications*, vol. 197-198, pp. 143–176, 1994, ISSN: 0024-3795. DOI: [https://doi.org/10.1016/0024-3795\(94\)90486-3](https://doi.org/10.1016/0024-3795(94)90486-3). [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0024379594904863>.
- [8] A. Gusrialdi and Z. Qu, “Distributed estimation of all the eigenvalues and eigenvectors of matrices associated with strongly connected digraphs,” *IEEE Control Systems Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 328–333, 2017. DOI: 10.1109/LCSYS.2017.2717799.

QR Algoritması Kullanarak Spektral Çizge Bölümleme

- [9] R. T. Kobayashi and T. Abrão, “Stability analysis in gram-schmidt qr decomposition,” *IET Signal Processing*, vol. 10, no. 8, pp. 912–917, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-spr.2016.0123>. eprint: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/iet-spr.2016.0123>. [Online]. Available: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-spr.2016.0123>.
- [10] D. Watkins, “Understanding the qr algorithm, part ii,” *SIAM Review*, vol. 24, Oct. 1982. DOI: 10.1137/1024100.
- [11] M. Dileo. “Doctor Who dataset.” (), [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/manueldileo/doctor-who-dataset>. (accessed: 06.06.2022).
- [12] M. Bastian, S. Heymann, and M. Jacomy, “Gephi: An open source software for exploring and manipulating networks,” 2009. [Online]. Available: <http://www.aaai.org/ocs/index.php/ICWSM/09/paper/view/154>.



Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

Telif Hakkı Devir Formu / Copyright Form

Biz aşağıda gerekli bilgileri bulunan,

[Yazarların Adı / Author names]

.....tarafımızdan yazılmış,

[Makale Adı / Article title]

.....

başlıklı makale içeriği, sunduğu sonuç, bilgi, bulgu ve yorumları konusunda, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'nün hiç bir sorumluluk taşımadığını kabul ederiz.

Sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; herhangi bir başka dergiye yayınlanmak üzere gönderilmediğini; daha önce yayınlanmadığını; tümüyle yada bir bölümü herhangi bir kongre/sempozyum da sunulup fakat tam metin olarak basılmadığını ve orijinal telif hakkı devri formu ile birlikte Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz. Bu vesileyle makalenin telif hakkı Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' ne devredilmiştir. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazarların aşağıdaki hakları saklıdır:

Aşağıdaki ve diğer bütün durumlarda makalenin Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi tarafından yayınlandığına dair referans verilmelidir.

1. Telif Hakkı dışında kalan patent v.b. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.
3. Yazarın gelecekteki kitaplar ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü ya da bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.

Bütün yazarlar tarafından imzalanması gerekiyor: (Sorumlu yazar/Corresponding author*)

Yazarın Adı ve Soyadı / Author Names

İmzası / Signature

Tarih / Date

1

2

3

4

5

NOT: Eksik imza durumunda sorumluluk imzalayan yazarlara aittir. Lütfen formu doldurunuz, imzalayınız ve aşağıdaki adrese metinle birlikte gönderiniz.

Adres: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 23119-Elazığ.