

FEN BİLİMLERİ VE MATEMATİK ALANINDA GÜNCEL METODOLOJİK YAKLAŞIMLAR

EDİTÖR
PROF. DR. HÜSNİYE SAĞLIKER

Fen Bilimleri ve Matematik Alanında Güncel Metodolojik Yaklaşımlar

Editör

Prof. Dr. Hüsniye Sağlıker

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editörler
Prof. Dr. Hüsniye Sağlıker

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Mart, 2026

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8513-10-7

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1.....	5
Mikroplastiklerin Böcek Fizyolojisi ve Ekosistem Hizmetleri Üzerindeki Etkileri	
Zübeyde Nur Yalçın & Sakin Vural Varlı	
BÖLÜM 2.....	29
Makine Öğrenmesi ve Doğal Dil İşleme Tabanlı Kod Klon Tespiti: TF-IDF ve Gömme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi	
Yeliz Balcı & Işıl Karabey Aksakal & Nursena Bayğın	
BÖLÜM 3.....	51
Meme Kanseriinde Doksorubisin Kullanımı	
Gamze Namalır & Metin Konuş & Menderes Suiçmez	
BÖLÜM 4.....	67
Uzun Kodlanmayan RNA'ların Meme Kanseriinde Rolü	
Gamze Namalır & Menderes Suiçmez & Metin Konuş	
BÖLÜM 5.....	83
Refraksiyon Kusurları ve Gözlükle Düzeltme Stratejileri	
Şeydanur Taşer	
BÖLÜM 6.....	105
Yakıt Hücrelerinde Nanokatalizörler ve Nanoelektrot Sistemleri	
Zehra Nur Özer & Mehmet Özkan & Merve Kuzu	
BÖLÜM 7.....	118
Afet Dinamik Haberleşme Ağlarındaki Cihazların Enerji Verimliliğine Yönelik Matematiksel Modelleme ve Graf Teorisi Tabanlı Optimizasyonu	
Zarife Gökçen Karadem	
BÖLÜM 8.....	133
Kara Delikler ve Kozmolojik Dinamikler	
Emine Canan Günay Demirel	



BÖLÜM 1

Mikroplastiklerin Böcek Fizyolojisi ve Ekosistem Hizmetleri Üzerindeki Etkileri

Zübeyde Nur Yalçın¹ & Sakin Vural Varlı²

1. GİRİŞ

Plastikler, dayanıklılık, işlenebilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları sayesinde insan inovasyonunun bir ürünü olarak doğal ham maddelerin yerini almış ve küresel ölçekte devasa bir üretim hacmine ulaşmıştır (Akça & Ok, 2021). Ancak bu endüstriyel başarı, plastiklerin doğada son derece yavaş ayrışması ve üretilen toplam miktarın yalnızca %9'unun geri dönüştürülebiliyor olması nedeniyle küresel bir çevre krizine dönüşmüştür. Plastik üretiminin 1950-2018 yılları arasında 360 milyon tona yaklaştığı ve bu şekilde devam ederse 2050 yılına kadar korkutucu boyutlara ulaşabileceği öngörülmektedir (Liu et al., 2019; Du & Wang, 2021; Das et al., 2025).

Mikroplastikler (MP), büyük plastik materyallerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerle parçalanması ya da doğrudan mikroskobik boyutlarda üretilmesi sonucu oluşan ve 5 mm'den küçük parçacıklar olarak tanımlanmaktadır (Rochman et al., 2015; Geremia et al., 2023). Günümüzde mikroplastiklerin kara, sucul ve atmosferik ekosistemlerin tamamında yaygın biçimde tespit edildiği bildirilmektedir (Rochman et al., 2019). Plastiklerin çevresel bozunumunun son derece yavaş gerçekleşmesi, mikroplastiklerin kalıcı kirleticiler hâline gelmesine neden olmaktadır (Li et al., 2024).

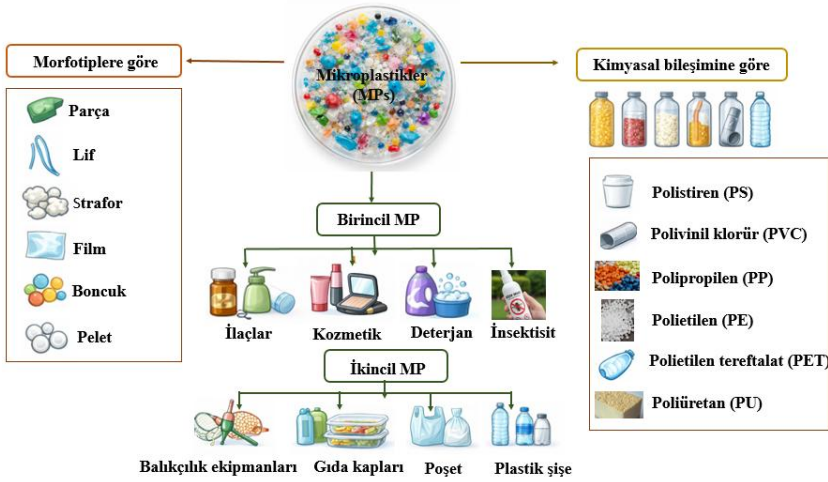
Mikroplastikler, oluşum süreçlerine göre birincil ve ikincil mikroplastikler olarak iki ana kategoride sınıflandırılmaktadır. Birincil mikroplastikler; kozmetik ürünler, yüz temizleyicileri ve çeşitli endüstriyel aşındırıcılarda kullanılmak üzere doğrudan mikron boyutlarında üretilen plastik parçacıkları, lifleri veya tozları kapsamaktadır. İkincil mikroplastikler ise doğaya atılan makro boyutlu plastik atıkların; güneş ışığına bağlı fotolitik süreçler, mekanik aşınma, kimyasal tepkimeler veya biyolojik aktiviteler sonucunda parçalanarak daha küçük formlara dönüşmesiyle meydana gelmektedir (Şekil 1) (Rochman et al., 2015; Helmberger et al., 2020; Fudlosid et al., 2022; Song et al., 2022; Bostan et al., 2023). Bu parçalanma sürecinin ilerlemesiyle mikroplastiklerin daha da

¹ Dr., Balıkesir Üniversitesi, 0000-0001-6160-2222

² Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, 0000-0002-9851-3490

küçülerek nanoplastik boyutlarına dönüşebildiği bildirilmiştir (Geremia et al., 2023).

Son yıllarda mikroplastiklerin omurgasız organizmalar üzerindeki etkileri giderek daha fazla ilgi görmeye başlamış; özellikle hem sucul hem de karasal ekosistemlerde kilit rollere sahip olan böceklerin, mikroplastik kirliliğinin biyo-indikatörleri ve trofik taşıyıcıları olarak öne çıktığı vurgulanmaktadır (Rochman et al., 2019; Li et al., 2024). Böcekler, ekosistemlerde besin döngüsü, tozlaşma, ayrışma ve biyolojik mücadele gibi temel işlevlerin ana taşıyıcıları olmalarının yanı sıra, yeryüzündeki en yaygın ve tür çeşitliliği en yüksek hayvan grubunu oluşturmaktadır (Zhang et al., 2025). Bununla birlikte, habitat kaybı, iklim değişikliği ve kirlilik gibi çoklu çevresel baskılar altında hızla azalan böcek popülasyonları için mikroplastikler, çevredeki yaygınlıkları ve çoklu maruziyet yolları nedeniyle yeni ve potansiyel olarak önemli stres faktörleri arasında değerlendirilmektedir (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019; Wei et al., 2025). Böceklerin yaşam döngülerinin farklı evrelerinde toprak, su ve atmosfer gibi ortamlarla etkileşim hâlinde olmaları, mikroplastiklerle temas ve alım riskini artırmakta ve bu kirleticilerin ekosistem işleyişi üzerindeki dolaylı etkilerini daha da kritik hâle getirmektedir (Alma et al., 2023; Li et al., 2024).



Şekil 1:

Plastiklerin çevrede bulunma biçimlerinin farklılıkları (Das et al., 2025)

2. MİKROPLASTİKLERİN EKOSİSTEMLERDEKİ DİNAMİĞİ

2.1. Sucul Ekosistemlerde Mikroplastik Birikimi

Karasal kaynaklar ve atık su arıtma tesisleri aracılığıyla tatlı su ekosistemlerine taşınan mikroplastikler, özellikle kozmetik ürünlerden

kaynaklanan yoğun partikül salımı nedeniyle giderek artan bir çevre sorunu haline gelmiştir (Napper et al., 2015). Çapı 5 mm'den küçük olan bu parçacıkların farklı trofik seviyeler arasında aktarılabilirdiği ve her yıl milyonlarca ton plastiğin denizel ortamlara ulaştığı yapılan çalışmalarla bildirilmiştir (Mason et al., 2016; Al-Jaibachi et al., 2019).

Sucul ekosistemler, atık sular, yüzey akışı ve atmosferik çökeltme yoluyla taşınan mikroplastiklerin biriktiği; bu partiküllerin sedimente bağlanarak özellikle bentik habitatlarda yoğunlaştığı dinamik sistemlerdir. Bu durum, sucul omurgasızlar için kronik bir maruziyet kaynağı oluşturmaktadır (Andrady, 2011; Wagner et al., 2014). Özellikle Diptera, Ephemeroptera, Trichoptera ve Odonata takımlarına ait sucul böcek larvaları, filtreye beslenme ve detritivor davranışları nedeniyle mikroplastikleri besinle birlikte sindirim sistemlerine alabilmekte; biriken partiküller büyüme, gelişim ve fizyolojik süreçleri olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Au et al., 2015; Windsor et al., 2019). Bu özellikleriyle sucul böcekler, mikroplastiklerin ekosistem düzeyindeki etkilerinin değerlendirilmesinde önemli biyogösterge organizmalar olmuştur (Setälä et al., 2014; Scherer et al., 2017).

2.2. Karasal Ekosistemlerde Mikroplastik Yayılımı

Mikroplastikler, okyanus derinliklerinden karasal topraklara kadar tüm ekosistemlerde yaygın olarak bulunmaları nedeniyle küresel ölçekte önemli bir kirlilik sorunu haline gelmiştir (Zeb et al., 2024). Ekotoksikoloji araştırmaları tarihsel olarak ağırlıklı biçimde sucul sistemlere odaklanmış olsa da, güncel bulgular karasal ekosistemlerdeki mikroplastik kirliliğinin denizel ortamlardan çok daha yüksek düzeylere ulaşabileceğini göstermektedir (Buteler et al., 2022). 1950'li yıllardan bu yana üretilen toplam plastik miktarının yaklaşık %55'inin (yaklaşık 6.800 megaton) çöplükler ve diğer karasal ortamlar aracılığıyla çevreye aktarıldığı bildirilmektedir (Ritchie et al., 2024). Topraklardaki mikroplastik yoğunluğu 1–40.000 adet/kg gibi oldukça geniş bir aralıkta değişmekte olup, özellikle lastik aşınması kaynaklı partiküller yol kenarı ekosistemlerinde önemli bir mikroplastik girdisi oluşturmaktadır (Wang et al., 2020; Selonen et al., 2021). Doğrudan insan faaliyetleri sonucu çevreye salınan veya daha büyük atıkların parçalanmasıyla oluşan nanoplastikler ise, günümüzde karasal ekosistemler açısından en ciddi ekotoksikolojik tehditlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Parenti et al., 2020).

3. BÖCEKLERDE MİKROPLASTİK MARUZİYET YOLLARI

Mikroplastikler, böceklerin yaşadığı karasal ve sucul ekosistemlerde yaygın olarak bulunmaları nedeniyle organizmaya farklı fizyolojik yollarla

girebilmektedir (Au et al, 2015; Zhu et al., 2018). Mikroplastiklere maruziyet; böceklerin yaşadığı habitat, beslenme stratejisi ve yaşam döngüsündeki gelişim evresine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu özellikleri nedeniyle böcekler, ekosistemler arası plastik transferinde kilit bir biyolojik vektör olarak değerlendirilmektedir (Sucharitakul et al., 2024).

3.1. Besin Yoluyla Mikroplastik Alımı

Mikroplastiklerin küçük boyutları ve çevredeki yaygın dağılımları, bu parçacıkların böcekler tarafından besin yoluyla alınmasını kaçınılmaz hâle getirmektedir (Oliveira et al., 2019). Besin zincirinin tabanında yer alan çok sayıda omurgasız türün larva ve ergin formları, mikroplastik partikülleri doğal besinlerle birlikte istemsizce yutabilmektedir (Setälä et al., 2014). Toprakta yaşayan larvalar, mikroplastik içeren organik madde ve detritusla beslenirken; fitofag türler, mikroplastiklerle kontamine olmuş bitki dokuları aracılığıyla bu parçacıklara maruz kalmaktadır (Huerta-Lwanga et al., 2016; Li et al., 2020). Özellikle parçacıklı maddeyle beslenen böcek larvalarında mikroplastiklerin sindirim sisteminde biriktiği ve somatik dokulara taşınabildiği raporlanmıştır (Wang et al., 2024).

Tenebrionidae familyasına ait *Tenebrio molitor* (Linnaeus, 1758) ve *Zophobas atratus* (Fabricius, 1775) (Coleoptera: Tenebrionidae) larvalarının polistiren (PS) ve polipropilen (PP) gibi polimerleri yutabildiği; bu plastiklerin bağırsakta kısmen parçalandığı ve organizma içinde birikebildiği tespit edilmiştir (Jiang et al., 2021; Wang et al., 2024). Ayrıca, sucul böceklerin larval evrelerinde, mikroplastiklerin algler ve mikroorganizmalarla birlikte tüketildiği de ortaya konmuştur (Au et al., 2015). Bal arılarında yapılan çalışmalar, küçük boyutlu PS parçacıklarının orta bağırsakta biriktiğini, doku hasarına yol açtığını ve bağışıklık sisteminin baskılanmasına sebep olduğunu vurgulamıştır (Deng et al., 2021). Benzer şekilde, polietilen tereftalat (PET) mikrofiberlerine maruz kalan *Gryllosigillatus* (Walker, 1869) (Orthoptera: Ensifera) bireylerinde vücut ağırlığı ve vücut boyutunda azalmalarda rapor edilmiştir (Fudlosid et al., 2022). Bu bulgular, mikroplastiklerin besin yoluyla alınımının böceklerde fizyolojik ve immünolojik etkiler doğurabildiğini göstermektedir (Song et al., 2022; Jeong et al., 2024).

3.2. Toprak Temaslı Maruziyet

Karasal ekosistemlerde mikroplastiklerin yoğun olarak biriktiği başlıca ortam topraktır ve bu durum, toprakla temas hâlinde yaşayan böcekler için önemli bir maruziyet yolu oluşturmaktadır (Horton et al., 2017; Wang et al., 2022). Tarımsal plastik kullanımı, kanalizasyon çamurlarının ve organik gübrelerin uygulanması,

topraklardaki mikroplastik yoğunluğunu önemli ölçüde artırmaktadır (Huerta-Lwanga et al., 2022).

Toprakta bulunan mikroplastikler, böceklerin vücut yüzeyine yapışarak hareket kabiliyetini kısıtlayabilmektedir (Wang et al., 2022). Toprak omurgasızlarının mikroplastikleri daha derin katmanlara taşınması, böceklerin bu parçacıklara uzun süreli ve tekrarlayan şekilde maruz kalmasına yol açmaktadır (Rillig et al., 2017; Kim & An, 2019). Ayrıca bazı böceklerin, mekanik parçalama veya mikrobiyal etkileşimler yoluyla makroplastiklerin mikro ve nanoplastiklere dönüşümüne katkıda bulunabildiği bildirilmiştir (Zhang et al., 2025). Bu süreçler sırasında böceklerde hareket bozuklukları, enerji kaybı ve oksidatif stres gibi olumsuz etkiler ortaya çıkmıştır (Qiu et al., 2022; Li et al., 2024; Staczek & Mbora, 2025). Dolayısıyla toprak, böcekler için hem doğrudan hem de dolaylı mikroplastik maruziyetinin temel ortamlarından biri olarak değerlendirilmektedir (Gautam et al., 2024).

3.3. Su Kaynakları Aracılığıyla Maruziyet

Tatlı su ekosistemleri, mikroplastiklerin yoğunlaştığı ve sucul böceklerin doğrudan maruz kaldığı önemli çevresel ortamlardır (Kim et al., 2018). Mikroplastikler, sucul böcekler tarafından besin sanılarak yutulabilmekte ve sindirilemeyen yabancı partiküller olarak sindirim kanalında birikebilmektedir (Immerschitt & Martens, 2021).

Balıklardan yırtıcı dalgıç böceklerine mikroplastik transferinin gözlemlenmesi, bu parçacıkların besin zinciri boyunca trofik aktarım yoluyla taşınabildiğini göstermektedir (Kim et al., 2018). Sucul böcekler tarafından alınan mikroplastiklerin parçalanarak tekrar su ortamına salınması, bu parçacıkların yeniden yutulmasına ve daha küçük boyutlu nanopartiküllerin oluşumuna yol açabilmektedir (Immerschitt & Martens, 2021). Buna ek olarak, sucul böceklerin ergin dönemlerinde karasal ortama geçmeleri, mikroplastiklerin sucul ekosistemlerden karasal ekosistemlere taşınmasında biyolojik bir köprü işlevi görmektedir (Ribeiro-Brasil et al., 2022).

3.4. Atmosferik Taşınım ve Yüzey Teması

Atmosferik taşınım, mikroplastiklerin uzak ve görece bozulmamış alanlara dahi ulaşabilmesini sağlayan önemli bir maruziyet yoludur (Allen et al., 2019). Atmosferde taşınan mikroplastikler, bitki yüzeylerine ve doğrudan böceklerin vücutlarına çökerek temas yoluyla maruziyete neden olmaktadır (Zhu et al., 2023).

Böcek kutikulasının lipofilik yapısı, mikroplastiklere ve bu parçacıklar üzerine adsorbe olmuş plastik katkı maddeleri ile çevresel kirleticiler için etkili bir tutucu yüzey oluşturmaktadır (Lenoir et al., 2012). Bal arıları üzerinde yapılan analizler, polistiren parçacıklarının kütikula yüzeyine yapışabildiğini ve bunun arıların viral enfeksiyonlara karşı duyarlılığını artırdığını bildirmiştir (Deng et al., 2021). Benzer şekilde, karıncalarda dietilheksil ftalatların kütikula üzerinde biriktiği ve kronik maruziyete yol açtığı kaydedilmiştir. Bu temas yoluyla alınan kirleticiler, böceklerin fizyolojisini ve üreme başarısını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Cuvillier-Hot et al., 2014).

3.5. Trofik ve Ontojenik Transfer Yoluyla Dolaylı Maruziyet

Mikroplastiklerin trofik ve ontojenik transferi, alt trofik seviyelerdeki organizmalar tarafından alınan parçacıkların hem besin ağları boyunca avcı türlere aktarılması (Setälä et al., 2014) hem de metamorfoz sürecinde gelişim evreleri arasında taşınması yoluyla gerçekleşen dolaylı bir maruziyet mekanizmasıdır (Al-Jaibachi & Callaghan, 2018). Böcekler bu süreçte mikroplastiklerin ekosistem içinde yeniden dağılımında önemli bir biyolojik vektör rolü üstlenmektedir (Jeong et al., 2024).

Tenebrio molitor larvaları aracılığıyla mikro ve nanoplastiklerin farelere aktarılması, bu parçacıkların biyolojik bariyerleri aşabildiğini ve hayati organlarda birikebildiğini ortaya koymaktadır (Wang et al., 2024). Benzer süreçler, sucul ekosistemlerde zooplanktonlardan makrozooplanktonlara veya balıklardan yırtıcı dalgıç böceklerle mikroplastik geçişinde de bildirilmiştir (Setälä et al., 2014; Kim et al., 2018). Bitkilerden fitofag böceklerle ve onların doğal düşmanlarına mikroplastik aktarımı, avlanma verimliliğini ve trofik etkileşimleri olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Zhang et al., 2025). Ek olarak Chironomidae ve Culicidae'nin sucul larva dönemlerinde alınan partiküllerin erginleşmiş uçan böceklerin hemolenf ve malpighi tüplerinde varlığını sürdürdüğü de bildirilmiştir (Al-Jaibachi & Callaghan, 2018). Bu durum, mikroplastiklerin yalnızca bireysel organizmalar üzerinde değil, besin ağları ve ekosistem işleyişi üzerinde bütüncül bir stres faktörü olarak etkili olduğunu ve sucul sistemlerden karasal ekosistemlere biyolojik yollarla taşınabildiğini ortaya koymaktadır (Scherer et al., 2017; Jeong et al., 2024). Sonuç olarak, ayrıştırıcı ve ara trofik basamakta yer alan böceklerin hem trofik hem de ontojenik süreçlerle mikroplastik taşıma kapasitesi, kirliliğin besin ağları boyunca yayılmasını hızlandırarak küresel ve sistemik bir ekosistem sorununa dönüşmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Setälä et al., 2014; Scherer et al., 2017; Jeong et al., 2024).

4. MIKROPLASTİK KİRLİLİĞİ BAĞLAMINDA KARASAL BÖCEKLER VE TOZLAŞTIRICILAR

Dünya genelindeki bitki türlerinin yaklaşık %90'ı, küresel tarımsal üretimin büyük bir bölümü, ekolojik dengenin sürdürülmesi ve milyarlarca dolarlık ekonomik değerin korunması açısından kritik öneme sahip olan böcek tozlaşmasına bağımlıdır (Moreno-Gómez-Toledano & Jabal-Uriel, 2024). Tozlayıcı böcekler, genetik çeşitliliğe sahip floranın devamlılığını sağlayarak doğal ekosistemlerin işleyişi ve gıda güvenliğinin temel bileşenleri arasında yer almaktadır (Al Naggar et al., 2021). Ancak mikroplastikler, toprak ekosistemlerinde mantarlar ve çeşitli omurgasızlarla etkileşime girerek bu organizmaların aracılık ettiği temel ekosistem hizmetlerini tehdit etmektedir (De Souza Machado et al., 2018).

4.1. Toprak Faunası Aracılığıyla Mikroplastik Taşınımı ve Dönüşümü

Böcekler ve diğer toprak omurgasızları, ekosistem dengesinin korunması ve biyoçeşitliliğin sürdürülmesinde kilit roller üstlenirken, aynı zamanda mikroplastikler gibi yeni nesil kirleticilerin birincil hedefleri arasında yer almaktadır (Kong et al., 2024; Parenti et al., 2020). Saha çalışmaları, yabani karasal türlerin yaklaşık %95'inin sindirim sistemlerinde farklı formlarda mikroplastik bulunduğunu ortaya koymaktadır (Lu et al., 2020).

Mikroplastik maruziyetinin, organizmaların gelişim evreleri boyunca aktarılabilirdiği; *Lumbricus terrestris* (Linnaeus, 1758) (Oligochaeta: Lumbricidae) gibi toprak solucanlarında büyüme geriliğine, *T. molitor*'de ise kilo kaybı ve artan mortalite oranlarına yol açtığı bildirilmiştir (Huerta Lwanga et al., 2016; Buteler et al., 2022; Peng et al., 2023). Bununla birlikte organizmaların mikroplastikler üzerindeki etkisi yalnızca maruziyetle sınırlı kalmamakta; bu parçacıkların mekanik olarak daha küçük boyutlara ayrılmasını da kapsamaktadır. Örneğin, cırcır böceklerinin yuttukları polietilen mikroplastikleri sindirim süreçleri sırasında nanoplastiklere dönüştürebildiği ve bu küçük parçacıkların trofik transfer yoluyla üst beslenme seviyelerine aktarılmasına aracılık ettiği saptanmıştır (Ritchie et al., 2024). Mikroplastik maruziyetinin ayrıca böceklerde oksidatif stres artışı, motor performans kaybı ve tırmanma yeteneğinde azalma gibi fizyolojik ve davranışsal bozulmalara neden olduğu bildirilmektedir (Li et al., 2024). Karasal ekosistemlerdeki bu kirlilik döngüsü; besin zinciri, bitki örtüsü ve doğrudan insan tüketimine sunulan hayvanlar üzerindeki etkileri nedeniyle, sucul sistemlerdeki mikroplastik kirliliğine kıyasla potansiyel olarak daha ciddi riskler barındırmaktadır (Wang et al., 2021).

4.2. Tozlaştırıcı Böceklerde Mikroplastik Maruziyeti ve Bal Arıları

Tozlaştırıcı böcekler, genetik açıdan zengin flora yapısının korunmasında ve hem doğal ekosistemlerin sürdürülebilirliği hem de küresel gıda güvenliğinin sağlanmasında vazgeçilmez bir role sahiptir (Al Naggar et al., 2021). Ancak güncel bulgular, mikroplastiklerin bu kritik ekosistem hizmetlerini sunan organizmalarla etkileşime girerek tozlaşma süreçlerini ve koloni sağlığını tehdit ettiğini ortaya koymaktadır (De Souza Machado et al., 2018).

Bal arıları, hava, su, toprak ve bitkilerle sürekli temas hâlinde olmaları nedeniyle mikroplastik kirliliğinin izlenmesinde biyogösterge olarak stratejik bir öneme sahiptir (Al Naggar et al., 2021; Balzani et al., 2022). Arıların morfolojik özellikleri ve uçuş sırasında kazandıkları statik elektrik, çevredeki mikropartiküllerin kütiküllerine yapışmasını kolaylaştırmakta; bu durum mikroplastiklerin kovan ürünlerine ve dolayısıyla insan gıda zincirine taşınmasına zemin hazırlamaktadır (Negri et al., 2015; Alma et al., 2023). Yapılan analizlerde, kentsel ve kırsal alanlardaki arılıklarda polyester ve polietilen başta olmak üzere geniş bir polimer çeşitliliği tespit edilmiştir (Edo et al., 2021).

Mikroplastik maruziyetinin bal arısı kolonileri üzerindeki etkileri çok boyutlu olup, bireysel fizyolojik bozulmalardan koloni düzeyinde işlev kayıplarına kadar uzanmaktadır. Laboratuvar çalışmaları, özellikle küçük boyutlu polistiren parçacıklarının (0,5 µm ve 100 nm) bağırsak dokusunda displaziye yol açtığını, faydalı mikrobiyota çeşitliliğini baskıladığını ve bağışıklık sistemini zayıflatarak arıları viral enfeksiyonlara karşı daha hassas hâle getirdiğini göstermektedir (Deng et al., 2021; Wang et al., 2022). Bu stres faktörlerinin birleşik etkisi, yalnızca bireysel düzeyde sağlık bozulmalarına değil, koloni varlığının sürdürülebilirliğini tehdit eden sistemik risklerin ortaya çıkmasına da neden olmaktadır (Alma et al., 2023).

5. MİKROPLASTİKLERİN BÖCEKLERDE ETKİ MEKANİZMALARI

Mikroplastikler ve nanoplastikler, küçük boyut ve yüksek özgül yüzey alanlara sahip olması sebebiyle ağır metaller, kalıcı organik kirleticiler (POP), endokrin bozucular ve patojenler için taşıyıcı rolü üstlenerek böceklerdeki toksik etkileri şiddetlendirmektedir (Du & Wang, 2021; Song et al., 2022). Karasal ve sucul böcekler, bu kontaminantlara başta atmosferik çökeltme ve kirlenmiş besin kaynakları aracılığıyla maruz kalmaktadır (Jeyashree & Gopianand, 2024). Yapılan meta-analizler, MP maruziyetinin hayatta kalma, büyüme, doğurganlık

ve davranışsal yanıtlar gibi temel biyolojik süreçleri olumsuz etkilediğini doğrulamaktadır (Abbas et al., 2025).

5.1. Taşıyıcı (Vektör) Rolü ve Maruziyet Dinamikleri

Mikroplastikler ve nanoplastikler, çevresel ortamlarda ağır metaller (Cr, Cd, Hg, Pb, Cu), poliklorlu bifeniller (PCB), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), pestisitler ve endokrin bozucular gibi toksik bileşenleri yüzeylerinde adsorbe edebilmekte ve bu maddeleri biyolojik sistemlere taşıyabilmektedir (Du & Wang, 2021; Fudlosid et al., 2022; Song et al., 2022). Bu durum, tek başına düşük toksisiteye sahip plastik parçacıkların, birleşik maruziyet senaryolarında biyolojik etkilerini önemli ölçüde artırmasına neden olmaktadır. Özellikle besin zinciri yoluyla gerçekleşen trofik aktarım, mikroplastiklerin bitkiden fitofag böceklerle ve oradan predatör türlere geçişini mümkün kılarak ekosistem genelinde kümülatif toksisite riskini artırmaktadır (Zhang et al., 2025).

5.2. Fiziksel Mekanizmalar

Mikroplastiklerin böcekler üzerindeki fiziksel etkileri; parçacıkların boyutu, şekli, polimer tipi ve maruziyet konsantrasyonuna bağlı olarak gelişmektedir. Sindirim sistemine alınan MP'ler, mekanik tıkanmalara yol açarak besin emilimini engellemekte ve bu durum büyüme, üreme ve hayatta kalma oranlarında düşüğe neden olmaktadır (Windsor et al., 2019). Bağırsak dokusunda oluşan bu fiziksel baskı, epitel bütünlüğünün bozulmasına, doku yaralanmalarına ve mikrobiyota dengesinin sarsılmasına zemin hazırlamaktadır (Jeyashree & Gopianand, 2024; Ritchie et al., 2024).

Parçacık morfolojisinin rolünü ortaya koyan çalışmalarda, *G. sigillatus* bireylerinin polietilen boncukları belirgin gelişimsel hasar olmaksızın sindirim sistemlerinden geçirebildiği; buna karşın yüksek konsantrasyondaki PET mikrofiberlerin (<5 mm) özellikle dişi bireylerde vücut boyutu ve ağırlığında anlamlı azalmalara yol açtığı saptanmıştır (Fudlosid et al., 2022). Hücresel düzeyde yapılan incelemeler, 2 µm boyutundaki polistiren mikroplastiklere (PS-MP) maruz kalan *Drosophila* bireylerinde orta bağırsak hücrelerinde konsantrasyona bağlı nekroz ve apoptoz geliştiğini; erkek bireylerin dişilere kıyasla daha hassas olduğunu ve yüksek dozlarda ölüm oranlarının %100'e ulaştığını bildirmiştir (El Kholy & Al Naggar, 2023).

5.3. Kimyasal ve Moleküler Mekanizmalar

Mikroplastiklerin kimyasal etkileri, üretim aşamasında eklenen bisfenol A (BPA), ftalatlar gibi katkı maddelerinin sızması ve çevresel ortamlardan adsorbe edilen toksik kirleticilerin biyolojik sistemlere taşınması yoluyla ortaya

çıkılmaktadır (Du & Wang, 2021; Fudlosid et al., 2022). Kimyasal maruziyeğin bir diğey boyutu olan endokrin bozulması; yumurta üretiminde azalma, doğurganlığın düşmesi ve sirkadiyen ritmi etkileyen nörotoksik etkilerle kendini göstermekte, ayrıca Toll/İmd sinyal yolları gibi bağışıklık yanıtlarında genetik düzeyde değışimlere neden olmaktadır (Shen et al., 2021; Liu et al., 2022; Wang & Jiang, 2024). Özellikle ağır metallerle birleşik maruziyet durumlarında mikroplastiklerin toksik etkilerinin sinerjistik biçimde arttığı bildirilmektedir (Zhang et al., 2020).

6. FİZYOLOJİK VE HÜCRESEL YANITLAR

6.1. Bağırsak Bütünlüğü, Mikrobiyota ve İmmün Yanıt

Böceklerde mikroplastik maruziyeti, doğrudan mortalite düşük olsa dahi geniş bir subletal etki spektrumu oluşturmaktadır. *Apis mellifera* üzerinde yapılan çalışmalar, polistiren mikroplastiklerin bağırsak mikrobiyotasının alfa çeşitliliğini bozarak mikrobiyal dengeyi ciddi biçimde sarstığını göstermiştir (Wang et al., 2021). *Drosophila melanogaster* (Meigen, 1830) (Diptera: Drosophilidae) ve *Bombyx mori* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera: Bombycidae) gibi model organizmalarda, mikroplastiklerin yalnızca bağırsak lümeninde kalmadığı; bağırsak bariyerini aşarak hemolenf, malpighi tüpleri ve hatta ocelli gibi uzak dokulara transloke olabildiği kanıtlanmıştır (Lee & Jang, 2014; Parenti et al., 2020; El Kholı & Al Naggar, 2023).

Bu süreçte bağırsak dokusunda hücresel nekroz ve apoptoz meydana gelmekte; PET ve PS gibi farklı plastik türleri besin emilimini ve mikrobiyal homeostazı bozmaktadır (Alaraby et al., 2023; El Kholı & Al Naggar, 2023). Uzun vadeli maruziyeğin bir diğey kritik sonucu ise bağışıklık sisteminin baskılanmasıdır; nitekim PS-MP birikimi arıları İsrail akut felç virüsü gibi patojenlere karşı daha savunmasız hale getirmektedir (Deng et al., 2021).

6.2. Oksidatif Stres, Nörotoksisite ve Genotoksisite

Mikro ve nanoplastiklerin böcekler üzerindeki ekotoksikolojik etkileri; hücresel, nöral ve genetik zincirleme hasar süreçlerini tetiklemektedir. Nano ölçekli partiküllerin biyolojik bariyerleri aşarak sinir dokusuna ulaşabildiği; asetilkolinesteraz (AChE) aktivitesindeki değışimler ve nöroinflamasyon yoluyla sinaptik iletimi bozduğu tespit edilmiştir (Prüst et al., 2020; Tlili et al., 2020; Liu et al., 2022). Bu süreçlerin merkezinde, mikroplastiklerin yüzey özellikleri ve taşıdıkları kirleticiler aracılığıyla tetiklenen oksidatif stres yer almaktadır (Geremia et al., 2023). Mikro ve nanoplastikler, yüzeylerindeki reaktif gruplar ve bünyelerinde taşıdıkları metal iyonları aracılığıyla Fenton benzeri reaksiyonlarla doğrudan; ağır metaller, pestisitler ve PAH'lar gibi kirleticileri adsorbe ederek

ise fotokimyasal/kimyasal süreçler yoluyla dolaylı olarak reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumunu tetiklemektedir (Geremia et al., 2023).

Genetik düzeyde, polistiren mikropplastiklerin somatik DNA rekombinasyonunu ve genotoksisiteyi indüklediği smart testi ile ortaya konmuştur (Demir, 2021). Ayrıca, uzun süreli maruziyetin bal arılarında bağışıklık ve detoksifikasyon genlerinin ekspresyon profilini değiştirdiği ve organizmanın savunma kapasitesini zayıflattığı bildirilmiştir (Wang et al., 2021). Ek olarak cinsiyete bağlı farklılıklar gözlenmiş; *D. melanogaster* dişilerinin erkeklere kıyasla mikropplastik stresine karşı daha dirençli olduğu ve maruziyete karşı cinsiyete özgü savunma stratejileri geliştirdiği saptanmıştır (El Kholy & Al Naggar, 2023). Yapılan toksikolojik değerlendirmeler, mikropplastik maruziyetinin sineklerin yaşam sürelerinde ve hem larva hem de yetişkin evrelerindeki motor fonksiyonlarında ciddi bir düşüşe yol açtığını (Wang & Jiang, 2024); buna ek olarak antioksidan enzim aktivitesindeki artışın *Hsp70Bc*, *rpr*, *cat*, *p53* ve *sod* gibi stres tepkisi genlerinin transkripsiyonel aktivasyonu ile desteklendiğini ortaya koymaktadır (Priscilla et al., 2025).

7. ORGANİZMA DÜZEYİNDE DAVRANIŞSAL VE GELİŞİMSEL SONUÇLAR

7.1. Davranışsal Değişimler

Mikropplastik maruziyeti, böceklerde merkezi sinir sistemi temelli davranışsal bozukluklara yol açmaktadır. Polistiren mikropplastiklerin *Drosophila* larvalarında hareket bozuklukları ve yönelim kayıplarına neden olduğu (Kong et al., 2024); açlık-tokluk sinyallerini yöneten nöral devreleri etkileyerek beslenme davranışını bozduğu bildirilmiştir (Liu et al., 2022). Benzer şekilde, polietilen (PE-MP) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) maruziyeti böceklerde, tırmanma, sürünme ve koku temelli yönelim davranışlarında belirgin bozulmalara yol açmıştır (Rondoni et al., 2021; Kauts et al., 2023; Ranjan et al., 2024). Bal arılarında PS ve pleksiglas (PMMA) mikrokürelerinin kan-beyin bariyerini aşarak öğrenme ve hafıza kusurlarına neden olduğu (Pasquini et al., 2024); PMMA maruziyetinin ise sirke sineklerinde uyku düzensizlikleri ve cinsiyete dayalı motor koordinasyon kaybını tetiklediği rapor edilmiştir (You & Shen, 2025). Dahası, PMMA maruziyetinin ipekböceği larvalarında doku birikimine bağlı kemotaksi kusurları gözlemlenmiştir (Parenti et al., 2020). Ayrıca, toprakta yaşayan yay kuyruklular ve odunla beslenen böceklerin plastik lifleri yutması besin döngüsünü bozmakta, karınca gibi türlerde ise plastik parçacıklara takılma gibi fiziksel etkiler beslenme ve yuva yapma gibi kritik davranışsal değişikliklere neden olmaktadır (Jeyashree & Gopianand, 2024). Bu davranışsal sapmalar, mikropplastiklerin böceklerin merkezi sinir sistemi üzerindeki nörotoksik potansiyelini ve bu etkilerin trofik seviyeler boyunca

yayılarak ekosistem dengesini bozabilecek ekolojik sonuçlarını açıkça vurgulamaktadır (Jeong et al., 2024).

7.2. Gelişim, Üreme ve Fitness Üzerine Etkiler

Davranışsal bozuklukların yanı sıra mikroplastikler, böceklerin gelişim süreleri, üreme kapasitesi ve genel zindelikleri üzerinde de belirgin olumsuz etkilere sahiptir (Buteler et al., 2022). Polyester liflerin besin viskozitesini değiştirerek tüketim hızını düşürmesi, mekanik yollarla gelişimsel geriliği tetiklemektedir (Buteler et al., 2022). Bitkiden herbivor böceğe ve ardından predatör türlere aktarılan PE-MP'lerin, *Leptinotarsa decemlineata* (Say, 1824) (Coleoptera: Chrysomelidae)'nın yumurta üretiminin düşmesine neden olduğu ve gelişim süresini uzattığı, ayrıca avcı böcek *Arma chinensis* Fallou, 1881 (Heteroptera: Pentatomidae)'in avlanma performansını azalttığı gösterilmiştir (Zhang et al., 2025). Sonuç olarak, böceklerde plastik kirliliği; büyüme, hareketlilik ve genotoksiste gibi hayati fonksiyonlar üzerinde karmaşık ve birikimli bir tehdit oluşturmaktadır (Tablo 1) (Shen et al., 2023; Wang & Jiang, 2024).

Tablo 1. Böceklerde mikroplastik maruziyeti: tür, mikroplastik tipi ve biyolojik etkiler

Böcek türü	Takım (Familya)	Mikroplastik türü	Bulgular ve etkiler	Kaynak
<i>Leptinotarsa decemlineata</i>	Coleoptera (Chrysomelidae)	PE-MP	Yumurta sayısında azalma; Larva gelişim süresinde uzama; Larva hayatta kalma oranında düşüş	Zhang et al., 2025
<i>Arma chinensis</i>	Hemiptera (Pentatomidae)	PE-MP	Avlanma davranışında baskılanma; Avlanma veriminde azalma	Zhang et al., 2025
<i>Chironomus riparius</i>	Diptera (Chironomidae)	PS, mikrokauçuk	Gelişim ve başkalaşım süreçlerinde değişimler	Carrasco-Navarro et al., 2021
<i>Folsomia candida</i>	Collembola (Isotomidae)	PVC	Bağırsak mikrobiyotası çeşitliliğinde azalma	Zhu, Chen, et al., 2018
<i>Zophobas morio</i>	Coleoptera (Tenebrionidae)	Lastik kökenli MP	Organik madde ayrışmasında azalma; Toprak kütle kaybının baskılanması	Staczek & Mbora, 2025
<i>Tenebrio molitor</i>	Coleoptera (Tenebrionidae)	PS, PVC, LDPE	MP metabolizasyonunda popülasyonlar arası fark; PS ve LDPE'nin PVC'ye göre daha kolay parçalanması	Wu et al., 2019
<i>Zophobas atratus</i>	Coleoptera (Tenebrionidae)	PS, LDPE	PS'de geniş, LDPE'de sınırlı depolimerizasyon; Bağırsak mikrobiyotasında belirgin kaymalar	Peng et al., 2022
<i>Gryllobates sigillatus</i>	Orthoptera (Gryllidae)	PE boncuk, PET lif	PE boncuklarda büyüme etkisi yok; PET liflerde dişi bireylerde vücut ağırlığı ve boyda azalma	Fudlosid et al., 2022
<i>Camponotus japonicus</i>	Hymenoptera (Formicidae)	PS-MP / PS-NP	Beslenme ve kazma davranışında bozulma; Hayatta kalma oranında düşüş	Wei et al., 2025
<i>Culex pipiens</i> (kompleks)	Diptera (Culicidae)	PS-MP	Ontojenik transfer; mortalite ve ergin ağırlığı üzerinde belirgin etki yok	Al-Jaibachi et al., 2019

Böcek türü	Takım (Familya)	Mikroplastik türü	Bulgular ve etkiler	Kaynak
<i>Drosophila melanogaster</i>	Diptera (Drosophilidae)	PS-MP	Erkek bireylerde yüksek mortalite; bağırsak hücrelerinde nekroz ve apoptoz	El Kholly & Al-Naggar, 2023
<i>Anax imperator</i>	Odonata (Aeshnidae)	PET	Yutulan mikroplastiklerin dışkı yoluyla atılması	Immerschitt & Martens, 2021
<i>Chironomus riparius</i>	Diptera (Chironomidae)	PET, PU	Bağırsak epitelinde hasar; Larva vücut uzunluğu ve ağırlığında azalma; Ergin çıkış süresinde uzama	Prata et al., 2023
<i>Cybister japonicus</i>	Coleoptera (Dytiscidae)	Çeşitli MP	Av tüketim hızında düşüş; MP'lerin 48 saat içinde eliminasyonu	Kim et al., 2018
<i>Apis mellifera</i>	Hymenoptera (Apidae)	PS-MP	Orta bağırsak hasarı; Viral enfeksiyonlara duyarlılıkta artış	Deng et al., 2021
<i>Bombyx mori</i>	Lepidoptera (Bombycidae)	PS-MP, PS-NP	Bağırsaklık ve antioksidan genlerde düzenleme; NP'lerde daha yüksek mortalite	Muhammad et al., 2021
<i>Bradysia difformis</i>	Diptera (Sciaridae)	HDPE	Bitki-toprak sistemine çekiciliğin azalması	Rondoni et al., 2021
<i>Chaoborus flavicans</i>	Diptera (Chaoboridae)	PS-MP	Predasyon oranı değişmedi; MP transferi av tüketimiyle ilişkili	Cuthbert et al., 2019

PE: Polietilen, **LDPE:** Düşük yoğunluklu polietilen, **HDPE:** Yüksek yoğunluklu polietilen, **PS:** Polistiren, **PVC:** Polivinil klorür, **PET:** Polietilen tereftalat, **PU:** Poliüretan, **MP:** Mikroplastik, **NP:** Nanoplastik.

8. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLER

Bu kitap bölümünde ele alınan bulgular bir bütün olarak değerlendirildiğinde, mikroplastik ve nanoplastik kirliliğinin böcekler aracılığıyla hem sucul hem de karasal ekosistemlerde çok boyutlu ve dinamik etkiler yarattığı açıkça görülmektedir. Böcekler, mikroplastiklerle yalnızca pasif biçimde karşılaşan organizmalar değil; beslenme, kütüküler temas ve solunum yoluyla bu parçacıkları bünyelerine alarak ekosistem içinde taşınmalarına ve yeniden dağılımlarına aktif biçimde katkı sağlayan canlılar konumundadır. Bu özellikleriyle böcekler, mikroplastiklerin biyolojik birikimi ve trofik transferi açısından kilit bir ekolojik arayüz oluşturmaktadır (Allison et al., 2025).

Mevcut çalışmalar, mikroplastik maruziyetinin böceklerde büyüme ve gelişme geriliği, davranışsal bozulmalar ve oksidatif stres artışı gibi çok sayıda biyolojik etkiye yol açabildiğini bildirmiştir (Shen et al., 2023; Li et al., 2024). Bununla birlikte bu etkilerin şiddeti; mikroplastiklerin boyutu, polimer türü ve maruziyet süresi gibi faktörlere bağlı olarak türler ve gelişim evreleri arasında değişkenlik göstermektedir. Özellikle küçük boyutlu mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin hücresel bariyerleri aşabilme potansiyeli, uzun vadeli fizyolojik ve nörolojik etkiler açısından önemli bir risk oluşturmaktadır (Prüst et al., 2020; Geremia et al., 2023; Gautam et al., 2024).

Böcekler aracılığıyla gerçekleşen trofik transfer, mikroplastiklerin ve bunlara adsorbe olmuş kirleticilerin daha üst trofik seviyelere taşınmasını kolaylaştırmakta ve bu durum ekosistem bütünlüğü ile biyolojik çeşitlilik üzerindeki potansiyel riskleri artırmaktadır (Du et al., 2021). Bununla birlikte, literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmının kısa süreli ve kontrollü laboratuvar deneylerine dayanması, mikroplastiklerin doğal ortamlardaki gerçek konsantrasyonlarını ve kronik maruziyet senaryolarını yeterince yansıtmadığına işaret etmektedir. Bu durum, elde edilen sonuçların ekosistem ölçeğine genellenmesini güçleştirmektedir. Gelecekte yapılacak araştırmalarda, çevresel olarak gerçekçi konsantrasyonların kullanıldığı uzun dönemli deneysel tasarımlara öncelik verilmesi büyük önem taşımaktadır.

Ayrıca mikroplastiklerin böcek fizyolojisi üzerindeki etkilerinin altında yatan moleküler ve biyokimyasal mekanizmaların, özellikle oksidatif stres yanıtları, detoksifikasyon sistemleri ve sinirsel süreçler bağlamında daha ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Standartlaştırılmış örnekleme ve analiz yöntemlerinin geliştirilmesi ise çalışmalar arası karşılaştırılabilirliğin artırılması açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, mikroplastik kirliliği böcekler üzerinden ekosistemlere yayılan ve potansiyel olarak geri dönüşü zor etkiler barındıran küresel bir çevre sorunu olarak değerlendirilmelidir. Plastik kullanımının azaltılması, atık yönetimi stratejilerinin güçlendirilmesi ve disiplinler arası araştırma yaklaşımlarının desteklenmesi, mikroplastiklerin böcek popülasyonları ve ekosistem hizmetleri üzerindeki olumsuz etkilerinin sınırlandırılmasında temel ve kaçınılmaz adımlardır.

KAYNAKLAR

- Abbas, M., Jafir, M., Nazir, T., Hussain, S., Sarwar, N., Song, L., & Wan, X. (2025). A global meta-analysis reveals the toxicity of plastics on insect health. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 302, 118611.
- Akça, M. O., & Ok, S. S. (2021). Toprak ekosistemi üzerine mikroplastiklerin etkileri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 9(2), 79-91.
- Alaraby, M., Villacorta, A., Abass, D., Hernández, A., & Marcos, R. (2023). The hazardous impact of true-to-life PET nanoplastics in *Drosophila*. *Science of the Total Environment*, 863, 160954.
- Al-Jaibachi, R., Cuthbert, R. N., & Callaghan, A. (2019). Examining effects of ontogenic microplastic transference on *Culex* mosquito mortality and adult weight. *Science of the Total Environment*, 651, 871–876.
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., ... & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature geoscience*, 12(5), 339-344.
- Allison, J. E., Ritchie, M. W., MacMillan, H. A., & Ferguson, L. V. (2025). How much should we care about insect-plastic interactions? *Current Opinion in Insect Science*, 101460.
- Alma, A. M., de Groot, G. S., & Buteler, M. (2023). Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution*, 320, 121078.
- Al Naggar, Y., Brinkmann, M., Sayes, C. M., AL-Kahtani, S. N., Dar, S. A., El-Seedi, H. R., Grünewald, B., & Giesy, J. P. (2021). Are honey bees at risk from microplastics? *Toxics*, 9(5), 109.
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 62(8), 1596-1605
- Au, S. Y., Bruce, T. F., Bridges, W. C., & Klaine, S. J. (2015). Responses of *Hyalella azteca* to acute and chronic microplastic exposures. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(11), 2564–2572.
- Balzani, P., Galeotti, G., Scheggi, S., Masoni, A., Santini, G., & Baracchi, D. (2022). Acute and chronic ingestion of polyethylene (PE) microplastics has mild effects on honey bee health and cognition. *Environmental Pollution*, 305, 119318.
- Bostan, N., Ilyas, N., Akhtar, N., Mehmood, S., Saman, R. U., Sayyed, R. Z., Shatid, A. A., Alfaifi, M. Y., Elbehairi, S. E. I., & Pandiaraj, S. (2023). Toxicity

- assessment of microplastic (MPs); a threat to the ecosystem. *Environmental Research*, 234, 116523.
- Buteler, M., Alma, A. M., Stadler, T., Gingold, A. C., Manattini, M. C., & Lozada, M. (2022). Acute toxicity of microplastic fibers to honeybees and effects on foraging behavior. *Science of the Total Environment*, 822, 153320.
- Carrasco-Navarro, V., Muñoz-González, A. B., Sorvari, J., & Martínez-Guitarte, J. L. (2021). Altered gene expression in *Chironomus riparius* (insecta) in response to tire rubber and polystyrene microplastics. *Environmental Pollution*, 285, 117462.
- Cuthbert, R. N., Al-Jaibachi, R., Dalu, T., Dick, J. T. A., & Callaghan, A. (2019). The influence of microplastics on trophic interaction strengths and oviposition preferences of dipterans. *Science of the Total Environment*, 651, 2420–2423.
- Cuvillier-Hot, V., Salin, K., Devers, S., Tasiemski, A., Schaffner, P., Boulay, R., ... Lenoir, A. (2014). Impact of ecological doses of the most widespread phthalate on a terrestrial species, the ant *Lasius niger*. *Environmental Research*, 131, 104–110.
- Das, B. K., Das, S., Kumar, V., Roy, S., Mitra, A., & Mandal, B. (2025). Microplastics in ecosystems: Ecotoxicological threats and strategies for mitigation and governance. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1672484.
- De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24(4), 1405–1416.
- Demir, E. (2021). Adverse biological effects of ingested polystyrene microplastics using *Drosophila melanogaster* as a model in vivo organism. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 84(16), 649–660.
- Deng, Y., Jiang, X., Zhao, H., Yang, S., Gao, J., Wu, Y., ... & Hou, C. (2021). Microplastic polystyrene ingestion promotes the susceptibility of honeybee to viral infection. *Environmental science & technology*, 55(17), 11680–11692.
- Du, H., & Wang, J. (2021). Characterization and environmental impacts of microplastics. *Gondwana Research*, 98, 63–75.
- Du, S., Zhu, R., Cai, Y., Xu, N., Yap, P. S., Zhang, Y., ... Zhang, Y. (2021). Environmental fate and impacts of microplastics in aquatic ecosystems: A review. *RSC Advances*, 11(26), 15762–15784.
- Edo, C., Fernández-Alba, A. R., Vejsnæs, F., van der Steen, J. J., Fernández-Piñas, F., & Rosal, R. (2021). Honeybees as active samplers for microplastics. *Science of the Total Environment*, 767, 144481.

- El Kholy, S., & Al Naggar, Y. (2023). Exposure to polystyrene microplastic beads causes sex-specific toxic effects in the model insect *Drosophila melanogaster*. *Scientific Reports*, 13(1), 204.
- Fudlosid, S., Ritchie, M. W., Muzzatti, M. J., Allison, J. E., Provencher, J. F., & MacMillan, H. A. (2022). Ingestion of microplastic fibres, but not microplastic beads, impacts growth rates in the tropical house cricket *Gryllobates sigillatus*. *Frontiers in Physiology*, 13, 871149.
- Gautam, S., Rathikannu, S., Katharine, S. P., Marak, L. K. R., & Alshehri, M. (2024). Beyond the surface: Microplastic pollution its hidden impact on insects and agriculture. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 135, 103663.
- Geremia, E., Muscari Tomajoli, M. T., Murano, C., Petito, A., & Fasciolo, G. (2023). The impact of micro-and nanoplastics on aquatic organisms: mechanisms of oxidative stress and implications for human health—a review. *Environments*, 10(9), 161.
- Helmberger, M. S., Tiemann, L. K., & Grieshop, M. J. (2020). Towards an ecology of soil microplastics. *Functional Ecology*, 34, 550–560.
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment*, 586, 127–141.
- Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., Van der Ploeg, M., ... Geissen, V. (2016). Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris*. *Environmental Science & Technology*, 50(5), 2685–2691.
- Huerta Lwanga, E., Beriot, N., Corradini, F., Silva, V., Yang, X., Baartman, J., ... & Geissen, V. (2022). Review of microplastic sources, transport pathways and correlations with other soil stressors: a journey from agricultural sites into the environment. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 20.
- Immerschitt, I., & Martens, A. (2021). Ejection, ingestion and fragmentation of mesoplastic fibres to microplastics by *Anax imperator* larvae. *Odonatologica*, 49(1–2), 57–66.
- Jeong, E., Lee, J. Y., & Redwan, M. (2024). Animal exposure to microplastics and health effects: A review. *Emerging Contaminants*, 10(4), 100369.
- Jeyashree, J., & Gopianand, L. (2024). Microplastics in aquatic and terrestrial insects: A growing environmental concern. *The Bioscan*, 19(3), 259–263.

- Jiang, S., Su, T., Zhao, J., & Wang, Z. (2021). Biodegradation of Polystyrene by *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, and *Zophobas atratus* Larvae and Comparison of Their Degradation Effects. *Polymers*, 13(20), 3539.
- Kauts, S., Mishra, Y., Yousuf, S., Bhardwaj, R., Singh, S. K., Alshabirmi, F. M., Abdurahman, M., Vamanu, E., & Singh, M. P. (2023). Toxicological Profile of Polyethylene Terephthalate (PET) Microplastic in Ingested *Drosophila melanogaster* (Oregon R+) and Its Adverse Effect on Behavior and Development. *Toxics*, 11(9), 782.
- Kim, S. W., Kim, D., Chae, Y., & An, Y. J. (2018). Dietary uptake, biodistribution, and depuration of microplastics in the freshwater diving beetle *Cybister japonicus*: effects on predacious behavior. *Environmental Pollution*, 242, 839-844.
- Kim, S. W., & An, Y. J. (2019). Soil microplastics inhibit the movement of springtail species. *Environment International*, 126, 699–706.
- Kong, F., Jin, H., Xu, Y., & Shen, J. (2024). Behavioral toxicological tracking analysis of *Drosophila* larvae exposed to polystyrene microplastics based on machine learning. *Journal of Environmental Management*, 359, 120975.
- Lee, K. P., & Jang, T. (2014). Exploring the nutritional basis of starvation resistance in *Drosophila melanogaster*. *Functional Ecology*, 28(5), 1144-1155.
- Lenoir, A., Cuvillier-Hot, V., Devers, S., Christidès, J. P., & Montigny, F. (2012). Ant cuticles: a trap for atmospheric phthalate contaminants. *Science of the total environment*, 441, 209-212.
- Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W. J., Yin, N., ... & Zhang, Y. (2020). Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nature sustainability*, 3(11), 929-937.
- Li, J. Y., Yu, Y., Craig, N. J., He, W., & Su, L. (2024). Interactions between microplastics and insects in terrestrial ecosystems—a systematic review and meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 462, 132783.
- Liu, P., Qian, L., Wang, H., Zhan, X., Lu, K., Gu, C., & Gao, S. (2019). New insights into the aging behavior of microplastics accelerated by advanced oxidation processes. *Environmental science & technology*, 53(7), 3579-3588.
- Liu, H. P., Cheng, J., Chen, M. Y., Chuang, T. N., Dong, J. C., Liu, C. H., & Lin, W. Y. (2022). Neuromuscular, retinal, and reproductive impact of low-dose polystyrene microplastics on *Drosophila*. *Environmental Pollution*, 292, 118455.
- Lu, S., Qiu, R., Hu, J., Li, X., Chen, Y., Zhang, X., ... & He, D. (2020). Prevalence of microplastics in animal-based traditional medicinal materials: Widespread

- pollution in terrestrial environments. *Science of the Total Environment*, 709, 136214.
- Mason, S. A., Garneau, D., Sutton, R., Chu, Y., Ehmann, K., Barnes, J., ... & Rogers, D. L. (2016). Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent. *Environmental pollution*, 218, 1045-1054.
- Moreno-Gómez-Toledano, R., & Jabal-Uriel, C. (2024). The “Plastic Age”: From endocrine disruptors to microplastics—An emerging threat to pollinators. In *Environmental Health Literacy Update-New Evidence, Methodologies and Perspectives*. IntechOpen.
- Muhammad, A., Zhou, X., He, J., Zhang, N., Shen, X., Sun, C., ... & Shao, Y. (2021). Toxic effects of acute exposure to polystyrene microplastics and nanoplastics on the model insect, silkworm *Bombyx mori*. *Environmental pollution*, 285, 117255.
- Napper, I. E., Bakir, A., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. (2015). Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics. *Marine pollution bulletin*, 99(1-2), 178-185.
- Negri, I., Mavris, C., Di Prisco, G., Caprio, E., & Pellecchia, M. (2015). Honey bees (*Apis mellifera*, L.) as active samplers of airborne particulate matter. *PLoS One*, 10(7), e0132491.
- Oliveira, M., Ameixa, O. M., & Soares, A. M. (2019). Are ecosystem services provided by insects “bugged” by micro (nano) plastics?. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 113, 317-320.
- Parenti, C. C., Binelli, A., Caccia, S., Della Torre, C., Magni, S., Pirovano, G., & Casartelli, M. (2020). Ingestion and effects of polystyrene nanoparticles in the silkworm *Bombyx mori*. *Chemosphere*, 257, 127203.
- Pasquini, E., Ferrante, F., Passaponti, L., Pavone, F. S., Costantini, I., & Baracchi, D. (2024). Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of the Total Environment*, 912, 169362.
- Peng, B. Y., Sun, Y., Wu, Z., Chen, J., Shen, Z., Zhou, X., ... & Zhang, Y. (2022). Biodegradation of polystyrene and low-density polyethylene by *Zophobas atratus* larvae: Fragmentation into microplastics, gut microbiota shift, and microbial functional enzymes. *Journal of Cleaner Production*, 367, 132987.
- Peng, B. Y., Sun, Y., Zhang, X., Sun, J., Xu, Y., Xiao, S., ... & Zhang, Y. (2023). Unveiling the residual plastics and produced toxicity during biodegradation of polyethylene (PE), polystyrene (PS), and polyvinyl chloride (PVC) microplastics by mealworms (Larvae of *Tenebrio molitor*). *Journal of Hazardous Materials*, 452, 131326.

- Prata, J. C., Silva, C. J., Serpa, D., Soares, A. M., Gravato, C., & Silva, A. L. P. (2023). Mechanisms influencing the impact of microplastics on freshwater benthic invertebrates: uptake dynamics and adverse effects on *Chironomus riparius*. *Science of The Total Environment*, 859, 160426.
- Priscilla, S., Nagasawa, R., Senthil Kumar, S., Kasavaraju, S. C., Chandrakanth, C., Sivakumar, P., ... & Sheik Mohideen, S. (2025). Polyethylene microplastics induce behavioural and developmental deficits in the *Drosophila* model. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 17(3), 449-460.
- Prüst, M., Meijer, J., & Westerink, R. H. (2020). The plastic brain: neurotoxicity of micro-and nanoplastics. *Particle and fibre toxicology*, 17(1), 24.
- Qiu, Y., Zhou, S., Zhang, C., Zhou, Y., & Qin, W. (2022). Soil microplastic characteristics and the effects on soil properties and biota: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 313, 120183.
- Ranjan, H., Kumar, S. S., Priscilla, S., Swaminathan, S., Umezawa, M., & Mohideen, S. S. (2024). Polyethylene microplastics affect behavioural, oxidative stress, and molecular responses in the *Drosophila* model. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 26(12), 2203-2214.
- Ribeiro-Brasil, D. R. G., Brasil, L. S., Veloso, G. K. O., de Matos, T. P., de Lima, E. S., & Dias-Silva, K. (2022). The impacts of plastics on aquatic insects. *Science of The Total Environment*, 813, 152436.
- Rillig, M. C., Ziersch, L., & Hempel, S. (2017). Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific reports*, 7(1), 1362.
- Ritchie, M. W., Provencher, J. F., Allison, J. E., Muzzatti, M. J., & MacMillan, H. A. (2024). The digestive system of a cricket pulverizes polyethylene microplastics down to the nanoplastic scale. *Environmental Pollution*, 343, 123168.
- Rochman, C. M., Tahir, A., Williams, S. L., Baxa, D. V., Lam, R., Miller, J. T., ... & Teh, S. J. (2015). Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Scientific reports*, 5(1), 14340.
- Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., Earn, A., Bucci, K., ... & Hung, C. (2019). Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environmental toxicology and chemistry*, 38(4), 703-711.
- Rondoni, G., Chierici, E., Agnelli, A., & Conti, E. (2021). Microplastics alter behavioural responses of an insect herbivore to a plant-soil system. *Science of the Total Environment*, 787, 147716.
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological conservation*, 232, 8-27.

- Scherer, C., Brennholt, N., Reifferscheid, G., & Wagner, M. (2017). Feeding type and development drive the ingestion of microplastics by freshwater invertebrates. *Scientific reports*, 7(1), 17006.
- Selonen, S., Dolar, A., Kokalj, A. J., Sackey, L. N., Skalar, T., Fernandes, V. C., ... & Van Gestel, C. A. (2021). Exploring the impacts of microplastics and associated chemicals in the terrestrial environment—Exposure of soil invertebrates to tire particles. *Environmental Research*, 201, 111495.
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., & Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environmental pollution*, 185, 77-83.
- Shen, J., Liang, B., Zhang, D., Li, Y., Tang, H., Zhong, L., & Xu, Y. (2021). Effects of PET microplastics on the physiology of *Drosophila*. *Chemosphere*, 283, 131289.
- Shen, J., Liang, B., & Jin, H. (2023). The impact of microplastics on insect physiology and the indication of hormesis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 165, 117130.
- Song, X., Zhuang, W., Cui, H., Liu, M., Gao, T., Li, A., & Gao, Z. (2022). Interactions of microplastics with organic, inorganic and bio-pollutants and the ecotoxicological effects on terrestrial and aquatic organisms. *Science of the Total Environment*, 838, 156068.
- Staczek, F. M., & Mbor, D. N. (2025). Microplastics inhibit the decomposition of soil organic matter by adult darkling beetles (Coleoptera: Tenebrionidae). *Environmental Entomology*, 54(1), 86-100.
- Sucharitakul, P., Wu, W. M., Zhang, Y., Peng, B. Y., Gao, J., Wang, L., & Hou, D. (2024). Exposure pathways and toxicity of microplastics in terrestrial insects. *Environmental Science & Technology*, 58(27), 11887-11900.
- Tlili, S., Jemai, D., Brinis, S., & Regaya, I. (2020). Microplastics mixture exposure at environmentally relevant conditions induce oxidative stress and neurotoxicity in the wedge clam *Donax trunculus*. *Chemosphere*, 258, 127344.
- Wagner, M., Scherer, C., Alvarez-Muñoz, D., Brennholt, N., Bourrain, X., Buchinger, S., ... & Reifferscheid, G. (2014). Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environmental Sciences Europe*, 26(1), 12.
- Wang, W., Ge, J., Yu, X., & Li, H. (2020). Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective. *Science of the total environment*, 708, 134841.

- Wang, K., Li, J., Zhao, L., Mu, X., Wang, C., Wang, M., ... & Wu, L. (2021). Gut microbiota protects honey bees (*Apis mellifera* L.) against polystyrene microplastics exposure risks. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123828.
- Wang, K., Zhu, L., Rao, L., Zhao, L., Wang, Y., Wu, X., ... & Liao, X. (2022). Nano- and micro-polystyrene plastics disturb gut microbiota and intestinal immune system in honeybee. *Science of the total environment*, 842, 156819.
- Wāng, Y., & Jiang, Y. (2024). *Drosophila melanogaster* as a tractable eco-environmental model to unravel the toxicity of micro-and nanoplastics. *Environment International*, 192, 109012.
- Wang, Y., Nan, X., Sun, H., Shi, Y., Miao, J., Li, Y., ... & Liu, B. (2024). From insects to mammals! Tissue accumulation and transgenerational transfer of micro/nano-plastics through the food chain. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136424.
- Wei, L. F., Liu, X. Y., Feng, H. S., Zhang, J. T., & Liu, X. P. (2025). Impact of Polystyrene Micro-and Nanoplastics on the Biological Traits of the Japanese Carpenter Ant, *Camponotus japonicus* Mayr (Hymenoptera: Formicidae). *Insects*, 16(3), 292.
- Windsor, F. M., Tilley, R. M., Tyler, C. R., & Ormerod, S. J. (2019). Microplastic ingestion by riverine macroinvertebrates. *Science of the total environment*, 646, 68-74.
- Wu, Q., Tao, H., & Wong, M. H. (2019). Feeding and metabolism effects of three common microplastics on *Tenebrio molitor* L. *Environmental geochemistry and health*, 41(1), 17-26.
- You, X., & Shen, J. (2025). Sex-specific toxicity of PMMA Microplastics: Behavioral and metabolic dysregulation in adult *Drosophila melanogaster*. *Environmental Pollution*, 127262.
- Zeb, A., Liu, W., Ali, N., Shi, R., Wang, Q., Wang, J., ... & Liu, J. (2024). Microplastic pollution in terrestrial ecosystems: Global implications and sustainable solutions. *Journal of hazardous materials*, 461, 132636.
- Zhang, Y., Wolosker, M. B., Zhao, Y., Ren, H., & Lemos, B. (2020). Exposure to microplastics cause gut damage, locomotor dysfunction, epigenetic silencing, and aggravate cadmium (Cd) toxicity in *Drosophila*. *Science of the Total Environment*, 744, 140979.
- Zhang, J., Hu, Y., Zhang, Y., He, B., Wang, J., Li, Y., & Li, C. (2025). Polyethylene microplastics inhibit the growth and reproduction of Colorado potato beetle and the predation efficiency of Stinkbug. *Environmental Pollution*, 369, 125840.

- Zhu, D., Chen, Q. L., An, X. L., Yang, X. R., Christie, P., Ke, X., ... & Zhu, Y. G. (2018). Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 116, 302-310.
- Zhu, J., Wu, P., Zhao, N., Jiang, S., Zhu, H., & Jin, H. (2023). Microplastics in terrestrial insects, long-horned beetles (Coleoptera: Cerambycidae), from China. *Science of the Total Environment*, 888, 164197.



BÖLÜM 2

Makine Öğrenmesi ve Doğal Dil İşleme Tabanlı Kod Klon Tespiti: TF-IDF ve Gömme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi

*Yeliz Balcı¹ & Işıl Karabey Aksakallı²
Nursena Baygın³*

1. Giriş

Günümüzde yazılım geliştirme sürecinde, sistemlerin büyüklüğü ve karmaşıklığı arttıkça, geliştiriciler bazen benzer işlevler için kodları kopyalayıp yapıştırma yoluna gitmektedirler. Bu, anlık olarak zaman kazandırır da uzun vadede sistemlerin sürdürülebilirliği ve bakım maliyetleri açısından bazı sorunlar yaratabilmektedir (Saini vd., 2018). Bu nedenle, yazılım projelerinde benzer işlevlere sahip, ancak farklı yerlerde bulunan kod parçalarının tespit edilmesi önemli hale gelmektedir (Sheneamer & Kalita, 2016). Kod klonları dört ana kategoriye ayrılıyor: Type-1 (tamamen aynı), Type-2 (yeniden adlandırılmış ama benzer), Type-3 (yapısal değişiklikler içeren) ve Type-4 (anlam açısından benzer ama yapısal olarak farklı) (Kaushik & Gupta, 2023; Saini vd., 2018). Her bir tür, farklı analiz gereksinimleri doğurduğundan, tespitinde farklı teknikler kullanmak gerekmektedir.

Geleneksel yöntemler, metin, token veya sözdizimi karşılaştırmalarına dayanıyor ve genellikle Type-1 ve Type-2 klonlarında iyi sonuç veriyor (Ain vd., 2019; Kamiya vd., 2002). Ancak Type-3 ve Type-4 klonlarını bulmak için daha karmaşık yöntemlere ihtiyaç vardır. Bu noktada semantik analizler, grafik temelli yapılar (PDG, AST) ve derin öğrenme gibi gelişmiş tekniklerin kullanımı ortaya çıkmaktadır (Mehrotra vd., 2020). Yeni nesil çalışmalar, kodun işlevselliğini daha iyi analiz etmek için modeller geliştiriyor. Özellikle PDG tabanlı sistemler, gömülü (embedding) temsiller ve Probabilistic Software Modeling (PSM) gibi ve istatistiksel yaklaşımlar, Type-4 klonları tespit ederken yüksek başarı oranları sağlamaktadır (Kaushik & Gupta, 2023). Ayrıca, dil bağımsız çalışabilecek ve daha basit algoritmalar kullanan araçlar da geliştirilmektedir. Örneğin, CodeRepeat aracı, tekrarlayan dizileri analiz ederek Type-1 klonları hassas bir

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Erzurum, 0009-0005-6884-8571

² Dr. Öğr. Üyesi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Erzurum, 0000-0002-4156-9098

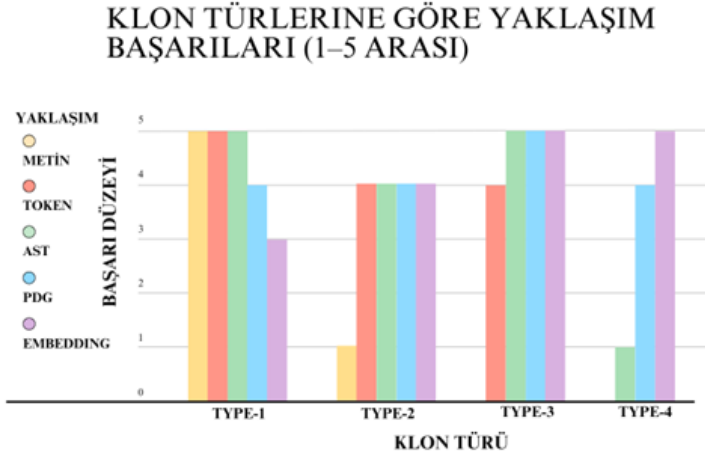
³ Dr. Öğr. Üyesi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Erzurum, 0000-0003-4457-5503

şekilde bulabilmekte ve gerçek dünya projelerinde güvenilir sonuçlar sunmaktadır (Yamagata vd., 2021).

Sonuç olarak, kod klon tespiti sadece benzerlik ölçümünü değil, aynı zamanda kod kalitesini artırmayı, bakım sürecini kolaylaştırmayı ve yeniden yapılandırmayı destekleyen çok yönlü bir alandır. Bu yüzden klasik yöntemlerin avantajlarını modern tekniklerle birleştiren yaklaşımlar, yazılım geliştirme süreçlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

2. Kod Klon Tespiti: Olanaklar, Sınırlılıklar, Değerlendirmeler

Kod klon tespiti, yazılım geliştirme süreçlerinde kaliteyi artırmak ve sürdürülebilirliği sağlamak için önemli bir fırsat sunmaktadır. Özellikle büyük ve uzun süreli projelerde, klon tespiti, kod tekrarlarını önlemeye, potansiyel hataları bulmaya ve karmaşıklığı azaltmaya yarayan pratik bir araçtır. Type-1 ve Type-2 gibi sıklıkla görülen klon türleri için geliştirilen araçlar (örneğin CCFinderX, Duplo, NiCad) hem doğru sonuçlar üretmekte hem de kullanım kolaylığı sunmaktadır. Son yıllarda grafik tabanlı modeller ve derin öğrenme yöntemlerinin eklenmesi, özellikle Type-3 ve Type-4 klonları bulmada büyük ilerleme kaydedilmesini sağlamıştır (Mehrotra vd., 2020). Klon tespiti yaklaşımlarının farklı klon türlerindeki başarı düzeyleri Şekil 1'de görselleştirilmiştir.



Şekil 1 Klon Türlerine Göre Yaklaşım Başarıları

Özellikle gömme (embedding) ve Program Bağımlılık Grafikleri (PDG) temelli yöntemlerin Type-4 klonlarında öne çıktığı görülmektedir. Ancak bu fırsatlara rağmen, kod klon tespiti konusunda hala bazı sorunlar bulunmaktadır.

Tablo 1 Kod Klon Tespiti Araçlarının Karşılaştırılması

No	Araç	Yaklaşım	Klon türleri	Avantajlar	Dezavantajlar
1	Duplo	Metin tabanlı	Type-1	Basit, hızlı	Type-2, 3 desteği yok
2	CCFinderX	Token tabanlı	Type-1, 2	Çok dilli, hızlı	Type-3, 4'te zayıf
3	NiCad	AST tabanlı	Type-1, 2, 3	Yapısal analiz sağlar	Yavaş, sınırlı dil desteği
4	CodeRepeat	Tekrar dizisi	Type-1 (zayıf)	Dil bağımsız	Yalnızca Type-1 için uygun
5	HOLMES	PDG + derin öğrenme	Type-1, 4	Anlamsal eşleşme	Yüksek kaynak ihtiyacı

En büyük problemlerden biri, çoğu aracın belirli programlama dillerine odaklanmasıdır. Bu da çok dilli sistemlerde zayıf sonuçlara yol açabilmektedir (Ain vd., 2019). Ayrıca, Type-4 klonları bulmak için kullanılan semantik analiz yöntemleri yüksek hesaplama gücü istemekte ve ölçeklenebilirlik açısından henüz yeterince başarılı olamamaktadır. Bu bağlamda yaygın kullanılan klon tespit araçlarının desteklediği türler, kullandıkları analiz yöntemleri ve avantaj/dezavantajları Tablo 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Derin öğrenme yöntemleri gelecek vadette de bu sistemleri eğitmek için gereken büyük etiketli veri setleri çok azdır ve model yorumlaması da bir sorun teşkil etmektedir. Bir başka önemli sorun ise değerlendirme kriterlerinde tutarsızlık olmasıdır. Her araç kendi değerlendirme yöntemine göre çalıştığı için, bunları doğrudan karşılaştırmak çoğu zaman yanıltıcı olabilmektedir. Bu nedenle, BigCloneBench gibi standart veri setlerinin ve duyarlılık (recall), hassasiyet (precision), F1-skoru gibi performans ölçütlerinin kullanımı, tarafsız ve karşılaştırmalı değerlendirme yapılabilmesi açısından oldukça önemlidir (Yamagata vd., 2021).

3. İlgili Çalışmalar

Saini ve arkadaşları (2018) kod klonlarının tespitine yönelik yeni bir yöntem sunmasalar da literatürdeki yöntemleri sistematik bir biçimde sınıflandırarak bütüncül bir bakış sunmaktadır. Bu çalışma da ilk olarak kod klonları 4 temel kategoriye ayrılmıştır. Type-1 (birebir aynı kod), Type 2 (yeniden adlandırılmış), Type-3 (kısmi değişiklik içeren), Type-4 (anlamsal olarak eş değer ama yapısal olarak farklı kodlar). Her bir tür için farklı yaklaşımlar incelenmiştir. Araştırmaya göre Type-1 türündeki klonların tespiti için yalnızca metin tabanlı yöntemler faydalı olmaktadır. AST (Abstract Syntax Tree) tabanlı yöntemlerin ise Type-2

ve Type-3 klonlarını tespit edebildiği görülmüştür. Type-4 klonların tespiti için klasik yöntemler yetersizdir. PDG tabanlı yapısal analizler, semantik benzerlik çıkarımı, derin öğrenme tabanlı kod gömme yöntemleri en etkili yöntemlerdir (Saini vd., 2018).

Kaushik ve Gupta (2023) yaptıkları çalışmada kod klon tespitine yönelik yöntemleri karşılaştırmalı bir şekilde incelemiş ve Saini ve arkadaşları gibi Type-4 türü klonlarında geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığını tespit etmişlerdir. Bu sebeple çalışmada özellikle Probabilistic Software Modeling (PSM) gibi yeni nesil yöntemlerin Type-4 türü klonların tespiti için umut verici sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır. PSM, yazılımın yapısal ve çalışma zamanlı davranışını modelleyerek kod parçaları arasında kavramsal benzerlikleri istatistiksel bir şekilde analiz etmesini sağlamaktadır. Literatürde PSM yaklaşımı ile benzer olarak Thaller ve arkadaşları semantik klon tespit sistemleri ve Yu ve arkadaşlarının geliştirmiş olduğu PACE algoritması, semantik eşdeğerlilik tespiti konusunda umut vadeden sonuçlar ortaya koymuştur (Kaushik & Gupta, 2023).

Ain ve arkadaşları (2019) kod klon tespiti alanındaki çalışmaları ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir. Mevcut yöntemlerin güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymuşlardır. Geleneksel yöntemlerin Type-1 ve Type-2'yi tespit etmede başarılı olduğunu ancak Type-3 ve Type-4'te yetersiz kaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kullanılan araçların birçoğunun bir programlama diline özel geliştirildiği ve çok dilli sistemlerde zayıf performans gösterdiği vurgulanmaktadır. Bu bulgular sonucunda kod klon tespitinde ölçeklenebilirlik, doğruluk, semantik farkındalık ve çok dillilik gibi birçok açığın bulunduğu ortaya konmaktadır. Buna çözüm olarak ise derin öğrenme, makine öğrenimi, graf temsilleri, embedding ve semantik analiz gibi yöntemlerin geleneksel yöntemler ile hibrit bir şekilde daha kapsayıcı şekilde kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca yazarlar, ortak karşılaştırma kriterlerini ve geniş çapta kabul görmüş veri kümelerini kullanılırsa araçlar arası karşılaştırmaların daha adil olacağını vurgulamaktadır (Ain vd., 2019).

Kod klonlarını bulmak için kullanılan yöntemlerden biri olan CCFinder, çok sayıda programlama dilini desteklemesi ve büyük yazılım projelerine uygulanabilmesiyle dikkat çekmektedir. Kamiya, Kusumoto ve Inoue (2002) tarafından geliştirilen bu araç, kaynak kodlarını token dizilerine çevirerek anlam olarak benzer kod parçalarını tespit edebilmektedir. Bu özellik, geleneksel satır bazlı karşılaştırma yöntemlerinden, örneğin Dup aracından, daha esnek olmasını sağlamaktadır. CCFinder ile sunulan metrikler sayesinde, klonların yazılım sistemine etkisi ve yayılımı gibi durumlar sayısal olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, C, C++, Java ve COBOL gibi farklı dillerde rahatlıkla kullanılabilir. Bu esneklik, CCFinder'ı hem akademik hem de endüstriyel projelerde popüler bir seçenek haline getirmektedir. CCFinder'ın yüksek doğrulukla klon tespit ettiği, özellikle JDK, Linux ve NetBSD gibi büyük kod tabanlarında yapılan araştırmalarla gösterilmiştir. Bu yüzden yazılım mühendisliği açısından önemli avantajlar sağlamakta; kod tekrarlarını azaltma,

yeniden yapılandırma fırsatlarını belirleme ve bakım maliyetlerini düşürme konusunda yardımcı olmaktadır (Kamiya vd., 2002).

Sheneamer ve Kalita (2016), kod klonlarının yazılım sistemlerine zararlarını incelemektedir. Çalışmada, klon türlerini ve bunları tespit etmeye yarayan teknikleri sistemli bir şekilde sınıflandırmışlardır. Metin, leksik, sözdizimsel ve anlamsal yaklaşımlar üzerinden geliştirilen yöntemlerin temel farkları, karşılaştıkları sorunlar ve hangi klonları tespit edebildikleri detaylı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, klon tespit süreci yedi aşamaya ayrılmış (ön işleme, dönüştürme, eşleştirme vb.) ve her aşamada kullanılan araçlar ve teknikler açıklanmıştır. Bu çalışma mevcut yöntemleri karşılaştırmakla kalmayıp, gelecekteki hibrit yöntemlerin ihtiyaçlarına da dikkat çekmektedir. Özellikle farklı tespit araçlarının duyarlılık, hassasiyet ve F-skor gibi metriklerle karşılaştırılması çalışmayı daha özgün bir konuma getirmekte ve metodolojik açıdan güçlü bir katkı sağlamaktadır (Sheneamer & Kalita, 2016).

Mehrotra ve arkadaşları (2020) kod kopyalarını semantik düzeyde tespit etmeye yönelik bir çalışma yapmışlardır. Geleneksel sözdizimsel benzerlik düşüncesinden uzaklaşarak, işlevsel benzerliğe odaklandılar ve bunun için grafik tabanlı bir yöntem önerdiler. HOLMES adını verdikleri sistemleri, PDG üzerinde çalışan ikiz sinir ağları ile donatılmıştır. Bu sistem, kontrol ve veri bağımlılıklarını ayrı ayrı ele alarak daha kapsamlı özellikler öğrenmektedir. Bu yaklaşım, sadece sözdizimsel yapıların ötesine geçip, kontrol akışı ve veri akışına dayalı anlamsal ilişkileri işleyebilmektedir. Özellikle Type-4 klonları tespit etmede önceki yöntemlere göre gözle görülür bir iyileşme sağlamıştır. Grafik tabanlı temsillerle birlikte dikkat mekanizmaları ve LSTM kullanarak çoklu bağlam öğrenimi gerçekleştirmişlerdir. Hem sentetik hem gerçek dünya verileri üzerinde mevcut yöntemlerle karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneyler, HOLMES'un hem doğru sonuçlar bulmada hem de genellenebilirlik açısından iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur (Mehrotra vd., 2020).

Kapdan ve arkadaşları (2013) kod klonlarını yapısal düzeyde tespit etmeye odaklanmışlardır. Eski klon algılama yöntemlerinin mimari düzeydeki tekrarları yakalamakta yetersiz olduğu gösterilmiş ve bu sorunu çözmek için metrik temelli bir yaklaşım önerilmiştir. Araştırmada, yazılım kalitesi metrikleri olarak sınıf karmaşıklığı, metot bağımlılığı, ağaç derinliği ve türetilmiş alt sınıf sayısının yapısal benzerlikleri belirlemede kullanılabileceği önerilmiştir. Yazarlar, Sonar platformuna entegre edilecek bir mimari aracılığıyla bu metrikleri kullanarak projeler arasında yapısal klon tespiti yapabileceğini de açıklamışlardır. Bu yaklaşım, metin ya da jeton tabanlı sistemlere kıyasla kodun üst düzey yapısal özelliklerine odaklanarak daha iyi bir benzerlik analizi sunmakta ve daha önce gözden kaçan önemli klon ilişkilerini ortaya çıkarmaktadır. Özellikle Tip-4 klonların tespitinde geleneksel yöntemlerin zayıf noktalarını kapatma konusunda önemli bir katkı sağlamıştır (Kapdan vd., 2013).

Özen ve Gülseçen (2012), yazılım geliştirme sürecinde kaynak kod intihalini ve klon kod benzerliklerini tespit etme üzerine bir araştırma yapmıştır. Yazarlar,

intihalin yalnızca etik bir sorun olmadığını, aynı zamanda Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu çerçevesinde hukuki bir konu olduğunu vurgulamışlardır. Kaynak kodun yapısının klasik eserlerden farklı olarak daha katı kurallara sahip olması, intihal tespiti için özel araçların kullanımını gerektirmektedir. Bu bağlamda, MOSS, JPlag, CCFinder, Sherlock, SIM, Simian, CPD ve Duplo gibi farklı dillerdeki araçların özellikleri detaylı bir şekilde karşılaştırılmış ve her birinin benzerlik oranı belirleme yöntemleri açıklanmıştır. Ayrıca, kodların sembollere ayrılarak analiz edilmesi, hash algoritmaları ile eşleştirme yapılması ve string tiling gibi yöntemlerin klon kod tespitindeki kullanımı örneklerle gösterilmiştir. Bu çalışma, yazılım mühendisliği ve bilişim hukuku alanında kaynak kod benzerlik analizi için önemli bir katkı sağlamıştır (Özen & Gülseçen, 2012).

Avetisyan ve arkadaşları (2015), yazılım sistemlerinde semantik olarak değiştirilmiş kod klonlarını (T3) bulmanın zorluklarına odaklanarak, LLVM altyapısını kullanarak bir klon tespit çerçevesi geliştirmiştir. Araştırmacılar, mevcut sözcüksel ve sözdizimsel yöntemlerin T3 klonlarını yakalamakta pek başarılı olmadığını söylemektedir. Bunun yerine, program bağımlılık grafikleri (PDG) temelli bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde, kod derlenirken otomatik olarak elde edilen PDG'ler sayesinde hem veri hem de kontrol bağımlılıkları yakalanmaktadır. Sonra bu PDG'ler, izomorfik altçizge analizleriyle incelenerek olası klonlar bulunmaktadır. Geliştirilen sistem, hızlı ön kontroller, grafik bölme algoritmaları ve slice tabanlı eşleştirme gibi adımlar içermekte; böylece sadece yüzeysel benzerlikler değil, kodun işlevsel benzerlikleri de analiz edilebilmektedir. Ayrıca, PDG'leri obfuscation ve transformasyon teknikleriyle değiştirilerek otomatik klon üretimi yapma ve bu yolla geliştirilen algoritmaların doğruluğunu test etme olanağı sağlamaktadır. Literatürde sıkça kullanılan MOSS ve CloneDR gibi araçlarla yapılan karşılaştırmalar, önerilen sistemin büyük projelerde daha fazla klon tespit ettiğini ve daha düşük yanlış pozitif oranları sunduğunu göstermektedir. Bu açıdan çalışma, semantik analizle klon tespitinin ne kadar etkili olduğunu ortaya koymaktadır (Avetisyan vd., 2015).

Yamagata ve arkadaşları (2021), kod klonlarını tespit etmek için karmaşık dil yapılarına ihtiyaç duymayan basit bir araç olan CodeRepeat'i geliştirmiştir. Bu yöntem, kaynak kodlarda tekrarlanan dizileri bularak Type-1 klonları işaretlemekte ve lexing ya da parsing gibi adımlara gerek duymamaktadır. Bioinformatik alanındaki tekrar bulma algoritmalarından esinlenerek oluşturulan bu yaklaşım, boşluk, tab ve satır sonlarını normale çevirerek, klasik hash tabanlı araçların kaçırabileceği iç benzerlikleri de yakalamaya yardımcı olmaktadır. Araç, Python, GCC, Firefox ve Android gibi büyük açık kaynak projelerinde test edilmiştir. Özellikle Type-1 klonlarda neredeyse %100 başarı elde etmiş, Type-2 klonlarda ise belli bir doğruluk sağlamıştır. CodeRepeat'in en büyük avantajı, geliştiriciler için anlaşılır ve şeffaf olmasıdır. Bu sayede, büyük yazılım projelerinde hızlı ve sağlam klon analizi yapmak mümkün olmakta ve tekrar eden kütüphaneler ya da modüller sayesinde yazılım bakım süreçlerine katkı sağlanmaktadır (Yamagata vd., 2021).

Feng ve arkadaşları (2020) tarafından geliştirilen CodeBERT modeli, doğal dil ve programlama dili çiftleri içeren büyük bir veri seti üzerinde iki modlu (bimodal) ön eğitim yaparak yazılım mühendisliğiyle ilgili görevlerde gömülü temsiller öğrenmeyi hedeflemektedir. Model, Transformer mimarisine dayanmaktadır. Kod arama ile koddan belge üretme gibi görevlerde incelenmiş, geleneksel yöntemlere göre daha iyi sonuçlar vermeyi başarmıştır. Özellikle, sadece kod veya yalnızca doğal dil kullanan tek modlu (unimodal) verilerin de eğitime dahil edilmesi, modelin daha güçlü temsiller elde etmesine yardımcı olmuştur. Bu çalışma, gömülü temsillerin kod klon tespiti gibi semantik analiz gerektiren görevlerde işe yaradığını göstermektedir (Feng vd., 2020).

Guo ve arkadaşları (2021) tarafından geliştirilen GraphCodeBERT modeli, geleneksel dizesel kod temsil yöntemlerinin ötesine geçmektedir. Bu model, programların veri akış grafikleri üzerinden yapısal ilişkileri öğrenmektedir. Yani, kodun sadece sözdiziminden değil, değişkenler arasındaki veri akışından da yararlanarak daha anlamlı şekillerde temsiller oluşturmaktadır. Kod tamamlama, hata tespiti ve özellikle klon tespiti gibi görevlerde, GraphCodeBERT'in eski modellere göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Araştırmalarda, Type-3 ve Type-4 gibi semantik benzerlik taşıyan klon türlerinin tespitinde bu yapısal temsillerin büyük avantaj sağladığı da ifade edilmektedir (Guo vd., 2021).

Chen ve arkadaşları (2021) tarafından geliştirilen Codex modeli, GPT-3'e dayanan büyük bir dil modelidir. Bu model hem doğal dil hem de kod üretiminde oldukça iyi bir performans gösteriyor. Özellikle farklı programlama dillerinde eğitildiği için, yazılım görevlerini doğal dil komutlarıyla yerine getirme yeteneği dikkat çekmektedir. Codex, kod önerisi, hata düzeltme ve çeviri gibi işlerde faydalı bir araç olarak görülmektedir. Büyük ölçekte çok dilli kod veri kümeleri üzerinde eğitim aldığı için yazılım desenlerini anlaması da kolaylaşmaktadır. Bu sayede, kod klonları gibi görevlerde benzerlikleri yakalayabilmektedir. Böylelikle klon tespiti gibi görevlerde hem sözdizimsel hem de anlamsal benzerlikleri kavrayabilecek bir temel oluşturmuştur (M. Chen vd., 2021).

Kod klonu tespiti üzerine önemli çalışmalardan biri, Mubarak-Ali ve Sulaiman (2020) tarafından ortaya konan Generic Code Clone Detection (GCCD) modelidir. Bu model, beş aşamadan oluşuyor: ön işleme, dönüştürme, parametre ayarlama, kategorilere ayırma ve eşleşme bulmaktır. Eclipse Ant projesinde uygulanan yöntemle Type-1'den Type-4'e kadar farklı klon türleri düzenli bir şekilde tespit edilmiştir. Model, fonksiyonların başlık ve gövde oranlarını kullanarak Öklit mesafesini üzerinden klon çiftlerini sınıflandırmıştır. Çalışmada doğruluk ve hassasiyet gibi ölçütler raporlanmamış, ama hem sözdizimsel hem de anlamsal benzerliklerin ayırt edilebildiği görülmüştür. Bu çalışma, modelin başka programlama dillerinde de kullanılmasına zemin hazırlamıştır ve sonraki araştırmalara ilham vermiştir (Mubarak-Ali & Sulaiman, 2020).

Yapılan araştırmalar, kod klonlarını bulmak için kullanılan klasik yöntemlerin bazı durumlarda işe yaradığını göstermektedir. Ama özellikle anlam (semantik) tabanlı klonları tespit etmede yetersiz kalmaktadırlar. Son yıllarda bu sorunları

aşmak için grafik tabanlı modeller, ölçümsel analiz yöntemleri ve dil bağımsız araçlar geliştirilmiştir. Literatürdeki yenilikler, klon tespitinin sadece teknik bir problem olmadığına, aynı zamanda ölçeklenebilirlik, çok dillilik (multi-linguality), bakım kolaylığı gibi yazılım mühendisliğinin temel ihtiyaçları ile yakından ilişkili çok yönlü bir konu olduğuna işaret etmektedir. Bu nedenle hem geleneksel yapısal analizleri hem de derin öğrenmeye dayalı gömülü temsilleri birleştiren melez yaklaşımlar, klon tespiti alanında giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

4. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, kod klonlarını sınıflandırmak için veri setinin hazırlanmasından özniteliklerin çıkartılmasına ve makine öğrenmesi modellerinin eğitilmesinden performans değerlendirmelerine kadar her aşama dikkatlice ele alınmıştır. Farklı klon türlerini (Type-1, Type-2, Type-3 ve Type-4) ayırmak için önce yapısal ve içerik temelli özellikler belirlenmiştir; bunun için header ve body uzunluklarıyla TF-IDF, Word2Vec ve FastText gibi göstergeler kullanılmıştır. Daha sonra bu özellikler farklı makine öğrenmesi algoritmalarıyla değerlendirilmiş ve model sonuçları çeşitli metriklerle analiz edilip karşılaştırılmıştır. Her sınıfın model üzerindeki etkisini net bir şekilde görmek için dengeli bir eğitim-test ayrımı yapılmış; böylece sınıflar arasındaki dengesizlikten kaynaklanabilecek hataların önüne geçilmeye çalışılmıştır. Bu bölümde tüm süreçler teknik detaylarıyla açıklanarak çalışmanın şeffaflığı sağlanmıştır.

4.1. Veri Seti

Bu çalışmada, yazılım mühendisliğinde sıkça karşılaşılan kod klonu probleminin sınıflandırması için özel bir veri seti kullanılmıştır. “GCCD” (A Benchmark Dataset for Code Clone Detection) adındaki bu veri seti, Mendeley Data üzerinden kamuya açık bir şekilde paylaşılmıştır (Mubarak-Ali & Sulaiman, 2020). Veri seti, EclipseAnt adlı açık kaynak bir Java projesinden elde edilmiştir. EclipseAnt, Apache Ant ile çalışan büyük ve karmaşık bir derleme otomasyon projesidir, bu da onu endüstriyel düzeyde kod klon analizleri için uygun bir seçenek yapmaktadır.

GCCD veri seti, dört ana klon türünü içermektedir: Type-1 (tamamen aynı kodlar), Type-2 (sözdizimi açısından benzer ama isimleri farklı olan kodlar), Type-3 (bazı satırları değiştirilmiş olan benzer kodlar) ve Type-4 (anlam olarak benzer ama yapıları farklı kodlar). Veri setinin her satırında iki kod parçasının çeşitli özellikleri yer almaktadır. Header 1, Header 2, Body 1 ve Body 2 sütunları, karşılaştırılan kod parçalarının başlık ve gövde bölümlerinin karakter uzunluklarını göstermektedir. Type sütunu ise bu kodların hangi klon türüne ait olduğunu belirtmektedir. Veri setinin yaklaşık 6600 örnekle geniş ve dengeli bir yapıya sahip olması, sınıflandırma algoritmalarının farklı türler arasındaki ayrımı öğrenmesine yardımcı olmaktadır.

4.2. Özellik Çıkarımı

Ham veri setindeki başlık ve gövde uzunlukları, sayı olmalarına rağmen model için hemen anlaşılamayacak bir yapıya sahiptir. Bu yüzden, kod çiftleri arasındaki yapısal benzerliği ifade etmek amacıyla Denklem 1’de tanımlanan başlık oranı (header ratio) ve Denklem 2’de tanımlanan gövde oranı (body ratio) olmak üzere iki yeni özellik hesaplanmıştır. Bu oranlar, her iki kod bloğundaki ilgili kısımların karakter uzunluklarının birbirine yakınlıklarını göstermekte ve aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır:

$$\text{header_ratio} = \frac{\min(\text{Header 1}, \text{Header 2})}{\max(\text{Header 1}, \text{Header 2})} \quad (1)$$

$$\text{body_ratio} = \frac{\min(\text{Body 1}, \text{Body 2})}{\max(\text{Body 1}, \text{Body 2})} \quad (2)$$

Bu iki oran sayesinde, kod çiftleri arasındaki boyut farkı dengelenmiş ve sınıflandırma algoritması için daha anlamlı bir veri sunulmuştur. Örneğin, iki kod parçasının başlık uzunlukları birbirine yakınsa, header ratio değeri 1’e yaklaşmaktadır. Bu da aralarındaki benzerliğin yüksek olduğunu göstermektedir. Tam tersi durumda ise değer 0’a yaklaştıkça yapısal farkın arttığı anlaşılmaktadır. Klon çiftleri arasındaki anlam benzerliğini ölçmek için 3 farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler aşağıda açıklanmaktadır.

TF-IDF: Kod parçalarının metinleri, kelime sıklıklarına göre sayısal vektörlere dönüştürülmüştür ve iki klon örneği arasındaki benzerlik, kosinüs benzerliği ile hesaplanmıştır. Sadece kelime düzeyindeki anlamları taşıyan öğelerin vektörleştirilmesi için 'token_pattern="(?"u)\b\w+\b"' deseni kullanılmıştır. Metinleri standart hale getirmek için küçük harfe çevirme (lowercase), kök bulma, durak kelimelerinin çıkarılması gibi ön işlemler yapılmıştır, bu da modelin doğruluk oranını arttırmıştır. Hesaplanan benzerlik skoru, 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır; skoru 1’e yakın olanlar, iki metin arasında yüksek benzerlik, 0’a yakın olanlar ise düşük benzerlik anlamına gelmektedir. Özellikle Type-3 ve Type-4 gibi karmaşık klon türlerinin doğru sınıflandırılmasında bu anlam benzerliği önemli bir katkı sağlamaktadır.

Word2Vec: Kod parçaları, kelime gömme (embedding) yöntemi olan Word2Vec ile vektörleştirilmiştir. Bu yöntemde her kelime, çok boyutlu bir vektör ile temsil edilmektedir ve bu vektörler büyük bir metin koleksiyonu üzerinde kelimelerin bağlam içindeki ilişkilerini öğrenerek oluşturulmaktadır. Tüm kelimeler için elde edilen vektörlerin ortalaması alınarak her bir kod satırı için tek bir temsilci vektör oluşturulmaktadır. Sonrasında, iki klon örneği arasındaki benzerlik, bu ortalama vektörlerin kosinüs benzerliği ile ölçülmektedir. Word2Vec’in bağlamsal anlamları yansıtmaya yeteneği, özellikle

yapısal olarak benzer ama farklı kelimeler içeren kod parçalarını ayırt etme konusunda faydalı olmuştur.

FastText: fastText, kelimeleri vektörlere dönüştürürken Word2Vec'e benzemektedir fakat her kelimeyi alt kelimelerine (subword – karakter n-gram'ları) ayırarak daha esnek bir temsil sunmaktadır. Bu yöntem sayesinde nadir veya daha önce hiç karşılaşılmamış kelimeler için dahi anlamlı vektörler elde edilebilmektedir. Kod satırları için fastText vektörleri çıkarılmakta ve bu vektörlerin ortalaması alınarak bir blok temsili oluşturulmaktadır. Benzerlik ölçümü ise kosinüs benzerliği ile yapılmaktadır. Teknik terimler ya da değişken adları içeren kod metinlerinin analizini yaparken fastText'in alt-kelime yapısı, modelin genel başarısını artırmış ve sınıflandırmada daha iyi sonuçlar vermiştir.

4.3. Veri Ayırma Süreci

Modelin klon türlerini değerlendirirken her sınıftan eşit sayıda örnek kullanabilmek için, Type-1, Type-2, Type-3 ve Type-4 sınıflarından rastgele 20'şer örnek test setine alınmıştır. Geri kalan örnekler eğitim seti olarak kullanılmıştır. Böylece toplam 80 örnekten oluşan dengeli bir test seti ve yaklaşık 6550 örnekten oluşan geniş bir eğitim seti oluşturulmuştur. Bu yaklaşım sayesinde sınıflar arası dengesizlikten kaynaklanan sorunları önlemiş ve her klon türü için eşit test koşulları sağlanmıştır. Bu veri ayırma stratejisi, örneği az olan Type-1 gibi sınıfların dışarıda kalmasını engellemiş ve dört sınıfın da test sürecine dahil olmasını sağlamıştır. Her sınıftan aynı sayıda örnek almak, azınlık olan sınıfların göz ardı edilmesini önlemiştir. Bu ayırma stratified sampling mantığına yakın bir şekilde yapılmış olup, test setinde her bir sınıfın eşit temsil edilmesi sağlanmıştır.

4.4. Sınıflandırma Yöntemi

Bu çalışmada, kod klonlarını sınıflandırmak için Random Forest (RF), XGBoost (XGB), Support Vector Machines (SVM) ve Multilayer Perceptron (MLP) olmak üzere dört farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Bu yöntemler hem doğruluk hem de genel başarı oranı açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında uygulanan yöntemler aşağıda açıklanmaktadır.

RF (Breiman, 2001) birden fazla karar ağacından oluşan bir topluluk (ensemble) öğrenme yöntemidir. Her bir ağaç, rastgele veri alt kümeleriyle ve özniteliklerle eğitilmektedir. Bu sayede modelin aşırı öğrenme (overfitting) riski azalırken, genelleme yeteneği artmaktadır. Bu çalışma için 100 karar ağacı kullanılarak tekrarlanabilirlik sağlamak için random state 42 olarak ayarlanmıştır.

XGB (T. Chen & Guestrin, 2016) ağaç tabanlı gradyan artımlı yöntemlerin daha optimize bir versiyonudur. Her yeni ağaç, önceki ağaçların hatalarını azaltacak şekilde eğitilmektedir. Düzenleme (regularization) terimleri sayesinde aşırı öğrenme (overfitting) riski minimize edilmektedir. Bu model, sınıflar arası farkları öğrenme konusunda iyi bir performans sergilemiştir ve RF ile benzer doğruluk oranları elde edilmiştir.

SVM (Cortes vd., 1995) sınıflar arasındaki en iyi ayırıcı düzlemi bulmaya yönelik bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Küçük ve ayrık sınıf kümelerinde yüksek performans göstermektedir. Bu çalışmada doğrusal çekirdek (linear kernel) tercih edilmiştir. Ancak SVM algoritması, eksik değer (NaN) içeren veri yapılarıyla doğrudan çalışmadığı için ön işleme aşamasında veriler dikkatle hazırlanmıştır.

MLP (Rumelhart vd., 1986) temel bir yapay sinir ağıdır ve giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve çıkış katmanından oluşmaktadır. MLP, karmaşık karar sınırlarını öğrenme yeteneği sayesinde esnek bir sınıflandırıcıdır. Bu çalışmada *MLPClassifier* modeli, *sklearn* kütüphanesi ile uygulanmış ve varsayılan parametrelerle eğitilmiştir. Tüm bu yöntemler aynı veri kümesi üzerinde test edilmiş ve başarı metrikleri karşılaştırılmıştır. Farklı algoritmaların kendine özgü avantajları sayesinde modelin güçlü ve zayıf yönleri daha net görülmüştür. Sonuçlar, RF ve *XGB* modellerinin en yüksek başarıyı elde ettiğini ortaya koymuştur ve bu modeller üzerinden ROC eğrisi ve karmaşıklık matrisi gibi değerlendirmeler yapılmıştır.

4.5. Performans Değerlendirme Yöntemleri

Modelin doğruluğunu ve genel başarısını ölçmek için farklı performans değerlendirme metrikleri kullanılmıştır. Bu metrikler, sınıflandırma problemlerinde sıkça tercih edilmektedir ve sınıflar arası dengesizlik gibi durumlarda bile güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada öncelikli olarak doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skoru hesaplanmıştır.

- Doğruluk: Modelin tüm sınıflar üzerinde doğru tahmin ettiği örneklerin toplam örnek sayısına oranıdır. Genel başarıyı ifade eder, ancak sınıf dağılımı dengesizse yanıltıcı olabilmektedir.
- Hassasiyet: Her bir sınıf için yapılan doğru pozitif tahminlerin, o sınıfa yapılan tüm tahminlere oranını göstermektedir. Yanlış pozitiflerin etkisini ölçmek açısından önemlidir.
- Duyarlılık: Bir sınıfa ait gerçek örneklerin ne kadarının doğru tespit edildiğini göstermektedir. Özellikle azınlık sınıflar için başarıyı analiz etmede kullanılmaktadır.

- F1-skor: Kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalamasıdır. Her iki metriğin dengeli bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Bu metrikler, scikit-learn kütüphanesindeki `classification_report` fonksiyonu ile hesaplanmıştır. Ayrıca, modelin sınıflarını ne kadar iyi ayırt edebildiğini görmek için bir confusion matrix (karışıklık matrisi) hazırlanmıştır. Bu matris, doğru ve yanlış tahmin sayıları hakkında detaylı bilgi vererek modelin nerelerde hata yaptığını göstermektedir. En iyi performans gösteren model için ise ayrıca ROC eğrisi çizilmiştir ve sınıflandırma başarısı AUC (Area Under the Curve) değeri ile de görsel olarak desteklenmiştir.

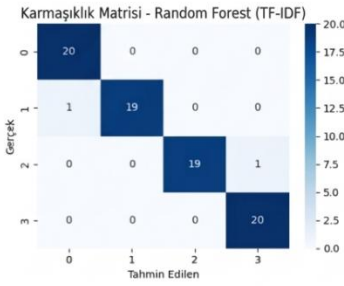
5. Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde, geliştirilen modelin farklı özellik çıkarım yöntemleri ve sınıflandırma algoritmaları ile gösterdiği performans metrikleri sunulmaktadır. Kod klon tespiti için oluşturulan veri seti, dört farklı klon türünü (Type-1, Type-2, Type-3 ve Type-4) eşit miktarda içerecek şekilde hazırlanmıştır. Her klon türü için 20 örnekle toplamda 80 örnek üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Özellik çıkarımında `header_ratio`, `body_ratio`, `TF-IDF`, `fastText` ve `Word2Vec` gibi yöntemler kullanılmıştır; bu özellik kombinasyonları dört farklı sınıflandırıcı (RF, SVM, MLP ve XGB) ile test edilmiştir. Deneysel analiz sürecinde doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1-skoru gibi yaygın başarı metrikleri kullanılmış ve sonuçlar karışıklık matrisleri ile sunulmuştur. Ayrıca, modelin genel başarı düzeyini incelemek için ROC eğrileri ve ayrıştırılmalı analizler yapılmıştır.

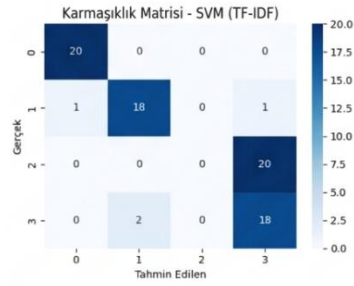
RF modeli, TF-IDF tabanlı sınıflandırma deneylerinde %97,5 doğruluk ile en iyi sonucu getirmektedir. Tablo 2’de görüldüğü üzere bu modeli %96,2 ile XGB izlemektedir. Şekil 2-a’daki karmaşıklık matrisi, RF’nin özellikle Type-1 ve Type-4 sınıflarını doğru bir şekilde sınıflandırdığını göstermektedir. XGB’nin Şekil 2-d’deki sonuçlarına baktığımızda sadece Type-2 ve Type-3 sınıflarında birkaç hata yapıldığı görülmektedir. Diğer yandan, Şekil 2-b’deki SVM ve Şekil 2-c’deki MLP modelleri özellikle Type-3 sınıfında başarılı bir performans sergileyememiştir. SVM modelinde bu sınıfa ait bütün örnekler yanlış sınıflandırılmıştır, MLP modelinde ise sadece %15’i doğru tahmin edilebilmiştir. Bu bulgular, TF-IDF gibi kelime frekans temelli metinsel özelliklerin, doğrusal ayırım yapamayan ağaç tabanlı modellerle (özellikle RF ve XGB) daha etkili çalıştığını ortaya koymaktadır.

Tablo 2 Modellerin TF-IDF İçin Sınıflandırma Performans Metrikleri

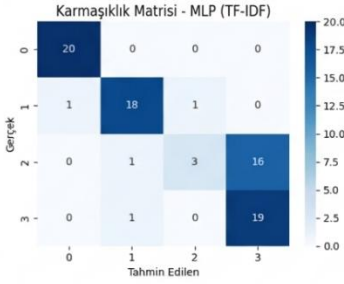
No	Model	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 skor
1	RF	0.9750	0.9762	0.9750	0.9750
2	XGB	0.9625	0.9654	0.9625	0.9624
3	MLP	0.7500	0.7863	0.7500	0.7041
4	SVM	0.7000	0.5785	0.7000	0.6214



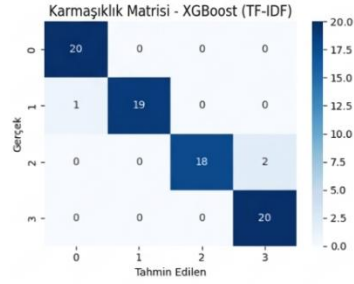
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2 Karmaşıklık Matrisi (a) RF- TF-IDF, (b) SVM- TF-IDF, (c) MLP- TF-IDF, (d) XGB- TF-IDF

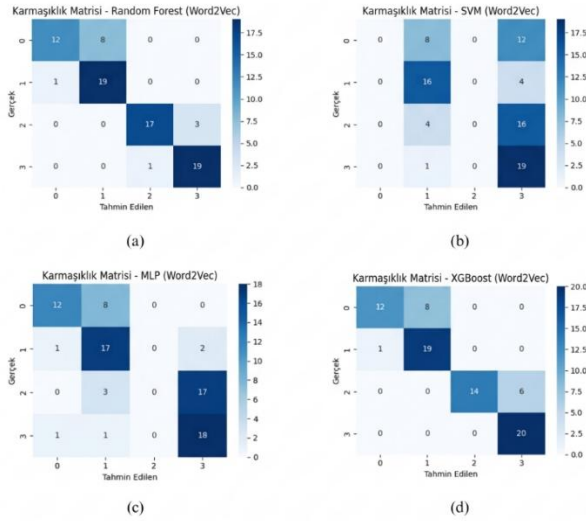
Word2Vec tabanlı özelliklerle yapılan sınıflandırma denemelerinde en iyi sonuç %83,7 ile RF modeliyle elde edilmiştir. Tablo 3'teki verilere göre, bu modelin ardından %81,2 ile XGB, %58,7 ile MLP ve %43,7 ile SVM modelleri gelmektedir. Şekil 3-a'daki karmaşıklık matrisine göre, RF modeli Type-1 sınıfında biraz zayıf kalırken, Type-3 ve Type-4 sınıflarında yüksek bir doğruluk sağlamaktadır. Şekil 3-d'deki XGB sonuçları incelendiğinde ise Type-2 ve Type-3 sınıflarının %90 ve %70 oranında doğru tahmin edildiğini, ancak Type-1

sınıfında hata yüzdesinin yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 3-b’deki SVM modeli, Type-1 ve Type-2 gibi düşük varyansa sahip sınıflarda dahi başarısız olmuş ve Type-3 sınıfında ise belirgin hatalar göstermiştir.

Tablo 3 Modellerin Word2Vec İçin Sınıflandırma Metrikleri

No	Model	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 skor
1	RF	0.8375	0.8587	0.8375	0.8338
2	XGB	0.8125	0.8490	0.8125	0.8072
3	MLP	0.5875	0.4825	0.5875	0.5078
4	SVM	0.4375	0.2311	0.4375	0.2971

Şekil 3 ‘deki karmaşıklık matrisi verilen MLP modeli Type-2 ve Type-3 sınıflarının neredeyse tamamını yanlış sınıflandırmıştır. Bu sonuçlar, Word2Vec tabanlı temsil yöntemlerinin klasik vektörleştirme yöntemlerine göre daha zayıf ayırım gücü sağladığını, özellikle karmaşık sınıflarda ağaç tabanlı modellerin bu açığı kapatma konusunda daha etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 3 Karmaşıklık Matrisi (a) RF- Word2Vec, (b) SVM- Word2Vec, (c) MLP- Word2Vec, (d) XGB- Word2Vec

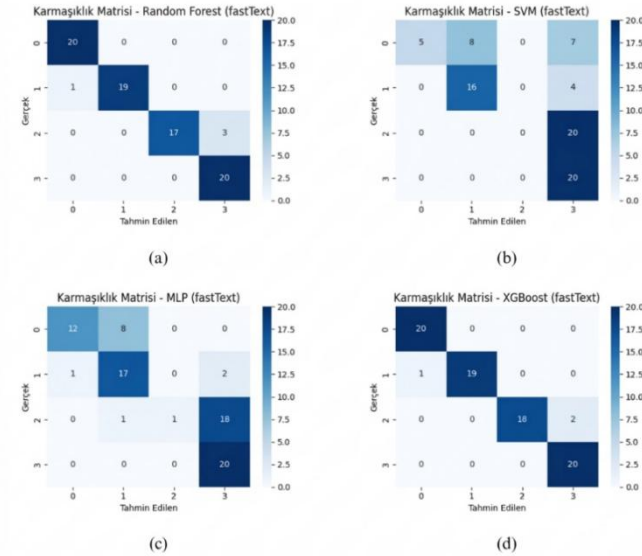
fastText gömme yöntemine dayalı sınıflandırma deneylerinde en iyi performansı XGB ve RF modelleri elde etmiştir. XGB modeli %96,2 doğrulukla tüm sınıflar arasında dengeli bir performans sergilemiştir. Şekil 4-d’de görüldüğü

üzere özellikle Type-1, Type-2 ve Type-4 sınıflarındaki örneklerin neredeyse hepsini doğru tahmin etmiştir. Benzer şekilde, RF modelinin yüksek doğruluğu ve tutarlı performansı Şekil 4-a'daki karmaşıklık matrisinde açıkça görülmektedir. Her iki modelin sonuçları, Tablo 4'te yer alan karşılaştırmalı metrik değerlerinden de anlaşılabileceği üzere, fastText vektör temsillerini en iyi değerlendiren algoritmalar olmuştur.

Tablo 4 Modellerin FastText İçin Sınıflandırma Performans Metrikleri

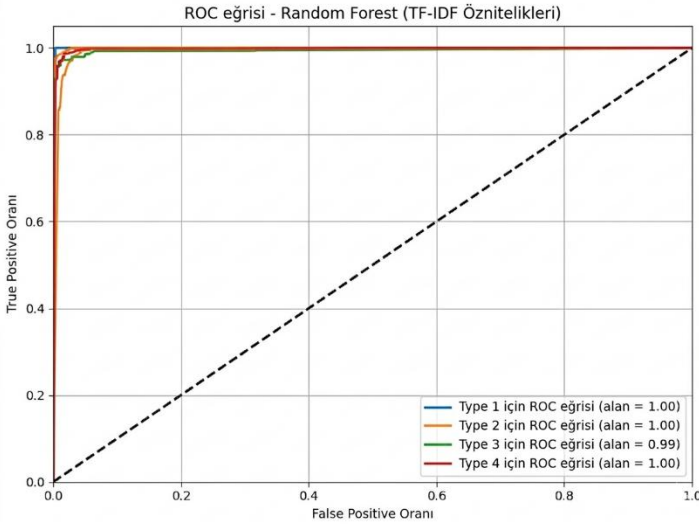
No	Model	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 skor
1	RF	0.9625	0.9654	0.9625	0.9624
2	XGB	0.9500	0.9555	0.9500	0.9498
3	MLP	0.6250	0.7692	0.6250	0.5571
4	SVM	0.5125	0.5147	0.5125	0.4227

Diğer yandan, MLP ve SVM modelleri fastText tabanlı girişlerde düşük performans göstermişlerdir. MLP modelinin Type-2 sınıfında sadece bir doğru tahmin yaptığını Şekil 4-c'de görülmektedir. SVM ise Şekil 4-b'de görüldüğü üzere düşük bir performans sergilemiştir.



Şekil 4 Karmaşıklık Matrisi (a) RF- FastText, (b) SVM- FastText, (c) MLP- FastText, (d) XGB – FastText

Type-2 ve Type-3 sınıflarını neredeyse tamamen yanlış sınıflandırmıştır. Bu durum, fastText'in sağladığı bağlamsal kelime ilişkilerinin doğrusal sınıflayıcılar tarafından etkili bir şekilde kullanılmadığını, ama ağaç tabanlı modellerin bu verileri daha iyi işleyebildiğini göstermektedir. Modelin sınıf ayırt edici performansını görselleştirmek amacıyla, yalnızca en başarılı sonuçları elde eden model için ROC eğrisi çizilmiştir. Şekil 5'te, TF-IDF tabanlı özelliklerle eğitilen RF modelinin eğrisi yer almaktadır. Çoklu sınıf yapısında oluşturulan ROC eğrisine göre, Type-1, Type-2 ve Type-4 sınıfları için AUC değeri 1,00 olarak bulunmuştur, bu da modelin bu sınıfları hatasız bir şekilde ayırt ettiğini göstermektedir. Type-3 sınıfı için AUC değeri ise 0.99, bu da modelin bu sınıfı da oldukça doğru bir şekilde ayırt edebildiğini ortaya koymaktadır. Eğrilerin ideal (0,1) köşe noktasına çok yakın olması, RF modelinin yüksek özgüllük ve duyarlılıkta çalıştığını göstermektedir. Bu sonuçlar, TF-IDF tabanlı vektör temsillerinin güçlü ayırt edebilme yeteneği ile birleştiğinde, ağaç tabanlı modellerin özellikle çoklu sınıf kod klon tespitinde etkili çözümler sunduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 5 RF- TF-IDF ROC eğrisi

5.1. Ayırıştırma Çalışması

Modelin hangi özellik kombinasyonu ile en iyi sonucu verdiğini incelemek için bir ablasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, header_ratio ve body_ratio özellikleri ayrı ayrı ve birlikte test edilmiştir. Yalnızca header bilgisine dayanan modelin sonuçları Tablo 5'te yer almaktadır. Bu tabloda doğruluk oranı %89,4 çıkmıştır. Özellikle Type-1 sınıfında düşük bir başarı olduğu dikkat çekmektedir. Tek başına body bilgisi kullanıldığında ise Tablo 6'da görüldüğü gibi sonuçlar

%85,7'ye düşmüştür ve burada hassasiyet, duyarlılık ile F1-skoru gibi değerlerde büyük kayıplar görülmüştür.

Tablo 5 Sadece Header Verisiyle Elde Edilen Sınıflandırma Performans Metrikleri

Sınıf	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 skoru
Type-1	0.0000	0.0000	0.0000
Type-2	0.6835	0.9141	0.7822
Type-3	0.7207	0.5517	0.6250
Type-4	0.9429	0.9609	0.9518
Doğruluk	-	0.8939	-
Makro Ort.	0.5868	0.6067	0.5897
Ağırlıklı Ort.	0.8718	0.8939	0.8802

Her iki özelliğin bir arada kullanıldığı durum Tablo 7'de gösterilmiştir. Bu kombinasyonla modelin doğruluk oranı %94,6'ya yükselmiş ve diğer metriklerde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Şekil 5'teki ROC grafiği, Header + Body kombinasyonunun diğer iki versiyona göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Sonuçlar, her özelliğin modelin başarısına farklı katkılarda bulunduğunu ve birlikte kullanıldıklarında özellikle karmaşık klon türlerini daha doğru sınıflandırmaya yardımcı olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 6 Sadece Body Verisiyle Elde Edilen Sınıflandırma Performans Metrikleri

Sınıf	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 skoru
Type-1	0.0000	0.0000	0.0000
Type-2	0.7215	0.6994	0.7103
Type-3	0.5857	0.2828	0.3814
Type-4	0.8861	0.9716	0.9269
Doğruluk	-	0.8577	-
Makro Ort.	0.5483	0.4884	0.5064
Ağırlıklı Ort.	0.8191	0.8577	0.8322

Tablo 7 Header ve Body Verisiyle Elde Edilen Sınıflandırma Performans Metrikleri

Sınıf	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 skoru
Type-1	0.8684	0.7174	0.7857
Type-2	0.9017	0.9571	0.9286
Type-3	0.8000	0.7448	0.7714
Type-4	0.9695	0.9755	0.9725
Doğruluk	-	0.9464	-
Makro Ort.	0.8849	0.8487	0.8646
Ağırlıklı Ort.	0.9453	0.9464	0.9454

6. Tartışma

Bu çalışmada, kod klonlarını sınıflandırmak için farklı gömme yöntemleri (TF-IDF, Word2Vec, fastText) ve sınıflandırma algoritmaları (RF, SVM, MLP, XGB) karşılaştırılmıştır. Deneysel bulgular, özellik çıkarımı ve model seçiminin sınıflandırma başarısı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle, TF-IDF gibi istatistiksel yaklaşımların ağaç tabanlı algoritmalarla bir araya geldiğinde nasıl daha iyi performans gösterdiği sunulmuştur.

TF-IDF kullanılarak yapılan deneylerde, RF modeli %97,5'lik bir doğruluk elde ederek en iyi sonuçları vermiştir. Bu, TF-IDF'in kelime frekansı bazlı yapısının, özellikle Type-1 ve Type-4 gibi belirgin farklılıklara sahip klon türlerini ayırt etmede etkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, XGB modeli de %96,2 doğrulukla yüksek bir performans göstermiştir. Fakat SVM ve MLP gibi doğrusal sınıflandırıcılar özellikle Type-3 sınıfında pek başarılı olamamıştır. Bu sınıftaki örnekler çoğunlukla yanlış sınıflandırılmıştır. Bu, TF-IDF'in doğrusal olmayan sınırlar gerektiren yapıları ayırt etmede daha iyi olduğunu göstermektedir. Word2Vec ile yapılan deneylerde performansın ciddi şekilde düştüğü görülmüştür. RF'nin doğruluğu %83,7'ye gerilerken, SVM ve MLP bazı sınıflarda neredeyse hiç iş görememiştir. Type-2 ve Type-3 gibi ortalama benzerlikteki klon türlerinde Word2Vec, sınıflar arası ayrımı yeterince güçlü bir şekilde gösterememiştir. Bu durum, Word2Vec'in bağlamsal bilgi taşımaya rağmen tüm sınıflarda eşit temsil sunamadığından kaynaklanmaktadır. FastText kullanıldığında ise karakter düzeyinde bilgi kullandığı için daha iyi sonuçlar alınmıştır. XGB %96,2, RF %95 doğruluk ile başarılı sonuçlar vermiştir.

Elde edilen bulgular fastText'in karakter ve kelime düzeyinde birlikte çalışması sayesinde özellikle varyasyon gösteren Type-2 ve Type-4 klonlarında daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak SVM ve MLP bu verilerle de beklenen başarıyı gösterememiş ve bazı sınıflarda doğruluk elde edememiştir. Ayrıca ROC eğrisi analizi, TF-IDF ve RF kombinasyonunun sınıflar arasında iyi bir ayırt edicilik sunduğunu ortaya koymuştur. Şekil 5'teki eğriler, özellikle Type-1 ve Type-4 için ROC alanının 1'e yakın olduğunu ve bu sınıfların yüksek ayırt ediciliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Ablasyon çalışması kapsamındaki deneylerde, yalnızca Header veya Body ile yapılan sınıflandırmalarda doğruluk oranlarının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Type-1 sadece Header veya Body ile doğru sınıflandırılmamış ve çoğu örnek yanlış etiketlenmiştir. Ancak, Header ve Body birlikte kullanıldığında doğruluk oranı %94,6'ya yükselmiş ve Type-1 ile Type-2 ve Type-3'te de önemli bir iyileşme görülmüştür. Bu bulgu, yapısal ve içeriksel bilginin birleşiminin klonları doğru tanımlamada önemli olduğunu göstermektedir.

7. Sonuç

Bu çalışmada, kod klon türlerini doğru bir şekilde sınıflandırmak için farklı metin temsilleri ve makine öğrenmesi sınıflandırıcıları incelenmiştir. Deneyler modelin başarısının, büyük ölçüde kullanılan özellik çıkarım yöntemine bağlı olduğunu göstermiştir. Geleneksel vektörleştirme yöntemlerinden biri olan TF-IDF, uygun sınıflandırıcılarla beraber kullanıldığında hala iyi sonuçlar vermektedir. Özellikle RF ve XGB gibi ağaç tabanlı modellerle birlikte kullanıldığında, bu temsiller yüksek doğruluk oranlarına ulaşmaktadır. Word2Vec ve fastText gibi modern gömme teknikleri, bazı sınıflarda başarılı olsa da genelde tutarlı bir başarı gösterememiştir. FastText özellikle Type-2 ve Type-4 sınıflarında güçlü bir performans göstererek, karakter düzeyindeki bilgileri iyi bir şekilde aktarma avantajını sunmuştur. Ama bu yöntemlerin etkili sonuçlar vermesi, kullanılan sınıflandırıcının kalitesine ve ayarlarına bağlıdır. Ablasyon çalışmasından elde edilen sonuçlarda ise kodun yalnızca bir kısmının analiz edilmesi ile (örneğin sadece başlık veya gövde) modelin genel başarısının önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmiştir. Hem yapısal hem de içeriksel yönleri birleştiren yaklaşımlar, karmaşık klon türlerinde daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle kod klon tespiti konularında daha çok yönlü özellik temsillerinin kullanılması önerilmektedir. Gelecek çalışmalarda, bu analizler daha büyük veri setleri üzerinde test edilerek geliştirilebilir. Ayrıca, Word2Vec ve fastText gibi yöntemlerin TF-IDF ile bir arada kullanıldığı hibrit yaklaşımlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Derin öğrenmeye dayalı yöntemlerin eklenmesiyle, modelin öğrenme yeteneği artırılarak daha karmaşık klon türlerinin ayrımı daha doğru hale getirilebilir.

Kaynaklar

- Ain, Q. U., Butt, W. H., Anwar, M. W., Azam, F., & Maqbool, B. (2019). A Systematic Review on Code Clone Detection. İçinde *IEEE Access* (C. 7, ss. 86121-86144). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2918202>
- Avetisyan, A., Kurmangaleev, S., Sargsyan, S., Arutunian, M., & Belevantsev, A. (2015). LLVM-based code clone detection framework. *2015 Computer Science and Information Technologies (CSIT)*, 100-104. <https://doi.org/10.1109/CSITechnol.2015.7358259>
- Breiman, L. (2001). *Random Forests* (C. 45).
- Chen, M., Tworek, J., Jun, H., Yuan, Q., Pinto, H. P. de O., Kaplan, J., Edwards, H., Burda, Y., Joseph, N., Brockman, G., Ray, A., Puri, R., Krueger, G., Petrov, M., Khlaaf, H., Sastry, G., Mishkin, P., Chan, B., Gray, S., ... Zaremba, W. (2021). *Evaluating Large Language Models Trained on Code*. <http://arxiv.org/abs/2107.03374>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 13-17-August-2016*, 785-794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Cortes, C., Vapnik, V., & Saitta, L. (1995). Support-Vector Networks Editor. İçinde *Machine Learning* (C. 20). Kluwer Academic Publishers.
- Feng, Z., Guo, D., Tang, D., Duan, N., Feng, X., Gong, M., Shou, L., Qin, B., Liu, T., Jiang, D., & Zhou, M. (2020). *CodeBERT: A Pre-Trained Model for Programming and Natural Languages*. <http://arxiv.org/abs/2002.08155>
- Guo, D., Ren, S., Lu, S., Feng, Z., Tang, D., Liu, S., Zhou, L., Duan, N., Svyatkovskiy, A., Fu, S., Tufano, M., Deng, S. K., Clement, C., Drain, D., Sundaresan, N., Yin, J., Jiang, D., & Zhou, M. (2021). *GraphCodeBERT: Pre-training Code Representations with Data Flow*. <http://arxiv.org/abs/2009.08366>
- Kamiya, T., Kusumoto, S., & Inoue, K. (2002). *CCFinder: A Multilinguistic Token-Based Code Clone Detection System for Large Scale Source Code*.
- Kapdan, M., Aktaş, M., Yiğit, M., Gelişim ve Bilgi Teknolojileri Başkanlığı, K., Hava Yolları, T., Mühendisliği Bölümü, B., Teknik Üniversitesi, Y., & Üniversitesi, B. (2013). *Yapısal Kod Klon Analizinde Metrik Tabanlı Teknikler*.
- Kaushik, H., & Gupta, D. (2023). *Code Clone Detection: An Empirical Study of Techniques for Software Engineering Practice* (C. 13).

- Mehrotra, N., Agarwal, N., Gupta, P., Anand, S., Lo, D., & Purandare, R. (2020). *Modeling Functional Similarity in Source Code with Graph-Based Siamese Networks*. <http://arxiv.org/abs/2011.11228>
- Mubarak-Ali, A.-F., & Sulaiman, S. (2020). Generic Code Clone Detection Model for Java Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 769(1), 12023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/769/1/012023>
- Özen, Z., & Gülseçen, S. (2012). Kaynak Kod Benzerliği ve Klon Kod Tespit Araçları. *System*, 400, 12.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). *Learning Representations by Back-Propagating Errors*.
- Saini, N., Singh, S., & Suman. (2018). Code Clones: Detection and Management. *Procedia Computer Science*, 132, 718-727. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.080>
- Sheneamer, A., & Kalita, J. (2016). A Survey of Software Clone Detection Techniques. İçinde *International Journal of Computer Applications*.
- Yamagata, Y., Hervé, F., Fujiwara, Y., & Inoue, K. (2021). *Finding repeated strings in code repositories and its applications to code-clone detection*.



BÖLÜM 3

Meme Kanserinde Doksorubisin Kullanımı

Gamze Namalır¹ & Metin Konuş² & Menderes Suiçmez³

1.1. Meme Kanserinde Doksorubisin Kullanımı

Kemoterapi, lenf nodu pozitif, tümörü 1 cm'den büyük olan kadınlar için standart tedavi yöntemidir. Doksorubisin hidroklorür (HCl) lipozomal enjeksiyonu, klinik onay alan ilk lipozomal kaplı antikanser ilacı olup, katı tümörler, nakledilebilir lösemiler ve lenfomalar dahil olmak üzere birçok kötü huylu tümöre karşı etkilidir (Slingerland vd., 2012). Doksorubisin şu anda meme kanserini tedavi etmek için kullanılan en etkili kemoterapötik ilaç olmasına karşın yan etkilerinden dolayı kullanımında sınırlamalar mevcuttur. Bu sınırlamalardan biri kanserli olmayan hücreler üzerindeki toksisite diğeri ise ilaç direnci gelişmesidir. Toksik etkileri çok yönlüdür ve kardiyotoksisite en iyi bilinen ve en kapsamlı çalışılan yan etkilerden biridir (Y. Shi vd., 2018). Konvansiyonel doksorubisinin kümülatif dozları 450 mg/m²'nin altında kardiyomiyopati nadiren gözlemlenmiştir; ancak, çalışmalar, doksorubisin kaynaklı konjestif kalp yetmezliğinin (CHF) daha önce belirtilenden daha düşük dozlarda ve daha sık meydana gelebileceğini göstermiştir. Kümülatif dozun ilacın vücut yüzey alanına göre 400 mg/m² olduğu durumlarda konvansiyonel doksorubisin kaynaklı CHF insidansının yaklaşık %5 olduğunu, bu oranın 550 mg/m²'de %26'ya, 700 mg/m²'de %48'e yükseldiğini rapor etmiştir (Swain vd., 2003; Von Hoff vd., 1979). Doksorubisin ile tedavi edilen hasta popülasyonunun %9'unda doksorubisine bağlı kardiyotoksisite meydana geldiği ve alınan kümülatif doza bağlı olarak bu oranın değiştiği bildirilmiştir. Bu kardiyotoksisitenin altında yatan mekanizmalar yoğun bir şekilde araştırılmış olsa da, kesin kanıtlar bulunamamıştır (van der Zanden vd., 2021). Kardiyo toksisitenin altında yatan mekanizmaların apoptoz, mitokondriyal disfonksiyon, kalsiyum düzensizliği, inflamasyon ve oksidatif stres olabileceği rapor edilmiştir (Linders vd., 2023).

¹ Dr., Hitit Üniversitesi, 0000-0001-6588-8504

² Prof. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, 0000-0002-9953-1375

³ Prof. Dr., Hitit Üniversitesi, 0000-0003-0890-8235

1.2.1. Doksorubisin

1950'lerin başlarında antikanser bileşik olarak toprak kaynaklı bir mikroorganizma olan *Streptomyces peucetius* suşundan üretilen bir antibiyotik, fare tümörleri üzerinde iyi aktivite gösterdiği bulundu. Bu yeni bileşik daunorubisin olarak adlandırıldı ve akut lösemi ve lenfoma tedavisinde başarıyla kullanıldı (Brockmann, 1963). Ancak, 1967'de daunorubisinin ölümcül kardiyak toksisiteye neden olabileceği anlaşıldı. Araştırmacılar, 1969 yılında daunorubisinin modifiye edilmiş türevi antrasiklin yapısında Adriamisin adı verilen bir antibiyotik ürettiler daha sonra bu bileşik doksorubisin olarak adlandırıldı (Arcamone vd., 1969). Doksorubisin kemik sarkomları, katı tümörler, lösemi, lenfoma, yumurtalık ve meme kanseri tedavisinde yaygın bir şekilde kullanılan bir kemoterapötik ajandır (Johnson-Arbor & Dubey, 2024). Bu antikanser bileşiğin FDA tarafından bir çok kanser (karsinom, sarkom, hematolojik malignite ve meme kanseri) tedavisinde onaylanmış en etkili kemoterapi ilaçlarından biri olarak kabul edildiği gösterilmiştir (Carvalho vd., 2009).

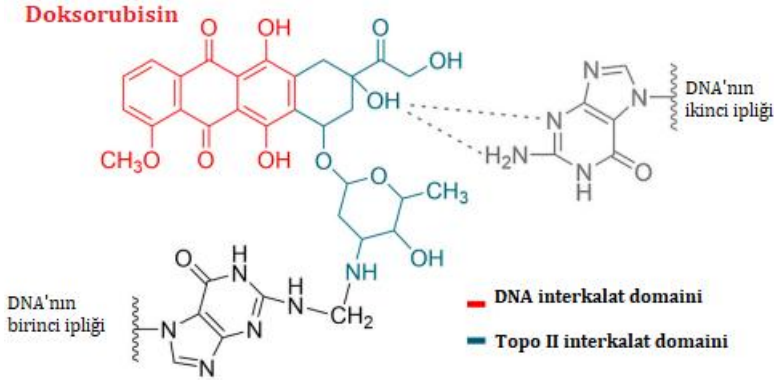
Doksorubisinin etki mekanizması oldukça karmaşıktır ve hücre içine alındıktan sonra birden fazla yolla etki gösterir (Kciuk vd., 2023). Bunun yanı sıra, son çalışmalar doksorubisinin DNA hasarına neden olma, reaktif oksijen türleri (ROS) üretimi, apoptozu tetikleme, mitokondri işlevini bozma, otofaji indüklemeye ve oksidatif stresi artırma gibi çeşitli antikanser mekanizmalara etki ettiğini ortaya koymuştur (Linders vd., 2024). Aşağıda, bu antikanser mekanizmaların bazıları ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

1.2.1.1. DNA İnterkalasyonu

Antrasiklinler çoğunlukla düzlemsel, aromatik moleküllerdir ve aglikon grupları DNA 'da GC baz çiftleri arasına girerek interkalasyon yoluyla DNA'ya bağlanır, böylece komşu baz çiftlerini birbirinden ayırırlar ve bir veya daha fazla şekerle DNA'nın küçük oluşuna yerleşirler. Antrasiklinler, DNA'ya yüksek afinite ile bağlanır. Bir Dox molekülünün bağlanması, çift sarmalın bükümünü -27° kadar gevşetir ve DNA heliksinde pozitif süpersallanmaya yol açar. Bu gevşeme ile DNA topoizomera II enzimi çalışamaz bu olay DNA replikasyonu ve transkripsiyon inhibe olmasına neden olur (Salerno vd., 2010; F. Yang vd., 2013).

Antrasiklin interkalasyonu, DNA'ya bağlı süreçleri etkileyen burulma stresine neden olur ve nükleozomların yapısını ve dinamiklerini değiştirir. Bu, nükleozomların artan şekilde serbest bırakılmasına (nükleozom uzaklaştırılması olarak da adlandırılır) ve nükleozomların kendilerinde yapısal değişikliklere

neden olarak H2A/H2B dimerlerinin tetramerik histon çekirdeğinden ayrılmasını artırır (Martins-Teixeira & Carvalho, 2020). Dox, DNA'nın bir ipliğindeki guanin ile formaldehit aracılığıyla kovalent bir bağ oluşturur ve karşı iplikteki guanin ile hidrojen bağları oluşturur. Antrasiklin gruplarının bağlanma bölgeleri "DNA interkalat domain" kırmızı renkte gösterilmiş, topoizomerez II interkalat domaini ise yeşil renkte gösterilerek Şekil 1'de belirtilmiştir.



Şekil 1. Dox-DNA kompleksinin yapısı (Mattioli vd. (2023)'den modifiye edilmiştir.)

1.2.1.2. DNA-Antrasiklin Kompleks Oluşumu

Antrasiklinler, DNA ile kovalent ve hidrojen bağları aracılığıyla kompleks oluşturur. Bir iplik antrasiklinle kovalent bağlar oluştururken, bu etkileşim diğer iplikte hidrojen bağlarının oluşumuyla stabil hale gelir (Bilardi vd., 2012). Yapısal olarak, antrasiklinler öncelikle GC baz çiftlerinde interkalasyon oluşturur. Bu, guanin bazının diğer DNA bazlarından daha büyük bir yüzey alanına sahip olmasından dolayıdır, bu da antrasiklin molekülü ile etkileşim olasılığını artırır (Chaires vd., 1987).

Antrasiklinlerin döngüye girmeleri ve enzimatik olarak yıkımı DNA-ilâç addüktleri tarafından engellenir, bu şekilde ROS ve toksik metabolitler üretilir (Rephaeli vd., 2007). DNA-ilâç addüktleri, transkripsiyon ve replikasyonun inhibe olması, çift sarmallı kırıkların (DSB) oluşumu ve apoptozun indüklenmesi gibi farklı etkilere sahiptir. İn vitro transkripsiyon deneyleri, Dox'un (formaldehit ile önceden aktive edilmiş) transkripsiyon sürecine bloklar oluşturarak transkripsiyonu engellediğini göstermiştir. Bu blokların, muhtemelen ilâç ile guanin (G) arasındaki etkileşim ve bir zincirler arası G-Dox-G çapraz bağı

oluşumu nedeniyle, GpC bölgelerine yakın yerlerde daha büyük olduğu bulunmuştur (Cullinane & Phillips, 1990).

Bilardi vd., (2012) fare meme kanseri hücrelerine Dox uygulaması sonrası, doksorubisinin [8H]-timidin inkorporasyonunu engelleyerek DNA replikasyonunu bozduğu ve hücre döngüsünü durdurarak Dox'un hücrenin replikatif süreçlerine müdahale etme yeteneğinin olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca, bu ekip DNA replikasyonu esnasında, replikasyon makineleri addükt oluşumu noktalarında duraklayabileceğini ve bunun da DSB'lerin (çift sarmallı kırıklar) ve DNA hasarının olasılığını artırarak replikasyon çatalının çökmesine neden olabileceğini savunmuştur.

1.2.1.3. Topoizomeraz II İnhibisyonu

Memelilerde DNA'da tek iplikli kırıklar oluşturan monomerik tip I topoizomeraz ve çift iplikli kırıklar oluşturan dimerik tip II topoizomeraz enzimleri bulunmaktadır. Bu enzimler, DNA süper sarmallarına bağlanır, DNA'da kırıklar oluşturur, burulma stresini azaltır ve kırıkları yeniden birleştirerek DNA transkripsiyonu, replikasyonu, onarımı ve diğer süreçlere yardım eder. Antrasiklinler ise topoizomeraz II enzim fonksiyonunu engelleyerek abortif antrasiklin-topoizomeraz-DNA üçlü kompleksi oluşturur ve geri dönüşü olmayan DNA hasarı indüklenir. Bu kompleks, DNA-topoizomeraz II kompleksini stabilize eder, muhtemelen enzimi kırılma bölgesinde hapsederek topoizomerazın kırılmış fosfodiester bağlarını düzgün bir şekilde yeniden oluşturmasını engeller. Dolayısıyla, antrasiklinler topoizomeraz II'nin fizyolojik fonksiyonunu bozarak onu DNA'yı kıran bir nükleaz haline dönüştürülür, bu da genomik instabiliteye yol açar ve bu da hücreyi apoptotik yola sürükler (Visone vd., 2020).

1.2.1.4. ROS Oluşumu ve Mitokondriyal Disfonksiyon

Doksorubisinin mitokondride sitozolden 100 kat daha fazla biriktiği bilinmektedir. Bu birikme mitokondrideki oksidatif fosforilasyonun yan ürünü olan ROS üretiminin artmasına neden olmaktadır. ROS, bazı aerobik metabolizma reaksiyonlarında üretilen moleküllerdir; bunlar çoğunlukla mitokondrinin iç zarında oksidatif fosforilasyon sırasında elektron taşıma zincirinde oluşur. ROS seviyesi hücre içerisinde çok arttığı zaman hücre zarında ve hücre yapıları üzerinde hasara yol açarak hücresel disfonksiyon ve apoptoza neden olabilmektedirler (S. Zhang vd., 2012). Doroshov (2019) tarafından Ehrlich kanser hücreleri ile yaptıkları araştırmada Dox dozuna bağlı bir şekilde süperoksit anyonunun üretiminin de arttığını saptandı. Bu, elektronların NADPH'den Dox'a geçtiği ve NADPH: sitokrom P-450 redüktaz tarafından Dox

yarı-kinonuna (SQ-Dox) dönüştürüldüğü, ardından bir oksijen molekülüne (O₂) geçtiği, süperoksit anyonu (O₂⁻) ürettiği ve tekrar bir Dox molekülü elde ettiği döngüsel olarak gerçekleştiği görülmüştür. Bu mekanizma ile Dox, Dau ve bleomisin gibi antrasiklinler, elektron taşıma zinciri komplekslerine doğrudan müdahale ederek ROS üretimini artırmaktadır. Dox, ayrıca kardiyomiyositlerde topoizomeraz IIβ enzimini inhibe ederek mitokondriyal fonksiyonu bozabilirler, bu da nükleer hasara, p53 aktivasyonuna ve mitokondriyal fonksiyonun ve bozuk mitokondriyal biyogenezin aşağı yönlü inhibisyonuna yol açar (S. Zhang vd., 2012).

1.2.1.5. Apoptozun İndüklenmesi

Doksorubisin, otofaji, ferroptoz, nefroptoz, piroptoz ve apoptoz gibi farklı mekanizmalar aracılığıyla kontrollü hücre ölümünü indükleyebilmektedir (Christidi & Brunham, 2021). J. Chen vd., (2011), H9c2 sıçan miyokard hücrelerinde Dox uygulaması sonrası hücrelerde oksidatif stres oluştuğu ve ROS üretiminin arttığını saptamıştır. Bu olayın sonucunda AMPK proteininin aktive olduğu, bu aktivasyonun p53'ün fosforilasyonuna ve sonuç olarak apoptoza yol açtığı bildirilmiştir. Apoptozun gerçekleşme sürecinde p53'ün aktivasyonu, Bax'ın sitoplazmadan mitokondriyal yüzeye taşınmasına neden olur ve Bcl-2 ile kompleks oluşturur. Ardından sitokrom c salınımını gerçekleştirir, sonrasında sitokrom c, ve Apaf-1 procaspase-9 ile kompleks oluşturur, bu da caspase-9 ve caspase-3'ün ve ardından caspase-6 ve caspase-7'nin aktivasyonuna yol açar, bu da apoptoza neden olur. Dox ayrıca NFAT/Fas/FasL yolunu aktive ederek apoptozu indükleyebilmektedir. Wistar sıçanlarında yapılan bir çalışmada Dox'un kardiyomiyositler üzerindeki apoptotik etkisini değerlendirilmiştir. Bu çalışmada Dox uygulaması sonrası, sitokrom c, Bax ve kaspaz-3 protein seviyelerinin değiştiği, mTOR aktivitesinin azaldığı ve Bcl-2 seviyelerini azalırken, ERK1/2, MAPK ve JNK seviyelerini arttığı bildirilmiştir. Ayrıca, Dox'un nükleer faktör-aktif T hücresi 2/3/4 (NFAT 2/3/4)'ü modüle ettiği Fas/FasL seviyelerini arttırdığı saptanmıştır. Fas/FasL seviyelerinin artmasının kaspaz-8 aracılığıyla programlanmış hücre ölümüne yol açtığı bildirilmiştir (Shati, 2020).

1.2.1.6. Hücre Zarı Değişiklikleri ve Lipid Disfonksiyonu

Antrasiklinler, özellikle Dox, hücre zarlarına zarar vermesi ve hücre zarlarının akışkanlığını ve lipid organizasyonunu azaltması (Murphree vd., 1981) ve hücre zarının bileşimini ve işlevini değiştirmesi ile ilişkilendirilmiştir. Dox, fosfatidiletanolaminin (PE) fosfatidilserinden (PS) sentezini katalize eden fosfatidilserin dekarboksilaz enzimini inhibe ederek mitokondri zarında PS/PE

oranında bir azalmaya yol açmaktadır. Bu oranın azalması mitokondriyal zarı hasara karşı daha duyarlı hale getirmektedir (Bellance vd., 2020).

1.2.2. Doksorubisin dirençliliği

Dox, çoğunlukla meme kanseri, multipl miyelom, yumuşak doku sarkomu, non-Hodgkin lenfoması, çocukluk çağı katı tümörü, akciğer kanseri ve akut lösemi tedavisinde kullanılmaktadır (Guo vd., 2011; Marina vd., 2002; Ruggiero vd., 2013). Dox, hızla bölünen hücreleri öldürmede, katı ve sıvı tümörlerin ilerlemesini geciktirmede büyük bir etkinlik göstermektedir, ancak Dox tedavi süresince ilaç direnci ve çeşitli yan etkiler gözlenmesi tedavinin etkinliği önemli ölçüde sınırlandırmaktadır (Varela-López vd., 2019).

Meme kanserinde sınıflarından agresif seyirli ilerleyen üçlü negatif meme kanseri (TNBC) tedavisinde rutin olarak kullanılan Dox beklenen etkiyi tam olarak sağlayamamakta ve Topoizomeraz II inhibitörleri ile ilişkili direnç mekanizmaları nedeniyle istenen terapötik sonuçlar elde edilememektedir. Bu sebepten dolayı, Dox'un etkinliği sınırlı kalmaktadır. Kanserde ilaç direnci, tedaviden önce mevcut olan (intrinsik direnç) veya kemoterapi ile indüklenen (kazanılmış direnç) olabilmektedir. Dox'un ilaç direnci geliştirmesi ile kanserli hücrelerin daha da çoğalmasının indüklenebileceği ve bu şekilde hastalarda kötü prognoza ve düşük sağkalımlara yol açabileceği farklı çalışmalarda gösterilmiştir (Lee vd., 2006; X. Li vd., 2005; Shukla vd., 2010). Dox direncine neden olan birçok mekanizma araştırılmış olmasına rağmen, Dox direnci kanser hastalarının tedavisinde hala büyük çözülmemiş bir sorun olmaya devam etmektedir (Smith vd., 2006). Yapılan çalışmaların bir kısmı, sinyal yolları arasındaki etkileşimin, proliferasyonun indüklenmesi, ATP Bağlayıcı Kaset (ABC) ilaç taşıyıcılarının regülasyonu, hücre döngüsünün ilerlemesi ve apoptozun inhibe olması ile DOX direncinin oluşabileceğini bildirmiştir (Abrams vd., 2010; Christowitz vd., 2019; Mohammad vd., 2015).

Tercih edilen kemoterapi ilaçlarından birisi de birçok kanser türünde de kullanılan doksorubisindir. Ancak doksorubisinin klinik kullanımı genellikle meme kanserinin tedavisinde önemli bir zorluk oluşturan ilaç direncinin gelişmesiyle sınırlıdır. Terapötik sonuçları iyileştirmek için genellikle siklofosamid ve taksanlar gibi diğer ajanlarla birlikte uygulanır (Sokolosky vd., 2011). Klinik çalışmalar, doksorubisinin hem erken evre hem de metastatik meme kanseri olan hastalarda sağ kalım oranlarını önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir. Ancak direnç mekanizmalarının ortaya çıkması kullanımını zorlaştırmaktadır. Direnç mekanizmalarında en çok çalışılan ATP bağlayıcı kaset (ABC) taşıyıcı ailesinin bir üyesi olan P-glikoprotein (P-gp) ekspresyonunun

artışı, doksorubisini kanser hücrelerinin dışına aktif olarak pompalandığı ve hücre içi konsantrasyonunu ve etkinliğini azalttığı saptanmıştır. P-gp'nin hedeflenmesi ile direnci aşmak potansiyel bir strateji oluşturulabilecek ancak kemoterapi direncinin ER⁺ meme kanseri terapilerinde önemli bir zorluk olmaya devam edecektir (Bao vd., 2011; J.-F. Huang vd., 2018).

Doksorubisin direncinin oluşmasında diğer moleküler yollarında etkili olduğu bilinmektedir. Örneğin, NF- κ B sinyal yolunun aktivasyonu hücre sağ kalımı ve kemoterapiye direncin artırılmasında rol oynamaktadır. Doksorubisin tedavisinin, NF- κ B transkripsiyonel aktivitesini artırarak BCL-XL gibi anti-apoptotik genlerin ekspresyonunu indüklediği ve bu sayede kanser hücrelerini doksorubisin kaynaklı apoptoza karşı koruduğu gösterilmiştir (Dalmases vd., 2014). Bunlara ilave olarak, Akt sinyal yolunun aktivasyonunun, östrojen reseptörü pozitif meme kanserlerinde kemoterapiye karşı direnç ile ilişkili olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, bu yolun inhibisyonu, doksorubisin gibi kemoterapötik ajanların etkinliğini artırmada potansiyel bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Hem PI3K hem de Akt'in eşzamanlı inhibisyonunun dirençli meme kanseri modellerinde kemoterapiye duyarlılığı artırabildiği çeşitli araştırma grupları tarafından ortaya konmuştur (Wallin vd., 2010; Yndestad vd., 2017). Bu bulgular, PI3K/Akt yolunu hedefleyen tedavi yaklaşımlarının, doksorubisin gibi standart kemoterapilerle kombinasyon halinde kullanılarak daha etkin tedavi sonuçları elde edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, mikroRNA'lar (miRNA'lar) doksorubisin duyarlılığının düzenlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, miR-145'in çoklu ilaç direnciyle ilişkili proteinleri hedefleyerek meme kanseri hücrelerinin doksorubisin duyarlılığını artırdığı tespit edilmiştir (M. Gao vd., 2016). Bu bulgular, miRNA bazlı tedavi stratejilerinin doksorubisin etkinliğini artırmada potansiyel bir yaklaşım olabileceğini göstermektedir.

PI3K/AKT/mTOR yolu, hücrelerin hayatta kalması ve çoğalması için kritik öneme sahiptir; bu sinyal yolunun aktivasyonu, kemoterapi ilaçlarına karşı artan direnç ile ilişkilendirilmiştir. HOTAIR'in susturulmasının, meme kanseri hücrelerinde ilaç direncini azalttığı ve doksorubisin direncini aşmak için potansiyel bir terapötik hedef olabileceği gösterilmiştir (Z. Li vd., 2019). Doksorubisin direncinde etkili olan bir diğer uzun kodlanmayan RNA H19'dur. Yapılan araştırmalar, RNAH19'un DNA onarım mekanizmalarında kritik rol oynayan poli (ADP-riboz) polimeraz 1 (PARP1) proteinini düzenlediğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, RNAH19'un, PARP1 ekspresyonunu artırarak meme kanseri hücrelerinin proliferasyonunu indüklediği ve doksorubisine karşı direnç geliştirmesine yol açtığı gösterilmiştir (Y. Wang vd., 2020). Uzun kodlanmayan

RNA (lncRNA) LINP1, meme kanserinde kemoterapiye direnç gelişimine katkıda bulunan bir onkogen olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmalar, LINP1'in doksorubisin tedavisine karşılık olarak hücre çoğalmasını artırdığını ve apoptozu baskıladığını göstermektedir. Bu lncRNA'nın yüksek düzeyde eksprese edilmesinin kötü klinik sonuçlarla ilişkili olabileceği ve kemoterapi direncinde önemli bir rolü olabileceğini ortaya koymuştur (X. Liang vd., 2018). Ayrıca, lncRNA CRLA meme kanserinde doksorubisin direnciyle ilişkili önemli bir düzenleyici olarak tanımlanmıştır. Yapılan araştırmalar, CRLA'nın inhibisyonunun çeşitli hücresel süreçleri ve sinyal yollarını etkileyerek doksorubisin dirençli meme kanseri hücre hatlarında kemoterapi direncini tersine çevirdiğini ortaya koymuştur (Y. Li vd., 2017). Orre vd. (2021) tarafından doksorubisine dirençli MCF-7/Dox meme kanseri hücre hattında lncRNA SAMMSON'un metabolizma ve kemorezistans üzerindeki rolü araştırılmıştır. Dikkat çekici bir şekilde, bu çalışmada, SAMMSON'un doksorubisine duyarlı MCF-7 hücrelerine kıyasla MCF-7/Dox hücrelerinde aşırı eksprese edildiği bulunmuştur. SAMMSON'un susturulmasının, MCF-7/Dox hücrelerinin doksorubisine karşı direncini azalttığı ve doksorubisin tedavisinden sonra MCF-7 hücrelerinde görülen yaşlanma kaçışını önlediği gösterilmiştir. Bu bulgular, SAMMSON'un doksorubisin direnci ve yaşlanma süreçlerinde kritik bir rol oynayabileceğini düşündürmektedir. Sonuç olarak bu bulgulardan lncRNA'ların meme kanserinde doksorubisin direncinin oluşumuna çeşitli mekanizmalar aracılığıyla rol oynadığı sonucuna varılmaktadır.

Teşekkür: Bu kitap bölümü, Gamze Namalır'ın doktora tezinin Genel Bilgiler bölümünden yararlanılarak hazırlanmıştır. İlgili tez Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi kayıtlarında yer almaktadır.

KAYNAKLAR

- Abrams, S. L., Steelman, L. S., Shelton, J. G., Wong, E. W. T., Chappell, W. H., Bäsecke, J., Stivala, F., Donia, M., Nicoletti, F., Libra, M., Martelli, A. M., & McCubrey, J. A. (2010). The Raf/MEK/ERK pathway can govern drug resistance, apoptosis and sensitivity to targeted therapy. *Cell Cycle*, 9(9), 1781–1791. doi:10.4161/cc.9.9.11483
- Arcamone, F., Cassinelli, G., Fantini, G., Grein, A., Orezzi, P., Pol, C., & Spalla, C. (1969). Adriamycin, 14-hydroxydaunomycin, a new antitumor antibiotic from *S. peucetius* var. *caesius*. *Biotechnology and Bioengineering*, 11(6), 1101–1110. doi:10.1002/bit.260110607
- Bao, L., Haque, A., Jackson, K., Hazari, S., Moroz, K., Jetly, R., & Dash, S. (2011). Increased expression of P-glycoprotein is associated with doxorubicin chemoresistance in the metastatic 4T1 breast cancer model. *The American Journal of Pathology*, 178(2), 838–852. doi:10.1016/j.ajpath.2010.10.029
- Bellance, N., Furt, F., Melser, S., Lalou, C., Thoraval, D., Maneta-Peyret, L., Lacombe, D., Moreau, P., & Rossignol, R. (2020). Doxorubicin inhibits phosphatidylserine decarboxylase and modifies mitochondrial membrane composition in HeLa cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4), 1317. doi:10.3390/ijms21041317
- Bilardi, R. A., Kimura, K.-I., Phillips, D. R., & Cutts, S. M. (2012). Processing of anthracycline-DNA adducts via DNA replication and interstrand crosslink repair pathways. *Biochemical Pharmacology*, 83(9), 1241–1250. doi:10.1016/j.bcp.2012.01.029
- Brockmann, H. (1963). Anthracyclinones and anthracyclines (rhodomycinone, pyrromycinone and their glycosides). *Fortschritte der Chemie Organischer Naturstoffe = Progress in the Chemistry of Organic Natural Products*, 21, 121–182.
- Carvalho, C., Santos, R. X., Cardoso, S., Correia, S., Oliveira, P. J., Santos, M. S., & Moreira, P. I. (2009). Doxorubicin: The good, the bad and the ugly effect. *Current Medicinal Chemistry*, 16(25), 3267–3285. doi:10.2174/092986709788803312
- Chaires, J. B., Fox, K. R., Herrera, J. E., Britt, M., & Waring, M. J. (1987). Site and sequence specificity of the daunomycin-DNA interaction. *Biochemistry*, 26(25), 8227–8236. doi:10.1021/bi00399a031
- Christidi, E., & Brunham, L. R. (2021). Regulated cell death pathways in doxorubicin-induced cardiotoxicity. *Cell Death & Disease*, 12(4), 339. doi:10.1038/s41419-021-03614-x

- Christowitz, C., Davis, T., Isaacs, A., Van Niekerk, G., Hattingh, S., & Engelbrecht, A.-M. (2019). Mechanisms of doxorubicin-induced drug resistance and drug resistant tumour growth in a murine breast tumour model. *BMC Cancer*, 19(1), 757. doi:10.1186/s12885-019-5939-z
- Cullinane, C., & Phillips, D. R. (1990). Induction of stable transcriptional blockage sites by adriamycin: GPC specificity of apparent adriamycin-DNA adducts and dependence on iron(III) ions. *Biochemistry*, 29(23), 5638–5646. doi:10.1021/bi00475a032
- Dalmases, A., González, I., Menendez, S., Arpí, O., Corominas, J. M., Servitja, S., Tusquets, I., Chamizo, C., Rincón, R., Espinosa, L., Bigas, A., Eroles, P., Furriol, J., Lluch, A., Rovira, A., Albanell, J., & Rojo, F. (2014). Deficiency in p53 is required for doxorubicin-induced transcriptional activation of NF- κ B target genes in human breast cancer. *Oncotarget*, 5(1), 196–210. doi:10.18632/oncotarget.1556
- Doroshov, J. H. (2019). Mechanisms of anthracycline-enhanced reactive oxygen metabolism in tumor cells. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019, 9474823. doi:10.1155/2019/9474823
- Gao, M., Miao, L., Liu, M., Li, C., Yu, C., Yan, H., Yin, Y., Wang, Y., Qi, X., & Ren, J. (2016). miR-145 sensitizes breast cancer to doxorubicin by targeting multidrug resistance-associated protein-1. *Oncotarget*, 7(37), 59714–59726. doi:10.18632/oncotarget.10845
- Guo, B., Zhu, H.-L., Li, S.-X., Lu, X.-C., & Fan, H. (2011). Individualized liposomal doxorubicin-based treatment in elderly patients with non-Hodgkin's lymphoma. *Onkologie*, 34(4), 184–188. doi:10.1159/000327008
- Huang, J.-F., Wen, C.-J., Zhao, G.-Z., Dai, Y., Li, Y., Wu, L.-X., & Zhou, H.-H. (2018). Overexpression of ABCB4 contributes to acquired doxorubicin resistance in breast cancer cells in vitro. *Cancer Chemotherapy and Pharmacology*, 82(2), 199–210. doi:10.1007/s00280-018-3603-y
- Johnson-Arbor, K., & Dubey, R. (2024). Doxorubicin. In *StatPearls*. Treasure Island, FL: StatPearls Publishing. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK459232/>
- Kciuk, M., Gielecińska, A., Mujwar, S., Kołat, D., Kałuzińska-Kołat, Ż., Celik, I., & Kontek, R. (2023). Doxorubicin—An agent with multiple mechanisms of anticancer activity. *Cells*, 12(4), 659. doi:10.3390/cells12040659
- Lee, E.-R., Kim, J.-Y., Kang, Y.-J., Ahn, J.-Y., Kim, J.-H., Kim, B.-W., Choi, H.-Y., Jeong, M.-Y., & Cho, S.-G. (2006). Interplay between PI3K/Akt and MAPK signaling pathways in DNA-damaging drug-induced apoptosis. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1763(9), 958–968. doi:10.1016/j.bbamcr.2006.06.006

- Li, X., Lu, Y., Liang, K., Liu, B., & Fan, Z. (2005). Differential responses to doxorubicin-induced phosphorylation and activation of Akt in human breast cancer cells. *Breast Cancer Research*, 7(5), R589–R597. doi:10.1186/bcr1259
- Li, Y., Wang, B., Lai, H., Li, S., You, Q., Fang, Y., Li, Q., & Liu, Y. (2017). Long non-coding RNA CRLA is associated with poor response to chemotherapy in primary breast cancer. *Thoracic Cancer*, 8(6), 582–591. doi:10.1111/1759-7714.12487
- Li, Z., Qian, J., Li, J., & Zhu, C. (2019). Knockdown of lncRNA-HOTAIR downregulates the drug resistance of breast cancer cells to doxorubicin via the PI3K/Akt/mTOR signaling pathway. *Experimental and Therapeutic Medicine*. doi:10.3892/etm.2019.7629
- Liang, X., Qi, M., Wu, R., Liu, A., Chen, D., Tang, L., Chen, J., Hu, X., Li, W., Zhan, L., & Shao, C. (2018). Long non-coding RNA CUDR promotes malignant phenotypes in pancreatic ductal adenocarcinoma via activating Akt and ERK signaling pathways. *International Journal of Oncology*, 53(6), 2671–2682. doi:10.3892/ijo.2018.4574
- Linders, A. N., Dias, I. B., López Fernández, T., Tocchetti, C. G., Bomer, N., & Van der Meer, P. (2024). A review of the pathophysiological mechanisms of doxorubicin-induced cardiotoxicity and aging. *npj Aging*, 10(1), 9. doi:10.1038/s41514-024-00135-7
- Linders, A. N., Dias, I. B., Ovchinnikova, E. S., Vermeer, M. C. S. C., Hoes, M. F., Markousis Mavrogenis, G., Deiman, F. E., Arevalo Gomez, K. F., Bliley, J. M., Nehme, J., Vink, A., Gietema, J., De Boer, R. A., Westenbrink, D., Silljé, H. H. W., Hilfiker-Kleiner, D., Van Laake, L. W., Feinberg, A. W., Demaria, M., ... Van der Meer, P. (2023). Evaluation of senescence and its prevention in doxorubicin-induced cardiotoxicity using dynamic engineered heart tissues. *JACC: CardioOncology*, 5(3), 298–315. doi:10.1016/j.jacc.2023.03.012
- Marina, N. M., Cochrane, D., Harney, E., Zomorodi, K., Blaney, S., Winick, N., Bernstein, M., & Link, M. P. (2002). Dose escalation and pharmacokinetics of pegylated liposomal doxorubicin (Doxil) in children with solid tumors: A Pediatric Oncology Group study. *Clinical Cancer Research*, 8(2), 413–418.
- Martins-Teixeira, M. B., & Carvalho, I. (2020). Antitumour anthracyclines: Progress and perspectives. *ChemMedChem*, 15(11), 933–948. doi:10.1002/cmdc.202000131
- Mattioli, R., Ilari, A., Colotti, B., Mosca, L., Fazi, F., & Colotti, G. (2023). Doxorubicin and other anthracyclines in cancers: Activity, chemoresistance

- and its overcoming. *Molecular Aspects of Medicine*, 93, 101205. doi:10.1016/j.mam.2023.101205
- Mohammad, R. M., Muqbil, I., Lowe, L., Yedjou, C., Hsu, H.-Y., Lin, L.-T., Siegelin, M. D., Fimognari, C., Kumar, N. B., Dou, Q. P., Yang, H., Samadi, A. K., Russo, G. L., Spagnuolo, C., Ray, S. K., Chakrabarti, M., Morre, J. D., Coley, H. M., Honoki, K., ... Azmi, A. S. (2015). Broad targeting of resistance to apoptosis in cancer. *Seminars in Cancer Biology*, 35(Suppl.), S78–S103. doi:10.1016/j.semcancer.2015.03.001
- Murphree, S. A., Tritton, T. R., Smith, P. L., & Sartorelli, A. C. (1981). Adriamycin-induced changes in the surface membrane of Sarcoma 180 ascites cells. *Biochimica et Biophysica Acta*, 649(2), 317–324. doi:10.1016/0005-2736(81)90421-1
- Orre, C., Dieu, X., Guillon, J., Gueguen, N., Ahmadpour, S. T., Dumas, J.-F., Khiati, S., Reynier, P., Lenaers, G., Coqueret, O., Chevrollier, A., Mirebeau-Prunier, D., & Desquiere-Dumas, V. (2021). The long non-coding RNA SAMMSON is a regulator of chemosensitivity and metabolic orientation in MCF-7 doxorubicin-resistant breast cancer cells. *Biology*, 10(11), 1156. doi:10.3390/biology10111156
- Rephaeli, A., Waks-Yona, S., Nudelman, A., Tarasenko, I., Tarasenko, N., Phillips, D. R., Cutts, S. M., & Kessler-Icekson, G. (2007). Anticancer prodrugs of butyric acid and formaldehyde protect against doxorubicin-induced cardiotoxicity. *British Journal of Cancer*, 96(11), 1667–1674. doi:10.1038/sj.bjc.6603781
- Ruggiero, A., De Rosa, G., Rizzo, D., Leo, A., Maurizi, P., De Nisco, A., Vendittelli, F., Zuppi, C., Mordente, A., & Riccardi, R. (2013). Myocardial performance index and biochemical markers for early detection of doxorubicin-induced cardiotoxicity in children with acute lymphoblastic leukaemia. *International Journal of Clinical Oncology*, 18(5), 927–933. doi:10.1007/s10147-012-0458-9
- Salerno, D., Brogioli, D., Cassina, V., Turchi, D., Beretta, G. L., Seruggia, D., Ziano, R., Zunino, F., & Mantegazza, F. (2010). Magnetic tweezers measurements of the nanomechanical properties of DNA in the presence of drugs. *Nucleic Acids Research*, 38(20), 7089–7099. doi:10.1093/nar/gkq597
- Shati, A. A. (2020). Doxorubicin-induces NFAT/Fas/FasL cardiac apoptosis in rats through activation of calcineurin and p38 MAPK and inhibition of mTOR signalling pathways. *Clinical and Experimental Pharmacology & Physiology*, 47(4), 660–676. doi:10.1111/1440-1681.13225S
- Shi, Y., Bieerkehazhi, S., & Ma, H. (2018). Next-generation proteasome inhibitor oprozomib enhances sensitivity to doxorubicin in triple-negative breast

- cancer cells. *International Journal of Clinical and Experimental Pathology*, 11(5), 2347–2355.
- Shukla, A., Hillegass, J. M., Macpherson, M. B., Beuschel, S. L., Vacek, P. M., Pass, H. I., Carbone, M., Testa, J. R., & Mossman, B. T. (2010). Blocking of ERK1 and ERK2 sensitizes human mesothelioma cells to doxorubicin. *Molecular Cancer*, 9, 314. doi:10.1186/1476-4598-9-314
- Slingerland, M., Guchelaar, H.-J., & Gelderblom, H. (2012). Liposomal drug formulations in cancer therapy: 15 years along the road. *Drug Discovery Today*, 17(3–4), 160–166. doi:10.1016/j.drudis.2011.09.015
- Smith, L., Watson, M. B., O’Kane, S. L., Drew, P. J., Lind, M. J., & Cawkwell, L. (2006). The analysis of doxorubicin resistance in human breast cancer cells using antibody microarrays. *Molecular Cancer Therapeutics*, 5(8), 2115–2120. doi:10.1158/1535-7163.MCT-06-0190
- Swain, S. M., Whaley, F. S., & Ewer, M. S. (2003). Congestive heart failure in patients treated with doxorubicin: A retrospective analysis of three trials. *Cancer*, 97(11), 2869–2879. doi:10.1002/cncr.11407
- Van der Zanden, S. Y., Qiao, X., & Neefjes, J. (2021). New insights into the activities and toxicities of the old anticancer drug doxorubicin. *The FEBS Journal*, 288(21), 6095–6111. doi:10.1111/febs.15583
- Varela-López, A., Battino, M., Navarro-Hortal, M. D., Giampieri, F., Forbes-Hernández, T. Y., Romero-Márquez, J. M., Collado, R., & Quiles, J. L. (2019). An update on the mechanisms related to cell death and toxicity of doxorubicin and the protective role of nutrients. *Food and Chemical Toxicology*, 134, 110834. doi:10.1016/j.fct.2019.110834
- Visone, V., Szabó, I., Perugino, G., Hudecz, F., Bánóczy, Z., & Valenti, A. (2020). Topoisomerases inhibition and DNA binding mode of daunomycin-oligoarginine conjugate. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 35(1), 1363–1371. doi:10.1080/14756366.2020.1780226
- Von Hoff, D. D., Layard, M. W., Basa, P., Davis, H. L., Von Hoff, A. L., Rozenzweig, M., & Muggia, F. M. (1979). Risk factors for doxorubicin-induced congestive heart failure. *Annals of Internal Medicine*, 91(5), 710–717. doi:10.7326/0003-4819-91-5-710
- Wallin, J. J., Guan, J., Prior, W. W., Edgar, K. A., Kassees, R., Sampath, D., Belvin, M., & Friedman, L. S. (2010). Nuclear phospho-Akt increase predicts synergy of PI3K inhibition and doxorubicin in breast and ovarian cancer. *Science Translational Medicine*, 2(48), 48ra66. doi:10.1126/scitranslmed.3000630

- Wang, W., Hu, W., Wang, Y., An, Y., Song, L., Shang, P., & Yue, Z. (2020). Long non-coding RNA UCA1 promotes malignant phenotypes of renal cancer cells by modulating the miR-182-5p/DLL4 axis as a ceRNA. *Molecular Cancer*, 19(1), 18. doi:10.1186/s12943-020-1132-x
- Yang, F., Kemp, C. J., & Henikoff, S. (2013). Doxorubicin enhances nucleosome turnover around promoters. *Current Biology*, 23(9), 782–787. doi:10.1016/j.cub.2013.03.043
- Yndestad, S., Austreid, E., Svanberg, I. R., Knappskog, S., Lønning, P. E., & Eikesdal, H. P. (2017). Activation of Akt characterizes estrogen receptor positive human breast cancers which respond to anthracyclines. *Oncotarget*, 8(25), 41227–41241. doi:10.18632/oncotarget.17167
- Zhang, S., Liu, X., Bawa-Khalfe, T., Lu, L.-S., Lyu, Y. L., Liu, L. F., & Yeh, E. T. H. (2012). Identification of the molecular basis of doxorubicin-induced cardiotoxicity. *Nature Medicine*, 18(11), 1639–1642. doi:10.1038/nm.2919



BÖLÜM 4

Uzun Kodlanmayan RNA'ların Meme Kanserinde Rolü

Gamze Namalır¹ & Menderes Suiçmez² & Metin Konuş³

1. Kodlanmayan RNA (ncRNA)

Son yıllarda gerçekleştirilen transkriptom analizlere göre, insan genomunun çoğunun transkripte edildiği ancak bu transkriptlerin çoğunun protein kodlama kapasitesine sahip olmadığı gösterilmiştir (W. Wang vd., 2021). Proteinlere dönüştürülmeyen ve kodlanmayan RNA'lar (ncRNA) olarak adlandırılan RNA moleküllerinin, ökaryotlarda genom boyutunun, kromatin yapısının ve sıkıştırmanın düzenlenmesi süreçlerinde, genom bütünlüğünde ve DNA onarımının etkinliğinde, gen susturma ve protein sinyal yollarının düzenlenmesi gibi hücresel süreçlerde rol aldığı tespit edilmiştir (Kovalchuk & Kovalchuk, 2021). Memeli genomu, 20 nükleotid uzunluğundaki mikroRNA'lar (miRNA) ile kilo bazlar boyutundaki uzun kodlanmayan RNA'lar (lncRNA) arasında değişen boyutlarda binlerce kodlanmayan RNA içermektedir. Diğer kodlanmayan RNA molekülleri; snoRNA'lar, tRNA'lar, spliceozom regülatörleri, telomer RNA'sı ve çok daha büyük ribozomal RNA'lar, büyük çoklu protein komplekslerinin yapısal iskelelerini oluşturan önemli RNA molekülleridir. Bu RNA türleri, genellikle karmaşık biyolojik süreçlerin düzenlenmesinde ve hücresel işlevlerin korunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, snoRNA'lar ribozomal RNA'nın (rRNA) kimyasal modifikasyonunda görev alırken, tRNA'lar protein sentezi sırasında amino asitlerin ribozoma taşınmasını sağlamaktadır. Spliceozom regülatörleri, pre-mRNA'nın olgun mRNA'ya dönüşümünü sağlarken, telomer RNA'sı kromozom uçlarının korunmasında yer alır. Ribozomal RNA'lar ise ribozomun yapısal ve fonksiyonel temelini oluşturur. Bu RNA molekülleri, hücresel makromoleküler komplekslerin stabilitesini ve işlevselliğini sağlamak için birer yapı taşı olarak hareket etmektedir (Q. Chen vd., 2016). Kodlanmayan en küçük RNA mikroRNA'lar olarak bilinmektedir ve bu RNA'lar belirli dokularda üretilmektedir. MikroRNA'lar RISC (RNA kaynaklı susturma kompleksi) olarak bilinen çok proteinli bir komplekse bağlanarak bu

¹ Dr., Hitit Üniversitesi, 0000-0001-6588-8504

² Prof. Dr., Hitit Üniversitesi, 0000-0003-0890-8235

³ Prof. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, 0000-0002-9953-1375

kompleksi hedef mRNA moleküllerine yönlendirmektedirler. Bu sayede, ilgili proteinlerin üretimini baskılayarak hücredeki protein dengesini düzenlemektedirler. Bu yönleriyle, mikroRNA'lar hücredeki protein yapısını şekillendirme açısından, gen ifadesini düzenleyen transkripsiyon faktörlerine benzemektedirler (Gebert & MacRae, 2019). Kodlanmayan RNA'ların yapılarının stabil bir şekilde kalması zorken, genomda düşük seviyede ekspresyona sahiptirler ve zamana bağlı olarak ekspresyon paternleri değişmektedir. Bilim insanları bu kodlanmayan RNA'ların davranış üzerinde etkili olabileceğini düşünmektedir. ncRNA'lar için, protein kodlayan genlerin sayısında bir değişiklik olmaksızın, gen düzenlemesinde ek bir katman oluşturarak fenotipik çeşitliliğin evrimini açıklamaya yardımcı olabileceği de düşünülmektedir (Dayal vd., 2024).

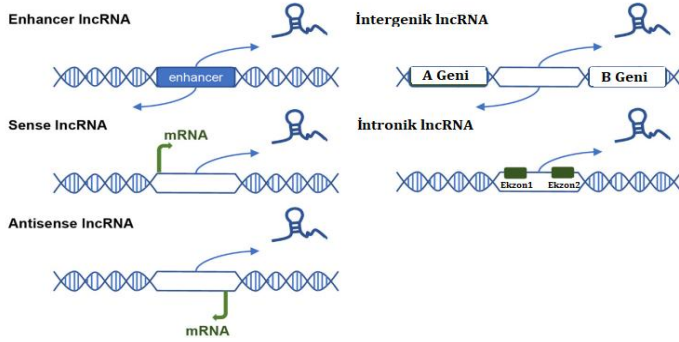
2. Uzun Kodlanmayan RNA'lar (Long Non-coding RNAs, lncRNA)

Kodlanmayan RNA'ların en heterojen ve işlevsel olarak çeşitli alt sınıfını uzun kodlanmayan RNA'lar (lncRNA'lar) oluşturmaktadır. lncRNA'lar, proteinler gibi, karmaşık yapılar oluşturacak şekilde katlanabilme ve dizilimleri sayesinde DNA ve RNA gibi diğer nükleik asitlerle etkileşime girebilme yeteneklerine sahiptir (Statello vd., 2021). Memeli genomunun sadece küçük bir kısmı protein kodlayan mRNA'lara transkribe edilirken büyük çoğunluğu çok sayıda uzun kodlanmayan RNA (lncRNA'lar) üretmektedir. Uzun kodlanmayan RNA'lar 200 nükleotitten daha uzun olan RNA'lar (lncRNA) olarak bilinmektedir ve proteinlere çevrilmemektedir (R.W. Yao vd., 2019).

Mesajcı RNA'lara (mRNA) benzer şekilde, lncRNA'lar da RNA polimeraz II tarafından transkripte edilmektedir, 5' uçlarına kap takılmaktadır, splicing sürecinden geçmektedir ve genellikle poliadenilasyona uğramaktadır. Mesajcı RNA'dan farklı olarak lncRNA'lar hücrede çok daha düşük seviyelerde ifade edilmektedir ve evrimsel olarak korunmamıştır (Achour & Aguilo, 2018). lncRNA'lar bir zamanlar "transkripsiyonel gürültü" olarak düşünülmüşse de promotörlerdeki arındırıcı seçim, örneğin yer değiştirmeler, eklemeler, silinmeler ve splicing gibi süreçler, bu moleküllerin işlevsel olduğunu ortaya koymuştur. Bazı lncRNA'ların küçük açık okuma çerçevelerine (sORF'ler/smORF'ler) sahip olduğunu ve ribozomlarla ilişkili olduklarını, bu durumun da protein kodlama potansiyellerini işaret ettiğini gösteren çalışmalar literatürde raporlanmıştır (Aspden vd., 2014; Mackowiak vd., 2015). Son yapılan çalışmalarda az sayıda lncRNA'nın çeşitli biyolojik süreçlerin düzenlenmesinde rol oynadığı ve 100 amino asitten daha az uzunluğa sahip mikropeptitler adı verilen küçük proteinleri kodlayabildiğini ortaya koymuştur (Yeasmin vd., 2018). Başlangıçtaki çalışmalar, lncRNA'ların kararsız transkriptler olduğunu

düşündürmekteydi. Ancak, daha sonraki araştırmalar, 800'den fazla lncRNA'nın çoğunluğunun yarı ömrünün 16 saatin üzerinde olduğunu ve oldukça stabil olduklarını, sadece az sayıda lncRNA'nın ise yarı ömrünün 2 saatin altında olduğunu göstermiştir (Clark vd., 2012). Hücredeki konumlarına bağlı olarak, lncRNA'lar farklı moleküler süreçlerde rol oynamaktadır. Nükleer lncRNA'lar, kromatin yapılarıyla yakından ilişkilidir ve belirli genlerin transkripsiyonel ve epigenetik düzenlenmesi ile pre-mRNA işlenmesi gibi çeşitli mekanizmaları etkileyerek gen ekspresyonunu düzenlerler. Buna karşılık, sitoplazmik lncRNA'lar, mRNA'ların stabilitesi ve çevirisi üzerinde baskın olarak kontrol sağlarlar (Noh vd., 2018). Örneğin, MALAT1 ve NEAT1 gibi lncRNA'lar ağırlıklı olarak çekirdekte bulunurken; DANCER ve OIP5-AS1 daha çok sitoplazmada yer alır; TUG1, CAS7 ve HOTAIR ise hem nükleer hem de sitoplazmik dağılıma sahiptir (Lennox & Behlke, 2016). Bu kodlanmayan RNA'lar, genomun geniş, keşfedilmemiş ve fonksiyonel bir bileşeni olduklarından, bu alanın incelenmesi insan biyolojisi ve hastalıkları açısından büyük öneme sahiptir (Carninci vd., 2005; ENCODE Project Consortium vd., 2007).

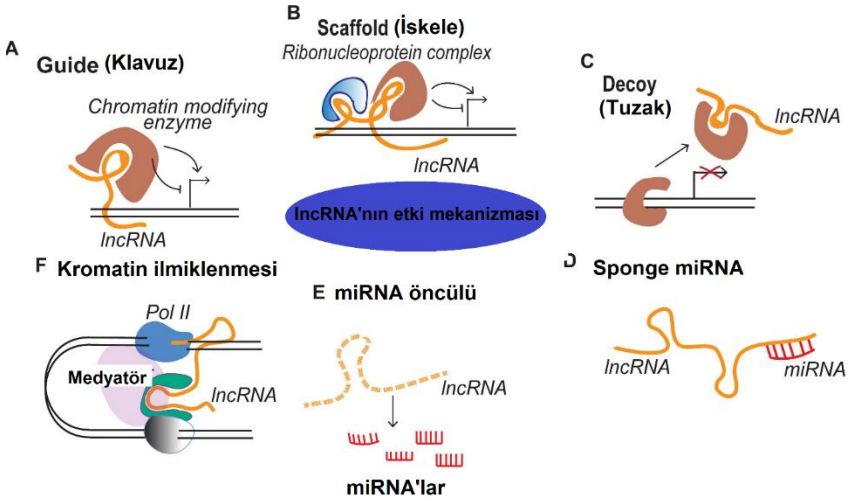
lncRNA'lar, genetik bilginin iletiminde çeşitli düzeylerde rol oynamaktadır. Bu roller arasında kromatinin yeniden programlanması, transkripsiyonel kontrol (örneğin, enhanser bölgelerde cis-regülasyon), posttranskripsiyonel kontrol (örneğin, mRNA işlenmesi) ve translasyonel düzenleme bulunmaktadır. lncRNA'ların bu geniş kapsamlı fonksiyonları, onları biyomarker olarak kullanımı ve terapötik hedef olarak değerlendirilmesi açısından umut verici kılmaktadır (Tao vd., 2023). lncRNA'ların birincil sınıflandırma şemalarından biri, protein kodlayan genlere göre genomik konumlarına dayanmaktadır. Protein kodlayan genler arasında yer alanlara intergenik lncRNA'lar (lincRNA'lar), protein kodlayan genlerin intronlarından türeyenlere intronik lncRNA'lar, enhanser dizilerinden transkripte edilenlere enhanser lncRNA'lar, protein kodlayan genlerin ters ipliğinden transkripte edilenlere ise antisens lncRNA'lar olarak bir sınıflandırma önerilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Tao vd. (2023)'den modifiye edilen farklı lncRNA türlerinin sınıflandırılmasını gösteren şematik diyagram

Son dönem genomik çalışmalar, memeli genomunun önemli bir kısmının transkripte edilebileceğini göstermiştir, bu da çok daha fazla sayıda kodlanmayan transkriptin varlığını işaret etmektedir (Carninci vd., 2005; Harrow vd., 2006). Bu amaçla, tiling mikroarray verileri ifade edilen sekans etiketlerinin (EST'ler) ve klonlanmış cDNA'ların shotgun dizilimi ve histon modifikasyon desenlerinin haritaları gibi yöntemler kullanılmaktadır. Özellikle, son çalışmalar, protein kodlayan bölgelerle örtüşmeyen büyük interjenik kodlanmayan RNA'lar (lncRNA'lar) üzerinde yoğunlaşmıştır, çünkü bu lncRNA'lar deneysel manipülasyon ve hesaplamalı analizleri kolaylaştırmaktadır (Cabili vd., 2011).

LncRNA'lar doğrudan DNA, RNA ve proteinlerle etkileşime girerek hücrelerin moleküler düzeydeki düzenlemesinde etkili olmaktadır. Bu etkileşimler, lncRNA'ların enhanser, kılavuz (guide), tuzak (decoy) ve iskele (scaffold) olarak sınıflandırılmasına olanak sağlamaktadır. Örneğin, büyük interjenik kodlanmayan RNA'lar, gen ekspresyon analizlerinde çeşitli hücresel süreçlerin önemli düzenleyicileri olarak ve kılavuzluk (guide) yaparak görev almaktadır. Ayrıca, lncRNA'lar, genomun üç boyutlu organizasyonunu yeniden şekillendirme, kromatin modifiye edici proteinlerin bağlanmasını kolaylaştırma ve düzenleyici faktörleri ya da mikroRNA'ları moleküler tuzaklar (decoy) veya süngerler (sponge) gibi tutarak da gen ekspresyonunu düzenlemektedir (Şekil 2) (Sweta vd., 2019).



Şekil 2. Sweta vd. (2019)'den modifiye edilen lncRNA'nın etki mekanizmaları

3. Meme Kanserinde Rol Alan lncRNA'lar

lncRNA'ların biyolojik işlevlerinin büyük bir kısmı henüz tam olarak anlaşılmamış olsa da bunlar, normal gelişim ve tümör oluşumu süreçlerinde önemli rollere sahip bir kodlanmayan RNA grubudur. Güncel çalışmalar meme kanserinde bazı lncRNA'ların anormal şekilde ifade edildiği bu genlerin işlevleri ve tümör dokularındaki ekspresyon modellerine göre tümör baskılayıcı genler veya onkogenler olarak sınıflandırılabilceğini göstermektedir. Ayrıca, lncRNA'ların anormal ekspresyonunu, özellikle meme kanseri başta olmak üzere çeşitli kanserlerde hücre proliferasyonu, invazyon, göç, apoptoz, epitel-mezenkimal dönüşüm (EMD) sürecinde rol almaktadır (Saranya vd., 2024).

3.1. Hücre proliferasyonunda rol alan lncRNA'lar

Hücre proliferasyonu, kanserin ilerlemesi açısından temel bir süreç olup genellikle hücre içi büyüme sinyal yollarının anormal aktivasyonu ile desteklenmektedir. Yapılan güncel araştırmalar, lncRNA'ların meme kanserinde spesifik sinyal yollarını aktive ederek veya inhibe ederek hücre proliferasyonunun düzenlenmesinde kritik roller üstlendiğini ortaya koymuştur. Özellikle, SPRY4 intron transcript 1 (SPRY4-IT1), DANCR, PVT1, CCAT1 ve KCNQ10T1 gibi lncRNA'ların meme kanseri hücre proliferasyonunu pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir (C. Han vd., 2019; Y. Shi vd., 2015; J. Tang vd., 2018; L. Xu vd., 2018). Bununla birlikte, bu lncRNA'ların hücre proliferasyonunu artırma mekanizmalarının birbirinden farklı işleyişe sahip olduğu görülmektedir. Kromozom 5 üzerinde yer alan ve 708 bp uzunluğunda bir

lncRNA olan SPRY4-IT1, meme kanseri hastalarında daha büyük tümör boyutları ve ileri patolojik evrelerle pozitif bir korelasyon olduğu bildirilmiştir. SPRY4-IT1, luminal B meme tümörlerinde 8p12 amplifikasyonunun genetik bir sürücüsü olarak tanımlanan zinc finger 703 (ZNF703) geninin ekspresyonunu düzenleyerek tümör hücrelerinin büyümesini indüklediği raporlanmıştır (Y. Shi vd., 2015). Diğer taraftan, DANCR ve PVT1 gibi lncRNA'ların belirli "aracılar" ile etkileşim kurarak spesifik sinyal yollarını aktive ettiği gösterilmiştir. Örneğin, DANCR, RXRA proteini ile bağlanır, bu proteinin glikojen sentaz kinaz-3 β (GSK-3 β) tarafından serin fosforilasyonunu artırarak PI3K/AKT sinyal yolunun aktivasyonunu sağladığı; bu da tümör oluşumunu tetiklediği raporlanmıştır (J. Tang vd., 2018). Buna karşın, bazı lncRNA'ların meme kanseri hücre proliferasyonunda tümör baskılayıcı etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Ai vd. (2019) yaptıkları çalışmada, LINC01355 lncRNA'sının FOXO3 proteini ile etkileşime girerek bu proteinin stabilitesini artırdığını ve bunun sonucunda CCND1 transkripsiyonunun inhibe olduğunu göstermiştir. Ancak, CCND1'in aşırı ekspresyonu ya da FOXO3 proteininin seviyesinin düşürülmesi, LINC01355'in meme kanseri hücre büyümesini baskılama etkisini tersine çevirebildiği raporlanmıştır.

3.2. İnvazyon ve Metastaz 'da rol alan lncRNA'lar

Tümör invazyonu ve metastazı, diğer kanserlerde olduğu gibi meme kanseri hastalarında da en belirgin biyolojik özellikler olup, hastalığın ilerlemesinin başlıca nedenlerindendir. Meme kanseri hücrelerinde lncRNA'ların anormal ekspresyonu, bir dizi moleküler mekanizma aracılığıyla invazyon ve metastaz gibi agresif fenotiplerin ortaya çıkmasını yada ilerlemesini tetiklemektedir (L. Liu vd., 2020). Epitelyel hücrelerinin mezenkimal hücrelere dönüşmesi olarak tanımlanan epitel-mezenkimal dönüşüm, belirli fizyolojik ve patolojik koşullar altında hücrelere invazyon ve migrasyon yeteneklerini kazandıran önemli bir süreçtir. EMD'nin karakteristik özellikleri arasında, mezenkimal belirteçlerin (vimentin, fibronektin, N-kadherin, Twist1 ve ZEB1 gibi) artan ekspresyonu ve epitel hücrelerine ait bağlantı proteinlerinin (E-kadherin, kladinler ve α -katenin gibi) azalan ekspresyonu yer alır. lncRNA'ların miRNA'larla etkileşime girerek meme kanseri hücrelerinin metastaz ve invazyon süreçlerini düzenleyebileceği rapor edilmiştir (Goodall & Wickramasinghe, 2021; O'Brien vd., 2018; S. Zhou vd., 2018). X. Jiang vd. (2018) çalışmalarında, lncRNA NEAT1'in, meme kanseri hücrelerinin migrasyon ve invazyon potansiyelini artırdığını rapor etmiştir. NEAT1, miR-448'e bağlanarak ZEB1 transkripsiyon faktörünün ifadenmesini artırarak ve miR-218'in ekspresyonunu baskılayarak meme kanseri hücre invazyonunu desteklemektedir (X. Jiang vd., 2018).

Son alışmalar, lncRNA'ların EMD ile ilişkili transkripsiyon faktörleri (EMD-TF'ler) ve bazı sinyal yolları (NF-κB, Notch, Wnt, Hedgehog, AKT-mTOR ve MAPK/ERK) ile ilişkili olduğunu bildirmiştir (Ye vd., 2022). LncRNA'ların EMD sürecindeki işlevleri, kemorezistans gelişen meme kanserinde (BC) kritik bir rol oynamaktadır. X. Sun vd., (2019), lncRNA küçük nükleolar RNA taşıyıcı gen 7'nin (SNHG7) meme kanserinde miR-34a'nın moleküler sünger olarak işlev gören bir onkojenik lncRNA olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, sh-NC grubuyla karşılaştırıldığında, sh-SNHG7 grubunda EMD ile ilişkili proteinler olan vimentin ve Snail'in azaldığını, buna karşın E-kaderin'in arttığını gözlemlemişlerdir. Bu sonuç, SNHG7 ekspresyonunun EMD-TF'lerin ekspresyonunu arttırdığını, EMD sürecini indüklediği ve tümör progresyonuna neden olduğunu göstermektedir (Ye vd., 2022).

3.3. Meme kanseri kemorezistansında rol alan LncRNA'lar

Kemoterapi, neredeyse tüm meme kanseri alt tiplerinde uygulanmakta olup, cerrahi sonrasında meme kanserinin tekrarlamasını ve metastazını etkili bir şekilde önlemektedir. Antrasiklinler, takсанlar ve platin bazlı ilaçlar, meme kanseri için standart birinci basamak kemoterapi ilaçlarıdır. Antrasiklin ailesinin bir üyesi olan Doksorubisin/Adriamisin (DOX/ADR), meme kanseri dahil olmak üzere birçok kanser türü için birinci basamak kemoterapi ilacı olarak kullanılmaktadır. DOX/ADR, DNA replikasyonunu durdurur, serbest radikal oluşumunu indükler ve topoizomerez II aktivitesini inhibe ederek DNA hasarına, bağlanmaya, alkilasyona ve çapraz bağlanmaya neden olur. Bu süreç, kanser hücrelerinde apoptozu tetiklemesine rağmen birçok hasta kısa bir süre içinde ilaç direnci geliştirerek nüks yaşamaktadır (Jasra & Anampa, 2018; Kalyanaraman, 2020). Güncel bilimsel çalışmalar, uzun kodlanmayan RNA'ların (lncRNA) meme kanserinde (BC) kemoterapi direncinin (kemorezistans) gelişiminde önemli roller oynadığını ortaya koymaktadır. Özellikle, MALAT-1, HOTAIR ve H19 gibi lncRNA'ların, apoptoz mekanizmaları ve taşıyıcı proteinlerin (efflux transporters) aktivitesini değiştirerek meme kanserinde hem kanserli hücrelerin çoğalması, invazyonu, metastazı gibi süreçlerle hem de kemorezistans ile yakından ilişkili olduğu bildirilmiştir (J. Yu vd., 2020).

4. Urothelial cancer associated 1 (UCA1)

Urothelial cancer associated 1 (UCA1), uzun kodlanmayan bir RNA (lncRNA) olup, ilk olarak mesane geçiş hücreli karsinomunda tanımlanmıştır. Dizi analizleri, bu RNA'nın insan endojen retrovirüs H ailesi ile homolojisini göstermiştir (X.-S. Wang vd., 2006). UCA1 geni, insan kromozomu 19p13.12 üzerinde pozitif iplikte yer almakta olup üç ekzon ve iki intron içermektedir.

UCA1 dizisi, herhangi bir koruyucu uzun açık okuma çerçevesi (ORF) içermeyen birçok sonlandırma dizisi barındırmaktadır (F. Yao vd., 2019). UCA1'in, 5' ucunda bir TATA kutusu ve 3' ucunda bir poliA kuyruğu bulunduğu tespit edilmiştir. Son çalışmalar UCA1'in üç farklı izoformu olduğunu ortaya koymuştur (1.4, 2.2 ve 2.7 kb)(Xue vd., 2016). En çok incelenen izoform, lncRNA UCA1 olarak adlandırılan ve en küçük boyutta olan varyanttır (H. Wang vd., 2017). Doku ekspresyon profiline göre, UCA1 embriyonik dokularda yaygın olarak ifade edilirken, yetişkinlerin çoğu normal dokularında (kalp ve dalak hariç) ifade edilmemektedir. UCA1, ilk olarak mesane kanserinde incelenmiş ve çoğunlukla sitoplazmada lokalize olduğu gösterilmiştir. Bu durum, aşağı akış genlerinde protein sentezi sürecinin düzenlenmesinde önemli olabileceğini düşündürmektedir (F. Yao vd., 2019).

Ürotelyal kanserle ilişkili 1 (UCA1) ilk olarak mesane kanserinde, hücre proliferasyonunu, migrasyonunu, invazyon kemorezistansı ve metabolizmasını düzenlediği bildirilen bir onkojenik lncRNA'dır (F. Wang vd., 2008). Mesane kanserinin yanı sıra, lncRNA UCA1'in onkojenik fonksiyonları meme kanseri, kolorektal kanser, özofagus yassı epitel hücreli karsinom, mide kanseri, hepatosellüler karsinom, melanom, yumurtalık kanseri ve dil skuamöz hücreli karsinom gibi diğer kanserlerde de tanımlanmıştır (H. Wang vd., 2017; Xue vd., 2016).

Onkojenik fonksiyonun yanı sıra, lncRNA UCA1'in birçok malign tümör tipinde ilaç direncini düzenlediği bulunmuştur; örneğin, meme kanserinde, UCA1'in yakın zamanda yapılan bazı çalışmalarda tamoksifene karşı ilaç direncini indüklediği gösterilmiştir (X. Li vd., 2016; C.-G. Xu vd., 2016). UCA1'in, küçük hücreli dışı akciğer kanserinde miR-193a (Nieto vd., 2016), hepatosellüler kanserde miR216b (F. Wang vd., 2015), meme kanseri hücrelerinde miR-18a içeren çeşitli kanser hücrelerinde birkaç miRNA'ya bağlandığı bildirilmiştir. lncRNA-UCA1'in p27'nin baskılanması ve kolorektal kanser hücrelerinin hücre proliferasyonu, apoptozu ve hücre döngüsü dağılımını etkileyerek meme kanserinde de onkojenik bir rol oynadığı gösterilmiştir (Y. Han vd., 2014). C. Wu & Luo, (2016) dirençli LLC2 ve LLC9 meme kanseri hücrelerinde UCA1'in MCF7 hücrelerine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek ekspresyon seviyelerine (~ 20 kat) sahip olduğunu bulmuştur. Ayrıca UCA1 geninin susturulması ile meme kanseri hücrelerinin tamoksifene karşı duyarlılığın arttığı gösterilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda UCA1'in regülasyonunun artmasının, meme kanserinde tamoksifen direnci ile ilişkili olduğu ve UCA1'in kısmi olarak mTOR sinyalizasyonunu aktive ederek meme kanseri hücrelerine tamoksifen direnci kazandırdığı rapor edilmiştir. Bu

çalışmaya paralel olarak, başka bir çalışmada UCA1'in tamoksifene karşı ilaç direncini indüklediği gösterilmiştir (C.-G. Xu vd., 2016). Bu sonuçlardan, lncRNA UCA1'in meme kanseri hücrelerinde tamoksifen direncini indüklediği ve bunu kısmen mTOR sinyal yolunun aktivasyonu ile yaptığı ortaya çıkmaktadır. Özetlenirse de literatür bulguları UCA1'in meme kanseri hücrelerinin kemoterapi direncini düzenlemede önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Teşekkür: Bu kitap bölümü, Gamze Namalır'ın doktora tezinin Genel Bilgiler bölümünden yararlanılarak hazırlanmıştır. İlgili tez Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi kayıtlarında yer almaktadır.

KAYNAKLAR

- Achour, C., & Aguilo, F. (2018). Long non-coding RNA and Polycomb: An intricate partnership in cancer biology. *Frontiers in Bioscience (Landmark Edition)*, 23(11), 2106–2132. doi:10.2741/4693
- Ai, B., Kong, X., Wang, X., Zhang, K., Yang, X., Zhai, J., Gao, R., Qi, Y., Wang, J., Wang, Z., & Fang, Y. (2019). LINC01355 suppresses breast cancer growth through FOXO3-mediated transcriptional repression of CCND1. *Cell Death & Disease*, 10(7), 502. doi:10.1038/s41419-019-1741-8
- Aspden, J. L., Eyre-Walker, Y. C., Phillips, R. J., Amin, U., Mumtaz, M. A. S., Brocard, M., & Couso, J.-P. (2014). Extensive translation of small open reading frames revealed by Poly-Ribo-Seq. *eLife*, 3, e03528. doi:10.7554/eLife.03528
- Cabili, M. N., Trapnell, C., Goff, L., Koziol, M., Tazon-Vega, B., Regev, A., & Rinn, J. L. (2011). Integrative annotation of human large intergenic noncoding RNAs reveals global properties and specific subclasses. *Genes & Development*, 25(18), 1915–1927. doi:10.1101/gad.17446611
- Carninci, P., Kasukawa, T., Katayama, S., Gough, J., Frith, M. C., Maeda, N., Oyama, R., Ravasi, T., Lenhard, B., Wells, C., Kodzius, R., Shimokawa, K., Bajic, V. B., Brenner, S. E., Batalov, S., Forrest, A. R. R., Zavolan, M., Davis, M. J., Wilming, L. G., ... RIKEN Genome Exploration Research Group and Genome Science Group (Genome Network Project Core Group). (2005). The transcriptional landscape of the mammalian genome. *Science*, 309(5740), 1559–1563. doi:10.1126/science.1112014
- Chen, Q., Yan, M., Cao, Z., Li, X., Zhang, Y., Shi, J., Feng, G., Peng, H., Zhang, X., Zhang, Y., Qian, J., Duan, E., Zhai, Q., & Zhou, Q. (2016). Sperm tsRNAs contribute to intergenerational inheritance of an acquired metabolic disorder. *Science*, 351(6271), 397–400. doi:10.1126/science.aad7977
- Clark, M. B., Johnston, R. L., Inostroza-Ponta, M., Fox, A. H., Fortini, E., Moscato, P., Dinger, M. E., & Mattick, J. S. (2012). Genome-wide analysis of long noncoding RNA stability. *Genome Research*, 22(5), 885–898. doi:10.1101/gr.131037.111
- Dayal, S., Chaubey, D., Joshi, D. C., Ranmale, S., & Pillai, B. (2024). Noncoding RNAs: Emerging regulators of behavioral complexity. *WIREs RNA*, 15(3), e1847. doi:10.1002/wrna.1847
- ENCODE Project Consortium, Birney, E., Stamatoyannopoulos, J. A., Dutta, A., Guigó, R., Gingeras, T. R., Margulies, E. H., Weng, Z., Snyder, M., Dermitzakis, E. T., Thurman, R. E., Kuehn, M. S., Taylor, C. M., Neph, S., Koch, C. M., Asthana, S., Malhotra, A., Adzhubei, I., Greenbaum, J. A., ... de Jong, P. J. (2007). Identification and analysis of functional elements in

- 1% of the human genome by the ENCODE pilot project. *Nature*, 447(7146), 799–816. doi:10.1038/nature05874
- Gebert, L. F. R., & MacRae, I. J. (2019). Regulation of microRNA function in animals. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 20(1), 21–37. doi:10.1038/s41580-018-0045-7
- Goodall, G. J., & Wickramasinghe, V. O. (2021). RNA in cancer. *Nature Reviews Cancer*, 21(1), 22–36. doi:10.1038/s41568-020-00306-0
- Han, C., Li, X., Fan, Q., Liu, G., & Yin, J. (2019). CCAT1 promotes triple-negative breast cancer progression by suppressing miR-218/ZFX signaling. *Aging*, 11(14), 4858–4875. doi:10.18632/aging.102080
- Han, Y., Yang, Y., Yuan, H., Zhang, T., Sui, H., Wei, X., Liu, L., Huang, P., Zhang, W., & Bai, Y. (2014). UCA1, a long non-coding RNA up-regulated in colorectal cancer, influences cell proliferation, apoptosis, and cell cycle distribution. *Pathology*, 46(5), 396–401. doi:10.1097/PAT.0000000000000125
- Harrow, J., Denoeud, F., Frankish, A., Reymond, A., Chen, C.-K., Chrast, J., Lagarde, J., Gilbert, J. G. R., Storey, R., Swarbreck, D., Rossier, C., Ucla, C., Hubbard, T., Antonarakis, S. E., & Guigo, R. (2006). GENCODE: Producing a reference annotation for ENCODE. *Genome Biology*, 7(Suppl. 1), S4.1–S4.9. doi:10.1186/gb-2006-7-s1-s4
- Jasra, S., & Anampa, J. (2018). Anthracycline use for early stage breast cancer in the modern era: A review. *Current Treatment Options in Oncology*, 19(6), 30. doi:10.1007/s11864-018-0547-8
- Jiang, X., Zhou, Y., Sun, A.-J., & Xue, J.-L. (2018). NEAT1 contributes to breast cancer progression through modulating miR-448 and ZEB1. *Journal of Cellular Physiology*, 233(11), 8558–8566. doi:10.1002/jcp.26470
- Kalyanaraman, B. (2020). Teaching the basics of the mechanism of doxorubicin-induced cardiotoxicity: Have we been barking up the wrong tree? *Redox Biology*, 29, 101394. doi:10.1016/j.redox.2019.101394
- Kovalchuk, I., & Kovalchuk, O. (2021). *Genome stability: From virus to human application* (2nd ed.). Elsevier Science & Technology.
- Lennox, K. A., & Behlke, M. A. (2016). Cellular localization of long non-coding RNAs affects silencing by RNAi more than by antisense oligonucleotides. *Nucleic Acids Research*, 44(2), 863–877. doi:10.1093/nar/gkv1206
- Li, X., Wu, Y., Liu, A., & Tang, X. (2016). Long non-coding RNA UCA1 enhances tamoxifen resistance in breast cancer cells through a miR-18a-HIF1 α feedback regulatory loop. *Tumour Biology*, 37(11), 14733–14743. doi:10.1007/s13277-016-5348-8

- Liu, L., Zhang, Y., & Lu, J. (2020). The roles of long noncoding RNAs in breast cancer metastasis. *Cell Death & Disease*, 11(9), 749. doi:10.1038/s41419-020-02954-4
- Mackowiak, S. D., Zauber, H., Bielow, C., Thiel, D., Kutz, K., Calviello, L., Mastrobuoni, G., Rajewsky, N., Kempa, S., Selbach, M., & Obermayer, B. (2015). Extensive identification and analysis of conserved small ORFs in animals. *Genome Biology*, 16(1), 179. doi:10.1186/s13059-015-0742-x
- Nieto, M. A., Huang, R. Y.-J., Jackson, R. A., & Thiery, J. P. (2016). EMT: 2016. *Cell*, 166(1), 21–45. doi:10.1016/j.cell.2016.06.028
- Noh, J. H., Kim, K. M., McClusky, W. G., Abdelmohsen, K., & Gorospe, M. (2018). Cytoplasmic functions of long noncoding RNAs. *WIREs RNA*, 9(3), e1471. doi:10.1002/wrna.1471
- O'Brien, S. J., Carter, J. V., Burton, J. F., Oxford, B. G., Schmidt, M. N., Hallion, J. C., & Galandiuk, S. (2018). The role of the miR-200 family in epithelial–mesenchymal transition in colorectal cancer: A systematic review. *International Journal of Cancer*, 142(12), 2501–2511. doi:10.1002/ijc.31282
- Saranya, I., Dharshini, V. S., Akshaya, R. L., Subhashini, P. S., & Selvamurugan, N. (2024). Regulatory and therapeutic implications of competing endogenous RNA network in breast cancer progression and metastasis: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 266(Pt. 2), 131075. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.131075
- Shi, Y., Li, J., Liu, Y., Ding, J., Fan, Y., Tian, Y., Wang, L., Lian, Y., Wang, K., & Shu, Y. (2015). The long noncoding RNA SPRY4-IT1 increases the proliferation of human breast cancer cells by upregulating ZNF703 expression. *Molecular Cancer*, 14, 51. doi:10.1186/s12943-015-0318-0
- Statello, L., Guo, C.-J., Chen, L.-L., & Huarte, M. (2021). Gene regulation by long non-coding RNAs and its biological functions. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 22(2), 96–118. doi:10.1038/s41580-020-00315-9
- Sun, X., Huang, T., Liu, Z., Sun, M., & Luo, S. (2019). LncRNA SNHG7 contributes to tumorigenesis and progression in breast cancer by interacting with miR-34a through EMT initiation and the Notch-1 pathway. *European Journal of Pharmacology*, 856, 172407. doi:10.1016/j.ejphar.2019.172407
- Sweta, S., Dudnakova, T., Sudheer, S., Baker, A. H., & Bhushan, R. (2019). Importance of long non-coding RNAs in the development and disease of skeletal muscle and cardiovascular lineages. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 7, 228. doi:10.3389/fcell.2019.00228

- Tang, J., Li, Y., Sang, Y., Yu, B., Lv, D., Zhang, W., & Feng, H. (2018). LncRNA PVT1 regulates triple-negative breast cancer through KLF5/ β -catenin signaling. *Oncogene*, 37(34), 4723–4734. doi:10.1038/s41388-018-0310-4
- Tao, S., Hou, Y., Diao, L., Hu, Y., Xu, W., Xie, S., & Xiao, Z. (2023). Long noncoding RNA study: Genome-wide approaches. *Genes & Diseases*, 10(6), 2491–2510. doi:10.1016/j.gendis.2022.10.024
- Wang, F., Ying, H.-Q., He, B.-S., Pan, Y.-Q., Deng, Q.-W., Sun, H.-L., Chen, J., Liu, X., & Wang, S.-K. (2015). Upregulated lncRNA-UCA1 contributes to progression of hepatocellular carcinoma through inhibition of miR-216b and activation of FGFR1/ERK signaling pathway. *Oncotarget*, 6(10), 7899–7917. doi:10.18632/oncotarget.3219
- Wang, H., Guan, Z., He, K., Qian, J., Cao, J., & Teng, L. (2017). LncRNA UCA1 in anti-cancer drug resistance. *Oncotarget*, 8(38), 64638–64650. doi:10.18632/oncotarget.18344
- Wang, W., Min, L., Qiu, X., Wu, X., Liu, C., Ma, J., Zhang, D., & Zhu, L. (2021). Biological function of long non-coding RNA (lncRNA) Xist. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 9, 645647. doi:10.3389/fcell.2021.645647
- Wang, X.-S., Zhang, Z., Wang, H.-C., Cai, J.-L., Xu, Q.-W., Li, M.-Q., Chen, Y.-C., Qian, X.-P., Lu, T.-J., Yu, L.-Z., Zhang, Y., Xin, D.-Q., Na, Y.-Q., & Chen, W.-F. (2006). Rapid identification of UCA1 as a very sensitive and specific unique marker for human bladder carcinoma. *Clinical Cancer Research*, 12(16), 4851–4858. doi:10.1158/1078-0432.CCR-06-0134
- Wu, C., & Luo, J. (2016). Long non-coding RNA (lncRNA) urothelial carcinoma-associated 1 (UCA1) enhances tamoxifen resistance in breast cancer cells via inhibiting mTOR signaling pathway. *Medical Science Monitor*, 22, 3860–3867. doi:10.12659/msm.900689
- Xu, C.-G., Yang, M.-F., Ren, Y.-Q., Wu, C.-H., & Wang, L.-Q. (2016). Exosomes mediated transfer of lncRNA UCA1 results in increased tamoxifen resistance in breast cancer cells. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 20(20), 4362–4368.
- Xu, L., Chen, Y., Mayakonda, A., Koh, L., Chong, Y. K., Buckley, D. L., Sandanaraj, E., Lim, S. W., Lin, R. Y.-T., Ke, X.-Y., Huang, M.-L., Chen, J., Sun, W., Wang, L.-Z., Goh, B. C., Dinh, H. Q., Kappei, D., Winter, G. E., Ding, L.-W., ... Koeffler, H. P. (2018). Targetable BET proteins- and E2F1-dependent transcriptional program maintains the malignancy of glioblastoma. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(22), E5086–E5095. doi:10.1073/pnas.1712363115

- Xue, M., Chen, W., & Li, X. (2016). Urothelial cancer associated 1: A long noncoding RNA with a crucial role in cancer. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*, 142(7), 1407–1419. doi:10.1007/s00432-015-2042-y
- Yao, F., Wang, Q., & Wu, Q. (2019). The prognostic value and mechanisms of lncRNA UCA1 in human cancer. *Cancer Management and Research*, 11, 7685–7696. doi:10.2147/CMAR.S200436
- Ye, P., Feng, L., Shi, S., & Dong, C. (2022). The mechanisms of lncRNA-mediated multidrug resistance and the clinical application prospects of lncRNAs in breast cancer. *Cancers*, 14(9), 2101. doi:10.3390/cancers14092101
- Yeasmin, F., Yada, T., & Akimitsu, N. (2018). Micropeptides encoded in transcripts previously identified as long noncoding RNAs: A new chapter in transcriptomics and proteomics. *Frontiers in Genetics*, 9, 144. doi:10.3389/fgene.2018.00144
- Yu, J., Jin, T., & Zhang, T. (2020). Suppression of long non-coding RNA metastasis-associated lung adenocarcinoma transcript 1 (MALAT1) potentiates cell apoptosis and drug sensitivity to taxanes and Adriamycin in breast cancer. *Medical Science Monitor*, 26, e922672. doi:10.12659/MSM.922672



BÖLÜM 5

Refraksiyon Kusurları ve Gözlükle Düzeltilme Stratejileri

Şeydanur Taşer¹

1.GİRİŞ

Refraksiyon kusurları, gözün optik sistemindeki bozukluklar nedeniyle görüntülerin net bir şekilde retina üzerinde odaklanamaması durumudur. Bu kusurlar, ışığın göz içindeki kırılma gücünün göze uygun şekilde ayarlandığı durumlarla karşılaştırıldığında, görme fonksiyonunun bozulmasına yol açar. Kusurların tanımlanması, doğru tedavi planının belirlenmesi açısından temel bir adımdır ve genellikle detaylı göz muayeneleriyle gerçekleştirilir. Bu muayenelerde, görme keskinliği ölçümleri ve refraksiyon analizi kullanılarak kusurların tipi ve derecesi belirlenir. (World Health Organization [WHO], 2019; GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators & Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study, 2021; Benjamin, 2006).

Refraksiyon kusurlarının belirlenmesinde, emetropik göz yapısı ile kırma kusuru bulunan gözler arasındaki optik farklar temel alınır. Emetropik gözde ışınlar retina üzerinde net bir odak oluştururken, miyopi, hipermetropi ve astigmatizm gibi durumlarda odak noktası retina düzleminden sapar ve görme kalitesi olumsuz etkilenir. Miyopide göz yapısı çoğu zaman normalden biraz daha uzundur. Bu nedenle kişi yakındaki nesneleri daha net görürken, uzaktaki nesneleri bulanık algılar. Hipermetropide ise göz küresi görece daha kısa bir yapıdadır. Bu durumda uzak görme çoğunlukla daha rahat olsa da, özellikle yakın mesafedeki nesnelere odaklanırken zorlanma yaşanabilir. Astigmatizmde ise kornea ya da göz içindeki lens yüzeyi her yönde aynı eğrilige sahip değildir. Bu düzensizlik, ışığın retina üzerine tek bir noktada odaklanmasını engeller ve sonuç olarak bulanık, bozulmuş ya da rahatsız edici bir görme deneyimi ortaya çıkabilir. (World Health Organization [WHO], 2019; GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators & Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study, 2021; Benjamin, 2006).

Ayrıca, yaşla birlikte ortaya çıkan presbiyopi, yakın odaklamada güçlüklerin yaşanması ile karakterizedir ve doğal yaşlanma sürecinin bir sonucu olarak kabul edilir. Presbiyopinin gelişimi, yaşam boyunca devam eden ve göz merceklelerinin esneklik kaybı ile ilişkili olan değişimlerle ilgilidir. Bu durumda, refraksiyon kusurlarına ek olarak, yakın görme kapasitesinde azalma ortaya çıkar. Such

¹ Fizik Öğretmeni, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı Patnos Anadolu Lisesi, Ağrı, Türkiye, ORCID: 0009-0003-4229-6364

değişimler, genellikle yaşla birlikte görülen doğal ve kaçınılmaz bir süreç olsa da uygun gözlük kullanımıyla görme fonksiyonu önemli ölçüde korunabilir. (World Health Organization [WHO], 2019; GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators & Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study, 2021; Benjamin, 2006).

Bütün bu faktörler göz detaylı muayene ve doğru analizlerin yapılmasını gerektirir. Bu sayede, bireye özgü en uygun düzeltme stratejileri belirlenebilir ve hastanın yaşam kalitesini olumsuz etkilemeden, en uygun görsel konfor sağlanabilir. (World Health Organization [WHO], 2019; GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators & Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study, 2021; Benjamin, 2006).

2.REFRAKSİYON KUSURLARININ TANIMLANMASI

Refraksiyon kusurları, göze gelen ışığın retina üzerinde düzgün odaklanamaması sonucunda ortaya çıkan görme problemleridir ve genellikle çeşitli optik bozukluklardan kaynaklanır. Bu kusurların tanımlanması, gözlerin optik sisteminin özelliklerinin detaylı değerlendirilmesini gerektirir. Öncelikle, emetropik gözler ile kusurlu gözler arasındaki temel farklar belirlenir. Emetropik göze, göze gelen ışık ışınları doğrudan retinanın üzerine odaklanır ve net görme sağlanır. Kusurlu gözlerde ise bu odak noktası retina önünde veya arkasında kalabilir, bu durum görme keskinliğini olumsuz etkiler. (Elkington, Frank, & Greaney, 1999; Benjamin, 2006; Chuck ve ark., 2018).

Refraksiyon kusurları genel olarak iki temel grupta ele alınır: küresel kusurlar ve astigmatik kusurlar. Küresel kusurlar, gözün ışığı her doğrultuda ideal biçimde odaklayamaması sonucu ortaya çıkar ve çoğunlukla miyopi ile hipermetropiyi kapsar. Miyopide gözün optik sistemi ışığı retina önünde toplarken, hipermetropide odak noktası retina arkasında kalma eğilimindedir. Astigmatizm ise kornea ya da lens yüzeyinin her ekseninde aynı eğrilığe sahip olmamasından kaynaklanır. Bu düzensiz yapı, ışığın farklı meridyenlerde farklı biçimde kırılmasına yol açar ve sonuçta görüntüde bulanıklık, şekil bozulması ve görsel rahatsızlık ortaya çıkabilir. Bu nedenle astigmatizmde görülen kırma farklılıkları, klinik uygulamada silindirik hata olarak değerlendirilir (Benjamin, 2006; Chuck et al., 2018; Elkington, Frank, & Greaney, 1999).

Presbiyopi, yaşa bağlı olarak ortaya çıkan ve genellikle 40 yaş civarında başlayan bir durumdur. Göz merceğinin esneklik kaybıyla, uzaktaki nesneleri net görme zorluğu ortaya çıkar. Bu süreçte göz merceği, yakın nesnelere odaklanma kapasitesini yitirmeye başlar ve gözlüklü veya başka düzeltme yöntemleriyle iyileştirilmesi gerekir. Ayrıca, refraksiyon kusurlarının tanımlanması sırasında, mercek güçleri, kırılma indeksleri ve koherans ölçümleri gibi çeşitli parametreler kullanılır. Bu analizler neticeleyerek, optik düzeltme girişimlerinin temelini

oluşturan temel kusurlar belirlenir ve uygun tedavi stratejileri planlanır. Gözlerin anatomik ve fonksiyonel özellikleri göz önüne alınarak, kusurların şiddeti ve tipi detaylı biçimde değerlendirilir, böylece hasta için en uygun gözlük veya diğer düzeltici yöntemler seçilir. (Elkington, Frank, & Greaney, 1999; Benjamin, 2006; Chuck ve ark., 2018).

2.1. Emetropik ve Kusurlu Gözler Arasındaki Fark

Emetropik gözler, ışık ışınlarının kornea ve lens sistemleri sayesinde net bir şekilde retina üzerinde odaklanmasıyla karakterize edilir. Bu durum, gözün optik sisteminin doğal refleks olarak görme görevini yerine getirebildiği anlamına gelir. Kısaca, emetropik gözlerde herhangi bir kırma kusuru veya uyumsuzluk söz konusu değildir; görüntü netlikle retina üzerinde oluşur ve göz sağlığı açısından herhangi bir görsel düzeltmeye ihtiyaç göstermez. (Elkington ve ark., 1999; Benjamin, 2006; Musa & Zeppieri, 2023).

Öte yandan, kırma kusurları bulunan gözlerde, ışığın retina üzerinde net bir şekilde odaklanması engellenir. Miyopi, hipermetropi ve astigmatizm gibi prizmatik bozukluklar bu gruba dahildir. Miyop gözde, gözü etkileyen uzunluk veya korneanın kırma kapasitesi nedeniyle uzak nesneler görüntüsü retina önüne odaklanır ki bu durumda yakın görme genellikle bozulmaz. Hipermetrop gözde ise, gözü etkileyen kısa boyutlar veya kırma gücündeki yetersizlik nedeniyle yakın nesneler retina önünde odaklanır, uzak nesneler ise nispeten daha iyi görünebilir. Astigmatizm ise, kornea veya lensin düzensiz şekli sonucu ışığın farklı noktalardan kırılmasıyla ortaya çıkar ve hem yakın hem de uzak görüşü olumsuz etkiler. (Elkington ve ark., 1999; Benjamin, 2006; Musa & Zeppieri, 2023).

Kusurlu bir gözde, kırılma kusurunun şiddetine ve türüne göre görme fonksiyonları değişkenlik gösterir. Bu noktada, uygun gözlük kullanımı, kırma kusurunun düzeltilmesinde temel stratejidir. Gözlükler, uygun güce sahip lensler aracılığıyla görüntüyü retina üzerinde netleştirir. Spherical kusurlar için, uygulanan sferik lensler; astigmatizme yönelik ise, silindirik lensler tercih edilir. Lensin gücü, kırılma kusurunun derecesine göre belirlenir ve doğru hesaplamalar, görsel konforu artırır. Ayrıca, gözlüklerde kullanılan malzemelerin ve kaplamaların özellikleri, güneş ışınlarına karşı koruma ve görsel netliği optimize etme açısından önemlidir. (Elkington ve ark., 1999; Benjamin, 2006; Musa & Zeppieri, 2023).

Bazı refraksiyon kusurlarında hatalı lens tercihi veya kullanım sürecindeki uyumsuzluklar, yeterli optik düzeltmenin sağlanamamasına ve görsel konforun azalmasına yol açabilir. Bu nedenle uygun gözlük seçimi ile düzenli izlem süreci, bireyin görme kalitesinin sürdürülebilmesi açısından önemli bir yere sahiptir. Tüm bu uygulamalar, kırma kusurunun derecesine ve hastanın yaşam tarzına göre

kişiyi özel planlanmak durumundadır. Sonuç olarak, emetropik gözler, herhangi bir düzeltme gerektirmeden optimum görsel performans sergilerken; kusurlu gözler ise, doğru teşhis ve uygun gözlük kullanımıyla, görme fonksiyonlarının en iyi seviyeye çıkarılmasını sağlar. (Elkington ve ark., 1999; Benjamin, 2006; Musa & Zeppieri, 2023).

2.2. Spherical ve Astigmatic Kusurları

Sferik kusurlar, görme keskinliğini azaltan ve cisimlerin net bir şekilde gözlenmesini engelleyen en yaygın refraksiyon bozukluklarıdır. Bu kusurlar genellikle göz küresinin ön arka çapında simetrik olmayan şeklinden kaynaklanır ve hem miyopiyi hem de hipermetropiyi içerebilir. Miyop durumda, göz küresi normalden daha uzun olabileceği gibi, kornea veya lensin kırma gücü aşırı olabilir; bu da uzak nesnelerin net görünmemesine yol açar. Hipermetrop ise, göz küresinin kısa olması veya kırma güçlerinin yetersizliği nedeniyle yakın nesnelerde bulanıklıkla kendini gösterir. Sferik kusurların tedavisinde, uygun güçteki yapay mercekler veya gözlük camları kullanılır. Gözlükte, miyop için negatif, hipermetrop için ise pozitif lensler tercih edilir ve bu sayede ışınların retina üzerine net bir şekilde odaklanması sağlanır. (Benjamin, 2006; Chuck ve ark., 2018; Musa & Zeppieri, 2023).

Astigmatizm ise, korneanın veya lensin düzensiz şekli nedeniyle ışık ışınlarının farklı meridyenlerde farklı odaklanmasına neden olur. Bu durum, hem netlik kaybına hem de görmeye bozukluğa yol açar. Astigmatizmanın gözlükle düzeltilmesinde, silindirik lensler kullanılır. Silindirik lensler, özellikle astigmatik meridyenlerde kırma gücünü ayarlayarak, ışık ışınlarının uygun odak noktalarına yönlendirilmesini sağlar. Gözlüklerde kullanılan silindirik güçler, hastanın farklı meridyenlerdeki refraktif hatalarını giderir ve böylece görüntüdeki bulanıklık ve distorsiyon azaltılır. Ayrıca, silindirik potansiyeller ve toleranslar gözlük tasarımında önemli yer tutar; böylece gözlük camlarının uygunluğu ve kullanıcı konforu sağlanır. (Benjamin, 2006; Chuck ve ark., 2018; Musa & Zeppieri, 2023).

Her iki kusur türünde de doğru lensin seçilmesi ve bireysel ihtiyaçlara uygun olarak güçlerin hassas hesaplanması esastır. Gözlük tasarımında, hastanın yaşam tarzı, yaş ve görsel gereksinimleri dikkate alınır. Özellikle astigmatizmde, silindirik güçlerin yanı sıra, silindirik toleranslar ve çeşitli kaplama teknolojileri kullanılarak, görsel konfor ve görüş kalitesi optimize edilir. Bu kusurların düzeltilmesinde, uygun gözlük kullanımı, düzenli göz muayeneleri ile birlikte, görme fonksiyonlarının sürekli izlenmesini ve gerektiğinde ayarlamaların yapılmasını sağlar. Böylece, hem görme keskinliği korunur hem de hastanın yaşam kalitesi artırılır. (Benjamin, 2006; Chuck ve ark., 2018; Musa & Zeppieri, 2023).

2.3. Presbiyopi ve Yaşa Bağlı Değişimler

Presbiyopi, yaşla birlikte ortaya çıkan ve yakın görme yeteneğini olumsuz yönde etkileyen doğal bir görme kusurudur. Bu durum, lensin esneklik kaybı nedeniyle yakına odaklanmada zorluk yaşanmasıyla kendini gösterir. Yaşın ilerlemesiyle birlikte, özellikle 40-45 yaşlarından itibaren, lensin elastikiyetinde azalma görülür ve bu durum, yakın nesnelerin net görülmesini engeller. Presbiyopi genellikle uzun süreli yakın faaliyetler sırasında göz yorgunluğu, bulanık görme ve odaklanma güçlüğü gibi semptomlarla kendini gösterir. Bu kusurun zamanla artması, kişinin günlük yaşam kalitesini olumsuz etkileyebilir. (WHO, 2019; Benjamin, 2006; Oscar, Sanchez, & Martin, 2023).

Yaşla birlikte görülen değişimler yalnızca göz merceğinin esnekliğinin azalmasıyla sınırlı kalmaz; gözün odaklama sürecinde görev alan yapılarda da zamanla işlevsel değişiklikler ortaya çıkabilir. Bunun sonucunda gözün uyum yeteneği zayıflar ve özellikle uzağa bakıştan yakına geçişte ya da yakın çalışmalarda belirgin güçlükler yaşanabilir. Presbiyopi geliştikçe bu durum bireyin mevcut refraksiyon durumuna göre farklı biçimlerde hissedilebilir. Miyop bireyler bazı durumlarda yakın görmeye bir süre daha avantajlı olsalar da, görsel konfor açısından sorun yaşayabilirler; hipermetrop bireylerde ise hem yakın hem de uzak mesafede odaklanma güçlüğü daha belirgin hale gelebilir (Benjamin, 2006; Oscar, Sanchez, & Martin, 2023; WHO, 2019).

Gözlükle düzeltme temel yöntemidir ve genellikle uygun kuvvette okuma gözlüğü veya multifokal (multi-fokal) lensler tercih edilir. Bu çözümler, yakın görüşü netleştirmeye yönelik çeşitli optik düzenlemeleri içerir. Günümüzde çok odaklı lensler, presbiyopiyi yaşa bağlı gelişimle birlikte karşılaştırmalı olarak en etkin alternatifleri sunar. Lens seçimi, hastanın yaşam tarzı, görsel ihtiyaçları ve göz yapısına göre belirlenir; güç hesaplamalarında ise, hastanın görme durumu, mesafe ve göz anatomisi dikkate alınır. Ayrıca, modern kaplamalar ve malzemeler, lenslerin kullanım süresince konforunu arttırmak ve görsel kalitenin korunmasını sağlamak amacıyla tercih edilir. (WHO, 2019; Benjamin, 2006; Oscar, Sanchez, & Martin, 2023).

Sonuç olarak, presbiyopi ve yaşa bağlı değişimler, doğal bir süreç olmasına rağmen, uygun gözlük kullanımı ile yaşam kalitesi önemli ölçüde korunabilir. Bu süreçte, yapılan düzenli muayeneler ve doğru optik çözümler, bireyin görsel fonksiyonlarını optimize eder ve günlük yaşamını olumsuz etkileyen faktörleri en aza indirir. (WHO, 2019; Benjamin, 2006; Oscar, Sanchez, & Martin, 2023).

3.GÖZLÜK DÜZELTME PRENSİPLERİ

Gözlüklerle refraksiyon kusurlarının düzeltilmesinde temel prensipler, doğru lens seçimi ve bu lenslerin kullanımına ilişkin esaslara dayanır. İlk olarak, lens tercihi yapılırken hastanın görme ihtiyacı, yaşam tarzı ve göz sağlığı durumu

dikkate alınır. Bu, özellikle lens gücü hesaplamalarında hassasiyet gerektirir; miyop, hipermetrop veya astigmat gibi kusurların doğru tanımlanması, uygun güçte lens seçimini sağlar. Lens güçleri, refraktif hatanın derecesine göre matematiksel formüller ve klinik ölçümler kullanılarak hesaplanır. Ayrıca, özellikle astigmatik kusurlarda, silindirik potansiyeller ve toleranslar göz önünde bulundurularak, hastanın görme konforu ve netliği optimize edilir. (Brooks & Borish, 2007; Atchison, 1992; Chuck ve ark., 2018).

Gözlük malzemeleri ve kaplamalar da, düzeltme stratejilerinin önemli parçalarıdır. Hafif ve dayanıklı camlar, kullanıcı konforu açısından tercih edilirken, yansıma önleyici, çizilmeye dayanıklı ve UV koruyucu kaplamalar göz sağlığını korurken, görsel rahatlığı artırır. Lens malzemesinin seçimi, hastanın yaşına, görme ihtiyacına ve yaşam ortamına göre belirlenir; örneğin, yüksek myopili hastalarda daha ince ve hafif camlar tercih edilir. Silindirik lensler ve mercek kaplamaları, astigmatizmanın düzeltilmesinde etkin rol oynar ve gözlüğün kullanım süresince oluşabilecek görsel yorgunluğu azaltır. (Brooks & Borish, 2007; Atchison, 1992; Chuck ve ark., 2018).

Lenlerin güç hesaplamasında, optik merkezlerin doğru konumlandırılması ve odak noktalarının hassas ayarı da göz önünde bulundurulur. Bu, özellikle yüksek güçteki lenslerde ve çok odaklı sistemlerde, net görüş sağlanması ve göz yorgunluğunun önlenmesi açısından önemlidir. Ayrıca, gözlüğün kullanılabilirliği ve uzun vadeli konforunu artırmak amacıyla, gözlük çerçevesinin ergonomik yapısı ve ayarları da dikkate alınır. Sonuç olarak, gözlük düzeltme prensipleri, hastanın görme ihtiyacına uygun, teknolojik yenilikler ve klinik deneyimlerle desteklenen bütünsel bir yaklaşımı gerektirir. Bu sayede, hastanın görme fonksiyonları en etkin şekilde düzeltilerek, yaşam kalitesinin artırılması sağlanır. (Brooks & Borish, 2007; Atchison, 1992; Chuck ve ark., 2018).

3.1. Lens Seçimi ve Güç Hesapları

Lens seçimi ve güç hesapları, refraksiyon kusurlarının uygun bir şekilde düzeltilmesi açısından temel bir aşamayı temsil eder. Bu süreçte, ilk olarak hastanın refraktif durumu dikkatlice belirlenir ve buna göre uygun mercek gücü belirlenir. Güç hesaplamalarında, öncelikli olarak retino-ksiyonal düzeltme sağlanmak üzere, söz konusu kusurun tipi ve şiddeti göz önüne alınır. Myopi ve hipermetropi gibi spherical kusurların düzeltilmesinde, düzenli ve doğru hesaplamalar, net ve konforlu görüş sağlar. Bu hesaplamalar genellikle aynalar ve ortoptik ölçüm cihazları kullanılarak gerçekleştirilir; özellikle, subjektif ve objektif muayeneler, hastanın görüş keskinliği ve görsel konforunu optimize edecek gücün belirlenmesini sağlar. (Benjamin, 2006; Elkington ve ark., 1999; Musa & Zeppieri, 2023).

Güç hesaplamalarında kullanılan temel formüller ve yöntemler, hastanın referasını en doğru şekilde yansıtarak, görsel ihtiyaçlara uygun lens seçimini kolaylaştırır. Örneğin, geleneksel Bessel veya topaklı metotlar, hastanın optik sistemindeki bozulmaları giderir ve gözlükle en iyi görüş kalitesine ulaşmayı hedefler. Günümüzde, bilgisayar destekli ölçüm cihazlarıyla yapılan otomatik hesaplamalar ise, daha hassas ve hızlı sonuçlar sunarak, özellikle ilave astigmatizmanın varlığıyla başa çıkmakta önem kazanmıştır. (Benjamin, 2006; Elkington ve ark., 1999; Musa & Zeppieri, 2023).

Lens güçleri belirlenirken, ayrıca kişinin yaşam tarzı ve görsel ihtiyacı da dikkate alınır. Yakın görüş gerektiren meslek veya günlük aktiviteler, çok odaklı veya multifokal lenslerin tercih edilmesine yol açabilir. Ayrıca, gözlük camlarının kalınlığı, optik performansı ve estetik kabul edilebilirliği göz önünde bulundurularak, uygun malzemeler ve tasarımlar seçilir. Bu süreçte, talimatlara uygun ve doğru ölçüm teknikleriyle gerçekleştirilen güç hesaplamaları, hastanın görsel memnuniyetini artırırken, uyumsuzluk ve rahatsızlık risklerini minimize eder. Sonuç olarak, lens seçimi ve güç hesapları, hem klinik doğruluk hem de hasta konforu açısından kritik öneme sahiptir ve dikkatli, sistematik bir yaklaşımla yapılmalıdır. (Benjamin, 2006; Elkington ve ark., 1999; Musa & Zeppieri, 2023).

3.2. Cylindrical Potansiyeller ve Silindirik Toleranslar

Cylindrical potansiyeller, astigmatizmanın derecesini ve yönünü belirleyen önemli parametrik değerlerdir. Bu potansiyeller, korneanın ya da göz küresinin silindirik şekil bozukluklarından kaynaklanan refraksiyon kusurlarını tanımlar. Silindirik potansiyellerin doğru saptanması, hastanın görüş kalitesinin optimize edilmesi açısından temel teşkil eder. Ayrıca, bu potansiyellerin hassasiyeti, uygun düzeltme stratejilerinin belirlenmesinde belirleyici bir rol oynar. (Brooks & Borish, 2007; Atchison, 1992; Musa & Zeppieri, 2023).

Silindirik toleranslar, gözlük camlarının veya kontakt lenslerin üretiminde kabul edilen sınır değerleridir. Bu toleranslar, lenslerin optik performansını ve kullanıcının konforunu doğrudan etkiler. Çok dar toleranslar, daha yüksek maliyetler ve karmaşık üretim süreçleri gerektirebilirken, daha geniş toleranslar ise görüş kalitesinde bozulmalara yol açabilir. Bu nedenle, tolerans seviyeleri, hastanın özel ihtiyaçları ve kullanım koşulları dikkate alınarak belirlenmelidir. (Brooks & Borish, 2007; Atchison, 1992; Musa & Zeppieri, 2023).

Gözlük tasarımında, silindirik potansiyellerin yanı sıra, toleranslar da göz önüne alınmak zorundadır. Bu sayede, özellikle kombinasyonlarda, en uygun ve konforlu ürünler seçilebilir. Silindirik değerlerin doğru ölçümü ve toleransların uygun belirlenmesi, matbu hata oranını azaltır, görsel konforu artırır ve uzun vadeli memnuniyeti sağlar. Ayrıca, üretim sırasında toleransların belirlenmesine

ilişkin standartlar ve kalite kontrol prosedürleri, gözlüklerin performansını garanti altına alır. Sonuç olarak, cylindrical potansiyeller ve silindirik toleranslar, gözlükle yapılan düzeltmenin etkinliği ve hastanın yaşam kalitesinin yükseltilmesi adına kritik öneme sahip parametrelerdir. (Brooks & Borish, 2007; Atchison, 1992; Musa & Zeppieri, 2023).

3.3. Gözlük Malzemeleri ve Kaplamalar

Gözlük malzemeleri, refraksiyon kusurlarının düzeltilmesinde temel faktörlerden biridir ve kullanım konforu ile görme kalitesini doğrudan etkiler. Malzeme seçiminde hafiflik, dayanıklılık, esneklik ve şeffaflık gibi özellikler göz önünde bulundurulur. Piyasada farklı polimer ve cam türleri bulunmakla birlikte, günümüzde en çok tercih edilen materyaller yüksek kaliteli amorf polisülfonlar, polikarbonatlar ve Trivex gibi ürünlerdir. Bu malzemeler hem hafiflik hem de kırılma direnci açısından avantaj sağlar. (Brooks & Borish, 2007; Jalie, 2008; Martinez-Perez & Oliveira, 2024).

Kaplamalar ise gözlük camlarının performansını artırmak ve kullanım deneyimini iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir. En yaygın kullanılan kaplamalar arasında yansıtma engelleyici, çizilme direnci yüksek ve UV koruyucu katmanlar yer alır. Yansıma önleyici kaplamalar, özellikle gece sürüşleri ve ışık yanmaları sırasında görüş netliğini artırarak baş ağrısı ve yorgunluğu azaltır. Çizilmeye karşı dayanıklı kaplamalar, kullanım ömrünü uzatırken, UV koruyucu tabakalar cilt ile temas halinde UV ışınlarının zararlı etkilerini engeller. (Brooks & Borish, 2007; Jalie, 2008; Martinez-Perez & Oliveira, 2024).

Modern teknolojiler sayesinde, gözlük camlarına uygulanan kaplamaların kalınlığı minimal olup, görme keskinliğine olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır. Ayrıca, anti-reflektif kaplamalar sayesinde ışık yansımalarını azaltır, böylece görsel konfor artar ve estetik açıdan daha şık bir görünüm sağlar. Gözlük malzemelerinde tercih edilen kaplamalar, hastaların yaşam kalitesini yükseltecek şekilde, pratik kullanımı ve uzun ömürleri ile öne çıkar. (Brooks & Borish, 2007; Jalie, 2008; Martinez-Perez & Oliveira, 2024).

Hızla gelişen malzeme teknolojileri, özellikle sporcu ve günlük kullanım için uygun hafif ve dayanıklı alternatifleri de beraberinde getirir. Sonuç olarak, doğru malzeme ve kaplama seçimi hem göz sağlığını koruma hem de kullanıcı memnuniyetini maksimize etme açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, gözlük seçiminde, hastanın yaşam tarzı ve ihtiyaçları gözetilerek, uzmanların önerisi doğrultusunda en uygun materyal ve kaplamaların tercih edilmesi gerekir. (Brooks & Borish, 2007; Jalie, 2008; Martinez-Perez & Oliveira, 2024).

4. KUSURLARA GÖRE DÜZELTME STRATEJİLERİ

Refraksiyon kusurlarının düzeltiminde gözlük seçimi ve kullanımında çeşitli stratejiler benimsenir. İlk olarak, uygun lens gücünün belirlenmesi esastır ve bu, detaylı göz muayeneleri sonucunda optometrik hesaplamalarla yapılır. Sferik kusurlar için kullanılan tüple güç ayarları, hastanın düzeltilmesi gereken görme netliği ve konforunu sağlayacak şekilde seçilir. Ayrıca, yüksek miyop veya hipermetrop kişilerde, farklı güçlerde birçok lens kombinasyonu veya tek başına yüksek güçlü lensler tercih edilebilir. (Chuck ve ark., 2018; Benjamin, 2006; Brooks & Borish, 2007).

Astigmatizme yönelik düzeltmelerde, silindirik güçler dikkatli bir şekilde belirlenmelidir. Silindirik potansiyeller ve toleranslar gözlük camlarının doğru optik performansını doğrudan etkiler. Bu noktada, uygun silindirik güç ve eksen bilgisi, hastanın görüş kalitesini artırır ve baş ağrısı gibi yan etkileri azaltır. Yumuşak ya da sert kontakt lenslerle karşılaştırıldığında, gözlükler genellikle daha ekonomik ve kullanımı kolaydır, ancak görüş alanı sınırlaması ve görüş kalitesi açısından bazı dezavantajlar içerebilir. (Chuck ve ark., 2018; Benjamin, 2006; Brooks & Borish, 2007).

Presbiyopi ise, özellikle yaşa bağlı olarak ortaya çıkan bir kusur olup, çok odaklı veya progresif lensler kullanılarak çözüm sağlar. Bu tür lensler, hem yakın hem de uzak mesafedeki görme ihtiyaçlarını tek bir camda karşılayarak hastanın günlük yaşam konforunu artırır. Yüksek miyop ve hipermetrop olgularında, gözlükler genellikle yüksek güçlü ve özel tasarımlı olur; bu, görmenin netliği yanında göz konforunu da amaçlar. (Chuck ve ark., 2018; Benjamin, 2006; Brooks & Borish, 2007).

Sonuç olarak, hastanın görme ihtiyaçlarına ve yaşam tarzına uygun gözlük seçimi, kabuller ve uyum süreçleri dikkate alınarak gerçekleştirilir. Bu stratejiler, hastanın yaşam kalitesini yükseltmek ve görsel konforu sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. (Chuck ve ark., 2018; Benjamin, 2006; Brooks & Borish, 2007).

4.1. Buğulu Görme ve Bireysel Adaptasyon Süreleri

Buğulu görme, özellikle başlangıçta önemli bir adaptasyon sürecini gerektiren bir durumdur ve bireylerin gözlük kullanımı sonrası deneyimledikleri önemli bir faktördür. Bu durum, yeni lens güçlerine alışma sürecinde geçici olarak ortaya çıkabilir ve genellikle birkaç gün ile birkaç hafta arasında değişen sürelerle kendiliğinden düzelir. Ancak, bazı bireylerde bu süre daha uzun olabilir ve bu süreç, göz yapısı, yaş ve diğer bireysel faktörlere bağlı olarak farklılık gösterir. Adaptasyon süreci sırasında hastanın görme kalitesinde geçici bir bozulma yaşaması, görsel konforu olumsuz etkileyebilir, bu da günlük yaşam aktivitelerinde rahatsızlıklar yaratabilir. Bu nedenle, özellikle yeni gözlük

kullanan kişilerde, doğru lens güçlerinin belirlenmesi kadar, bireysel adaptasyon sürelerine de dikkat etmek gerekir. (Oscar ve ark., 2023; Brooks & Borish, 2007).

Bireysel adaptasyon süreleri, hastanın önceki görme durumu ve yeni düzeltmenin özelliklerine göre değişir. Genellikle, hastalar ilk başta bulanık veya çift görünüm, yanık veya ışıltı gibi geçici şikayetler ifade edebilir. Bu belirtiler, beynin yeni görsel girdilere uyum sağlayabilmesi ve gözlerin yeni lens sistemine alışmasıyla azalır. Adaptasyon sürecinde kişiye özel çeşitli stratejiler uygulamak faydalı olabilir. Örneğin, kısa süreli olarak düşük güçte lens kullanımı veya yavaş güç artışları, hastanın görsel alışma sürecini kolaylaştırabilir. Ayrıca, ortam değişiklikleri ve gözlük kullanım alışkanlıklarının uyumlaştırılması da bu süreci hızlandırabilir. Gözlük kullanımı sırasında görsel konforu artırmak ve bu geçici adaptasyon sürecinde rahatsızlıkları minimize etmek için uygun malzeme ve kaplama özelliklerine sahip lensler tercih edilmelidir. (Oscar ve ark., 2023; Brooks & Borish, 2007).

Özellikle buğunlu görmenin uzun sürelere yayılan bir adaptasyon gerektirdiği durumlarda, hastanın sabrı ve düzenli göz kontrolleri oldukça önemlidir. Gözlük kullanımına ilk başladığında veya güç ayarlarında değişiklik yapıldığında, hastanın yaşadığı uyumsuzluk hissine karşı psikolojik destek ve bilgilendirme yapılması, adaptasyon sürecinin daha sağlıklı ve konforlu geçmesini sağlar. Ayrıca, bireysel farklılıklar göz önüne alınarak, gerekiyorsa kısa süreli iletişim ve takiplerle, görsel konforun sürdürülebilirliği sağlanmalı ve uzun vadede olası sorunların önüne geçilmelidir. Bu sayede, bireylerin görsel aktiflikleri ve yaşam kaliteleri korunabilir, adaptasyon süreleri ise en uygun ve rahat biçimde tamamlanabilir. (Oscar ve ark., 2023; Brooks & Borish, 2007).

4.2. Astigmatizmde Gözlük Tercihleri

Astigmatizmde gözlük tercihleri, hastanın refraksiyonel ihtiyaçlarına ve yaşam tarzına uygun çözümün belirlenmesine dayanır. Bu kusurun düzeltilmesinde en yaygın kullanılan yöntem, silindirik lenslerle sağlanan optik düzeltmedir. Gözlüğün optik performansı, silindirik gücün ve eğim açısının doğru belirlenmesine bağlıdır; bu nedenle, reçete detaylarının hassasiyeti büyük önem taşır. Ayrıca, gözlük malzemeleri ve kaplamalar da hastanın görüş konforunu artırmak açısından dikkate alınır. Silindirik lensler, farklı meridyenlerdeki refraktif hataları dengeleyerek net görme sağlar. Gözlüğün silindirik gücü, hastanın astigmatizma seviyesine göre belirlenir ve silindirik potansiyelin doğru hesaplanması, görüş kalitesini doğrudan etkiler. Toleranslar ve tolerans sınırları, hastanın göz yapısı ve görsel beklentilerine göre uyarlanmalıdır. Malzeme seçiminde, şık ve hafif cam ya da plastik türleri, estetik ve konfor açısından avantaj sağlar. Gözlük kaplamaları ise, yansıma önleyici, çizilmeye karşı dayanıklı ve UV filtresi içeren seçeneklerle hastanın kullanım deneyimi optimize edilir. Ayrıca, astigmatizmanın ilerleyici doğası göz önüne

alınarak, zamanla ihtiyaçların değişmesine uygun ayar imkânları sunan gözlükler tercih edilir. Özellikle sportif veya aktif yaşam tarzına sahip hastalarda, dayanıklı ve dayanıklı kameralı veya spor amaçlı modeller ön plana çıkar. Sonuç olarak, astigmatizma düzeltmede gözlük seçimi, kişisel özellikler ve görsel ihtiyaçlar doğrultusunda dikkatle yapılmalı hem netlik hem de konfor sağlanmalıdır. Bu doğrultuda, uzman bir gözlükçü ile düzenli takip ve ayarlamalar, tedavinin başarıyla sürdürülebilmesi açısından temel unsurlardır. (Chuck ve ark., 2018; Brooks & Borish, 2007; Musa & Zeppieri, 2023).

4.3. Presbiyopide Çok Odaklı Çözümler

Presbiyopi, yaşa bağlı olarak ortaya çıkan yakın görme güçlüğüdür ve bu durum genellikle 40 yaş sonrası kendini gösterir. Çok odaklı çözümler, presbiyopinin bu doğal değişimine uygun, fonksiyonel ve konforlu görme sağlamak amacıyla geliştirilmiş yöntemlerdir. Bu yaklaşımlar, tek bir gözlük ile hem uzak hem de yakın görüşü düzgün hale getirmeyi hedefler ve hasta konforunu artırır. En yaygın kullanılan strateji, multifokal lens sistemleridir. Bu lensler, farklı güç seviyelerini içeren çok odaklı yüzeyler sayesinde, kullanıcının farklı mesafelere odaklanmasına imkân tanır. Bunlar arasında en sık tercih edilenler, mercek üzerinde çeşitli bölümler veya halkalar aracılığıyla uzak ve yakın odaklar sağlayan multifokal veya progresif lenslerdir. (Oscar ve ark., 2023; Atchison, 1992; Benjamin, 2006).

Progresif lensler, görme alanında kesintisiz bir geçiş sağlar, böylece kullanıcı farklı mesafelere gözü hizalayarak geçer ve adaptasyon süresi nispeten daha kısadır. Bu lensler, üst kısmı uzak mestelere, orta ve alt kısımları ise yakına odaklanabilecek biçimde tasarlanır. Ayrıca, hastanın yaşam tarzına göre özel tasarımlar veya ince ayar seçenekleri sunulabilir. Bir diğer alternatif çözüm ise, bifokal lenslerdir; bunlar iki ayrı bölmeden oluşur ve kullanıcının ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir. Ancak, bu lensler geçiş alanlarının belirgin olması nedeniyle bazen adaptasyon sorunlarına yol açabilir. (Oscar ve ark., 2023; Atchison, 1992; Benjamin, 2006).

Multifokal ve progresif lenslerin yanı sıra, günümüzde var olan teknolojik gelişmeler sayesinde, gözlük tasarımında hafif ve dayanıklı malzemeler, daha şeffaf yüzey kaplamaları ve çizilme önleyici özellikler entegre edilir. Bu çözümler hem görsel performansı artırır hem de uzun kullanım sürecinde konforu sağlar. Ayrıca, hastanın görme ihtiyaçlarına uygun doğru lens güçlerinin belirlenmesi, kişisel yaşam alanları ve meslek özellikleri dikkate alınarak yapılır. Çok odaklı çözümler, düzenli klinik takip ve adaptasyon sürecini içerir; bu sayede hastanın kullanım memnuniyeti ve göz sağlığı korunur. (Oscar ve ark., 2023; Atchison, 1992; Benjamin, 2006).

Kısaca, presbiyopide çok odaklı gözlük çözümleri, kişisel ihtiyaçlara göre uyarlanmış çok çeşitli tasarım ve teknolojik seçenekleri kapsar. Bu yaklaşımlar, yaşla beraber artan uzak ve yakın görme zorluklarına etkin çözümler sunmak ve yaşam kalitesini yükseltmek amacıyla kullanılır. Modern tasarım ve teknolojiler sayesinde, hastaların görsel konforu ve günlük yaşam fonksiyonları daha etkin şekilde desteklenir, böylece presbiyopinin getirdiği sınırlamalar büyük ölçüde azaltılır. (Oscar ve ark., 2023; Atchison, 1992; Benjamin, 2006).

4.4. Yüksek Miyop ve Hipermetropde Gözlük Uygulamaları

Yüksek miyop ve hipermetrop durumlarında gözlük uygulamaları, hastanın görme keskinliğini artırmak ve günlük fonksiyonlarını optimize etmek amacıyla önemli bir tedavi seçeneği olarak öne çıkar. Yüksek miyoplarda, korneadan retina uzaklığı ciddi derecede artmış olduğundan, uygun güçteki lenslerle görüntü netliği sağlanabilir. Bu durumda, genellikle negatif güçlü sferik lensler tercih edilerek ışığın göz içerisindeki odak noktasını retina üzerinde konumlandırmak amaçlanır. Lens seçimi ve güç hesaplaması titizlikle yapılmalı, hastanın göz yapısı, çalışma ortamları ve yaşam tarzı göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, yüksek miyopta alınacak maliyet ve estetik kaygılar nedeniyle hafif kırılma güçlerine sahip ince yapılı lensler tercih edilmesi hem konfor hem de estetik açıdan avantaj sağlar. (Chuck ve ark., 2018; Benjamin, 2006; Musa & Zeppieri, 2023).

Hipermetropza genellikle pozitif güçte sferik lensler kullanılır. Bu lensler, gözün odak noktası retina önünde kalan görüntüyü retina üzerine getirmeyi sağlar. Özellikle yüksek hipermetrop hastalarında, uygun optik güçte gözlük kullanımı görme keskinliğini önemli ölçüde artırırken, gözlerin aşırı zorlanmasını önler. Yüksek hipermetropi durumu, gözlerde yorgunluk, baş ağrısı ve okuma güçlüğüne neden olabileceği için, gözlük uygulamasında hassasiyetle uygun güç seçimi yapılmalıdır. Ayrıca, hastalığın ilerleme potansiyeli göz önüne alınarak, düzenli takip ve güç ayarları yapılmalıdır. (Chuck ve ark., 2018; Benjamin, 2006; Musa & Zeppieri, 2023).

Her iki durumda da yüksek refraksiyon kusurlarında, gözlüğün uygun optik performansı ve hastanın konforu dikkate alınarak, malzeme ve kaplama özellikleri de göz önünde bulundurulur. Şeffaf ve hafif cam seçenekleri, anti-reflektif kaplamalar ve çizilmeye dayanıklı materyaller, kullanım süresi boyunca memnuniyeti artırır. Alternatif olarak, yüksek ölçüde kırılma değeri taşıyan lensler, daha ince ve estetik bir görünüm sunarak hastanın sosyal ve mesleki yaşam kalitesini yükseltir. Düzenli göz muayeneleri ve hastaya özgü gözlük reçeteleriyle, yüksek miyop ve hipermetrop tedavisinde etkin ve güvenilir sonuçlar elde edilir. (Chuck ve ark., 2018; Benjamin, 2006; Musa & Zeppieri, 2023).

5. KLİNİK UYGULAMA VE TAKİP

Refraksiyon kusurlarının klinik uygulama ve takibi aşamasında, doğru tanı yöntemleri ve uygun takip protokolleri büyük önem taşır. İlk olarak, refraktometri cihazlarıyla yapılan muayeneler sırasında, hastanın görüş bulanıklığına neden olan hataların tespiti sağlanır. Bu muayeneler, subjektif ve objektif yöntemlerin kombinasyonuyla gerçekleştirilir; subjektif değerlendirmeler hastanın görsel memnuniyetine uygun lens gücünün belirlenmesini sağlar, objektif ölçümler ise gama ve astigmatizm gibi optik hataların hassas tespiti için kullanılır. Ayrıca, gözlüğe adaptasyon sürecinde hastanın alışma durumu gözlemlenirken, beklentiler ve görsel fonksiyonlar dikkate alınır. Bu süreçte, gözlük kullanımına ilişkin hasta eğitimi önemli bir yer tutar; hastalara lenslerin doğru kullanımı, temizliği ve bakım alışkanlıkları konusunda bilgi verilir. Takip sırasında, göz sağlığı düzenli olarak izlenir; özellikle, yüksek miyop, hipermetrop veya astigmatizmalarda ilerlemenin takibi, olası yan etkilerin erken fark edilmesini sağlar. Ayrıca, gözlük kullanıcılarında oluşabilecek baş ağrısı, göz yorgunluğu veya ufak görme problemleri gibi şikâyetler değerlendirilerek, gerekirse lens güçlerinde ayarlamalar yapılır. Kontrol muayeneleri, genellikle belirli aralıklarla tekrarlanır ve hastanın görsel konforu ile yaşam kalitesi yakından izlenir. Gözlük adaptasyon sürecinde hastanın motivasyonu ve psikolojisi de göz önünde bulundurularak, gerekirse psikososyal destek sağlanır. Bu aşamalar hem optimal görsel fonksiyonun sağlanması hem de hastanın memnuniyet ve hızla alışma sürecinin desteklenmesi açısından kritik önemdedir. Sonuç olarak, klinik uygulama ve takip aşaması, refraksiyon kusurlarının tedavisinde başarıyı belirleyen ve hastanın yaşam kalitesini doğrudan etkileyen temel unsurlardır. (Chuck ve ark., 2018; WHO, 2019; Musa & Zeppieri, 2023).

5.1. Refraksiyon Muayenesi Yöntemleri

Refraksiyon muayenesi yöntemleri, gözde mevcut olan kırma kusurlarını belirlemek amacıyla kullanılan çeşitli klinik test ve ölçüm tekniklerini kapsamaktadır. Bu muayeneler, hastanın görme fonksiyonunu en doğru şekilde değerlendirmek ve uygun düzeltici tedavi stratejisini belirlemek için temel teşkil eder. Genellikle objektif ve subjektif olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Objektif muayeneler, hastanın göz yapısı ve kırma kusurlarını doğrudan ölçen cihazlar kullanılarak yapılır. Bu cihazlar arasında keratometre, otomatik refraktometre ve otomasyonlu anizometreler önemli yer tutar. Otomatik refraktometreler, hastanın göz numarasını hızlı ve hassas biçimde tespit ederken, keratometreler korneal yüzey eğriliklerini saptamada kullanılır. (Benjamin, 2006; Elkington ve ark., 1999; Chuck ve ark., 2018).

Subjektif muayeneler ise hastanın görme keskinliğini ve görüş konforunu arttırmaya yönelik, gözle görülen netliği ve uyumu değerlendiren testlerdir. Bu aşamada, en yaygın kullanılan yöntem Snellen tablosu ile mesafe görme

keskinliği testi, yakın görme testleri ve gözlük gücü ayarlama prosedürleridir. Hastaya çeşitli lazerli veya film optik numaraları içeren deneme gözlükleri takılarak, görme şiddetli veya azalmış olduğu durumlar tespit edilir. Ayrıca, sferik ve silindirik güçler, hastanın göz yapısına göre belirlenir ve bu bilgiler ışığında uygun gözlük veya kontakt lens gücü hesaplamaları yapılır. (Benjamin, 2006; Elkington ve ark., 1999; Chuck ve ark., 2018).

Refraksiyon muayenelerinde gözdeki optik anormalliklerin doğru saptanması ve ölçüm hatalarının minimize edilmesi için birkaç kritik adım izlenir. Öncelikle, hastanın dikkat ve odaklanma durumu dikkate alınmalı; kullanıcı konforu sağlanmalı ve uyumsuzluk durumları göz önünde bulundurulmalıdır. Muayene sırasında, özellikle heterofori veya göz kaymalarında gözlerin hizalanmasına da özen gösterilir. Son olarak, hastanın görme durumu ve gereksinimlerine göre, farklı ışık koşullarında ve çeşitli görme mesafelerinde tekrarlanan ölçümler gerçekleştirilir. Bu yöntem ve teknikler, kırma kusurlarını en doğru şekilde tespit etmek ve uygun gözlük gücü belirlemek için temel teşkil eder. (Benjamin, 2006; Elkington ve ark., 1999; Chuck ve ark., 2018).

5.2. Gözlük Adaptasyonu ve Hasta Eğitimi

Gözlük adaptasyonu sürecinde, hastaların yeni gözlüklerine uyum sağlaması için zaman ve sabır gereklidir. Adaptasyon aşamasında hastalara, ilk kullanımda oluşabilecek rahatsızlıklar ve geçici görsel bozukluklar hakkında bilgi verilmelidir. Bu süreçte, gözlük kullanımı sırasında oluşabilecek baş ağrısı, baş dönmesi veya bulanık görme gibi yakınmalara karşı hastalar bilgilendirilerek psikolojik destek sunulmalıdır. Gözlüklerin doğru ve düzenli kullanımı, adaptasyon sürecinin hızlanmasına katkı sağlar. (Brooks & Borish, 2007; Oscar ve ark., 2023).

Hasta eğitimi, bu dönemde klinik uygulamaların en önemli unsurlarından biridir. Hastalara, gözlüklerin nasıl kullanılacağı, temizlik ve bakımına ilişkin detaylar detaylı biçimde anlatılmalı, uygun lens temizleme yöntemleri öğretilmelidir. Ayrıca, gözlüklerin doğru şekilde takılması ve çıkartılması, kaybolmaması veya zarar görmemesi için önemlidir. Hasta eğitimi sırasında, özellikle çocuk ve yaşlı hastalarda, gözlüklerin günlük yaşamda rahatlıkla kullanılabilmesi için pratik öneriler sunulmalıdır. (Brooks & Borish, 2007; Oscar ve ark., 2023).

Gözlük adaptasyonu sırasında, hastanın beklentilerinin karşılanması ve konforun sağlanması için kişiselleştirilmiş yaklaşımlar benimsenmelidir. Bu nedenle, ilk reçete sırasında hastanın yaşam tarzı, mesleği ve görsel ihtiyaçları göz önünde bulundurulmalıdır. Uygun gözlük seçimleriyle birlikte, belirli durumlarda erken adaptasyon için kısa süreli rahatsızlıklar minimize edilmeye çalışılır. Gözlük kullanımı ile ilgili düzenli takipler, adaptasyon sürecinin etkin

yönetimi açısından kritiktir. Herhangi bir rahatsızlık veya görsel bozukluk geliştiğinde, hızlı müdahale edilerek gerekirse lens güçlerinde ayarlamalar yapılmalıdır. Bu yaklaşım, hem hastanın memnuniyetini artırır hem de uzun vadeli kullanım konforunu sağlar. (Brooks & Borish, 2007; Oscar ve ark., 2023).

Son olarak, hastaların yeni gözlüklerine alışmasını kolaylaştırmak amacıyla, motivasyon ve destek sağlanmalı, gerekirse görsel alıştırmalar ve ek tedavi seçenekleri değerlendirilmeli. Bu süreçte hekim ve hasta arasında etkili iletişim kurmak, adaptasyonun olumlu sonuçlanması için temel faktördür. Uygun bilgi ve destekle, hastaların gözlük kullanımına uyumu ve yaşam kalitesinde iyileşme sağlanması hedeflenir. (Brooks & Borish, 2007; Oscar ve ark., 2023).

5.3. Göz Sağlığı İzlem ve Yan Etkiler

Göz sağlığı izleme sürecinde, hastaların refraksiyon kusurlarına bağlı olarak gelişebilecek olası yan etki ve komplikasyonların düzenli olarak takip edilmesi büyük önem taşımaktadır. Gözlük kullanımıyla yapılan düzeltmelerin ardından, gözlerde oluşabilecek kuruluk, yanma, sulanma veya bulanık görme gibi yan etkiler dikkatle izlenmelidir. Bu belirtiler, uygun olmayan lens gücü veya malzeme seçiminin sonucu olabilir ve zamanla görme konforunu olumsuz yönde etkileyebilir. Ayrıca, uzun süreli gözlük kullanımı sonrası da gözkapığında veya burun köprüsünde tahriş ve bası hissi ortaya çıkabilir. Bu nedenle, hastalara düzenli klinik muayeneler ve göz sağlığı değerlendirmeleri önerilmektedir. (Chuck ve ark., 2018; Brooks & Borish, 2007; WHO, 2019).

Gözlük kullanımıyla ilişkilendirilebilecek yan etkilerin önüne geçmek amacıyla, hastaların yakın takibi ve uygun ayarlamalar yapılması son derece önemlidir. Göz içi basınç, kornea olarak görülen yapıların durumu ve göz içi sıvı seviyeleri rutin kontrol edilmelidir. Gözlük camlarının ve çerçevenin uygunluğu, zamanla değişen görme ihtiyaçlarına göre düzenlenmelidir. Özellikle, gözlük kullanımı sırasında ortaya çıkan baş ağrısı, yorgunluk ve görme bulanıklığı gibi şikayetler, uzmanlar tarafından değerlendirilerek gerekli düzeltmeler yapılmalıdır. (Chuck ve ark., 2018; Brooks & Borish, 2007; WHO, 2019).

Ayrıca, hastalara gözlükle ilgili olası yan etkiler hakkında bilgilendirme sağlanmalı ve doğru kullanım alışkanlıkları kazandırılmalıdır. Göz küresinin yapısal değişiklikleri veya kornea tabakasında meydana gelen olası hasarlar, ilerleyen dönemde görme fonksiyonlarını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, özellikle yüksek refraksiyon kusurlarında ve presbiyopi gibi yaşa bağlı değişimlerde, sürekli göz muayeneleri ve takipler büyük önem taşır. Gözlükle düzeltmenin ötesinde, gerekirse ek tedavi seçenekleri ve alternatif yaklaşımlar hakkında hasta bilgilendirilerek, genel göz sağlığı korunmalıdır. Sonuç olarak, düzenli göz sağlığı izlemi ve hastanın bilinçli takip edilmesi, gözlük kullanımının

güvenli ve konforlu olmasını sağlayan temel unsurlardır. (Chuck ve ark., 2018; Brooks & Borish, 2007; WHO, 2019).

6.GÖZLÜK DÜZELTMELERİNİN SINIRLAMALARI VE ALTERNATİF YAKLAŞIMLAR

Gözlükle yapılan refraksiyon düzeltmeleri birçok durumda etkili olsa da belirli sınırlamaları ve yan etkileri nedeniyle her zaman yeterli çözümler sunmayabilir. Öncelikle, yüksek miyop, hipermetrop veya astigmat gibi ciddi kusurlarda gözlük ceza ve konfor açısından kısıtlayıcı olabilir. Ayrıca, gözlüklerin kullanımına bağlı olarak görsel algıda gerçekleşen bozulmalar veya baş ağrıları gibi yan etkiler ortaya çıkabilir. Bu durum, özellikle sportif aktiviteler veya yoğun hareket gerektiren işlerde görüş kalitesini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, gözlükler zamanla yatkınlık, deformasyon veya çizilmelere bağlı performansını kaybedebilir. Çocuklar ve genç erişkinlerde, gözlük kullanımını sürdürülebilir kılmak veya alışkanlık oluşturmak bazen zor olabilir. Bunların yanı sıra, bazı kişilerde gözlük kullanımı estetik veya psikolojik nedenlerle tercih edilmeyebilir. (Chuck ve ark., 2018; Kandel, 2022; WHO, 2019).

Bu sınırlamalara alternatif olarak, kontakt lensler modern ve esnek çözümler sunar. Kontakt lensler, görüş alanını kısıtlamadan doğrudan göz yüzeyine oturdukları için etkinliği artırır ve hareket özgürlüğü sağlar. Ayrıca, refraktif cerrahi işlemleri—lasik, prk ve diğer laser yöntemleri—katarakt veya korneal yapıya uygun hastalarda kalıcı çözümler üretebilir. Bu cerrahiler, özellikle yüksek kusurlarda daha net ve konforlu görüş imkânı sunabilir. Ancak, her cerrahi prosedür gibi, bu seçenekler de belirli riskler ve sınırlamalar içerir; enfeksiyon riski, kuru göz sendromu ve teknolojik gelişmelere bağlı değişken başarı oranları dikkate alınmalıdır. Göz sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkiler, maliyet ve iyileşme süreci göz önünde bulundurulduğunda, alternatif yöntemlerin seçiminde uzmanların detaylı değerlendirmeleri büyük önem taşır. Görsel konfor ve yaşam kalitesini artırmak adına, uygun hasta seçimi ve düzenli takip ile bu alternatif yaklaşımların avantajları en üst düzeye çıkarılabilir. (Chuck ve ark., 2018; Kandel, 2022; WHO, 2019).

6.1. Kontakt Lensler ve Görüş Kalitesi

Kontakt lensler, refraksiyon kusurlarının düzeltilmesinde önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşımlar, özellikle gözlük kullanımına kıyasla daha estetik ve pratik bir çözüm sunar. Lenslerin görme kalitesine etkisi, kullanılan tiplerine göre değişiklik gösterir ve uygun seçim, hastanın yaşam tarzı, göz yapısı ve konfor tercihlerine göre yapılmalıdır. Kontakt lenslerin göze doğrudan temas etmesi, her bireyde farklı uyum süreçleri gerektirir ve bu süreçte hastalar, lenslerin adaptasyonu ve göz sağlığını koruyucu önlemler konusunda bilgilendirilmelidir. (Kandel, 2022; Brooks & Borish, 2007).

Görüş kalitesini artırmak amacıyla, uygun lens seçimi ve doğru yerleştirme kritik öneme sahiptir. Silindirik ve sferik lenslerin kombinasyonu, özellikle astigmatizm ve hipermetrop gibi kusurlarda net görüntü sağlar. Ayrıca, lenslerin malzeme ve kaplama özellikleri, konforu ve göz sağlığını doğrudan etkiler. Günümüzde hyaluronik asit içeren veya UV korumalı lensler, gözlerin kurumaması ve güneş ışınlarına karşı korunması açısından tercih edilmektedir. (Kandel, 2022; Brooks & Borish, 2007).

Lens kullanımında dikkat edilmesi gereken noktalar arasında, düzenli temizlik ve hijyen uygulamaları ile gözlerin oksijen almasını engellemeyen malzemelerin kullanımı yer alır. Uygun bakım ve kontrol randevuları, olası komplikasyonların erken tespiti ve önlenmesine imkan sağlar. Ayrıca, lenslerin uyum sürecinde hastalara gerekli eğitimler verilerek, rahatsızlık ve komplikasyon riskleri en aza indirilir. (Kandel, 2022; Brooks & Borish, 2007).

Kontakt lensler, yüksek miyop veya hipermetrop gibi ciddi refraksiyon kusurlarında görme fonksiyonunu optimize etmenin yanı sıra, estetik tercihler açısından da cazip bir alternatif sunar. Ancak, göz sağlığını koruma adına, kullanım süreleri, uygun temizlik ve bakım kurallarına uyum büyük önem taşır. Böylece, hem görüş kalitesi artırılır hem de göz sağlığı korunabilir. Bu nedenle, hastaların bireysel ihtiyaçlarına uygun lens tipi ve kullanım alışkanlıkları belirlenerek, uzun vadeli memnuniyet ve güven ortamı sağlanmalıdır. (Kandel, 2022; Brooks & Borish, 2007).

6.2. Refraktif Cerrahi Seçenekleri

Refraktif cerrahi, refraksiyon kusurlarının düzeltiminde cerrahi girişimlerle kalıcı ve genellikle başarılı sonuçlar sağlayan alternatif bir yöntemdir. Bu uygulamalar, özellikle gözlük veya kontakt lens kullanımıyla sağlanan düzeltmenin yeterli olmadığı veya hastanın yaşam kalitesini artırmak istediği durumlarda tercih edilmektedir. En sık kullanılan refraktif cerrahi yöntemleri arasında LASIK, PRK ve SMILE bulunur. LASIK (Laser-Assisted In Situ Keratomileusis), korneasında ince bir flap oluşturarak lazerle korneanın şeklinin değiştirilmesini sağlar. PRK (Photorefractive Keratectomy), korneal epitelin kaldırılmasını takiben lazer uygulamasıyla refraktif hatanın düzeltilmesine imkan tanır. SMILE (Small Incision Lenticule Extraction), minimal invaziv bir teknik olup, korneada küçük bir insizyondan lenticle çıkarılarak görmenin iyileştirilmesini sağlar. (Chuck ve ark., 2018).

Her cerrahi yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları bulunur. LASIK, hızlı iyileşme süreci ve genellikle düşük komplikasyon oranıyla tercih edilirken, yüksek miyop ve astigmatizmi olan hastalarda başarı oranı yüksektir. Ancak korneal incelme sebebiyle düşük riskli olmasına rağmen, olası kuru göz sendromu veya gece görme sorunları gibi yan etkiler görülebilir. PRK ise kornea

yapısının daha az hassas olduğu durumlarda tercih edilir ve daha uzun iyileşme süresi ile birlikte hafif ağrı ve görsel dalgalanmalar görülebilir. SMILE yöntemi, kornea yapısını daha az etkilediği için kuru göz gelişimini azaltabilir ve hızlı iyileşme sağlayabilir; fakat bazı hastalarda görsel netlik ve stabilite açısından diğér yöntemlere göre farklılıklar oluşabilir. (Chuck ve ark., 2018).

Cerrahi karar verilmesinde hastanın yaş, refraktif hata tipi, kornea kalınlığı ve yaşam tarzı önemli rol oynar. Ayrıca, cerrahi öncesi detaylı muayene ve hasta beklentilerinin doğru belirlenmesi, başarı oranını artırır. Refraktif cerrahi, öngörülen sonuçlara ulaşmakla birlikte, bazı durumlarda tekrar müdahale gerekebilir ve uzun vadeli takipler önem taşır. Tüm bu faktörler göz önüne alınarak, hastanın ihtiyaçlarına en uygun yöntemin seçilmesi, görsel konfor ve yaşam kalitesini en üst düzeye çıkaracaktır. (Chuck ve ark., 2018).

6.3. Görsel Konfor ve Yaşam Kalitesi Değerlendirmeleri

Görsel konfor ve yaşam kalitesi değerlendirmeleri, refraksiyon kusurlarının tedavisinde önemli bir yere sahiptir. Gözlükle düzeltme sonrası hastaların vizyon kalitesi kadar, günlük yaşam aktivitelerindeki rahatlık ve memnuniyetleri de dikkate alınmalıdır. Bu değerlendirmeler, sadece görme keskinliğinin iyileştirilmesine odaklanmak yerine, bireyin görsel ihtiyaçları ve yaşam tarzına uygun konforu ölçmeyi amaçlar. Anketler, gözlük kullanımına uyum ve memnuniyet seviyeleri, subjektif görsel rahatsızlıkların belirlenmesi ve yaşam kalitesini etkileyen faktörlerin saptanması açısından önemli bilgiler sağlar. Örneğin, geniş perdeli görüş alanı, parlama eğilimleri ve ense yorgunluğu gibi konular, gece görüşü ve uzun süreli okuma sırasında yaşanan zorluklar gibi unsurlar, görsel konforun temel göstergeleri arasında yer alır. (Kandel, Khadka, Goggin, & Pesudovs, 2017; Rajabpour ve ark., 2024).

Bu değerlendirmeler, hastanın günlük yaşamında görülen zorlukları tespit ederek, gözlük tasarımı ve seçimi süreçlerine yön verir. Ayrıca, hastanın kişisel alışkanlıkları ve çalışma ortamları dikkate alınarak, daha uygun ve konforlu çözümler oluşturulur. Özellikle, presbiyopili bireylerde çok odaklı lenslerin kullanımı ve astigmatizması olan hastalarda uygun gözlük tercihi, yaşam kalitesini doğrudan etkiler. Bu kapsamda, düzenli klinik takipler ve hasta eğitimleri ile bireysel memnuniyet seviyeleri ölçölür ve gerekirse gözlük uygulamasında ayarlamalar yapılır. (Kandel, Khadka, Goggin, & Pesudovs, 2017; Rajabpour ve ark., 2024).

Değerlendirmelerde kullanılan objektif ve subjektif ölçüm araçları, hastanın görsel fonksiyonlarını geniş bir perspektiften analiz ederek hem görsel performans hem de genel yaşam kalitesini optimize etmeye yöneliktir. Sonuç olarak, görsel konfor ve yaşam kalitesi değerlendirmeleri, bireysel ihtiyaçlara uygun düzeltme stratejilerinin belirlenmesinde ve hastanın tedavi sürecine

katılımının artırılmasında temel bir araçtır. Bu sayede, yalnızca görme keskinliği değil, aynı zamanda günlük yaşamda karşılaşılan görsel rahatsızlıkların azaltılması hedeflenir. (Kandel, Khadka, Goggin, & Pesudovs, 2017; Rajabpour ve ark., 2024).

7. SONUÇ

Refraksiyon kusurlarının tespiti ve uygun gözlük düzeltmesi, hastaların görsel fonksiyonunu optimize etmek adına kritik bir öneme sahiptir. Başarılı bir düzeltme stratejisi, bireysel ihtiyaçların doğru analiz edilmesi ve kişiye uygun lenslerin seçimiyle mümkün olur. Lenslerin güç hesaplamalarında geleneksel ve modern teknolojilerin entegrasyonu, gözlüklerin görsel kalitesini artırmada etkili bir yöntemdir. Aynı zamanda, silindirik potansiyellerin ve toleransların dikkate alınması, özellikle astigmatizmanın düzeltilmesinde başarının anahtarını oluşturur. Gözlük malzemeleri ve kaplamalar ise, kullanım rahatlığını artırırken, göz sağlığını korumaya yönelik önemli unsurlardır. (WHO, 2019; Chuck ve ark., 2018; Rajabpour ve ark., 2024).

Kusurlara bağlı düzeltme uygulamalarında, hastanın görsel adaptasyon süresi, kişisel tercihler ve yaşam tarzı göz önünde bulundurulmalıdır. Astigmatizmi olan bireylerde tercih edilen gözlük seçenekleri, silindirik özelliklerin doğru ayarlanmasıyla görme kalitesini iyileştirir. Presbiyopi gibi yaşla ilişkili değişimlerde ise, çok odaklı çözümler veya multifokal lensler, fonksiyonellik ve konforu birlikte sağlar. Yüksek miyop ve hipermetrop bireyler için ise, uygun güçteki lenslerin seçimi, hem görsel netliği hem de göz konforunu garanti altına alır. (WHO, 2019; Chuck ve ark., 2018; Rajabpour ve ark., 2024).

Uygulama aşamasında, refraksiyon muayenelerinin doğru ve titiz bir şekilde yapılması, temel teşhis ve tedavi açısından vazgeçilmezdir. Hasta eğitimi ve adaptasyon sürecinin etkin yönetimi, uyum sürecini hızlandırarak, gözlük kullanım memnuniyetini artırır. Ayrıca, düzenli takipler sayesinde, olası yan etkiler ve göz sağlığı ile ilgili değişimler zamanında tespit edilerek, gerekli düzenlemeler yapılabilir. Gözlüklerin sınırlamalarını dikkate alarak, kontakt lensler ve refraktif cerrahi gibi alternatif yöntemler değerlendirilmeli ve hasta tercihleri gözetilmelidir. Tüm bu uygulamaların başarısı hem teknik bilgi hem de hasta saygısı ve iletişim kalitesiyle sağlanır, böylece görsel yaşam kalitesi sürekli olarak geliştirilir ve korunur. (WHO, 2019; Chuck ve ark., 2018; Rajabpour ve ark., 2024)

KAYNAKÇA

- Atchison, D. A. (1992). Spectacle lens design: A review. *Applied Optics*, 31(19), 3579-3585. doi:10.1364/AO.31.003579
- Benjamin, W. J. (Ed.). (2006). *Borish's clinical refraction* (2nd ed.). St. Louis, MO: Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- Brooks, C. W., & Borish, I. M. (2007). *System for ophthalmic dispensing* (3rd ed.). St. Louis, MO: Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- Chuck, R. S., Jacobs, D. S., Lee, J. K., Afshari, N. A., Vitale, S., Shen, T. T., ... Keenan, J. D. (2018). Refractive Errors & Refractive Surgery Preferred Practice Pattern®. *Ophthalmology*, 125(1), P1-P104. doi:10.1016/j.ophtha.2017.10.003
- Elkington, A. R., Frank, H. J., & Greaney, M. J. (1999). *Clinical optics* (3rd ed.). Oxford, England: Blackwell Science.
- GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators, & Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study. (2021). Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: The Right to Sight: An analysis for the Global Burden of Disease Study. *The Lancet Global Health*, 9(2), e144-e160. doi:10.1016/S2214-109X(20)30489-7
- Jalie, M. (2008). *Ophthalmic lenses and dispensing* (3rd ed.). Edinburgh, Scotland: Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- Kandel, H. (2022). Quality-of-life outcomes of long-term contact lens wear: A systematic review. *Contact Lens & Anterior Eye*, 45(1), 101521. doi:10.1016/j.clae.2021.101521
- Kandel, H., Khadka, J., Goggin, M., & Pesudovs, K. (2017). Impact of refractive error on quality of life: A qualitative study. *Clinical and Experimental Ophthalmology*, 45(7), 677-688. doi:10.1111/ceo.12954
- Martinez-Perez, C., & Oliveira, A. P. (2024). Meta-Analysis of Materials and Treatments Used in Ophthalmic Lenses: Implications for Lens Characteristics. *Materials*, 17(23), 5949. <https://doi.org/10.3390/ma17235949>
- Musa, M. J., & Zeppieri, M. (2023). Spectacle correction of ametropias. In *StatPearls* [Internet]. Treasure Island, FL: StatPearls Publishing.
- Oscar, G.-E., Sanchez, I., & Martin, R. (2023). Visual satisfaction with progressive addition lenses prescribed with novel foveal fixation axis measurements. *Scientific Reports*, 13(1), 11262. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38446-6>

Rajabpour, M., Kangari, H., Pesudovs, K., Khorrami-Nejad, M., Rahmani, S., Mohaghegh, S., & Moradnejad, S. (2024). Refractive error and vision related quality of life. *BMC Ophthalmology*, 24(1), 83. <https://doi.org/10.1186/s12886-024-03350-8>

World Health Organization. (2019). World report on vision. Geneva, Switzerland: Author.



BÖLÜM 6

Yakıt Hücrelerinde Nanokatalizörler ve Nanoelektrot Sistemleri

Zehra Nur Özer¹ & Mehmet Özkan² & Merve Kuzu³

1. GİRİŞ:

Dünyamızın yüzyıllardır gelişmesi, insan nüfusunun artması, doğal kaynakların tükenmesi ve sürdürülemez enerji kaynaklarının her geçen gün tükenmesi nedeniyle, sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç artmış ve bu amaçla çeşitli kaynaklar araştırılmış ve en verimli biçimde kullanılmaları hedeflenmiştir.

Bu sürdürülebilir enerji kaynaklarının başında uzun yıllar boyunca güneş enerjisi, hidroelektrik enerji ve rüzgâr enerjisi gelmekteydi. Ancak zamanla, bu enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin bazı uygulamalarda yetersiz kalması ve maliyet unsurlarının artması nedeniyle daha verimli olabilecek enerji kaynakları arayışı doğmuş ve yakıt hücreleri hakkındaki araştırmalar hızlanmıştır (Vielstich et al., 2010)

Hidrojen ve yakıt hücresi teknolojileri, özellikle tam elektrifikasyonun teknik olarak uygulanmasının güç olduğu veya ekonomik açıdan sınırlı kaldığı sistemlerde, geleceğin sürdürülebilir enerji sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olarak geniş ölçüde kabul edilmektedir. Bu alanlar arasında ağır yük taşımacılığı, havacılık, deniz taşımacılığı, demiryolları ve bazı sabit enerji üretim uygulamaları yer almaktadır. Yakıt hücreleri, yüksek elektrik verimliliği, düşük kirlenici emisyonları, sessiz çalışma ve bazı sistemlerde yakıt esnekliği gibi özellikleriyle geleneksel enerji dönüşüm teknolojilerine göre çeşitli avantajlar sunmaktadır (Debe, 2012; Liu et al., 2006).

PEM yakıt hücreleri, anot ve katotta meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlara dayanır ve elektrokatalizörler genel performansı belirlemede merkezi bir rol oynar (Markovic & Ross, 2002). Platin, şu anda hem anottaki hidrojen oksidasyon reaksiyonları (HOR) hem de katottaki oksijen indirgeme reaksiyonları (ORR) için en etkili katalizörlerden biridir. Bununla birlikte, Pt'nin kıtlığı ve yüksek maliyeti, toplam sistem maliyetini önemli ölçüde artırmaktadır.

¹ Prof. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu
ORCID:0000-0002-5887-4486

² Doç. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi
ORCID: 0000-0001-8346-1459

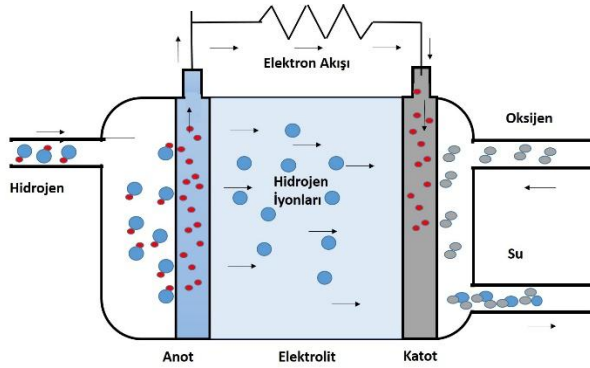
³ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
ORCID: 0009-0005-4462-8953

Ek olarak, Pt bazlı katalizörler, gerçek çalışma koşulları altında parçacık kümelenmesi, çözünme, desteklerden ayrılma ve karbon desteklerinin korozyonu gibi dayanıklılık sorunlarından muzdariptir (Antolini, 2009; Zhang et al., 2013).

Bu kitap bölümünde yakıt hücrelerinin temel özellikleri tanıtılmış, yapılan araştırmalar incelenmiş ve nanokatalizörlerin ve nanoelektrot sistemlerinin güncel yaklaşımlar çerçevesinde değerlendirilmesine yer verilmiştir.

Hidrojen yakıt hücreleri, hidrojen gazının oksijen ile elektrokimyasal tepkimeye girmesi sonucunda elektrik elde etmeyi amaçlayan sistemlerdir. Tepkime aşamasında hidrojen anotta iyonlaşır ve elektronlar serbest kalır. Hidrojen anotta protonlara ve elektronlara ayrılır. Protonlar elektrolit membranından geçerken, elektronlar dış devreden katoda doğru hareket ederek elektrik akımını oluşturur (Bektaş ve Arpa, 2024).

Hidrojen elementi, tepkime sonucu başlıca su oluşturduğu için tercih edilebilirliği yüksek olan enerji taşıyıcıları arasındadır. Bununla birlikte hidrojenin doğada serbest hâlde bol miktarda bulunmadığı, çoğunlukla bileşikler hâlinde yer aldığı unutulmamalıdır. Bir diğer tercih edilme sebebi de uygun üretim yöntemleri kullanıldığında sürdürülebilir enerji sistemlerine katkı sağlayabilmesidir Şekil-1 de PEM yakıt hücresinin bir şeması gösterilmiştir.



Şekil-1 PEM yakıt hücresi şematik gösterimi.

Hidrojen elementinin gün geçtikçe daha fazla kullanılması ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Yeşil hidrojen, birçok alanda tercih edildiği gibi otomotiv sektöründe de giderek önemli bir yer edinmiştir. Bu sayede yeni araştırmalara konu olmuştur. Yapılan çalışmaların temel amacı, sıfır emisyonlu araçlar tasarlamak ve bunları günlük hayatta kullanılabilir hâle getirmektir.

Yapılan araştırmalar gösteriyor ki 1 kg hidrojenin ürettiği enerji miktarı, 1 kg petrolün yaklaşık 2,9 katına, 1 kg doğal gazın yaklaşık 2,1 katına denk gelmektedir (Kazak, Özer, Özkan, 2025). Ancak bu karşılaştırmanın kütesel

enerji içeriği temelinde yapıldığı, hidrojenin hacimsel enerji yoğunluğunun ise düşük olduğu özellikle belirtilmelidir.

Bu elde edilen veriler göz önüne alındığında, uygun üretim, depolama ve taşıma altyapısı sağlandığında, maliyet, atık miktarı ve sürdürülebilirlik açısından önemli kazanımlar (Steele & Heinzl, 2001; Wang et al., 2011).

2. NANOKATALİZÖR

Nano boyutta teknolojik gelişmelerde en önemli özellik yüzey alanıdır. Nanomalzemeler, yüksek yüzey-hacim oranları, ayarlanabilir elektronik yapıları ve karmaşık, çok işlevli mimariler oluşturma yetenekleri nedeniyle yakıt hücresi katalizörleri ve bileşenleriyle ilgili zorlukların üstesinden gelmek için benzersiz bir şekilde uygundur (Agrawal et al., 2025; Njoki & Zhong, 2010). Parçacık boyutunu, morfolojisini, bileşimini ve yüzey kimyasını nano ölçekte kontrol ederek, katalitik aktiviteyi, kütle transferini ve uzun vadeli kararlılığı önemli ölçüde artırmak mümkündür (Raduwan et al., 2022).

Nanokatalizörler, reaksiyon mekanizmasını değiştirerek aktivasyon enerjisini düşüren, reaksiyon hızını artıran ve reaksiyon sonunda kimyasal olarak değişmeden kalan katalitik malzemelerdir. Nano ölçekli katalizörler (1–10 nm), kütle başına yüzey alanını önemli ölçüde artırarak aktiviteyi geliştirir. Bu sayede bileşim ve morfoloji üzerinde daha hassas kontrol sağlanabilir. Çekirdek-kabuk, alaşımlı veya çok metalli nanopartiküller, hacimsel katalizörlere kıyasla daha iyi aktivite ve kararlılık için tasarlanabilir. Uygun destek etkileşimleri sağlandığında, nano katalizörler genellikle elektron taşınımını ve yapısal kararlılığı artırmak için yüksek yüzey alanlı karbon desteklere (karbon nanotüpler veya grafen gibi) dayanır (Kumaş & Akyüz, 2020)SOYLU. Nanokatalizörler çevresel iyileştirme, enerji tasarrufu ve sağlık sektöründe ilaç geliştirme gibi alanlarda da çalışmalarda yer almıştır. Nanokatalizörler aşağıdan yukarı (bottom-up) ve yukarıdan aşağı (top-down) yöntemleri ile elde edilebilir (Saleem ve ark., 2025).

Yapılan çalışmalar bize gösteriyor ki nanokatalizörler her sanayi çeşidi için farklı maksimum verimi sağlıyor. Örneğin, doğrudan etanol yakıt hücreleri için özellikle platin, kalay ve sezyum içeren bileşikler test edilmiştir. Bu nanokatalizör üretiminde etilen glikol indirgeme yöntemi kullanılmış olup, en verimli olan nanokatalizörün platin ve kalay bileşiği olduğu bildirilmiştir (Kıvrak Hilal ve ark., 2013).

Tablo-1: Nanokatalizörlerin sınıflandırılması

Catalyst Type	Example Materials	Advantages	Challenges
Pt-based nanoparticles	Pt/C, Pt/CNT	High catalytic activity for ORR	High cost, Pt dissolution
Pt-alloy catalysts	Pt-Co, Pt-Ni, Pt-Fe	Improved ORR activity, reduced Pt usage	Stability issues
Metal-Nitrogen-Carbon catalysts	Fe-N-C, Co-N-C	Low cost, PGM-free	Lower durability in acidic media
Carbon-based catalysts	N-doped graphene, CNT	High conductivity, large surface area	Limited catalytic activity
Metal oxide supported catalysts	Pt/TiO ₂ , Pt/SnO ₂	Enhanced stability	Lower electrical conductivity
Single atom catalysts	Fe-N-C SAC	Maximum atom efficiency	Complex synthesis
MOF-derived catalysts	Fe-MOF derived carbon	Tunable porosity and active sites	Scalability challenges

Yaygın Katalizör Tasarımı

Karbon destekler üzerinde metal nanopartiküller: Karbon nanotüpler, grafen veya Vulcan XC-72 üzerinde Pt, Pd ve Pt alaşımları.

Katkılı karbon destekler: Azot veya diğer heteroatom katkısı, katalizörün tutunmasını, iletkenliğini ve korozyon direncini iyileştirir.

1.1.1. Zorluklar

Maliyet ve kıtlık: Platin **yüksek performanslı bir katalizör olmakla birlikte** pahalıdır.

Dayanıklılık: Sinterleme, çözünme veya destek korozyonu yoluyla nanokatalizörün bozulması, uzun vadeli performansı sınırlar.

1.2. Metal-Azot-Karbon (M-N-C) Katalizörleri

Fe veya Co bazlı metal-N₄ makro halkaları ve ilgili M-N-C katalizörleri, soylu olmayan metal katalizörlerin en umut vadeden sınıflarından birini temsil etmektedir (Shao et al., 2016). Yüksek sıcaklıkta piroliz ve bilyalı öğütme gibi gelişmiş sentez stratejileri, ORR aktivitelerini ve dayanıklılıklarını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bazı M-N-C katalizörleri, özellikle alkali ortamlarda, önemli maliyet avantajları sunarken Pt bazlı katalizörlerin performansına yaklaşmaktadır.

Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC'ler), yüksek enerji verimliliği, düşük çalışma sıcaklığı, hızlı başlatma ve minimum çevresel etki nedeniyle en umut vadeden elektrokimyasal enerji dönüşüm teknolojileri arasında yer almaktadır. Geleceğin ulaşım sistemleri, taşınabilir elektronik cihazlar ve sabit enerji uygulamaları için temel güç kaynakları olarak kabul edilmektedirler. Bununla birlikte, kapsamlı araştırma ve geliştirmeye rağmen, PEMFC'lerin büyük ölçekli ticarileştirilmesi; yüksek maliyet, yetersiz dayanıklılık ve optimum olmayan güç yoğunluğu gibi çeşitli teknik engellerle sınırlıdır.

1.8. Kontrollü Morfolojiye Sahip Pt Nanokristalleri

Platinin katalitik performansı, parçacık boyutu, şekli ve yüzey yapısına büyük ölçüde bağlıdır. Daha k  k Pt nanoparçacıkları genellikle daha yüksek elektrokimyasal aktif yüzey alanı (ECSA) sunarken, şekil kontrollü nanokristaller, reaksiyon ara ürünlerinin adsorpsiyon enerjilerini etkileyen belirli kristal yüzeyleri ortaya çıkarır (Zhang, 2008).

Atomik basamaklar ve kenarlar bakımından zengin yüksek indeksli yüzeyler, düşük indeksli yüzeylere kıyasla önemli ölçüde artırılmış katalitik aktivite sergiler. Pt nanok pler, nanotelcikler, nanotüpler ve mezogözenekli Pt yapıları, gelişmiş ORR ve yakıt oksidasyon aktivitelerinin yanı sıra üstün dayanıklılık göstermiştir. Özellikle tek boyutlu ve mezogözenekli Pt mimarileri, Ostwald olgunlaşmasını ve kümelenmeyi en aza indirerek uzun vadeli performansı korur.

2. NANOELEKTROTTLAR

Nanoelektrotlar, aktif katmanları nanometre ölçeğinde tasarlanmış veya yapılandırılmış elektrotları ifade eder; bu durum elektrokimyasal olarak aktif alanı artırır ve yük transferini kolaylaştırır (Du, 2020). Bunlar şunları içerebilir:

Gözenekli nanoyapılı malzemeler reaktan erişimini artırır. Nanotüp veya nanotel dizileri etkili iyon/elektron taşınım yollarını teşvik eder.

2.1. Gaz Difüzyon Elektrotları (GDE)

Birçok yakıt hücresinde gaz difüzyon elektrotları, gaz, sıvı elektrolit ve katı katalizörün bir arada bulunmasına olanak tanır ve reaktanların katalitik bölgelere kütle transferi için gereklidir.

2.2. Nanokataliz rlerle Entegrasyon

Nano  l ekli katalizörlerin gaz difüzyon elektrot desteklerine yüksek oranda dağıtılması, etkili aktif alanı artırır (Erol, 2021).

2.3. Önemli Nanoelektrot Araştırma Yöntemleri

2.3.1. Membran Elektrot Montajı (MEA) Mühendisliği

Reaktanların, iyonların ve elektronların buluştuğu üç fazlı sınırları optimize etmek için katalizör tabakasının gözenekliliğini, bileşimini ve nanoyapısını ayarlama.

2.3.2. Nanoelektrot Karakterizasyonu

Döngüsel voltametri (CV), döner disk elektrot (RDE) ve empedans spektroskopisi (EIS) gibi elektrokimyasal teknikler, katalitik performansı ve kinetiği değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır.

3. YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücreleri, yanma olmadan kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren, verimli, sürdürülebilir ve enerji kaybının düşük olduğu sistemlerdir (Lee et al., 2005). En çok tercih edilen yakıt hücresi türlerinden biri PEM (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) yakıt hücreleridir. Bunun temel sebebi, bu membranın düşük sıcaklıkta çalışması (yaklaşık 60–80 °C) ve taşınabilir sistemlerde kullanılabilir olmasıdır.

Yakıt hücreleri tepkimeleri normal süreçte yavaş ilerlediği için katalizör kullanımı elzemdir (Gasteiger et al., 2005). Nanopartiküllerin boyutunun büyümesini engellemek ve heterojen sistemin dayanıklılığını sağlamak amacıyla polimerler veya yüzey aktif maddeler gibi uygun stabilize edici etmenlerin belirlenmesi bu aşamalarda çok önemlidir. Bu aşamaların bütüncül olarak anlaşılması; enerji dönüşümü, uygulanabilirlik, verimlilik ve diğer işlevlerin değerlendirilmesi açısından temel öneme sahiptir. **Bu sayede** nanokatalizörlerin tepkimeleri daha öngörülebilir hâle gelmektedir (Rondon Jario ve ark., 2025).

3.1. Temel İlkeler

Yakıt hücresi, yanma yoluyla değil, redoks reaksiyonları yoluyla bir yakıtı (genellikle hidrojen) bir oksitleyiciyle (genellikle oksijen) birleştirerek elektrik üreten elektrokimyasal bir enerji dönüşüm cihazıdır. Pillerin aksine, yakıt hücreleri çalışmak için sürekli bir reaktif kaynağına ihtiyaç duyar ve bu nedenle yakıt ve oksitleyici sağlandığı sürece kesintisiz olarak güç çıkışı sağlayabilir.

3.2. Performans Hususları

Yakıt hücresi performansı, aktivasyon kayıpları (reaksiyon kinetiği), ohmik kayıplar (bileşenler içindeki direnç) ve konsantrasyon kayıpları (kütle transferi sınırlamaları) tarafından etkilenir.

3.3. Yakıt Hücrelerinde Nanokatalizörler

Katalizörler, özellikle yavaş elektrokimyasal reaksiyonları hızlandırır:

Katottaki oksijen indirgeme reaksiyonu (ORR) — genellikle hız sınırlayıcı adımdır. Anottaki yakıt oksidasyonu (hidrojen oksidasyonu veya doğrudan yakıt hücrelerinde alkol oksidasyonu gibi reaksiyonlar). Bu ORR reaksiyonları Tablo-2’de verilmiştir (Li et al., 2019).

Nanokatalizörler, gerekli pahalı platin grubu metallerin miktarını en aza indirirken yüzey alanını ve katalitik aktif bölgeleri en üst düzeye çıkarmak için tasarlanmıştır.

Tablo-2 Elektrolit Çözeltilerinde Oksijen İndirgeme Reaksiyonu (ORR) Yolları

Electrolyte	Reaction Pathway	Reaction Equation	Standard Potential (V vs. NHE)
Alkaline electrolyte	4-electron pathway	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$	0.401
	Peroxide pathway (step 1)	$O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow HO_2^- + OH^-$	-0.065
	Peroxide pathway (step 2)	$HO_2^- + H_2O + 2e^- \rightarrow 3OH^-$	0.867
	Alternative pathway	$HO_2^- \rightarrow$ decomposition	—
Acidic electrolyte	4-electron pathway	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229
	Peroxide pathway (step 1)	$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2$	0.670
	Peroxide pathway (step 2)	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$	1.770
	Alternative pathway	$H_2O_2 \rightarrow$ decomposition	—

4. ENERJİ ÜRETİMİNDE NANOTEKNOLOJİK YAKLAŞIMLAR

Nanoteknoloji, nano ölçekte gelişmiş verimlilik, sürdürülebilirlik ve malzeme performansı sağlayarak enerji üretim teknolojilerinin ilerlemesinde çok önemli bir rol oynamaktadır (Shayo et al., 2025). Tipik olarak 100 nanometrenin altında boyutlara sahip malzemelerin mühendisliği ile, kütle halindeki malzemelerde erişilemeyen benzersiz elektriksel, optik ve katalitik özellikler elde edilebilir (Elezz Mariam Abu ve ark., 2025).

Enerji üretim sistemlerinde nanoteknoloji; güneş pilleri, yakıt hücreleri, piller ve hidrojen üretim teknolojilerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Nanoyapılı malzemeler, fotovoltaiik cihazlarda ışık emilimini ve yük taşınımını iyileştirerek daha yüksek dönüşüm verimliliğine yol açar (Wang et al., 2022). Yakıt

hücrelerinde ise karbon nanomalzemeler üzerinde desteklenen platin bazlı nanopartiküller gibi nanokatalizörler, değerli metal yükünü azaltırken elektrokimyasal reaksiyon kinetiğini önemli ölçüde artırır (Sahaym ve Norton, 2008).

Ayrıca nanoteknoloji, iyon taşınımını, yüzey reaksiyon hızlarını ve genel cihaz dayanıklılığını iyileştiren nanoelektrotların ve nanoyapılı membranların geliştirilmesini sağlar. Hidrojen enerji sistemlerinde nanomalzemeler, su ayrışması için katalitik aktiviteyi artırmak ve hidrojen depolama kapasitesini geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Genel olarak, nanoteknolojik yaklaşımlar, enerji dönüşüm süreçlerini optimize etmek, malzeme maliyetlerini düşürmek ve daha temiz ve sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişi desteklemek için güçlü araçlar sunmaktadır.

5. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Bu inceleme, PEM yakıt hücreleri için nanoyapılı elektrokatalizörlerin geliştirilmesinde elde edilen kayda değer ilerlemeyi vurgulamaktadır (Omeiza et al., 2023). Katalizör desteklerinde, Pt bazlı nanoyapılarda, bimetalik katalizörlerde ve Pt dışı alternatiflerde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bununla birlikte, yaygın ticarileşmenin gerçekleştirilebilmesi için hâlâ birçok zorluk mevcuttur.

Gelecekteki araştırmalar, özellikle elektronik etkiler, kafes gerilimi ve katalizör-destek etkileşimleri ile ilgili olarak yapı-özellik ilişkilerinin temel anlayışını derinleştirmeye odaklanmalıdır. Gerçekçi çalışma koşulları altında dayanıklılığın iyileştirilmesi ve ölçeklenebilir, uygun maliyetli sentez yöntemlerinin geliştirilmesi de aynı derecede kritiktir. Malzeme bilimi, elektrokimya ve nanoteknoloji alanlarındaki disiplinlerarası çalışmaların devam etmesi, nihayetinde PEM yakıt hücrelerinin büyük ölçekli kullanımını mümkün kılacak yeni nesil yüksek performanslı, düşük maliyetli elektrokatalizörlerin geliştirilmesine öncülük edecektir.

Gelecekteki araştırmalar, ölçeklenebilir üretim tekniklerine, hibrit elektrot mimarilerine ve çok işlevli nanoyapılara odaklanmalıdır. 1D nanoyapı dizilerini, alaşım nanopartikülleri, tek atomlu katalizörler ve PGM içermeyen malzemeler gibi gelişmiş katalizörlerle birleştirmek, performansı ve sürdürülebilirliği daha da artırmak için umut vadeden yollar sunmaktadır.

Bu inceleme, tek boyutlu nanoyapı dizilerine dayalı PEMFC elektrot tasarımındaki araştırma ilerlemesini kapsamlı bir şekilde özetlemektedir. Geleneksel elektrotlarla karşılaştırıldığında, 1D nanoyapılı elektrotlar üstün

katalitik aktivite, gelişmiş kütle ve yük taşınımı, iyileştirilmiş su yönetimi ve daha yüksek dayanıklılık sergilemektedir.

Ölçeklenebilirlik ve maliyet açısından önemli zorluklar devam etse de, nanomalzemeler ve üretim teknolojilerindeki sürekli gelişmelerin PEMFC'lerin ticarileşmesini hızlandırması beklenmektedir. Tek boyutlu nanoyapı dizileri, yeni nesil yakıt hücresi elektrot tasarımı için oldukça **umut verici** bir yönü temsil etmektedir.

Kaynaklar

1. Omeiza, L. A., Abdalla, A. M., Wei, B., Dhanasekaran, A., Subramanian, Y., Afroze, S., Reza, M. S., Abu Bakar, S., & Azad, A. K. (2023). Nanostructured electrocatalysts for advanced applications in fuel cells. *Nanomaterials*, **13**, 1–25.
2. Shayo, G. M., Mpelwa, M., Elimbinzi, E., & Shao, G. N. (2025). Toward sustainable hydrogen production from renewable energy sources: A review. *Renewable Energy Reviews*, **xx**, xxx–xxx.
3. Sahaym, U., & Norton, M. G. (2008). Advances in the application of nanotechnology in enabling a hydrogen economy. *Journal of Materials Science*, **43**, 5395–5429.
4. Lee, J. S., Quan, N. D., Hwang, J. M., Lee, S. D., Kim, H. G., Lee, H., & Kim, H. S. (2005). Polymer electrolyte membranes for fuel cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **11**, 1–14.
5. Millington, B., Du, S., & Pollet, B. G. (2011). The effect of materials on proton exchange membrane fuel cell electrode performance. *Journal of Power Sources*, **196**, 9013–9017.
6. Erol, S. N. (2021). Yakıt hücreleri için karbon temelli nanokatalizörlerin üretimi, karakterizasyonu ve performans analizleri. Yüksek Lisans Tezi, Türkiye.
7. Abu Elezz, M., Aboelle Neen, N. M., Mahmoud, N., & Sorour, F. H. (2025). Functional nanomaterials for renewable energy: Innovations, applications and sustainable strategies. *Renewable Energy Reviews*, **xx**, xxx–xxx.
8. Saleem, F., Khan, M. U., Hassan, M., Fatima, M., Mahmood, W., Rehman, A. U., Shahzaib, M., & Ahmad, N. (2025). Nanocatalysts in chemistry: From synthesis to industrial applications. *Catalysis Reviews*, **xx**, xxx–xxx.
9. Kumaş, K., & Akyüz, A. Ö. (2020). An overview on the use of nanotechnology in the renewable energy field. *Renewable Energy Journal*, **xx**, xxx–xxx.
10. Raduwan, N. F., Shaari, N., Kamarudin, S. K., Masdar, M. S., & Yunus, R. M. (2022). An overview of nanomaterials in fuel cells: Synthesis methods and applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 12345–12360.
11. Wang, L., Teles, M. P. R., Arabkoohsar, A., Yu, H., Ismail, K. A. R., Mahian, O., & Wongwises, S. (2022). A holistic and state-of-the-art review of nanotechnology in solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **158**, 112104.

12. Agrawal, P., Ebrahim, S., & Ponnammma, D. (2025). Advancements in nanocarbon-based catalysts for enhanced fuel cell performance: A comprehensive review. *Carbon*, xx, xxx–xxx.
13. Njoki, P., & Zhong, C. J. (2010). Nanostructured catalysts in fuel cells. *Catalysis Today*, 160, 89–95.
14. Du, S. (2020). Recent advances in electrode design based on one-dimensional nanostructure arrays for proton exchange membrane fuel cell applications. *Advanced Energy Materials*, 10, 2000123.
15. Zhang, S., Shao, Y., Yin, G., & Lin, Y. (2013). Recent progress in nanostructured electrocatalysts for PEM fuel cells. *Chemical Reviews*, 113, 382–407.
16. Kazak, M., Özer, Z. N., & Özkan, M. (2025). Sürdürülebilir enerji kaynağı: Yeşil hidrojen. *Enerji Teknolojileri Dergisi*, xx, xxx–xxx.
17. Tompos, A. (2025). Nanomaterials applied to fuel cells and catalysts. *Catalysis Today*, xx, xxx–xxx.
18. Karaoğlu, K., Baran, N. Y., Özçifçi, Z., Akçay, H. T., & Baran, T. (2025). Pd nanocatalyst supported on chitosan–waste oil microspheres for efficient degradation of industrial pollutants in water. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, xx, xxx–xx
19. Debe, M. K. (2012). Electrocatalyst approaches and challenges for automotive fuel cells. *Nature*, 486, 43–51.
20. Shao, M., Chang, Q., Dodelet, J., & Chenitz, R. (2016). Recent advances in electrocatalysts for oxygen reduction reaction. *Chemical Reviews*, 116, 3594–3657.
21. Gasteiger, H., Kocha, S., Sompalli, B., & Wagner, F. (2005). Activity benchmarks and requirements for PEMFC electrocatalysts. *Applied Catalysis B*, 56, 9–35.
22. Markovic, N. M., & Ross, P. N. (2002). Surface science studies of model fuel cell electrocatalysts. *Surface Science Reports*, 45, 117–229.
23. Steele, B. C. H., & Heinzel, A. (2001). Materials for fuel cell technologies. *Nature*, 414, 345–352.
24. Antolini, E. (2009). Carbon supports for low-temperature fuel cell catalysts. *Applied Catalysis B*, 88, 1–24.
25. Wang, Y., Chen, K., Mishler, J., Cho, S., & Adroher, X. (2011). A review of polymer electrolyte membrane fuel cells. *Applied Energy*, 88, 981–1007.

26. Liu, H., Song, C., Zhang, L., Zhang, J., Wang, H., & Wilkinson, D. (2006). A review of anode catalysis in the direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources*, 155, 95–110.
27. Zhang, J. (2008). *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers*. Springer.
28. Vielstich, W., Lamm, A., & Gasteiger, H. (2010). *Handbook of Fuel Cells*. Wiley.
29. 21. Li, Y., Li, Q., Wang, H., Zhang, L., Wilkinson, D. P., & Zhang, J. (2019). Recent progresses in oxygen reduction reaction electrocatalysts for electrochemical energy applications. *Electrochemical Energy Reviews*, 2, 518–538.
30. Bektaş, M., & Arpa, O. (2024). Hydrogen fuel cells and their applications in sustainable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, xx, xxx–xxx.
31. Kivrak, H., Alal, O., & Özer, A. (2013). Ethylene glycol reduction method for the synthesis of Pt–Sn nanoparticles and their application in ethanol fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 10433–10440.
32. Rondón, J., Gómez, R., & Martínez, L. (2025). Stabilization strategies for nanoparticle catalysts in electrochemical energy conversion systems. *Electrochimica Acta*, xx, xxx–xxx.
33. Abu Elezz, M., Aboelle Neen, N. M., Mahmoud, N., & Sorour, F. H. (2025). Functional nanomaterials for renewable energy: Innovations, applications and sustainable strategies. *Renewable Energy Reviews*, xx, xxx–xxx.



BÖLÜM 7

Afet Dinamik Haberleşme Ağlarındaki Cihazların Enerji Verimliliğine Yönelik Matematiksel Modelleme ve Graf Teorisi Tabanlı Optimizasyonu

Zarife Gökçen Karadem¹

Giriş

Olası bir deprem veya büyük ölçekli afet durumlarında, mevcut baz istasyonlarının ve sabit iletişim altyapısının hasar görerek devre dışı kalma durumları sıkça yaşanmaktadır. Böyle bir durumda, AFAD, arama-kurtarma ekipleri ve askeri birliklerin haberleşmeleri; geçici mobil baz istasyonları, Wi-Fi donanımlı insansız hava araçları (Drone) ve araç üstü iletişim modülleri ile sağlanan Gezgin Tasarsız Ağlar (MANET) üzerinden yürütülmek zorundadır (Korkuter vd. 2017). Ancak bu ağlarda istasyonlar sabit değildir; ekipler ve drone'lar sürekli hareket halindedir, dolayısıyla ağ haritası (graf yapısı) anlık olarak değişmektedir. Tüm bu cihazların ortak kısıtı ise enerji kaynağı, yani pil/bataryadır. Cihazların hem sürekli hareket halinde olmaları hem de değişen ağ yapısında sinyal bütünlüğünü korumaya çalışmaları, enerji tüketimini artırmakta ve pillerin hızla tükenmesine neden olmaktadır. Bu cihazların işlemsel sürelerinin uzatılması, afet bölgesindeki "altın saatler" olarak tanımlanan zaman diliminde yapılacak müdahalelerin sürekliliği ve can kayıplarının önlenmesi açısından hayati önem taşımaktadır.

Afet durumlarındaki senaryolarda haberleşme ağlarından maksimum verimlilik sağlamak ve cihazların pil ömrünü artırmak amacıyla tasarlanan bu çalışmanın literatür taramasında, mevcut çalışmalar ve eksiklikler şu şekilde tespit edilmiştir:

Literatürde afet yönetiminin başarısı, büyük ölçüde kesintisiz ve hızlı kurulabilen kablosuz iletişim sistemlerine dayandırılmaktadır (Bozkurt ve Demir, 2023; Aytaç, 2023). Dijitalleşen dünyada afet anında sahadan veri akışının sürekliliği için İHA/Drone destekli ağların kullanımı yaygınlaşmıştır (Batıbay ve Şahin, 2023; Ayrancı ve İlhan 2022). Ancak yapılan çalışmalar, bu dinamik ağların yaşam süresini belirleyen en temel faktörün enerji optimizasyonu

¹ Dr. Milli Eğitim Bakanlığı, Tenzile Erdoğan Anadolu Lisesi, Isparta, Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-6174-9486

olduğunu vurgulamaktadır (Sumathi ve Priyadharshini, 2015). “Dijitalleşen Dünyada Akıllı Afet Yönetimi” üzerine yapılan çalışmalar, afet anında can kayıplarının önlenmesi ve arama-kurtarma ekiplerinin koordinasyonu için kesintisiz veri akışının hayati önem taşıdığını vurgulamaktadır (Bozkurt ve Demir, 2023; Yaman ve Çakır, 2018). Sabit altyapının çökmesi durumunda, iletişim sürekliliğini sağlamak için önerilen en güncel çözüm; İnsansız Hava Araçları (İHA/Drone) ve mobil yer istasyonlarından oluşan, merkezi bir yönetime ihtiyaç duymayan “Gezgin Tasarsız Ağlar” (MANET) veya havadan kurulan “Uçan Tasarsız Ağlar” (FANET) kullanımıdır (Batıbay ve Şahin, 2023; Aytaç, 2023). Gelecek nesil haberleşme sistemlerinin temel bileşeni olarak görülen bu dinamik ağlar, afet sahasında esnek, hızlı ve otonom bir iletişim omurgası oluşturma yeteneğine sahiptir (Ayrancı ve İlhan 2022). FANET ve MANET sistemlerinin sağladığı esnekliğe karşın, bu sistemlerin operasyonel başarısını sınırlayan en kritik faktör enerji verimliliğidir. Pille çalışan drone ve mobil istasyonların havada kalma ve iletişim kurma süreleri, batarya kapasiteleri ile sınırlıdır.

Literatür incelendiğinde, gezgin ağlardaki enerji optimizasyonu çalışmalarının büyük bir çoğunluğunun, verinin bir noktadan diğerine en kısa yoldan iletilmesini sağlayan Yönlendirme Protokolleri ve Akış Denetimi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir (Yen vd,2008; Sumathi ve Priyadharshini, 2015; Korkuter vd, 2017; Doğru vd 2018). Araştırmacılar, ağ katmanında cihazların izleyeceği yolu optimize ederek enerji tasarrufu sağlamaya çalışmışlardır. Ayrıca, drone tabanlı operasyonlarda hız, irtifa ve manevra gibi fiziksel uçuş parametrelerinin enerji tüketimine etkileri incelenmiştir (İnan ve Karcı, 2025). Yönlendirme Protokolleri üzerine çalışmalardan fiziksel katmanda gerçekleşen frekans atama problemleri ise genellikle spektrum tasarrufu odaklı ele alınmış olup enerji maliyeti boyutu yeterince incelenmemiştir (Seyman ve Saçaklı, 2026). Literatürde bu tür karmaşık optimizasyon ve çizelgeleme problemleri, genellikle Greedy Algoritmalar kullanılarak çözülmektedir (Demir, 2021a). Greedy algoritmalar, her adımda o an için en iyi görünen seçimi yaparak (örneğin komşularda kullanılmayan en küçük numaralı kanalı seçerek) hızlı sonuç üretmektedir (Demir, 2021b). Ancak bu yaklaşım, sadece kanalların çakışmaması (0/1 mantığı) üzerine kuruludur. Bu çalışmalarda kullanılan standart Greedy algoritmalar (Demir, 2021a; Demir, 2021b) hızlı çözüm üretmekle birlikte, cihazların fiziksel konumlarından kaynaklanan sinyal girişimini ve buna bağlı enerji israfını hesaba katmamaktadır (Rappaport, 2010). Fiziksel olarak birbirine çok yakın olan cihazlara spektral olarak yakın kanallar atandığında oluşan gürültü, veri paketlerinin bozulmasına ve cihazların aynı veriyi tekrar göndermek

için daha fazladan enerji harcamasına neden olmaktadır. Tüm bu çalışmalar incelendiğinde; haberleşmenin fiziksel katmanında gerçekleşen ve cihazların birbirine fiziksel yakınlığından kaynaklanan Sinyal Girişimi ve Frekans Atama kaynaklı enerji kayıpları, literatürde yeterince irdelenmemiş büyük bir boşluk olarak durmaktadır.

Bu çalışma, literatürde tespit edilen yönlendirme odaklı çalışmaların ötesine geçerek, eksik kalan fiziksel katman enerji optimizasyonu boşluğunu doldurmayı hedeflemektedir. Çalışmada; afet sahasındaki cihazların fiziksel mesafelerini ve frekans kanalları arasındaki uzaklıkları temel değişken olarak kabul eden özgün bir Enerji Kullanım Fonksiyonu modellenmiştir. Bu matematiksel model, Python programlama dili ve çeşitli algoritmalar kullanılarak (Bakdemir, 2024) dinamik bir simülasyon ortamına aktarılmıştır. Çalışmada geliştirilen ve Graf Teorisi prensiplerine dayanan "Enerji Kullanım Optimizasyon Algoritması", standart "Greedy" algoritması ile karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Araştırmada sadece frekans çakışmasını önleyen değil, toplam enerji kullanımını minimize eden matematiksel bir model ile afet ağlarındaki cihazların pil ömrünü uzatmak ve iletişim sürekliliğini sağlamak amaçlanmaktadır.

Yöntem

Bu araştırma matematiksel modelleme ve deneysel simülasyon teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Yöntem üç ana bileşenden oluşmaktadır:

- Enerji kullanımını temsil eden bir matematiksel modelin oluşturulması,
- Bu modelin graf teorisi tabanlı bir frekans atama algoritmasına dönüştürülmesi,
- Geliştirilen algoritmanın dinamik bir simülasyon ortamında standart bir algoritma ile karşılaştırılması.

Araştırma süreci, problemin çözümüne yönelik olan geliştirilen özgün bir matematiksel modelin tanımlanması, test yapılacak ortamın fiziksel parametrelerinin kurgulanması ve algoritmanın oluşturularak simülasyonun gerçekleştirilmesi ve sonuçların görselleştirilmesi şeklinde sürdürülmüştür.

Çalışmada “Enerji Kullanım Fonksiyonu” ($E_{kullanım}$) elde etmek için fiziksel bir yasa olan ters orantı yasası ve haberleşme teorisindeki frekans farkı yasası kullanılmıştır. Simülasyon ortamının kurulması ve algoritmaların geliştirilmesi için Python yazılım dili kullanılmıştır. Python dilindeki kodlamalar Google Colab aracı ile yapılmıştır. Kodların yazılmasında hazır kütüphaneler ve ortaya çıkan hataların giderilmesinde Gemini AI’den destek alınmıştır. Graf teorisi analizleri için NetworkX, matematiksel hesaplamalar için NumPy ve veri görselleştirmeleri için Matplotlib kütüphaneleri kullanılmıştır.

Uygulama Süreci: Çalışmanın 4 temel aşaması detaylı olarak şöyle gerçekleştirilmiştir:

Aşama 1: Enerji Kullanım Fonksiyonunun Geliştirilmesi:

Araştırmacı tarafından geliştirilen “Enerji Kullanım Fonksiyonu” ($E_{kullanım}$), iki temel fiziksel değişken ve bu değişkenlerin etkileşimine dayanmaktadır. Geliştirilen Enerji Kullanım Fonksiyonu, fiziksel yasaların birebir türevi değil; cihazlar arası girişimden kaynaklanan enerji kaybını temsil eden göreceli bir maliyet fonksiyonudur. Fonksiyonda kullanılan değişkenleri şu şekilde açıklayabiliriz;

1. Değişken; Fiziksel mesafe ve Ters Kare Yasası ($\frac{1}{d^2}$): Kablosuz haberleşmede bir sinyalin gücü kaynağından uzaklaştıkça mesafenin karesiyle ters orantılı olarak düşer. İki cihaz birbirine ne kadar yakınsa, birbirlerinin alıcılarına o kadar yüksek sinyal gönderir. Bu yüksek ve güçlü ama istenmeyen sinyal, alıcı cihazın sinyali anlama, işleme gücünü düşürür. Cihaz kendi verisini doğru iletebilmek için ya sinyal gücünü artırmak ya da bozuk giden verilerini yeniden iletmek durumunda kalır. Her iki durumda da cihaz pil kullanımını artırır. Bu durumda matematiksel olarak, mesafe (d) azaldıkça enerji kullanımının ($E_{kullanım}$) artması gerekmektedir. Bu ters orantılılık nedeniyle mesafe faktörü formülün paydasında yer almıştır.

2. Değişken; Spektral Uzaklık ve Kanal Girişimi ($\frac{1}{\Delta f}$): Haberleşme sistemlerinde alıcı cihazlar belirli frekans aralıklarını dinler. İki cihazın çalışma frekansları (f_1 ve f_2) birbirine ne kadar yakınsa gürültü yani kanalların karışması olasılığı o kadar artar. $\Delta f = 0$ ise bu durum aynı kanalı temsil eder ($f_1 = f_2$) yani cihazlar aynı kanalı duyuyor demektir ve gürültü maksimumdur. Δf büyüksse cihazlar birbirine uzaktır ve birbirini duymaz. Bu durumda matematiksel olarak frekans farkı (Δf) arttıkça, kanalların karışması yani girişimin az olmasına yani cihazların birbirini duymamasına sebep olur ve dolayısıyla enerji kullanımının azalması beklenir. Bu ters orantılılık durumundan dolayı frekans farkı da formülün paydasında yer almıştır.

Fonksiyonu elde ederken paydada yer alan her iki değişken çarpılmaktadır. Çünkü enerji kullanımının en az olması için her iki koşulunda aynı anda gerçekleşmesi gerekmektedir. Fonksiyonda enerji kullanımı cihazların arasındaki mesafeye ve frekansları arasındaki farklara bağlıdır. Bu durumda matematiksel mantık ilkeleri gereği formülde çarpma işlemi yapılmıştır. Bu fiziksel ve mantıksal çıkarımlar ile paydaların 0 olmaması için $+1$, $+\epsilon$ sembolleri eklenerek model oluşturulmuştur. Modelde yer alan k sabiti; cihazın enerji tüketimini ve

simülasyon ortamındaki sonuçların daha anlaşılır bir ölçeğe (örneğin 0-1000 birim arasına) taşınmasını sağlayan ölçekleme katsayısıdır. Bu çalışmadaki simülasyonlar için k değeri 1000 olarak kabul edilmiştir. k katsayısının değiştirilmesi, algoritmanın standart algoritmaya göre sağladığı oransal verimliliği etkilememektedir.

Nihai şekli verilen matematiksel model aşağıda sunulmuştur;

$$(E_{\text{kullanım}}) = \sum \left(\frac{k}{d_{ij}+1} * \frac{1}{|f_i - f_j| + \epsilon} \right)$$

Burada d_{ij} koordinat sisteminde (i, j) konumundaki cihazlar arası fiziksel mesafeyi, $|f_i - f_j|$ ise frekans kanalları arasındaki farkı temsil etmektedir.

Aşama 2: Afet Bölgesinin Graf Haritası olarak Kurgulanması:

Ortam olarak Afet bölgesini temsil eden 2 boyutlu düzlem (x, y) koordinatları, düğümler olarak drone veya mobil ekipleri temsil eden N adet hareketli cihaz alınmıştır. Afet sahası, 1000×1000 birimlik iki boyutlu bir düzlem olarak modellenmiştir. Bu sahaya, haberleşme altyapısını temsil eden $N = 15$ adet mobil cihaz (düğüm) rastgele koordinatlarda (x, y) yerleştirilmiştir. Cihazlar arasındaki fiziksel mesafe (d), Öklid bağıntısı ile hesaplanmış ve belirli bir kritik mesafeden ($300m$) yakın olan cihazlar arasında gürültü riski olduğu varsayılarak graf üzerinde bağlantılar (kenarlar) oluşturulmuştur. Bu model, fonksiyonun test edileceği sanal laboratuvar alanıdır. Buradaki ağ yapısı bir Graf olarak, cihazlar Düğüm, etkileşimler Kenar, frekans kanalı Renk olarak tanımlanmıştır. Frekans atama işlemi bir Graf Renklendirme Problemi olarak ele alınmıştır.

Aşama 3: Enerji kullanım Optimizasyon Algoritmasının Kurulması:

Bu aşamada geliştirilen özgün matematiksel modeli kullanarak karar veren bir yazılım algoritması olan özgün bir Enerji Kullanım Optimizasyon Algoritması tasarlanmıştır. Karşılaştırma yapmak için de bir kontrol algoritması olarak literatürde var olan bir algoritma olan Greedy algoritması kullanılmıştır.

1. Kontrol Algoritması (Standart Greedy Algoritması): Bu algoritma, "Largest First" prensibiyle çalışmaktadır. Graf teorisindeki klasik renklendirme işlemidir. Bu işlemde algoritma en çok komşusu olan düğümden başlar ve o düğüme, komşularında kullanılmayan ilk rengi atar. Algoritma burada enerji maliyetini dikkate almaz, sadece çakışmayı önlemeye yani komşu renklerin aynı olmamasına odaklanır. Hızlı atama yapan bir yaklaşıma sahiptir.

2. Deney Algoritması (Geliştirilen Enerji Kullanım Optimizasyon Algoritması): Bu algoritma; problemi, Ağırlıklı Graf Optimizasyonuna

dönüştürür. Bu algorithmada Aşama 1'de anlatılan $E_{kullanım}$ fonksiyonu graf teorisi tabanlı bir karar destek mekanizması olarak kullanılmaktadır. Algoritma şu adımları izleyecek şekilde kurgulanmıştır:

- Sıradaki düğüm için müsait olan tüm renk adaylarını belirle.
- Her bir aday renk için, o kanalın seçilmesi durumunda oluşacak anlık enerji kullanımını $E_{kullanım}$ ile hesapla.
- Adaylar arasından minimum enerji kullanımını sağlayan rengi seç ve düğüme ata.

Algoritmanın akış şemasının basit mantığı şöyledir;

Başla -> Cihaz Konumlarını Al -> Mevcut Kanalları Tara -> Enerji Kullanım Formülünü Hesapla -> En Düşük Kullanım Kanalı Seç -> Ata -> Bitir

Aşama 4: Simülasyon Gerçekleştirilmesi ve Sonuçların Görselleştirilmesi

Geliştirilen $E_{kullanım}$ fonksiyonunu minimize etmeyi hedefleyen Enerji Kullanım Optimizasyon Algoritması, standart Greedy Algoritması ile oluşturduğumuz sanal laboratuvarında Python Yazılım Dili ve hazır kütüphaneler ile yapılan kodlamalarla karşılaştırılarak test edilmiştir. Bu algoritmanın başarısını ölçmek için zaman döngülü bir simülasyon yapılmıştır. Simülasyon 500 zaman adımı boyunca sürdürülmüş, cihazlara hareket verilerek dinamik bir afet ortamı oluşturulmuş, cihazlar rasgele vektörlerle hareket ettirilerek ortamın fiziksel yapısının sürekli değişmesi sağlanmıştır. Her saniye, her iki algoritmanın harcadığı enerji miktarı hesaplanarak sanal bataryadan düşürülmüştür. Sonuç olarak pillerin tükenme hızı sayısal veri olarak kaydedilip grafiklerle veriler görselleştirilmiştir. Simulasyon her çalıştırıldığında algoritmanın rastgele atadığı düğümler farklılaştığı için her durumda farklı bir enerji verimliliği sonucu elde edilmiştir. Ek 1'de 8 farklı senaryodan elde edilen grafikler verilmiş olup bulgulara tek bir senaryoya ait sonuçlar ve görselleştirmeler sunulmuştur.

Bulgular

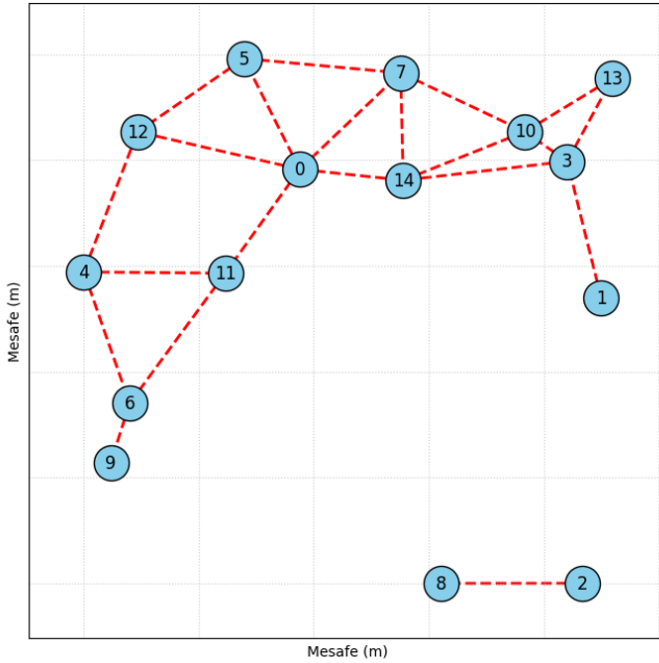
Araştırmada Python ortamında afet bölgesi graf haritası olarak simüle edilmiştir. Simülasyon her çalıştırıldığında cihazların başlangıç koşulları kodlamadaki rasgelelik ilkesi gereği değişmekte ve her seferinde farklı bir ağ modeli ile karşılaşılmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyonlarda ağ yapısı yani cihazların birbirine olan uzaklıkları değişmektedir. Simülasyon her çalıştırıldığında geliştirilen algoritma cihazların o senaryodaki konumlarına göre hesaplamalar yapmakta ve enerji kullanımını hesaplamaktadır. Yapılan onlarca denemede geliştirilen modelin standart modele göre çok daha az enerji kullandığı

gözlemlenmiştir. EK 1 de bu denemelerden 8 farklı simülasyon senaryosunun ağ model grafikleri ve o senaryoda elde edilen enerji verimlilikleri sunulmuştur. EK 1’de yer alan simülasyonlarda enerji verimliliğinin % 64 ile %81 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu çalışmanın bulgular bölümünde ise farklı senaryoların genel davranışını temsil etmesi ve bir örnek üzerinden bulguları sunmak amacıyla enerji verimliliği % 79,5 oranında olan simülasyona ait grafikler verilmiştir.

Araştırmada gerçekleştirilen simülasyonlarda enerji verimliliği %79,5 olan senaryoya ait elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur:

1.Cihazlar Arası Etkileşim Ağının Modellenmesi ile ilgili Bulgular

Simülasyonun başlangıç aşamasında 1000x1000 birimlik bir alana algoritmanın rasgele yerleştirdiği 15 cihazın etkileşim haritası çıkarılmıştır.

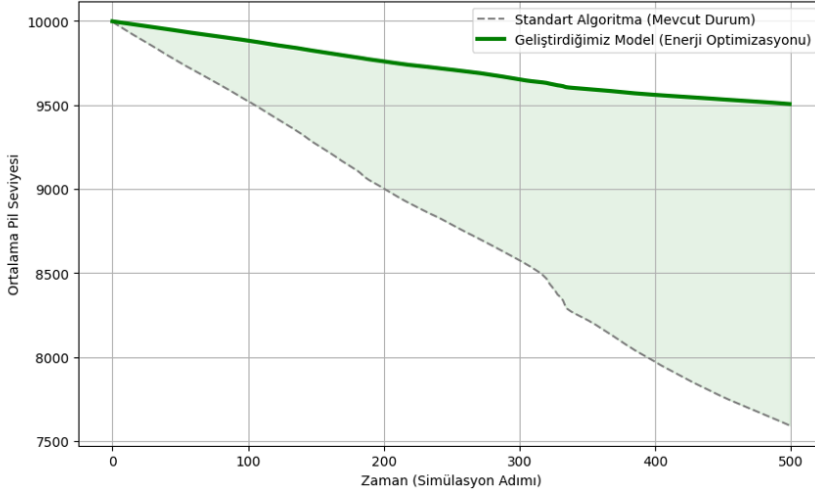


Şekil 1. Afet Sahasındaki Cihazların Fiziksel Etkileşim Ağı (Kırmızı Çizgiler: Gürültü Riski)

Şekil 1 incelendiğinde görselleştirme ile elde edilen ağ grafiğinde cihazların rastgele yerleşmiş olmalarına rağmen bazı bölgelerde yoğunluk, kümelenme görülmüştür. 300 m olarak belirlenen kritik mesafenin altındaki cihazlar arasında yoğun bir gürültü ağı oluşmuştur. Grafiğin sağ üst köşesindeki yoğunluğun oluştuğu bölge yüksek enerji kaybı riski taşıyan bölgeyi temsil etmektedir. Özellikle bu gölgeler cihazlar aradaki mesafenin kısa olmasından kaynaklı olarak cihazların kullandığı pil gücünü artırma olasılığının yüksek olduğu alanlardır.

3- Zamana Bağlı Pil Ömrü Analizine İlişkin Bulgular

Geliştirilen özgün matematiksel model ile hedef cihazların pil ömrünü uzatmak idi. Söz konusu senaryoda cihazların pil ömrünün zamana bağlı grafiği (Şekil 2) ile bu durum ortaya çıkarılmıştır.



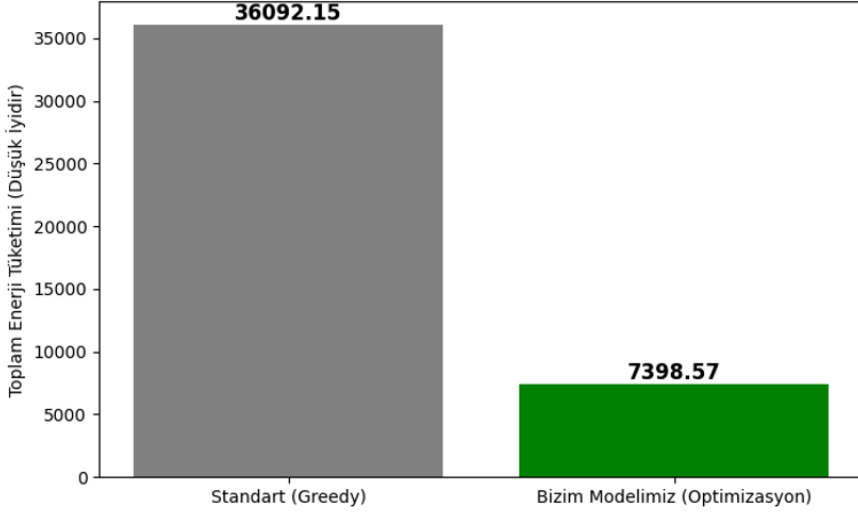
Şekil 2. Zamana Bağlı Pil Tüketimi Karşılaştırması

Şekil 2 incelendiğinde standart algoritmadaki ağın (gri kesikli çizgi) pil seviyesinin hızla azaldığı görülmektedir. Ancak geliştirilen modele ait ağın (Yeşil düz çizgi) pil seviyesindeki düşüşün diğerine öge çok daha az olduğu görülmektedir. Her iki ağda 10.000 birim ile başlayan pil seviyesi simülasyonun sonunda standart algoritmada yaklaşık 7600 birim civarına düşerken, geliştirdiğimiz algoritmada 9500 birim civarı olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir.

2- Her İki Algoritmanın Karşılaştırmalı Performanslarının Analizlerine ilişkin Bulgular

Geliştirilen özgün Enerji Kullanım Optimizasyon Algoritması ile standart Greedy algoritmaları aynı ağ modeli üzerinde çalıştırılmıştır. Elde edilen bulgularda standart algoritmanın fiziksel olarak birbirine yakın olan cihazlara yakın kanallar atadığı tespit edilmiştir. Bu durumun anlık olarak enerji kullanımını artırdığı görülmektedir. Geliştirilen özgün algoritmada ise yakın cihazlara uzak frekans kanallarının atandığı böylece $E_{kullanım}$ değerinin en aza indiği gözlemlenmiştir.

Bu durumun toplam enerji tüketimine etkisi Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Algoritmaların Toplam Enerji Performansı

Şekil 3 incelendiğinde geliştirilen modelin toplam enerji tüketimi, standart modelin neredeyse üçte biri seviyesinde olduğu görülmektedir.

4- Enerji Verimliliğine İlişkin Bulgular ve Somut Sonuçlar:

Simülasyon, farklı afet senaryolarını temsil etmek amacıyla rastgele başlangıç konumlarıyla defalarca tekrarlanmıştır. Testlerde, cihazların konumlanmasına bağlı olarak enerji verimliliği artışının %64 ile %81 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. 8 Farklı senaryo Ek2’de sunulmuştur. Raporumuzda, **%79.50** verimlilik artışı sağlanan senaryonun verileri (grafikleri) sunulmuştur. Sözkonusu simülasyonun sonuçlarına göre;

Standart Yöntem Toplam Tüketim: 36092.15

Geliştirilen Model Toplam Tüketim: 7398.57

BAŞARI ORANI (VERİMLİLİK ARTIŞI): %79.50 şeklindedir.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, afet yönetiminde kritik öneme sahip olan ancak enerji kısıtlılığı nedeniyle işlemsel sürekliliği kısıtlı olan dinamik haberleşme ağları için özgün bir matematiksel model ve optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Çalışmada geliştirilen yaklaşım, mevcut afet haberleşme sistemlerine donanımsal bir değişiklik gerektirmeden, yalnızca yazılımsal güncelleme ile entegre edilebilecek niteliktedir. Bu yönüyle model, gerçek saha koşullarında düşük maliyetli ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

Python tabanlı dinamik simülasyon ortamında elde edilen bulgular, literatürdeki mevcut çalışmalar ve teorik altyapı ışığında aşağıda tartışılmıştır:

1. Matematiksel Modelin Fiziksel Gerçeklikle Uyumu ve Literatürdeki Yeri

Bulgular bölümünde sunulan Graf Ağ Modeli analizi (Şekil 1) ile afet sahasındaki cihazların fiziksel kümelenmelerinin olabileceğini ve gürültü riskinin yüksek olacağı bölgelerin olabileceğini göstermiştir. Gerçek bir afet durumunda da mobil cihazlar sürekli hareket halinde olacak ve birbirlerine yaklaşabilecekler, bazı alanlarda kümelenmeler oluşacaktır. Bununla birlikte Ek 1'de yer alan 8 farklı senaryonun Ağ Modeli grafiklerinde de cihazların bazı bölgelerde yoğunlaştığı, kümelenmenin fazla olduğu bölgeler açıkça görülmektedir. Bu bölgelerde gürültü fazladır ve buradaki cihazlar fazla pil tüketmektedirler. Bu durum açıkça göstermektedir ki, pil ömrünü optimize eden sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Literatür incelendiğinde, afet haberleşme sistemleri üzerine yapılan çalışmaların çoğunlukla "Akıllı Afet Yönetimi" ve "Kesintisiz İletişim" kavramlarına odaklandığı (Bozkurt ve Demir, 2023; Yaman ve Çakır 2018; Aytac 2023), ancak enerji optimizasyonu konusunda genellikle ağ katmanındaki "yönlendirme protokolleri" ve "akış denetimi" üzerine yoğunlaştığı görülmektedir (Yen vd 2008; Korkuter vd 2017; Doğru vd 2018). Bu çalışma ise literatürdeki bu yaklaşımların aksine, enerji kaybının kök nedeninin fiziksel katmandaki sinyal gürültüsünün olduğunu vurgulayan temel fizik yasalarına (Ters Kare Yasası) dayanmaktadır. Simülasyon sonuçları, cihazlar arası mesafeyi ($\frac{1}{d^2}$) bir risk faktörü olarak modele dahil etmenin, literatürde eksik kalan fiziksel katmandaki enerji yönetimine dair boşluğu başarıyla doldurduğunu kanıtlamaktadır.

2. Algoritma Stratejilerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Çalışmada gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler, literatürde optimizasyon ve kaynak atama problemlerinde yaygın olarak kullanılan standart Greedy algoritmaların (Demir 2021a, Demir 2021b), afet durumları gibi önemli derecede enerjiye ihtiyaç duyulan senaryolarda yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Çalışmadaki test sonuçlarına göre standart algoritma, 0/1 mantığı ile sadece frekans çakışmasını önlemeye odaklanırken, fiziksel olarak birbirine çok yakın cihazlara spektral olarak yakın kanallar atayarak yüksek enerji maliyeti yaratmıştır. Bu durum, çoklu taşıyıcı sistemlerinde kaynak paylaşımının önemini vurgulayan çalışmalarla örtüşmektedir (Seyman ve Saçaklı, 2016). Geliştirilen

"Enerji Kullanım Optimizasyon Algoritması" ise yakın cihazlara spektral olarak en uzak kanalları atayarak gürültüyü ve enerji tüketimini en aza indirmiş; böylece literatürde belirtilen "enerji etkin multicast yönlendirme (Yen vd 2008) gibi çözümlere, fiziksel katmanda güçlü bir destek sağlamıştır.

3. Enerji Verimliliğine İlişkin Sonuçların Değerlendirilmesi

Araştırmanın en dikkat çekici ve en önemli sonucu, bu raporda örnek teşkil etmesi için verilen dinamik simülasyonların birinde elde edilen %79.50 oranındaki enerji verimliliği artışıdır. Simülasyonu her çalıştırıldığında yüksek bir enerji verimliliği (%64-81) ile karşılaşılmıştır ve EK 1’de farklı senaryolardan 8 tanesi sunulmuştur. Bulgularda grafiklerini sunduğumuz senaryonun enerji verimliliği %79.5 gibi oldukça yüksek bir sonuçtur. Literatürde, özellikle İHA /Drone tabanlı tarımsal veya askeri operasyonlarda hız ve yükseklik gibi parametrelerin enerjiye etkisi incelenmiş (İnan ve Karıcı, 2025) ve FANET sürülerinin operasyonel sürelerinin kısıtlı olduğu sıkça vurgulanmıştır (Batıbay ve Şahin, 2023; Ayrancı ve İlhan 2022). Çalışmada elde edilen bu sayısal veri ve zamana bağlı pil tüketim grafiği (Şekil 3), geliştirilen modelin bu kısıtı önemli ölçüde hafiflettiğini göstermektedir. Yeşil çizginin (Geliştirilen Model) yatay olarak seyretmesi, "Özgün modelin kullanılması, haberleşme ağının enerji tüketimini azaltır ve cihazların ortalama pil ömrünü uzatır" sonucu araştırma sorumuzun kesin bir cevabı niteliğindedir. Bu sonuç, dinamik haberleşme ağ yapılarında enerji optimizasyonunun ağ yaşam süresi için kritik olduğunu belirten çalışmaları (Sumathi, K., & Priyadharshini 2015) destekler niteliğindedir.

Sonuç olarak;

Bu çalışma, afet anında iletişimin kesintisiz bir biçimde sağlanması gerekliliğine yönelik olarak, donanımsal bir maliyet gerektirmeyen, tamamen yazılımsal ve matematiksel bir strateji sunmakla birlikte yüksek AR-GE niteliği taşımaktadır. Geliştirilen Enerji Kullanım Fonksiyonu ve bu fonksiyonu karar mekanizması olarak kullanan Enerji Kullanım Optimizasyon Algoritması; mevcut sistemlere entegre edildiğinde, afet bölgelerindeki arama-kurtarma ekiplerinin ve drone'ların sahada kalma süresini teorik olarak %80’e kadar artırma potansiyeline sahiptir.

Öneriler

Bu matematiksel model, arama kurtarma ekiplerinin, AFAD veya askeri haberleşme sistemlerinin yazılımlarına entegre edilebilir. Bu sayede pilot çalışmaları yapılabilir. Gerçek saha testlerinin sonuçları da bilimsel olarak ortaya çıkarılabilir.

Bu çalışma, 2 boyutlu düzlem gerçekleştirilmiştir. Çalışma 3 boyutlu (yükseklik içeren) arazi modellerine genişletilebilir ve 3 boyutlu ağ yapılarındaki sonuçlar elde edilerek analiz edilebilir. Cihazların engebeli arazilerdeki dağ gibi yapıların arkasında kalması nedeniyle oluşacak sinyal kayıpları da modele eklenebilir.

Model, sadece enerji değil, "veri aktarım hızı" parametresini de optimize edecek şekilde geliştirilebilir.

Fikri Mülkiyet Beyanı

Bu bölümde teorik altyapısı ve kavramsal çerçevesi sunulan, afet haberleşme ağlarındaki cihazların enerji verimliliğini sağlamaya yönelik matematiksel model ve algoritma mimarisi için, yazar tarafından Türk Patent ve Marka Kurumu nezdinde **2026/003397** başvuru numarası ile Faydalı Model tescil başvurusu yapılmıştır.

Kaynaklar

- Ayrancı, A. A., & İlhan, H. (2022). Gelecek Nesil Haberleşme Sistemleri İçin İha-Temelli Haberleşme Ağlarının İncelenmesi. Ankara/Turkey, 511.
- Aytaç, A. (2023). Deprem Ve Afet Anlarına Yönelik Bir Haberleşme Sistemi Önerisi:“Milli Telsiz Haberleşme Sistemi”. Avrasya Dosyası, 14(1), 125-145.
- Bakdemir, M. (2024). Python İle Makine Öğrenmesi Algoritmalarını Kullanarak Rüzgar Santralinin Elektrik Üretim Tahmini (Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Batıbay, B., & Şahin, D. D. Y. (2023). Sürü İnsansız Hava Araçları İçin Bir Fanet Haberleşme Ağının Kurulması. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Üniversitesi
- Bozkurt, Y., & Demir, T. (2023). Afet Yönetiminde İletişim Ve Medya Üzerine Bir Değerlendirme: Kahramanmaraş Merkezli Depremler. Dumlupınar Üniversitesi İİB Dergisi, (11), 22-32.
- Demir, Y. (2021a). Tekrarlı Açgözlü Algoritma Üzerine Kapsamlı Bir Analiz. Journal Of The Institute Of Science And Technology, 11(4), 2716-2728.
- Demir, Y. (2021b). Tekrarlı Açgözlü Algoritması İle Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi Üzerine Bir Uygulama. Journal Of The Institute Of Science And Technology, 11(1), 169-178.
- Doğru, A., Erdem, O. A., & Akcayol, M. A. (2018). Gezgin Tasarsız Ağlarda Tahsisli Güvenilir Akış Denetimi Algoritması Geliştirilmesi. Academia.Eu
- İnan, M., & Karci, A. (2025). Drone Tabanlı Tarımsal Operasyonlarda Hız Ve Yüksekliğin Enerji Tüketimine Etkisi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 674-689.
- Korkuter, B., Ulusoy, A. H., & Rızaner, A. (2017). Gezgin Tasarsız Ağ Yönlendirme Protokollerinde Enerji Tüketim Değerlendirilmesi. Sakarya University Journal Of Science, 21(4), 584-591.
- Rappaport, T. S. (2010). Wireless Communications: Principles And Practice, 2/E. Pearson Education India.
- Seyman, M. N., & Saçaklı, (2016). B. Mc-Cdma Sistemlerinde Alt Taşıyıcı Tahsis Algoritmalarının Performanslarının İncelenmesi. Uluslararası Mühendislik Araştırma Ve Geliştirme Dergisi, 8(1).
- Sumathi, K., & Priyadharshini, A. (2015). Energy Optimization İn Manets Using On-Demand Routing Protocol. Procedia Computer Science, 47, 460-470.

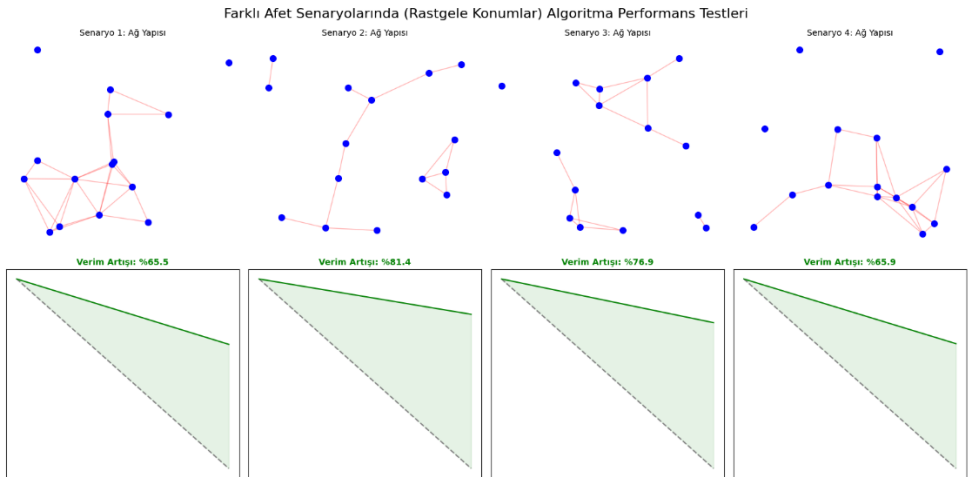
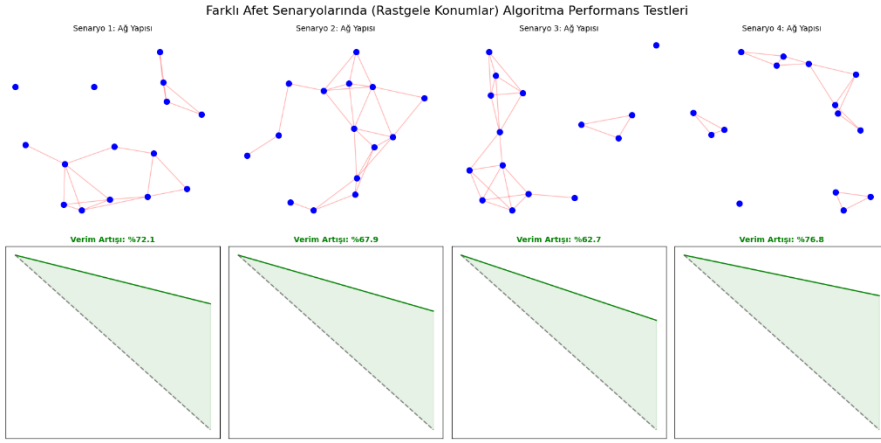
Yaman, M., & Çakır, E. (2018). Dijitalleşen Dünyada Akıllı Afet Ve Acil Durum Uygulamaları. İnsan Ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi, 7(2), 1124-1138.

Yen, Y. S., Chan, Y. K., Chao, H. C., & Park, J. H. (2008). A Genetic Algorithm For Energy-Efficient Based Multicast Routing On Manets. Computer Communications, 31(10), 2632-2641.

Ekler

EK 1

8 farklı afet Senaryosunda Elde Edilen Verimlilik Sonuçları





BÖLÜM 8

Kara Delikler ve Kozmolojik Dinamikler

Emine Canan Günay Demirel¹

1. GİRİŞ

Kara delikler, genel görelilik teorisinin öngördüğü en önemli yapılardan biridir. Olay ufkuyla sınırlı bu bölgelerde, nedensel yapı alışlagelmiş sezgilerimizin ötesine geçer; dışarıdan bakan bir gözlemci için, olay ufkunun içinden bilgi iletilemez. Bu nedenle, kara delikler sadece güçlü yerçekiminin örnekleri değildir; uzay-zamanın nasıl davrandığını, hangi koşullar altında klasik fiziğin yetersiz kaldığını ve kuantum etkilerinin ne zaman gerekli hale geldiğini gösteren teorik laboratuvarlardır. Literatürde, kara delikler bir yandan her ölçekte karşılaştığımız astrofiziksel nesneler, diğer yandan da kuantum, termodinamik ve geometriyi ortak bir zeminde bir araya getiren temel yapılar olarak ele alınmaktadır. Özellikle evrenin erken dönemlerinde beklenenden daha fazla aktif kara delik örneğinin gözlemlenmesi, kara deliklerin sadece son durum çözümleri değil, aynı zamanda oluşum ve büyüme süreçleriyle birlikte incelenmesi gereken dinamik sistemler olduğunu açıkça göstermektedir [1,6,33].

Kara delikler üzerine yapılan araştırmalar üç ana eksene odaklanmaktadır: Birinci eksen, kara deliklerin evrenin erken dönemlerinde ortaya çıktığı fiziksel koşullar ve kozmolojik zaman içinde süper kütleli yapılara nasıl dönüştükleridir [1,6,32]. İkinci eksen, kara deliklerin genişleyen veya kozmolojik olarak sabit arka planlar içinde nasıl tanımlandığı ve bu arka planın, özellikle gölge, ufuk ve gözlemci tanımları üzerindeki etkileridir [9,14,20]. Üçüncü eksen, Hawking buharlaşması, kara delik entropisi ve bilgi paradoksu gibi problemler aracılığıyla klasik genel görelilik ve kuantum teorisi arasındaki gerilimi anlamayı amaçlamaktadır [5,15,21,28]. Bu kitap bölümü, bu eksenleri ayrı konular olarak değil, aynı fiziksel problemin farklı yönleri olarak bir araya getirmeyi amaçlamaktadır.

2. Kara Deliklerin Kavramsal Temelleri

Kara delikleri açıklarken iki temel kavram öne çıkar: olay ufku ve tekillik. Olay ufku, en basit anlamıyla, geri dönüşü olmayan noktadır; bu sınırı geçen ışık da dahil olmak üzere hiçbir sinyal dış bölgeye ulaşamaz. Tekillik ise, geometrinin belirsizleştiği ve eğrilik miktarlarının kontrolsüz bir şekilde arttığı bölge olarak kabul edilir. Bununla birlikte, modern fizik için kritik nokta, bu iki kavramın eşit derecede gözlemlenebilir olmamasıdır. Olay ufku, gölge yapısı, ışık ışınlarının

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, ORCID:0000-0003-2968-9780

bükülmesi, yığılma akışları ve enerji taşınımı yoluyla dolaylı olarak test edilebilirken; tekillik doğrudan erişilebilir bir fiziksel bölge değil, teoremin sınırını gösteren bir göstergedir. [14,11,20].

Olay ufkunun tamamen karanlık olduğu klasik sezgisi, kuantum etkileri dikkate alındığında önemli ölçüde azalır. Hawking radyasyonu fikri, kara deliklerin tamamen pasif yapılar olmadığını göstermektedir; son derece zayıf olsa da bir radyasyon mekanizmasına sahip olabilecekleri ve yeterince uzun zaman ölçeklerinde buharlaşabilecekleri gösterilmiştir [15]. Bu sonuç, kara deliklerin termodinamik niceliklerle tanımlanabileceği fikrini güçlendirmiştir; entropi, sıcaklık ve alan arasındaki bağlantının temel fiziğin merkezine yerleştirilmesine yol açmıştır [5,28].

3. Anti-de Sitter Uzay zamanında İvmelenen Kara Delik Geometrilere

Kara delikler çoğu zaman durağan ve izole çözümler merceğinden tartışılabilir da gerçek evren o kadar basit değildir. Dış alanlar, gerilim kaynakları, kozmolojik sabit ve sınır koşulları gibi etkenler kara delik geometrisini anlamlı biçimde dönüştürebilir. Bu nedenle, hızlanan kara delik çözümleri, genel göreliliğin daha gerçekçi ve zengin bir alt sınıfını temsil edebilir. Anti-de Sitter (AdS) arka planında incelenen hızlanan kara delikler, C-metrik ailesinin kozmolojik sabitin varlığında nasıl çeşitlendiğini, ufuk yapılarının nasıl yeniden düzenlendiğini ve küresel uzay-zaman topolojisinin nasıl değiştiğini gösterdikleri için önemlidir [2]. Bu, kara deliklerin yalnızca yerel olarak güçlü alan nesneleri değil, aynı zamanda küresel geometri ve sınır yapılarıyla birlikte ele alınması gereken sistemler olduğunu açıkça göstermektedir. Hızlanma, yalnızca koordinat seçimine indirgenebilecek bir etki değildir. Hızlanan kara delik geometrilerinde, olay ufku ve hızlanma ufku gibi farklı nedensel sınırlar aynı uzay-zamanda bir arada bulunabilir. Bu hem termodinamik yorumları hem de uzay-zamanın küresel nedensellik yapısını doğrudan etkiler. Özellikle AdS arka planı, enerji, sınır koşulları ve holografik yorumların daha hassas bir şekilde tanımlanmasına olanak tanımaktadır. Böylece, kara deliklerin sadece kütle ve spin ile karakterize edilen yerel nesneler olmadığını, aynı zamanda arka plan geometrisinin fiziksel yorumu belirlediğini göstermektedir [2,21].

4. Genişleyen Evrende Kara Delik Modelleri

Kara deliği genişleyen bir kozmolojik arka plan içine yerleştirmek kuramsal olarak son derece güçtür çünkü burada yerel güçlü alan rejimi ile büyük ölçekteki sürekli genişleme aynı metrik yapı içinde uyumlu biçimde temsil edilmek zorundadır. Bu nedenle, genişleyen bir evrende kara delik sorunu sadece yeni çözümler bulma çabası değil, aynı zamanda gözlemci tanımını, enerji yorumunu ve olay ufku kavramını yeniden düşünme meselesidir [9,20]. Bazı modeller bir kara deliğin etkin kütlelerini zamanın bir fonksiyonu olarak gösterebilirken, bazı

araştırmacılar bu belirli koordinat tercihlerindeki değişikliği sadece yorumlamada bir farklılık olarak ele alabilir. Esas sorun, hangi niceliklerin fiziksel olarak gözlemlenebilir kabul edileceği ve hangi gözlemci sınıfına göre tanımlanacağıdır [19,20].

Tek bir kara delik fikrini kozmolojiyle birleştirerek ufuk kavramını çok katmanlı hale getirmek mümkündür. Genişleyen bir evrende, kara delik olay ufku ve kozmolojik ufuk aynı uzay-zamanda birlikte var olabilir ve etkileşimleri enerji akışını, nedenselliği ve parçacık hareketini doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, kozmolojik bir arka plan içinde kara deliklerin incelenmesi sadece teknik bir metrik problem değildir; kara delik fiziğinin kozmolojiyle temas ettiği en önemli alanlardan biridir. [9,20,19].

5. Kara Delik Gölgesinin Kozmolojik ve Gözlemsel Yorumu

Kara delik gölgesi genellikle olay ufkunun doğrudan bir görüntüsü olarak sunulsa da fiziksel olarak daha incelikli bir yapıdır. Gölge, fotonların kararsız yörüngelerinden, güçlü mercekleme etkilerinden ve gözlem yönündeki ışık demetlerinin seçilmesinden kaynaklanan optik bir izdir. Bu nedenle, gölgenin boyutu ve şekli sadece kara deliğin kütlesi ve dönüşüyle değil, aynı zamanda ışığın geçtiği uzay-zamanın küresel özellikleri ve gözlemcinin konumuyla da ilişkilidir. Kozmolojik sabitler içeren genişleyen bir evrende gölgeyi araştıran çalışmalar, gölge tanımının hangi gözlemci sınıfları için anlamlı olduğunu ve bu niceliğin daha önce düşünüldüğü kadar tamamen yerel olmayabileceğini göstermektedir [14].

Bu bulgu, yüksek hassasiyetli kara delik görüntülerinin yorumlanması için önemli sonuçlar doğurmaktadır. Prensip olarak, bu gözlemler sadece kara deliğin parametrelerini değil, aynı zamanda gözlemci-evren geometrisi ilişkisinin bazı izlerini de taşıyabilir. Ancak, böyle bir çıkarımın güvenilir olması için, yığılma diskinin yapısı, plazma etkileri, saçılma süreçleri ve manyetik alan topolojisi gibi astrofiziksel sistemlerin dikkatlice modellenmesi gerekmektedir [11,36]. Bu nedenle, kara deliğin gölgesi hem klasik genel göreliliğin hem de daha derin teorik önerilerin test edilebileceği çok katmanlı bir gözlem alanı haline gelmiştir.

6. Kara Delik Evreni ve Kozmolojik İvme

Kara delik kavramı, yalnızca yerel ve astrofiziksel bir nesne olarak değil, aynı zamanda kozmolojik düşüncüyü yapılandıran bir modelleme aracı olarak da kullanılabilir. “ Λ tabanlı kara delik evreni” yaklaşımı, kara delik benzetmeleri aracılığıyla kozmolojik bir sabit içeren bir yapı içinde evrenin ufuk ve teklik özelliklerini yeniden açıklamaya çalışmaktadır [7]. Öte yandan, “kara delik evreninin ivmelenmesi” fikri, genişleme dinamiklerini kara delik merkezli parametrizasyonlarla ele alarak evrenin büyük ölçekli davranışını güçlü yerçekimi ile anlamayı amaçlamaktadır [3]. Bu yaklaşımlar, standart kozmolojik

modele alternatif olarak değil, evren-ufuk-nedensellik ilişkisini daha görünür kılan kavramsal araçlar olarak önemlidir. Ufukların fiziksel anlamı, nedensel bölgelerin ayrılması ve evrenin sınırı hakkındaki düşünceler, kara delik geometrisinde yeniden ele alınabilir. Bu nedenle “evrenin sınırı” veya “kozmetik nedensellik” gibi kavramlar yalnızca kozmolojik çözümler aracılığıyla değil, aynı zamanda kara delik yardımıyla da açıklanabilir [25].

7. Dönen ve Sıçrayan Evren Senaryolarında Kara Delikler

Kara delikler sadece izotropik, homojen ve statik arka planlarda değil, aynı zamanda daha karmaşık kozmolojik koşullarda da incelenmektedir. Sarmal veya dönme evren modellerinde, kara delikler arka planın küresel akış yapısından etkilenebilir ve ufuk yorumları ve geometri konusunda yeni araştırmalar ortaya çıkarılabilir [18]. Bu tür çalışmalar, kara delik çözümlerinin genellikle varsayıldığı kadar arka plandan bağımsız olmadığını, aksine evrenin büyük ölçekli yapısıyla önemli ölçüde etkileşime girdiğini göstermektedir. Bu, güçlü alan fiziğinin ve küresel kozmolojik özelliklerin tamamen ayrı olarak ele alınamayacağını göstermektedir. Büyük ölçekte başlangıç tekilliklerinden kaçınan bir kozmolojide, yerel çökme süreçlerinin nasıl yorumlanacağı, olay ufuklarının zaman içinde nasıl değişeceğini ve kozmik ölçekli dönüşümlerin kara deliğin çevresinde nasıl yansıdığı temel konulardır [29]. Bu nedenle, kara delikler sadece çökmenin son ürünü değil, aynı zamanda kozmolojik evrimin farklı aşamaları arasındaki geçişleri anlamada da önemlidir.

8. Erken Evrende Primordial Kara Delikler

İlkel kara delikler (PBH'ler), yıldız evriminden bağımsız olarak, evrenin erken dönemlerinde meydana gelen yoğunluk dalgalanmalarının çökmesi sonucu oluşabilen kara deliklerdir. Bu özelliği nedeniyle, PBH'ler kara delik oluşumunun en erken kozmolojik aşamaları hakkında bilgi sağlayabilir ve erken evren fiziğini mevcut gözlemsel deneylerle birleştiren güçlü bir köprü oluşturabilir. Friedmann evreninde kara delik oluşumunu araştıran çalışmalar, kozmolojik akışın çökme eşiği üzerindeki etkisinin, PBH oluşumunun yalnızca yerel yoğunluk artışı açısından değil, aynı zamanda evrenin genel dinamikleriyle birlikte de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır [10]. Bu nedenle, PBH senaryoları, erken evrenin mikrofiziği ile büyük ölçekli kozmolojik yapı arasındaki bağlantıyı anlamada önemlidir [33].

PBH'lerin en güçlü gözlemsel veya yarı gözlemsel işaretlerinden biri Hawking buharlaşmasıdır. Yeterince küçük kütleli ilkel kara delikler, kozmolojik zaman ölçeklerinde önemli bir enerji salınımı üretebilir ve bu süreç, erken evrenin termal tarihi, parçacık içeriği ve arka plan radyasyonu üzerinde izler bırakabilir [31]. Ek olarak, kara deliklerin tamamen buharlaşıp buharlaşmadığı sorusu, PBH

kalıntıları fikrini ortaya çıkarabilir. Kararlı veya uzun ömürlü kalıntılar varsa, bunlar da karanlık madde tartışmasına yol açabilir [13].

PBH'lerin önemini artıran bir diğer boyut ise, erken evrende monopol üretimi gibi yüksek enerjili fizik sonuçları üretme potansiyelleridir. Bu tür senaryolar, kara deliklerin sadece astrofiziksel nesneler değil, aynı zamanda parçacık fiziği ve erken evren simetrileriyle ilişkili aktif süreçler olduğunu göstermektedir [12].

Burada PBH'lerin nasıl oluştuğu değil, aynı zamanda oluşumdan sonra hangi koşullar altında büyüdükleridir. Kütlesiz skalar alanlar içeren bir evrende PBH büyümesini inceleyen çalışmalar, birikim sürecinin kozmolojik genişlemeyle rekabet ettiğini ve büyümenin her dönemde aynı verimlilikte gerçekleşmediğini göstermektedir [34]. Bu, PBH'lerin pasif fosiller olarak değil, belirli dönemlerdeki çevresel madde içeriğine duyarlı bir şekilde evrimleşen dinamik nesneler olarak değerlendirilmesini gerektirir. Erken evrende mevcut olan alan türleri ve enerji yoğunlukları, daha sonraki kozmolojik dönemlerde PBH'lerin kütle dağılımının nasıl şekilleneceği üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olabilir. PBH'lerin kozmolojik ve astrofiziksel etkilerini açıklayan çalışmalar, bu nesnelerin etkisinin oluşum anıyla sınırlı olmadığını ortaya koymaktadır. Yapı oluşumu, ilk yıldızların doğuşu, yeniden iyonlaşma tarihi, arka plan radyasyonu ve hatta bazı kütle aralıklarındaki karanlık madde senaryoları PBH araştırmalarının konularıdır [35]. Bu nedenle, PBH literatürü, tek bir hipotezin doğrulanmasını bekleyen dar bir alan olarak değil, farklı gözlem kanalları aracılığıyla denenen çok katmanlı bir araştırma olarak görülmelidir.

9. Süper Kütleli Kara Delikler

Süper kütleli kara deliklerin (SMBH) kökeni, özellikle erken evrende gözlemlenen aktif kara delikler nedeniyle, günümüz fiziğindeki en dikkat çekici problemlerden biri haline gelmiştir. İlk yıldızların ve ilk kara deliklerin oluşumuyla ilgili çalışmalar, gaz soğutma süreçleri, ilk haloların oluşumu, metal eksikliği olan yıldız popülasyonları ve bunların çökme ürünleri yoluyla kara delik tohumlama senaryolarına odaklanmaktadır [32]. Bu bağlamda, ilk yıldızların yaşamlarının sonunda geride bıraktığı kara delik tohumları, birleşme ve birikim süreçleri yoluyla zamanla daha büyük kütlelere ulaşabilir. Bununla birlikte, bu büyüme yolunun yeterli olacağı koşullar, erken evrende gözlemlenen nesnelerin nicelleştirilmesiyle doğrudan test edilmektedir. Erken evrende gözlemlenen bazı kara delik örnekleri, bu büyüme sürecinin klasik olarak beklenenden daha hızlı ilerlemiş olabileceğini göstermektedir. Küçük ama son derece aktif bir erken evren kara deliğini bildiren çalışmalar, yüksek birikim verimliliğinin ve hızlı kütle kazanımının beklenenden daha erken devreye girmiş olabileceğini göstermektedir [1]. Benzer şekilde, hızla dönen ve süper kütleli kara deliklerin doğuşuyla ilgili çalışmalar, dönüşün sadece geometrik bir parametre olmadığını göstermektedir; Enerji çıkarımı, birikim verimliliği ve büyüme geçmişinin

belirleyici bir rol oynayabileceği vurgulanmaktadır [6]. Bu iki çizgi birlikte ele alındığında, erken evren kara deliklerinin sadece kütlelerinin büyüklüğüyle değil, aynı zamanda nasıl beslendikleri ve ne kadar hızlı döndükleriyle de tanımlanması gerekmektedir.

10. Brane-World Yaklaşımlarında Kara Delikler

Kara delik fiziği, yalnızca standart dört boyutlu genel görelilik bağlamında değil, ek boyutlu ve brane-temelli modellerde de verimli bir araştırma alanı sunmaktadır. Brane-world yaratılış ve kara delikler üzerine geliştirilen yaklaşımlar, kozmolojik yaratım senaryolarında kara deliklerin rolünü yeniden değerlendirmektedir; Brane-world bağlamında bulunan çözümler, etkin dört boyutlu evrende ortaya çıkan kara delik geometrisinin daha yüksek boyutlu yapılarla nasıl ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Bu çerçevede, kara delikler yalnızca klasik çözümler olarak değil, aynı zamanda ekstra boyutların ve gizli serbestlik derecelerinin dolaylı izlerini taşıyabilen yapılar olarak da önem kazanmaktadır. Bu yaklaşımlar altında, kara delikler yalnızca farklı koordinatlarla yeniden yazılmış eşdeğer çözümler değildir. Ufuk yapısının, enerji tanımlarının ve yerçekimi modlarının daha yüksek boyutlara doğru incelenmesi, kara delik termodinamiği ve bilgi akışı tartışmalarına yeni bir bakış açısı getirmektedir [8,26].

11. Galileo Kuramında Kara Delikler

Değiştirilmiş yerçekimi modellerinde, kara delik çözümleri hem teorilerin tutarlılığını ölçmede hem de onları genel görelilikten gözlemsel olarak ayırt etmede kritik bir rol oynar. Galileo teorisi içindeki kara deliklerle ilgili çalışmalar, skalar alan dinamiklerinin ufuk çevresinde ve dış bölgede nasıl izler bırakabileceğini ve dolayısıyla kara deliklerin ‘saçsızlık’ 'sezgisinin hangi koşullar altında kırılabilceğini tartışmaktadır [17]. Bu noktada, mesele sadece yeni çözümler üretmek değil; aynı zamanda hangi ek alanların fiziksel anlam taşıdığını ve gözlemlenebilir izler bırakıp bırakmadıklarını sorgulamaktır.

Saçsızlık kara deliklerin manyetik bir evrene yerleştirilmesini inceleyen çalışmalar, güçlü elektromanyetik arka planların kara deliklerin yakınındaki alan konfigürasyonlarını nasıl yeniden düzenleyebileceğini göstermektedir [30]. Manyetik alanların ufuk çevresinde nasıl organize olduğu, enerji çıktısı, plazma dinamikleri ve büyük ölçekli yapılara yol açan koşullar açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, değiştirilmiş yerçekimi ve manyetik evren literatürü, kara delikleri sadece vakum çözümleri olarak değil, aynı zamanda çevreleyen alanlarla birlikte var olan ve değişen sistemler olarak da ele almaktadır [30,36].

12. Kara Delik ve Manyetik Akı

Kara delik çevresindeki manyetik alanlar, özellikle enerji taşınımı, akresyon yapıları ve büyük ölçekli çıkışların beslenmesi açısından belirleyici öneme sahiptir. Kara delikler boyunca manyetik akıların taşınımını araştıran çalışmalar, alan çizgilerinin olay ufku etrafında nasıl organize edildiğini, akı taşınımının dış bölgedeki plazma ile nasıl bağlantı kurduğunu ve bunun gözlemlenen elektromanyetik süreçlere nasıl yansıdığını tartışmaktadır [36]. Buradaki kilit nokta, olay ufku nedensel bir sınır olmasına rağmen, ufka yakın bölgede kurulan alan düzeninin dışarıdaki fiziksel süreçleri güçlü bir şekilde etkileyebilmesidir. Bu bakış açısı, kara deliklerin sadece maddeyi yutan pasif yapılar olmadığını; çevredeki alanları organize eden, enerji dışa akışları için gerekli koşulları hazırlayan ve büyük ölçekli geri besleme üreten merkezler olabileceğini göstermektedir. Manyetik evrendeki kara delik çözümleriyle birlikte ele alındığında, manyetik alanların hangi topolojik koşullar altında korunduğunu ve büyük ölçekli kararlı yapılar oluşturduğunu göstermektedir [30][36]. Böylece, manyetik akı problemi, kara deliklerin etrafındaki yüksek enerjili süreçleri anlamamızı sağlamaktadır

13. Kara Delik Termodinamiği

Kara delik termodinamiği, modern kara delik fiziği için en önemli kavramlardan biridir. Kara deliklerin sıcaklık ve entropi gibi niceliklerle tanımlanabileceğini ve geometrik bir nesnenin de termodinamik bir sistem olarak anlaşılabilmesini göstermektedir [15]. Entropi-alan ilişkisi, özellikle olay ufkunun sadece geometrik bir sınır değil, mikrofiziksel bilgi içeriğinin bir göstergesi olabileceği fikrine yol açmıştır. Hawking buharlaşması bu bağlamda en çarpıcı sonuçlardan biridir; çünkü kara deliklerin kelimenin tam anlamıyla siyah olmadığını ve kuantum etkileri altında enerji kaybedebileceğini ortaya koymaktadır, Bu nedenle bilgi paradoksu ortaya çıkmaktadır: [5,28]. Giddings'in kuantum evrenindeki kara deliklere ilişkin değerlendirmesi, sorunun sadece bir paradokslar kümesi olmadığını; kuantum kütleçekiminin inşasında belirleyici bir eşik oluşturduğunu göstermektedir [21].

14. Kuantum Kütleçekim Açısından Kara Delikler

Kara delik görüntüleri genellikle klasik ışın izleme, plazma modelleme ve gözlemsel çözünürlük sınırlamaları çerçevesinde açıklanabilir. Bununla birlikte, bazı çalışmalar bu görüntülerin prensipte kuantum kütleçekimi hakkında daha derin bilgiler de taşıyabileceğini savunmaktadır. Kara delik görüntülerinin kuantum kütleçekimsel bilgileri kodlayabileceği fikri, ufuk yakınındaki mikrofiziğin, doğrudan olmasa bile, çok küçük sapmalar yoluyla gözlemlenebilir optik yapılarda yansıtılabileceğini öne sürmektedir [11].

Bu fikri güçlendiren bir diğer unsur ise, kara delik gölgesinin kozmolojik sabit, genişleme ve gözlemci tanımı gibi büyük ölçekli özelliklere de duyarlı olabilmesidir. Genişleyen evrende kozmolojik sabit ile gölgeyi inceleyen çalışmalar, görüntü-geometri ilişkisinin teknik ayrıntılarını açıklığa kavuşturarak hangi gözlemsel niceliklerin gerçekten anlamlı olduğunu göstermektedir [14]. Böylece, kara delik görüntülerinden geometriye ve oradan da daha temel teorilere geçilebilir [11,14].

15. Çoklu Evrende Kara Deliklerin Yeri

Kara delikler üzerine literatür geometri, gözlemsel astrofizik veya kuantum paradokslarıyla sınırlı değildir. Bazı yaklaşımlar kara delikleri daha geniş bir kozmolojik açıklama çerçevesine yerleştirir ve hatta onları yeni evrenlerin oluşumuna aracılık edebilecek yapılar olarak değerlendirir [16]. Bu tür fikirler doğrudan gözlemsel doğrulamaya açık olmasa da kozmolojide kara delik kavramının açıklayıcı gücünü önemli ölçüde genişletir. Kara delik evreni ve ivmelenme yaklaşımlarıyla birlikte incelendiğinde, ufuk kavramının yalnızca yerel bir fizik sınırı olarak değil, aynı zamanda kozmolojik düşüncenin temel yapı taşlarından biri olarak da yeniden şekillendirilebileceğini gösterir [3,7,16].

16. Sonuç

Kara delik günümüzde tek bir disiplinin sınırları içinde ele alınamayacak kadar genişlemiştir. Genel görelilik tarafından sunulan geometrik çözümler ve ufuk yapıları [2,9,20], erken evren süreçleri ve ilkel kara delik senaryoları [10,27,31,34,35], manyetik alanlar ve çevresel dinamikler [30,36], kuantum bilgisi ve termodinamik tartışmaları [15,21,28] hepsi aynı ortak probleme odaklanmaktadır. Özellikle, erken evrende gözlemlenen aktif kara delikler, tohum oluşumu ve büyümesi son derece güncel ve gerekli bir araştırma konusu haline gelmiştir [1,6]. Kuantum perspektifinden bakıldığında, bilgi paradoksu, ufuk mikrofiziğinin tutarlı bir açıklaması olmadan çözülemez görünmektedir; bu da kara delikleri kuantum yerçekimi arayışının merkezine yerleştirmektedir [5,21].

Görüntüleme verileri, yüksek enerjili parçacıklar, kozmik arka plan kısıtlamaları ve erken evrenle ilgili dolaylı gözlemsel kanıtlar, ancak güçlü bir teorik çerçeveye anlam kazanacaktır [11,14,27]. Bu entegrasyon sağlandığında, kara delikler yalnızca evrendeki uç noktalar olarak değil, doğanın temel yasalarını test eden, teoriler arasındaki gerilimleri ortaya çıkaran ve modern fiziğin en derin sorularını ele alan başlıca araştırma araçlarından biri olarak daha net bir şekilde anlaşılacaktır.

Kaynaklar

- [1] Maiolino, R., Scholtz, J., Witstok, J., et al. (2024). A small and vigorous black hole in the early Universe. *Nature*, 627(8002), 59–63. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07052-5>
- [2] Krtouš, P. (2005). Accelerated black holes in an anti-de Sitter universe. *Physical Review D*, 72(12), 124019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.72.124019>
- [3] Zhang, T. X., & Frederick, C. (2014). Acceleration of black hole universe. *Astrophysics and Space Science*, 349, 567–573. <https://doi.org/10.1007/s10509-013-1644-6>
- [4] Das, A. (2024). Black hole: A mystery in the universe. *International Journal of Novel Research and Development*, 9(4), b144–b152. <http://doi.org/10.1729/Journal.38773>
- [5] Marolf, D. (2017). The Black Hole information problem: past, present, and future. *Reports on Progress in Physics*, 80(9), 092001. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aa77cc>
- [6] Inayoshi, K., Jiang, Y.-F., Fumagalli, M., & Ho, L. C. (2024). Birth of rapidly spinning, overmassive black holes in the early Universe. *The Astrophysical Journal Letters*, 975(1), L8. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad74e2>
- [7] Yoo, C.-M., & Okawa, H. (2014). Black hole universe with Λ . *Physical Review D*, 89(12), 123502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.123502>
- [8] Maeda, K., & Nozawa, M. (2010). Black hole in the expanding universe from intersecting branes. *Physical Review D*, 81(4), 044017. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.81.044017>
- [9] Gibbons, G. W., Maeda, K., & Miyamoto, U. (2010). Black holes in an expanding universe. *Physical Review Letters*, 104(13), 131101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.131101>
- [10] Shibata, M., & Sasaki, M. (1999). Black hole formation in the Friedmann universe: Formulation and computation in numerical relativity. *Physical Review D*, 60(8), 084002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.60.084002>
- [11] Zhang, C., Ma, Y., & Yang, J. (2023). Black hole image encoding quantum gravity information. *Physical Review D*, 108(10), 104004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.104004>
- [12] Das, S., & Hook, A. (2021). Black hole production of monopoles in the early universe. *Journal of High Energy Physics*, 2021, 145. [https://doi.org/10.1007/JHEP12\(2021\)145](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2021)145)

- [13] Scardigli, F., Gruber, C., & Chen, P. (2011). Black hole remnants in the early universe. *Physical Review D*, 83(6), 063507. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.063507>
- [14] Perlick, V., Tsupko, O. Y., & Bisnovatyi-Kogan, G. S. (2018). Black hole shadow in an expanding universe with a cosmological constant. *Physical Review D*, 97(10), 104062. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.104062>
- [15] Hawking, S. W. (2000). Black holes 2000. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.gr-qc/0009407>
- [16] Garriga, J., Vilenkin, A., & Zhang, J. (2016). Black holes and the multiverse. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016(02), 064. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2016/02/064>
- [17] Babichev, E., Charmousis, C., Lehébel, A., & Moskalets, T. (2016). Black holes in a cubic Galileon universe. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016(09), 011. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2016/09/011>
- [18] Astorino, M., Martelli, R., & Viganò, A. (2022). Black holes in a swirling universe. *Physical Review D*, 106(6), 064014. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.064014>
- [19] Popławski, N. J. (2024). Black holes in an expanding universe from fake. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.16673>
- [20] Popławski, N. J. (2025). Black holes in the expanding Universe. *Classical and Quantum Gravity*, 42(6), 065017. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/adb537>
- [21] Giddings, S. B. (2019). Black holes in the quantum universe. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377(2161), 20190029. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0029>
- [22] Latif, M. A., Schleicher, D. R. G., Schmidt, W., & Niemeyer, J. (2013). Black hole formation in the early Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433(2), 1607-1618. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt834>
- [23] Volonteri, M., & Bellovary, J. (2012). Black holes in the early Universe. *Reports on Progress in Physics*, 75(12), 124901. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/12/124901>
- [24] Novikov, I. D., & Frolov, V. P. (2001). Black holes in the Universe. *Physics-Uspekhi*, 44(3), 291-305. <https://doi.org/10.1070/PU2001v044n03ABEH000773>
- [25] Moore, M. G. (2000). Black holes in their universe. *European Journal of Physics*, 21(4), 347–351. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/21/4/308>

- [26] Garriga, J., & Sasaki, M. (2000). Brane-world creation and black holes. *Physical Review D*, 62(4), 043523. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.62.043523>
- [27] Carr, B. J., MacGibbon, J. H., & Halzen, F. (1998). Cosmic rays from primordial black holes and constraints on the early universe. *Physics Reports*, 307(3–4), 141–154. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(98\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00039-8)
- [28] Polchinski, J. (2017). The black hole information problem. In *New Frontiers in Fields and Strings: TASI 2015 Proceedings of the 2015 Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics* (pp. 353–397). <https://doi.org/10.1142/10270>
- [29] Pérez, D., Perez Bergliaffa, S. E., & Romero, G. E. (2021). Dynamical black hole in a bouncing universe. *Physical Review D*, 103(6), 064019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.064019>
- [30] Astorino, M. (2013). Embedding hairy black holes in a magnetic universe. *Physical Review D*, 87(8), 084029. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.084029>
- [31] Arbey, A., Auffinger, J., & Hickling, A. (2023). Evaporation of primordial black holes in the early Universe: Mass and spin distributions. *Physical Review D*, 108(1), 015005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.015005>
- [32] Yoshida, N. (2019). Formation of the first generation of stars and blackholes in the Universe. *Proceedings of the Japan Academy, Series B, Physical and Biological Sciences*, 95(1), 17–28. <https://doi.org/10.2183/pjab.95.002>
- [33] Chow, T. L. (2008). *Gravity, black holes, and the very early universe: An introduction to general relativity and cosmology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73631-0>
- [34] Harada, T., & Carr, B. J. (2005). Growth of primordial black holes in a universe containing a massless scalar field. *Physical Review D*, 71(10), 104010. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.104010>
- [35] Gunn, J. (2025). Impacts of primordial black holes in the early universe. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.14583>
- [36] Bičák, J., & Janiš, V. (1985). Magnetic fluxes across black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 212(4), 899–915. <https://doi.org/10.1093/mnras/212.4.899>

