

# DOĞA BİLİMLERİ VE MATEMATİKTE GÜNCEL KAVRAMLAR VE YENİLİKÇİ ARAŞTIRMALAR





*DOĞA BİLİMLERİ VE  
MATEMATİKTE GÜNCEL  
KAVRAMLAR VE YENİLİKÇİ  
ARAŞTIRMALAR*

Editör  
Doç. Dr. ALİ ÖZDEMİR





***Doğa Bilimleri ve Matematikte Güncel Kavramlar ve Yenilikçi Araştırmalar***

***Editör: Doç. Dr. ALİ ÖZDEMİR***

**Dizayn:** All Sciences Academy Design

**Basım Tarihi:** Aralık 2025

**Yayıncı Sertifika Numarası:** 72273

**ISBN:** 978-625-8536-58-4

© All Sciences Academy

[www.allsciencesacademy.com](http://www.allsciencesacademy.com)

[allsciencesacademy@gmail.com](mailto:allsciencesacademy@gmail.com)

## İÇERİK

|                                                                                                                                                                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. Bölüm</b>                                                                                                                                                                                              | <b>7</b>   |
| Hopf-Cole Dönüşümü ve Burgers Denkleminin Lineerleştirilmesi<br><i>Ahmet BOZ</i>                                                                                                                             |            |
| <b>2. Bölüm</b>                                                                                                                                                                                              | <b>17</b>  |
| Türkiye Florasındaki Endemik Stachys Türleri İle İlgili Yapılan Çalışmalar<br><i>Betül AKIN, Betülnur ÖZEL</i>                                                                                               |            |
| <b>3. Bölüm</b>                                                                                                                                                                                              | <b>41</b>  |
| <i>N-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid Türevleri ile 2,6-Pridindikaboksilik asit in Proton Transfer Tuzunun Sentezi ve Karakterizasyonu</i><br><i>Halil İLKİMEN, Cengiz YENİKAYA, Aysel GÜLBANDILAR</i> |            |
| <b>4. Bölüm</b>                                                                                                                                                                                              | <b>60</b>  |
| 2,3,5,6-Pirazintetrakarboksilik Asitin Diğer Bileşiklerle Verdiği Tuz, co-Kristal ve Metal Komplekslerinin İncelenmesi<br><i>Halil İLKİMEN, Cengiz YENİKAYA</i>                                              |            |
| <b>5. Bölüm</b>                                                                                                                                                                                              | <b>81</b>  |
| Bilimsel Araştırma Yöntemleri ve Yayın İhlalleri Üzerine Bir İnceleme<br><i>Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ömür ÖZER, Öğr. Gör. Dr. İbrahim Tamer EMECAN</i>                                                           |            |
| <b>6. Bölüm</b>                                                                                                                                                                                              | <b>99</b>  |
| İhtiyohelminetolojide Preparasyon Teknikleri<br><i>Mehmet Oğuz ÖZTÜRK</i>                                                                                                                                    |            |
| <b>7. Bölüm</b>                                                                                                                                                                                              | <b>111</b> |
| 6-Metil-2-Piridilokso-Süstitüe Siklotrifosfazen Bileşiğinin 2,2'-Dihidroksibifenil İle Reaksiyonu<br><i>Saliha BEGEÇ</i>                                                                                     |            |

|                                                                                                                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8. Bölüm</b>                                                                                                                                                           | <b>127</b> |
| Ayva ve Ayva Kabuğu Kaynaklı Fermente Ürünlerde (Şarap ve Sirke)<br>Biyoaktif Bileşenler ve Antioksidan Kapasite Analizi<br><i>Zuhal ŞAHİN, Tülay DURAN, Fatih SÖNMEZ</i> |            |
| <b>9. Bölüm</b>                                                                                                                                                           | <b>136</b> |
| Polinom İnterpolasyonu ve Uygulamaları<br><i>Ahmet BOZ</i>                                                                                                                |            |
| <b>10. Bölüm</b>                                                                                                                                                          | <b>144</b> |
| Genelleştirilmiş Tipte Parçalı Sabit Gecikme İçeren Diferansiyel<br>Denklemlerde Salınım ve Salınımsızlık Kriterleri<br><i>Güler KUTLU, Duygu ARUĞASLAN ÇİNÇİN</i>        |            |
| <b>11. Bölüm</b>                                                                                                                                                          | <b>156</b> |
| Genelleştirilmiş Parçalı Sabit Argümanlı Diferansiyel Denklemlerin Salınım<br>Davranışı<br><i>Güler KUTLU, Duygu ARUĞASLAN ÇİNÇİN</i>                                     |            |
| <b>12. Bölüm</b>                                                                                                                                                          | <b>174</b> |
| İhtiyohelmintolojide Preparasyon Teknikleri<br><i>Mehmet Oğuz ÖZTÜRK</i>                                                                                                  |            |
| <b>13. Bölüm</b>                                                                                                                                                          | <b>185</b> |
| Türkiye Florasında Ciğerotları(Marchantiophyta): Ekolojik<br>Adaptasyonlar, Biyoçeşitlilik ve Biyoteknolojik Potansiyel<br><i>Özcan ŞİMŞEK</i>                            |            |
| <b>14. Bölüm</b>                                                                                                                                                          | <b>208</b> |
| Güncel Bulguların Işığında Ciğerotlarının (Marchantiophyta) Evrimsel<br>Biyocoğrafyası<br><i>Özcan ŞİMŞEK</i>                                                             |            |
| <b>15. Bölüm</b>                                                                                                                                                          | <b>228</b> |
| Biyo-Esaslı Biyobozunmaz Biyoplastikler: Biyo-Polietilen ve Biyo-Propilen<br><i>Mithat ÇELEBİ</i>                                                                         |            |

|                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>16. Bölüm</b>                                                                                    | <b>242</b> |
| Triallyl Isocyanurate Molekülünün Elektronik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi                    |            |
| <i>EMİNE TANIŞ</i>                                                                                  |            |
| <b>17. Bölüm</b>                                                                                    | <b>256</b> |
| Bir Oksidazol Türevinin Çözücü Ortamındaki Elektronik, Optik ve Algılama Özelliklerinin İncelenmesi |            |
| <i>EMİNE TANIŞ</i>                                                                                  |            |
| <b>18. Bölüm</b>                                                                                    | <b>270</b> |
| Mermer Sektöründe Müşteri Şikayetlerinin Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Sınıflandırılması          |            |
| <i>Meşharet Sena DEMİRTAŞ, Eralp DOĞU</i>                                                           |            |
| <b>19. Bölüm</b>                                                                                    | <b>285</b> |
| Fitokimyasalların Gücü: Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Biyolojik Aktiviteleri                         |            |
| <i>Handan SARAÇ, Ahmet DEMİRBAŞ</i>                                                                 |            |
| <b>20. Bölüm</b>                                                                                    | <b>306</b> |
| Endüstriyel Boyaların Gideriminde Peroksidazların Kullanımı                                         |            |
| <i>Hatice NOHUT, Doç. Dr. Yağmur ÜNVER</i>                                                          |            |
| <b>21. Bölüm</b>                                                                                    | <b>326</b> |
| Genom Düzenleme Araçları                                                                            |            |
| <i>İbrahim DAĞCI, Yağmur ÜNVER</i>                                                                  |            |
| <b>22. Bölüm</b>                                                                                    | <b>354</b> |
| KRD Toplam Kurallarına Giriş                                                                        |            |
| <i>Jale Y. SÜNGÜ</i>                                                                                |            |

|                                                                                                                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>23. Bölüm</b>                                                                                                                                          | <b>369</b> |
| En Küçük Kartezyen Grup Düzleminde Pappus Teoremi Üzerine<br><i>Sümeyye Büşra YAMAN, Ziya AKÇA</i>                                                        |            |
| <b>24. Bölüm</b>                                                                                                                                          | <b>393</b> |
| Genelleştirilmiş q-Picard Operatörlerinin Ağırlıklı Yaklaşım Özellikleri<br><i>BAŞAR YILMAZ</i>                                                           |            |
| <b>25. Bölüm</b>                                                                                                                                          | <b>408</b> |
| Yanma Sürecinde Alev Geciktiricilerin Etki Mekanizmaları<br><i>Cumali ÇELİK</i>                                                                           |            |
| <b>26. Bölüm</b>                                                                                                                                          | <b>420</b> |
| Isparta Bölgesi Mermer Ocaklarında Yapısal Süreksizliklerin ve<br>Blok Verimliliğinin Yer Radarı (GPR) Yöntemiyle Değerlendirilmesi<br><i>Olca ÇAKMAK</i> |            |
| <b>27. Bölüm</b>                                                                                                                                          | <b>441</b> |
| Sosyal Böceklerde Yuvalar: Yapı-İşlev Mimari<br><i>Aysel KEKİLLİOĞLU</i>                                                                                  |            |
| <b>28. Bölüm</b>                                                                                                                                          | <b>455</b> |
| İş Yaşamı Sürecinde Biyolojik Riskler: Biyogüvenlik ve Sürdürülebilirlik<br><i>Aysel KEKİLLİOĞLU</i>                                                      |            |
| <b>29. Bölüm</b>                                                                                                                                          | <b>474</b> |
| Veri Madenciliğine Bir Bakış<br><i>Mustafa KARAKAYA, Pelin KASAP</i>                                                                                      |            |

# **Hopf-Cole Dönüşümü ve Burgers Denkleminin Lineerleştirilmesi**

**Ahmet BOZ<sup>1</sup>**

1- Prof. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, ahmet.boz@dpu.edu.tr,  
ORCID: 0000-0002-1438-2391.

## ÖZET

Bu bölümde, viskoz Burgers denkleminin analitik ve nümerik açıdan incelenmesinde merkezi bir rol oynayan Hopf–Cole dönüşümü ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Burgers denklemi, taşıma ve difüzyon süreçlerinin aynı denklem altında birleşmesi nedeniyle güçlü bir lineer olmayan yapıya sahiptir ve bu yapı, doğrudan analitik çözüm elde edilmesini güçleştirmektedir. Hopf–Cole dönüşümü, bu karmaşık yapıyı ortadan kaldırarak denklemi klasik ısı denklemi formuna dönüştürmekte ve böylece tam anlamıyla lineerleştirme gerçekleştirmektedir. Dönüşümün matematiksel temelleri adım adım türetilmiş, logaritmik türev yapısı ve terimlerin sadeleşme mekanizması ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Elde edilen lineer denklem, Gauss çekirdeği aracılığıyla çözülebilmekte ve başlangıç koşullarının evrimi açık biçimde ifade edilebilmektedir. Ayrıca dönüşümün nümerik yöntemler üzerindeki etkileri tartışılarak, özellikle Crank–Nicolson, spektral yöntemler ve kolokasyon yaklaşımlarında sağladığı stabilite avantajları vurgulanmıştır. Bu çalışma, Hopf–Cole dönüşümünün teorik gücünü ve uygulama potansiyelini bir araya getirerek Burgers denklemi bağlamında kapsamlı bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır.

*Anahtar Kelimeler – Hopf–Cole dönüşümü, Burgers denklemi, lineerleştirme yöntemleri, ısı denklemi, analitik çözüm*

---

## GİRİŞ

Lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemler (KDD’ler), hem matematiksel hem de fiziksel süreçlerde ortaya çıkan karmaşık dinamikleri modellemede önemli bir role sahiptir. Bu denklemler arasında yer alan Burgers denklemi, özellikle difüzyon ve taşınım süreçlerinin aynı denklem altında birleşmesi nedeniyle, uygulamalı matematikte temel bir model olarak kabul edilmektedir (Whitham, 1974). Denklem

$$u_t + uu_x = \nu u_{xx},$$

şeklinde verilir ve viskozite parametresi  $\nu > 0$  olduğunda difüzyonun etkisi belirgindir. Burgers denklemi, düşük boyutlu akışkanlar mekaniği modelleri, şok dalgalarının oluşumu, trafik akışı, gaz dinamiği ve türbülans teorisinin bazı basitleştirilmiş formlarında sıklıkla kullanılmaktadır (Burgers, 1948; Hopf, 1950).

Ancak, denklemin taşıdığı kuadratik konveksiyonel terim  $(uu_x)$  nedeniyle analitik çözümü doğrudan elde etmek oldukça güçtür. Bu güçlük, lineerleştirme yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik yoğun bir araştırma alanı doğurmuştur. Bu bağlamda Hopf–Cole dönüşümü, Burgers denklemini tam anlamıyla lineerleştirebilmesi nedeniyle hem analitik çözüm elde edilmesinde hem de nümerik yöntemlerin iyileştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Cole, 1951).

Hopf–Cole dönüşümü sayesinde Burgers denklemi, difüzyon süreçlerinin temelini oluşturan ısı denklemi biçimine dönüştürülür. Burgers denkleminin ısı denklemi

$$\phi_t = \nu \phi_{xx}$$

şeklinde elde edilir ve bu dönüşüm, analitik çözümün klasik Gauss çekirdeği üzerinden ifade edilmesine olanak tanır. Dönüşümün bu özelliği, hem matematiksel çözüm üretiminde hem de nümerik analizde yüksek doğruluk sağlayan yöntemlerin geliştirilmesine doğrudan katkı sunmaktadır (Evans, 2010).

Bu bölümde Hopf–Cole dönüşümünün matematiksel yapısı ayrıntılı biçimde incelenecek, dönüşümün teorik temelleri adım adım türetilecek, Burgers denkleminin analitik çözümüne etkisi tartışılacak ve son olarak dönüşümün nümerik yöntemler üzerindeki sonuçları değerlendirilecektir. Bölümün hedefi yalnızca dönüşümün cebirsel yönünü değil, aynı zamanda fiziksel anlamını ve nümerik hesaplamalar bakımından sağladığı avantajları kapsamlı biçimde sunmaktır.

Hopf–Cole dönüşümünün anlaşılabilmesi için Burgers denkleminin yapısını ve özellikle taşıma–difüzyon ayrımını doğru biçimde yorumlamak gerekir. Burgers denklemi, viskozite parametresine bağlı olarak hem lineer olmayan taşıma denklemi hem de ısı denklemi davranışı sergiler (LeVeque, 2002).

Denklemin konvektif kısmı

$$u_t + uu_x = 0,$$

tek başına ele alındığında çözümlerinin çoğunlukla şok dalgaları oluşturduğu bilinmektedir. Bu tür konveksiyon baskın problemler, entropi koşulları, zayıf çözüm kavramı ve karakteristik eğrilerin çakışması gibi karmaşık fenomenler içerir (Lax, 1957).

Öte yandan difüzyon terimi

$$u_t = \nu u_{xx}$$

ısı yayılımını temsil eder ve çözümleri Gauss çekirdeği ile tanımlanan düzgünleşen bir davranış sergiler (Evans, 2010). Burgers denkleminde bu iki süreç aynı anda işlediğinden, denklemin çözümü hem yayılma hem çökme eğilimi taşır ve başlangıç koşuluna göre karmaşık çözüm yapıları oluşturabilir.

Hopf–Cole dönüşümünün en önemli katkısı, bu iki süreci ayırarak lineer olmayan yapıyı tamamen ortadan kaldırmasıdır. Dönüşüm

$$u(x, t) = -2\nu \frac{\phi_x(x, t)}{\phi(x, t)}$$

şeklindedir ve bu bağıntı aracılığıyla Burgers denkleminin ısı denklemi formuna ulaşılır. Bu form, PDE'lerin çözüm yöntemleri açısından klasik, iyi anlaşılmış ve güçlü analitik araçlarla donatılmış bir yapıdır (Ladyzhenskaya, 1985).

Bu dönüşümün varlığı, Burgers denklemini Navier–Stokes denklemlerinin bir boyutlu sadeleştirilmiş bir modeli olarak kullanan pek çok çalışma için teori ile hesaplama arasında bir köprü niteliği taşır (Whitham, 1974).

## HOPF-COLE DÖNÜŞÜMÜNÜN MATEMATİKSEL İFADESİ

### 1. Hopf–Cole dönüşümü:

Hopf–Cole dönüşümü, Burgers denklemini lineer bir forma indirmek amacıyla tasarlanmış özel bir değişken dönüşümüdür. Bu dönüşüm ilk kez Hopf (1950) ve Cole (1951) tarafından birbirinden bağımsız olarak ortaya konmuş ve akışkanlar mekaniğinde karşılaşılan lineer olmayan difüzyon–taşınım süreçlerinin analizinde temel bir araç hâline gelmiştir.

$$u_t + uu_x = \nu u_{xx} \quad (1.1)$$

Bu denklemdeki konveksiyon terimi Burgers denkleminin lineer olmayan yapısının kaynağıdır (Whitham, 1974).

Burgers denklemini lineer bir denkleme dönüştürmek amacıyla Hopf ve Cole aşağıdaki değişken dönüşümünü önermiştir:

$$u(x, t) = -2\nu \frac{\phi_x(x, t)}{\phi(x, t)} \quad (1.2)$$

Bu ifade aynı zamanda logaritmik türevin ölçekli bir formudur (Cole,

1951). Bu ifadeden yola çıkılarak türevler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$u_x = -2\nu \left( \frac{\phi_{xx}}{\phi} - \frac{\phi_x^2}{\phi^2} \right) \quad (1.3)$$

$$u_t = -2\nu \left( \frac{\phi_{xt}}{\phi} - \frac{\phi_x \phi_t}{\phi^2} \right) \quad (1.4)$$

$$uu_x = 4\nu^2 \left( \frac{\phi_x \phi_{xx}}{\phi^2} - \frac{\phi_x^3}{\phi^3} \right) \quad (1.5)$$

$$u_{xx} = -2\nu \left( \frac{\phi_{xxx}}{\phi} - 3 \frac{\phi_{xx} \phi_x}{\phi^2} + 2 \frac{\phi_x^3}{\phi^3} \right) \quad (1.6)$$

(1.3)–(1.6) ifadeleri (1.1)’de yerine yazıldığında kuadratik ve kübik türev terimleri birbirini tamamen götürür. Sadeleştirme sonunda aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\phi_t = v\phi_{xx} \quad (1.7)$$

Bu, klasik ısı denklemidir (Evans, 2010). Hopf–Cole dönüşümü, lineer olmayan Burgers denklemini tamamen lineer bir difüzyon denklemine indirger. Gauss çekirdeği üzerinden çözülebilen bu form, hem analitik çözümü mümkün kılar hem de nümerik çözümler için üstün stabilite özellikleri sağlar (LeVeque, 2002; Ladyzhenskaya, 1985).

Hopf–Cole dönüşümü ile Burgers denkleminin ısı denklemi formuna dönüştürülmesi, analitik çözüm elde etme sürecini önemli ölçüde kolaylaştırır. Bu bölümde, dönüşüm sonrası ortaya çıkan lineer problemin çözümü ayrıntılı olarak ele alınacak ve elde edilen çözümün Burgers değişkenine geri dönüşümü gösterilecektir (Cole, 1951; Evans, 2010).

Dönüşüm sonucu elde edilen denklem:

$$\phi_t = v\phi_{xx}$$

Bu denklem, başlangıç koşulu  $\phi(x, 0) = \phi_0(x)$  olmak üzere klasik ısı denklemi biçimindedir. Isı denkleminin çözümü, Gauss çekirdeği kullanılarak integral formunda yazılabilir (Evans, 2010):

$$\phi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi vt}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x-y)^2}{4vt}\right) \phi_0(y) dy$$

Bu ifade, her  $t > 0$  için çözümün düzgünleştiğini ve başlangıç verisindeki keskinliklerin zamanla yayıldığını gösterir (Whitham, 1974).

## 2. Başlangıç Koşulunun Uygulanması:

Başlangıç koşulu  $u(x, 0) = u_0(x)$  olarak verildiğinde, dönüşüm (1.2):

$$u_0(x) = -2v \frac{\phi'_0(x)}{\phi_0(x)}$$

şeklinde bir ilişki verir. Buradan:

$$\phi_0(x) = C \exp\left(-\frac{1}{2v} \int_0^x u_0(s) ds\right)$$

elde edilir. Bu, Burgers denkleminde başlangıç fonksiyonunun ısı denkleminin başlangıç verisine nasıl dönüştüğünü açıklar (Hopf, 1950).

### 3. Burgers Denklemine Çözümünün Elde Edilmesi:

Isı denkleminin çözümü elde edildikten sonra, Burgers denkleminin çözümü Hopf–Cole dönüşümünün tersinin uygulanmasıyla bulunur:

$$u(x, t) = -2\nu \frac{\phi_x(x, t)}{\phi(x, t)}$$

Bu işlem, ısı denkleminin Gauss tipi çözümünün türevini gerektirir. (4.5) ile (4.2)'nin birlikte kullanılması sonucu Burgers denkleminin genel analitik çözümü şu biçimde ifade edilir (Whitham, 1974; Cole, 1951):

$$u(x, t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-y}{t} \exp\left(-\frac{(x-y)^2}{4\nu t}\right) - \frac{1}{2\nu} \int^y u_0(s) ds dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x-y)^2}{4\nu t}\right) - \frac{1}{2\nu} \int^y u_0(s) ds dy}$$

Bu formül Burgers denkleminin kapalı formdaki tam çözümüdür ve Hopf–Cole dönüşümünün gücünü açıkça gösterir.

### 4. Özel Bir Örnek: Basamak Tipi Başlangıç Verisi:

Başlangıç verisi:

$$u_0(x) = \begin{cases} u_L, & x < 0, \\ u_R, & x > 0, \end{cases}$$

şeklindeyse, çözümün zamanla nasıl düzgünleştiği Gauss çekirdeği sayesinde açıkça görülebilir. Özellikle  $t \rightarrow 0$  limitinde şok benzeri bir yapı oluşsa da, viskozite  $\nu > 0$  olduğundan şok sonsuz eğim yapmaz, yerine difüze bir geçiş tabakası oluşur (Lax, 1957; LeVeque, 2002).

Hopf–Cole dönüşümü bu davranışı açık biçimde ortaya koyar: difüzyon çekirdeği başlangıçtaki keskinliği zamanla yayar, bu da Burgers akışının fiziksel doğasına uygun bir geçiş sağlar.

### 5. Hopf–Cole Dönüşümünün Nümerik Yöntemlere Etkisi

Hopf–Cole dönüşümünün en güçlü yönlerinden biri, Burgers denklemindeki lineer olmayan konveksiyon terimini tamamen ortadan kaldırarak problemi ısı denklemi formuna dönüştürmesidir. Bu dönüşüm yalnızca analitik çözümü kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda nümerik yöntemlerin uygulanmasını da daha istikrarlı ve doğruluk açısından daha avantajlı hâle getirir (LeVeque, 2002; Evans, 2010). Bu bölümde,

dönüşümün nümerik çözüm süreçlerine sağladığı etkiler ayrıntılı biçimde ele alınacaktır.

### 5.1. Lineerleştirme ve Zaman Ayrıklaştırmasının Kolaylaşması

Burgers denkleminin orijinal formu:

$$u_t + uu_x = \nu u_{xx},$$

zaman ayrıklaştırmasında özellikle yarı-kesin (semi-implicit) ve tam-kesin yöntemlerde kararsızlıklara yol açabilir.

Konveksiyon terimi  $uu_x$ , CFL koşulu gereksinimlerini sıkılaştırır ve küçük zaman adımı zorunlu hâle getirir (Lax, 1957).

Hopf–Cole dönüşümü sonrası elde edilen denklem:

$$\phi_t = \nu \phi_{xx},$$

tüm bu kısıtlamalardan bağımsızdır. Isı denklemi için kararlılık koşulları hem daha iyi tanımlıdır hem de daha gevşektir. Özellikle Crank–Nicolson yöntemi koşulsuz kararlı olduğundan, büyük zaman adımlarıyla bile yüksek doğruluk korunabilir (LeVeque, 2002).

### 5.2. Crank–Nicolson Yöntemi ile Çözüm

Isı denklemi için Crank–Nicolson şeması:

$$\frac{\phi_i^{n+1} - \phi_i^n}{\Delta t} = \nu \frac{(\phi_{i+1}^{n+1} - 2\phi_i^{n+1} + \phi_{i-1}^{n+1}) + (\phi_{i+1}^n - 2\phi_i^n + \phi_{i-1}^n)}{2(\Delta x)^2},$$

şeklindedir ve ikinci mertebe doğruluk sağlar. Hopf–Cole dönüşümünde  $u$  yerine  $\phi$  çözülür ve sonrasında:

$$u_i^{n+1} = -2\nu \frac{\phi_x(x_i, t_{n+1})}{\phi(x_i, t_{n+1})}$$

formülüyle Burgers çözümü geri elde edilir (Cole, 1951).

Bu yaklaşım özellikle yüksek gradyanlı (şok benzeri) başlangıç fonksiyonlarında bile kararlı sonuç verir.

### 5.3. Spektral Yöntemlerle Uyum

Hopf–Cole dönüşümü sonrası çözülmesi gereken denklem lineer olduğundan:

- Fourier spektral yöntemleri,
- Chebyshev spektral yöntemleri,
- Laguerre tabanlı yöntemler

ısı difüzyon için son derece uygundur (Boyd, 2001).

Isı denkleminin spektral formda temsil edilmesi:

$$\hat{\phi}'_k(t) = -\nu k^2 \hat{\phi}_k(t)$$

ile tek boyutlu bir ODE ailesine dönüşür; bu da spektral yöntemlerin maksimum verimlilikle kullanılmasını sağlar.

Burgers denkleminin doğrudan spektral çözümünde karşılaşılan aliasing ve Gibbs osilasyonları, Hopf–Cole dönüşümü ile büyük ölçüde azaltılır.

#### 5.4. Kolokasyon Yöntemlerine Etkisi

Sizin uzmanlık alanınız açısından en önemli noktalardan biri şudur: Hopf–Cole dönüşümü kolokasyon yöntemlerinin doğruluğunu belirgin biçimde artırır.

Örneğin Hermite kolokasyon yönteminde <sup>u</sup> fonksiyonunun üçüncü ve dördüncü türevleri çözümler sırasında hesaplamayı zorlaştırırsa da, dönüşüm sonrası  $\phi$  için: daha pürüzsüz bir çözüm elde edilir, türevlerin sayısal kararlılığı artar ve matris sistemleri daha iyi şartlanır.

Kübik B-spline veya Fibonacci kolokasyon gibi yöntemlerde de aynı şekilde sistemin lineerleşmesi, elde edilen çözümün stabilitesine önemli katkıda bulunur (LeVeque, 2002).

#### 5.5. Nümerik Kararlılık Açısından Genel Değerlendirme

Hopf–Cole dönüşümünün nümerik çözüme sağladığı temel avantajlar şöyle özetlenebilir:

- Kararlılık artar: Konveksiyon terimi ortadan kalktığı için CFL kısıtı zayıflar.
- Doğruluk artar: Gauss çekirdeği yapısı pürüzsüz çözümler doğurur.
- Yüksek gradyanlı bölgelerde bozulma azalır: Gibbs etkisi ve aliasing kaybolur.
- Zaman adımı büyütülebilir: Yarı-kesin yöntemlerde özellikle belirgin avantaj sağlar.
- Kolaylaştırılmış matris yapısı: Spektral ve kolokasyon yöntemlerinde sistemler simetrik ve pozitif tanımlı hâle gelir.

Bu nedenlerle Hopf–Cole dönüşümü, Burgers denkleminin nümerik çözümünde hem doğruluk hem stabilize bakımından son derece güçlü bir araçtır.

## SONUÇ

Bu bölümde, Burgers denkleminin analitik olarak çözülmesinde temel rol oynayan Hopf–Cole dönüşümü ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Öncelikle Burgers denkleminin taşıma ve difüzyon süreçlerini aynı yapıda barındıran karmaşık doğası tartışılmış; bu yapının, konveksiyon terimi nedeniyle doğrudan analitik çözümü güçleştirdiği belirtilmiştir (Whitham, 1974). Hopf–Cole dönüşümü, söz konusu güçlüğü ortadan kaldırarak denklemi tam anlamıyla lineerleştirmekte ve Burgers denklemini klasik ısı denklemi formuna dönüştürmektedir (Hopf, 1950; Cole, 1951).

Dönüşümün matematiksel türetilmesi adım adım gerçekleştirilmiş; türevlerin hesaplanması, terimlerin sadeleşme mekanizması ve lineer olmayan yapıdaki tamamen ortadan kalkma süreci ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Elde edilen ısı denklemi, Gauss çekirdeği ile çözülebilir bir forma sahiptir ve böylece Burgers denklemine ait çözümler başlangıç koşullarına bağlı olarak integral ifadeleri üzerinden açık biçimde elde edilebilmektedir (Evans, 2010).

Hopf–Cole dönüşümü yalnızca teorik bir araç olmakla kalmayıp, Burgers denkleminin nümerik çözümünde de önemli avantajlar sağlamaktadır. Lineerleştirilmiş form sayesinde zaman ayrıklaştırma yöntemleri, spektral yaklaşımlar ve kolokasyon teknikleri daha kararlı ve yüksek doğrulukla uygulanabilmektedir (LeVeque, 2002; Ladyzhenskaya, 1985).

Sonuç olarak Hopf–Cole dönüşümü, Burgers denkleminin hem analitik hem de nümerik incelenmesinde vazgeçilmez bir yöntem olup; akışkanlar mekaniği, difüzyon süreçleri ve nonlinear dalga yayılımı gibi pek çok alanda güçlü bir çözüm çerçevesi sunmaktadır.

## REFERANSLAR

Burgers, J. M. (1948). *A mathematical model illustrating the theory of turbulence*. Advances in Applied Mechanics, 1, 171–199.

Cole, J. D. (1951). On a quasi-linear parabolic equation occurring in aerodynamics. *Quarterly of Applied Mathematics*, 9(3), 225–236.

Evans, L. C. (2010). *Partial differential equations* (2nd ed.). American Mathematical Society.

Hopf, E. (1950). The partial differential equation  $u_t + uu_x = \mu u_{xx}$ . *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 3(3), 201–230.

Ladyzhenskaya, O. A. (1985). *The mathematical theory of viscous incompressible flow*. Gordon and Breach.

Lax, P. (1957). Hyperbolic systems of conservation laws II. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 10(4), 537–566.

LeVeque, R. J. (2002). *Finite volume methods for hyperbolic problems*. Cambridge University Press.

Whitham, G. B. (1974). *Linear and nonlinear waves*. Wiley.



# **Türkiye Florasındaki Endemik Stachys Türleri İle İlgili Yapılan Çalışmalar**

**Betül AKIN<sup>1</sup>**  
**Betülnur ÖZEL<sup>2</sup>**

- 1- Doç. Dr. Betül AKIN; Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü.  
betul.akin@dpu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-2325-7496
- 2- Arş. Gör. Betülnur ÖZEL; Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü.  
betulnur.ozel@dpu.edu.tr ORCID No: 0009-0005-0988-3342

## ÖZET

Yaklaşık 370 türle temsil edilen *Stachys* (Lamiaceae) cinsi, dünyanın çeşitli bölgelerinde yayılış göstermektedir. Bu türlerin üyeleri yüzyıllardır geleneksel şifalı bitkiler olarak kullanılmaktadır. Ülkemiz, 125 *Stachys* taksonuna ev sahipliği yapmakta ve bu cins için önemli bir gen merkezi konumundadır. Bu taksonlar arasında 64 tür endemiktir ve bu da Türkiye’de *Stachys* cinsi için yaklaşık %53,3’lük bir endemizm oranına işaret etmektedir. Halk arasında “Deliçay, Çayçe, Mayasılotu, Köprülüçay, Sümbülçayı” olarak bilinen *Stachys* cinsi, Türk geleneksel tıbbında çeşitli rahatsızlıkların tedavisinde kullanılmaktadır. Bu çalışma, Türkiye florasında yer alan endemik *Stachys* türlerinin fenolik içeriği, uçucu yağ kompozisyonu, biyolojik aktivite ve *in vitro* çoğaltım tekniklerine yönelik mevcut araştırmaları bir araya getirerek literatürdeki verileri bütüncül bir çerçevede sunmayı amaçlamaktadır.

*Anahtar kelimeler - Biyolojik aktivite, Endemik tür, In vitro çoğaltım, Stachys, Türkiye*

## GİRİŞ

Bioçeşitlilik, dünya üzerindeki yaşam çeşitliliğini ifade etmekte olup üç ana bileşeni kapsayan bir olgudur. Bunlardan ilki bir tür içindeki genetik çeşitliliği tanımlayan “genetik çeşitlilik”, ikincisi tür sayısını ifade eden “tür çeşitliliği”, üçüncüsü ise farklı ekosistemlerin bulunmasıyla birlikte oluşan “ekosistem çeşitliliğidir”. Bu üç unsur arasında, özellikle tür çeşitliliği bağlamında değerlendirilen endemik flora, yerel bioçeşitliliğin benzersiz özelliklerinin en göze çarpan örnekleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yunanca endemos kelimesinden gelen endemik terimi, sınırlı yayılışa sahip bitki gruplarını ifade etmektedir. Endemizm ise bir taksonun coğrafi bir alanla sınırlandırılması olgusu olup, floristik birimleri tanımlamak için yaygın olarak kullanılan temel bir kavramdır (Anderson, 1994:451). Dolayısıyla bir bitki; sınırları belli, dar bir alanda yayılış gösterdiği takdirde “endemik bitki” olarak tanımlanmaktadır. Ülkemizin sahip olduğu benzersiz coğrafi ve ekolojik koşullar, Türkiye’de çok sayıda bitki türünün ortaya çıkmasına ve bu türlerin bir kısmının sadece belirli bölgelerde ve sınırlı yayılış göstermesine olanak sağlamaktadır (Güner vd., 2012). Bu noktada endemik türler; mikroçoğaltım teknikleriyle sürdürülebilir üretimlerinin sağlanması, antimikrobiyal özelliklerinin araştırılması ve tıbbi aromatik amaçlarla kullanımları açısından büyük önem taşımaktadır. Bu özel bağlamda, Lamiaceae familyası, üyeleri içinde uçucu yağların ve fenolik bileşiklerin varlığı ile ayırt edilen taksonomik bir grubu temsil etmektedir. Familyaya ait birçok takson, antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri ile bilinmekte ve tıbbi ve aromatik özellikleriyle öne çıkmaktadır. Buna ek olarak Lamiaceae familyasında sınıflandırılan flora ile ilgili baskın bilimsel araştırma alanı, içerdikleri uçucu yağların sergilediği

antimikrobiyal özelliklerle ilgilidir (Kemer vd., 2022:19). Endemik türler açısından zengin olan Lamiaceae familyasındaki tıbbi öneme sahip bitkilerin, *in vitro* koşullarda doku kültürüyle çoğaltılması, bu türlerin korunması açısından önemli bir yöntemdir (Akın vd., 2024:1653). Familyanın kullanım alanlarına bakıldığında, taksonlarda uçucu yağların varlığı nedeniyle, tıp, diş hekimliği, eczacılık, kimya, mutfak sanatları (baharatlar gibi), zirai kimya uygulamaları, kozmetik, ilaç endüstrileri ve parfümeri dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulamalar gözlemlenmektedir (Küçük vd., 2021:372). Bu familyanın üyeleri, antibiyotik özellikleri nedeniyle geleneksel halk hekimliğinde analjezik ve antiseptik etkilerinden dolayı yaygın olarak kullanılmakta olup etnobotanik açıdan önemli bir yere sahiptir. Tüm bu kullanım alanlarına ek olarak familyaya ait birçok tür süs bitkisi olarak kültüre alınmaktadır (Watson & Dallwitz, 2002; Baytop, 1999:35).

Bu derlemenin amacı, Türkiye’de yayılış gösteren endemik *Stachys* türleri üzerine yapılan; söz konusu türlerin *in vitro* çoğaltımı, etken madde içerikleri, antimikrobiyal aktiviteleri ve tıbbi-aromatik özelliklerini inceleyen çalışmaları sentezleyerek mevcut literatürü değerlendirmektir. Çalışma, literatürde var olan bilgileri bir araya getirerek literatürdeki boşlukların belirlenmesine, araştırma eğilimlerinin anlaşılmasına ve gelecekte yapılacak çalışmalara yön verilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

## **TÜRKİYE FLORASI, ENDEMİK *Stachys* TÜRLERİ VE YAYILIŞ ALANLARI**

Türkiye, Avrupa-Sibiryaya, Akdeniz ve İran-Turan fitocoğrafik bölgelerinin kesişim noktasında yer alması, topoğrafik yapısı, jeolojik özellikleri ve geniş iklim çeşitliliği nedeniyle çeşitli vejetasyon tiplerine ev sahipliği yapmakta ve ayrıca flora açısından da dikkate değer bir zenginliğe sahiptir. Bu zengin biyolojik çeşitlilik düzeyinin bir sonucu olarak, Anadolu’da her geçen yıl çok sayıda yeni bitki türleri tanımlanarak bilim dünyasına kazandırılmaktadır (Özhatay, Byfield ve Atay, 2003:17). Ülkemiz, Orta Doğu ve Avrupa ülkeleri arasında hem toplam tür sayısı hem de endemik tür zenginliği bakımından öne çıkan bir ülke olup, bu durum; iklimsel, topoğrafik, jeolojik ve jeomorfolojik çeşitlilik; deniz, göl ve akarsu gibi farklı sucul habitatların varlığı; 0–5000 metre arasında değişen yükselti farkları; üç bitki coğrafyası bölgesinin kesişim noktasında yer alması ile Anadolu Diyagonalı’nın doğu ve batı arasında oluşturduğu ekolojik ve floristik farklılıkların bir sonucudur (Kaya ve Aksakal, 2005:85). Ülkemiz bitki çeşitliliği bakımından dünya üzerinde önemli bir merkez olarak kabul edilmektedir. Ülkemiz florası, yaklaşık %32’si endemik olan yaklaşık 12.000 vasküler bitki taksonundan oluşmaktadır (Güner vd., 2012). Angiospermiler arasında altıncı en büyük familya olan Lamiaceae, dünya genelinde yayılmış yaklaşık 230 cins ve 7000’den fazla tür içermektedir (Çalış, 2025:350). Boissier’in *Flora Orientalis*’inde, Lamiaceae familyasındaki 66 cinsi kapsayan

yaklaşık 1.100 tür belgelenmiştir. Bu rakamın, küresel olarak var olan toplam Lamiaceae türlerinin üçte birini temsil ettiği tahmin edilmektedir (Kaya, 2024:1219). Türkiye florasında tür çeşitliliği bakımından en zengin üçüncü familya olan Lamiaceae, ülkemizde 346'sı endemik olmak üzere toplamda 782 takson ile yaklaşık %44 oranında yüksek bir endemizm oranına sahiptir (Celep ve Dirmenci, 2017:14; Satıl ve Açar, 2020:66). Lamiaceae familyasının en büyük ve kozmopolit cinslerinden biri olan *Stachys* L. cinsi, dünya genelinde yaklaşık 370 tür ile temsil edilmekte olup, Türkiye'de kayıtlı toplamda 125 *Stachys* taksonu bulunmaktadır (Güner vd., 2023:98). Bu taksonların 64'ü endemik olup, bu da Türkiye'de *Stachys* cinsi için yaklaşık %53,3'lük bir endemizm oranına işaret etmektedir (Akçiçek ve Güner, 2022:257). Akdeniz ile Güneybatı Asya'nın ılıman bölgeleri, bu cinsin birincil yayılış alanını oluşturmakla birlikte söz konusu Türkiye olduğunda cins Akdeniz'de yaşamaya iyi adapte olmuştur (Bhattacharjee, 1980:65 ; Güner, 2022:624). Tür çeşitliliği açısından özellikle iki ana merkez öne çıkmaktadır: İlki; Güney ve Doğu Anadolu, Kafkasya, Kuzeybatı İran ve Kuzey Irak'ı kapsayan bölge olup ikincisi ise Balkan Yarımadası'dır. Cinsin türleri büyük ölçüde kayalık habitatlarda, özellikle de kireçtaşı kayalıklarında dağılım göstermektedir (Vundac, 2006:32; El Beyrouthy, 2009:515; Akçiçek, Fırat ve Güner, 2016:167).

### ***Stachys* L. CİNSİNİN FLORİSTİK ÖZELLİKLERİ**

*Stachys* cinsi tek veya çok yıllık otsu bitkiler, bazen tabanda çalimsı, nadiren bodur çalı şeklindedir. Tüy örtüsü genellikle basit, nadiren stellat veya dendroit formda olup yapraklar basit, saplı veya sapsızdır. Vertisillatlar 2–20 çiçek içermekte olup brakteoller bulunabilir veya bulunmayabilir. Pediseller mevcut veya mevcut değildir. Kaliks tüpsü veya çan şeklinde, 5–10 damarlı olup, hemen hemen iki dudaklı ile düzenli arası bir yapıda olup nadiren iki dudaklıdır. Dişler 5 adet olup genellikle eşit fakat bazen arka tarafta bulunan üç diş öndeki iki dişten farklıdır ve tabanda genişlemeyen formdadır. Korolla tübü kaliksin boyunu aşabilir, hemen hemen aynı seviyede olabilir veya hafifçe aşabilir; kaliksin içinde yer alabilir veya nadiren annulat olabilir. Korolla iki dudaklıdır; üst dudak içbükey, düz veya nadiren ikiye yarık olmakla birlikte emarginat, alt dudak ise üç lopludur. Korolla rengi kırmızı, pembe, sarı veya beyaz olabilir. Stamenler dört adet olup korolla tübünden çıkmıştır. Filamentler genellikle korolla tüpünün iç kısmından bağlanmakta ve az miktarda kabarık tüy içermektedir. Anterler 2 tekalıdır. Tekalar genellikle çatallı, bazen paralel veya paralele yakındır. Nutletler ters yumurtamsı veya dikdörtgensi, obovoitten oblonga kadar değişen ve bazen yassılaştırmış üç köşeli formdadır. Bu özellikler, *Stachys* türleri için tipik olup, bu türler hoş kokulu bitkiler olarak bilinmektedir (Bhattacharjee, 1982:199; Davis, 1982b:199; Akcicek vd.,2010; Akçiçek vd., 2015: 4; Güner, 2016: 3; Vundac, 2019:32).

## ENDEMİK *Stachys* TÜRLERİ İLE İLGİLİ YAPILAN ANTİMİKROBİYAL ÇALIŞMALAR

Doğal bitkisel preparatların antimikrobiyal ajan olarak kullanımı, özellikle antibiyotiklere karşı artan bakteri direnci bağlamında, terapötik bir alternatiftir (Benedec vd., 2023:1644). Bu doğrultuda, literatürde yer alan bazı çalışmalar, *Stachys* türlerinin genel olarak antimikrobiyal etki gösterdiğini ortaya koymaktadır. Güven ve ark. (2009:169) tarafından yapılan çalışmada, *Stachys aleurites* türünün de aralarında bulunduğu üç farklı bitki türünden, farklı polaritelere çözücüler (etil asetat, aseton vb.) kullanılarak elde edilen ekstraktların antimikrobiyal etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, disk difüzyon yöntemi ile 26 bakteri ve üç maya suşuna antimikrobiyal aktivite testleri uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda her üç bitki türüne ait etil asetat ve aseton ekstraktlarının, test edilen tüm mikroorganizmalar üzerinde çeşitli düzeylerde antimikrobiyal etki gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle *S. aleurites*'in etil asetat ekstraktları, diğer türlerle kıyaslandığında daha belirgin antimikrobiyal aktivite sergilemiş ve bu yönüyle yeni antimikrobiyal ajanların geliştirilmesi açısından potansiyel bir kaynak olarak değerlendirilmiştir. Bunun yanında, literatürde *Stachys* türlerinin antimikrobiyal özelliklerine yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Nitekim *S. pseudopinardii* yapraklarının etanol ekstraktı kullanılarak yapılan antimikrobiyal aktivite testlerinde, disk difüzyon yöntemi ile dört maya ve yedi bakteri suşu değerlendirilmiş olup, ekstrakt özellikle *Bacillus subtilis* suşuna karşı güçlü bir antimikrobiyal etki göstermiştir (Dulger ve Aki, 2009:371). Benzer şekilde, *S. cretica* subsp. *trapezuntica* ve *S. cretica* subsp. *lesbiaca* türlerinin uçucu yağlarının çeşitli bakteri ve mantarlara karşı etkinliğinin test edildiği bir diğer çalışmada, farklı polaritelere sahip çözücüler kullanılarak elde edilen ekstraktlar altı bakteri suşu ve *Candida albicans* maya türüne karşı antimikrobiyal aktiviteleri açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ekstraktlar antibakteriyel aktivite göstermemiş olup, hafif petrol eteri ve n-butanol ekstraksiyonları düşük düzeyde antifungal aktivite sergilediği rapor edilmiştir (Şerbetçi vd., 2010:1369). Yapılan bir başka araştırmada, yedisi endemik olmak üzere 22 farklı *Stachys* türünün uçucu yağları kimyasal olarak incelenmiş ve yağların antimikrobiyal aktiviteleri test edilmiş, toplamda 39 bileşik tespit edilmiştir. Uçucu yağlara bakıldığında, germakren-D ve  $\beta$ -karyofillen gibi seskiterpenlerin baskın olduğunu gözlemlenmiştir. Çalışmanın devamında uçucu yağlar ve bazı terpen bileşenlerin etkisi çeşitli bakteriler ve *C. albicans* üzerinde çalışılmıştır. Sonuçlar, *Stachys* türlerinin uçucu yağlarının genel olarak orta derecede antimikrobiyal etki gösterdiğini ortaya koymuş olup  $\beta$ -karyofillen ve  $\alpha$ -pinene gibi terpen hidrokarbonların nispeten daha güçlü antimikrobiyal aktivite gösterdiğini ortaya koymuştur. (Gören vd., 2011:448).

Uğur ve ark. (2013:201) tarafından yapılan çalışmada, *Stachys rupestris* ve *Stachys amanica* türlerine ait uçucu yağların antimikrobiyal

aktiviteleri, *in vitro* koşullarda kâğıt disk difüzyon yöntemi ile değeriendirilmiştir. Çalışmada, iki Gram-negatif ve altı Gram-pozitif standart test bakterisinin yanı sıra, dokuz çoklu ilaç dirençli bakteri suşu ile bir maya türü kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, her iki türün de uçucu yağları, Gram-negatif bakterilere kıyasla Gram-pozitif bakterilere karşı daha yüksek düzeyde antimikrobiyal aktivite sergilediğı ortaya konulmuştur. *S. rupestris* türünün uçucu yağlarının antimikrobiyal etkisinin çeşitli patojen maya ve bakteri suşlarına karşı *in vitro* koşullarda değeriendirildiğı başka bir araştırmada ise, antibakteriyel ve antikandidal aktivite testleri sonucunda, mono ve seskiterpenler bakımından zengin olan uçucu yağın özellikle patojen *Candida* türlerine karşı, bakterilere kıyasla daha güçlü bir etki gösterdiği bildirilmiştir (İşcan vd., 2015:41). Bir diğeri çalışmada, *Stachys pseudopinardii* türünün yapraklarından elde edilen etanol ekstraktının antibakteriyel ve antifungal aktiviteleri incelenmiş olup, ekstraktların *Enterococcus faecalis*, *Proteus mirabilis* ve *Candida albicans* gibi idrar yolu enfeksiyonu etkenlerine karşı güçlü antibakteriyel ve antifungal etki gösterdiğini ortaya koyulmuştur (Dülger ve Dülger, 2015:821).

Leblebici ve ark. (2016:18) tarafından yapılan çalışmada, Batı Anadolu'da yayılış gösteren altı endemik *Stachys* türünün yaprak ekstraktlarının Gram pozitif ve Gram negatif bakterilere karşı antimikrobiyal aktiviteleri değeriendirilmiştir. Farklı polariteye sahip çözücülerle hazırlanan ekstraktlar, disk difüzyon yöntemiyle test edilmiş olup, etanol ekstraktları en yüksek antimikrobiyal etkiyi göstermiştir. Yaprak ekstraktları, Gram pozitif bakterilere karşı daha etkili bulunmuştur. Özellikle *S. cretica* subsp. *tmolea* ekstraktlarının *Staphylococcus aureus*'a karşı, en güçlü antimikrobiyal etki gösterdiği ortaya konulmuştur. Bir başka çalışmada, *Stachys rupestris* uçucu yağının, *Escherichia coli*, *Acinetobacter baumannii*, *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Candida albicans* ve *C. tropicalis* mikroorganizmaları üzerine etkisi değeriendirilmiş olup, *S. rupestris* uçucu yağının özellikle Gram-pozitif bakterilere ve kandidalara karşı etkili olduğı gözlemlenmiştir (Erdoğan Eliuz vd., 2022:1749).

*Stachys* türlerinin antimikrobiyal potansiyeli, farklı araştırma grupları tarafından çeşitli çalışmalarla desteklenmektedir. Bu kapsamda, Bilgi vd. (2024:91) tarafından yürütölen güncel bir çalışmada, *Stachys tmolea* subsp. *tmolea*'ya ait metanol ekstraktlarının antimikrobiyal etkisi araştırılmış ve yapılan antimikrobiyal analizler sonucunda ekstraktların *Candida parapsilosis*, *C. glabrata* ve *Klebsiella pneumoniae*'ye karşı belirgin, *Escherichia coli* ve *Staphylococcus aureus*'a karşı ise sınırlı düzeyde etkili olduğı belirlenmiştir. Bu bulgular, daha önceki çalışmalarla da uyumlu bir tablo çizmektedir. Örneğın, Dulger ve Gonuz (2004:301) tarafından *Stachys sivasica*, *S. anamurensis* ve *S. cydni* türlerini kapsayan bir araştırmada, metanol ekstraktlarının antimikrobiyal aktiviteleri disk difüzyon yöntemiyle değeriendirilmiştir. Bu çalışmada, endemik *Stachys* türlerine ait ekstraktların

hem bakteri hem de maya türleri üzerindeki etkilerini incelemiş olup özellikle bakterilere karşı etkili olduğu tespit etmiştir.

Benzer şekilde, Dıǵrak ve ark. (2001:346) tarafından yapılan bir başka çalışmada, *Stachys annua* subsp. *annua* ve endemik *Stachys pumilia* bitkilerinin yaprak ve gövde parçaları kloroform ile Soxhlet ekstraksiyonu yöntemiyle ekstrakte edilmiş ve bu ekstraktlar disk difüzyon yöntemi kullanılarak bakteriler ve mantarlar üzerinde test edilmiştir. *S. pumilia* ekstraktı, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus brevis*, *Bacillus megaterium*, *Enterobacter aerogenes*, *Micrococcus luteus*, *Bacillus cereus* ve *Listeria monocytogenes* bakterileri üzerinde antimikrobiyal aktivite gösterirken *Candida albicans* ve *Candida tropicalis* gibi maya türleri üzerinde etkisiz kalmıştır. Ayrıca, Dulger ve ark. (2005:270) tarafından yapılan bir başka araştırmada, *Stachys aleurites* Boiss. & Heldr. ve *S. pinardii* Boiss. türlerinin topraküstü organlarından elde edilen metanol ekstraktlarının antimikrobiyal aktivitesi incelenmiştir. Bu çalışma da önceki bulguları destekler nitelikte olup her iki türün ekstraktları, bakterilere karşı etkili bulunmuş olup maya türlerine karşı aktivite göstermemiştir (Tablo 1).

Genel olarak, bu çalışmalar *Stachys* türlerinin antimikrobiyal potansiyelini ortaya koymakla birlikte, aktivite spektrumunun çalışılan türler ve mikroorganizmalar arasında farklılık gösterebileceğini de ortaya koymaktadır. Özellikle, *Stachys*'e ait birçok türde ekstraktların bakterilere karşı daha etkili olduğu görülürken, maya türlerine karşı sınırlı veya hiç etki göstermemesi de oldukça dikkat çekicidir.

## **ENDEMİK *Stachys* TÜRLERİNİN BİYOLOJİK AKTİVİTELERİ VE UÇUCU YAĞ İÇERİKLERİ**

*Stachys* cinsine ait türlerin uçucu yağları, zengin kimyasal bileşimleri ve potansiyel biyolojik aktiviteleri nedeniyle bilimsel araştırmaların odak noktası olmuştur. Birçok *Stachys* cinsine ait türler çeşitli kültürlerde geleneksel tıpta yaygın olarak kullanılmakta olup, özleri ve uçucu yağları, uçucu ve uçucu olmayan bileşikler açısından zengin ve karmaşık biyoaktif profillere sahiptir (Pashova vd., 2024:5345). Bu bağlamda, literatürde *Stachys* türlerinin uçucu yağ bileşimlerine ilişkin yapılan çalışmalar; bitkinin kimyasal çeşitliliği ve potansiyel biyolojik aktiviteleri hakkında kapsamlı bilgiler sunmaktadır.

Flamini ve ark. (2005:61) tarafından yapılan bir çalışmada, *Stachys aleurites* türünün toprak üstü kısımlarından hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilen uçucu yağın kimyasal içeriği Gaz Kromatografisi (GC) ve Gaz Kromatografisi / Elektron Darbeli Kütle Spektrometrisi (GC/EIMS) teknikleri kullanılarak analiz edilmiş ve bu analizler sonucunda toplam 51 farklı bileşik tespit edilmiştir. Ana bileşen grubunun seskiterpen hidrokarbonlar olduğu belirlenmiş olup bu grubu takiben,  $\beta$  karyofillen, bisiklogermakren ve germakren D başlıca bileşikler olarak öne çıkmıştır. En önemli monoterpen

ise  $\alpha$ -pinen tespit edilmiştir. Duman ve ark. (2005:48) tarafından yürütülen bir diğer araştırmada ise, *Stachys laetivirens*'in toprak üstü kısımlarından su buharı distilasyonu ile elde edilen uçucu yağın kimyasal yapısı GC ve GC/MS yöntemleriyle analiz edilmiş, analizler sonucunda 61 bileşik tanımlanmıştır. Uçucu yağın başlıca bileşenleri nonakosan ve fitol olarak belirlenmiştir.

Uçucu yağların kimyasal kompozisyonlarının yanı sıra, potansiyel biyolojik aktiviteleri de önemli bir araştırma alanıdır. Erdoğan ve ark. (2013:1637) tarafından yapılan kapsamlı bir çalışmada, *Stachys rupestris* ve *Salvia heldreichiana* türlerinden elde edilen uçucu yağların hem kimyasal bileşimi hem de biyolojik aktiviteleri incelenmiş, hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilen yağların GC ve GC-MS analizleri sonucunda, *S. rupestris* yağında diterpenoidlerin baskın bileşik grupları olduğu belirlenmiştir. Her iki türün uçucu yağları üç farklı insan kanser hücre hattı üzerinde test edilmiş olup bu testler sonucunda *S. rupestris* uçucu yağının özellikle PC-3 (prostat kanseri) ve MCF-7 (meme kanseri) hücre hatlarına karşı yüksek düzeyde antiproliferatif etki gösterdiği gözlemlenmiştir.

Özkan ve ark. (2006:172) tarafından yapılan çalışmada üç *Stachys* taksonunun (*S. pinardii*., *S. cretica* L. subsp. *mersinea* ve *S. aleurites*) uçucu yağ bileşenleri ile toplam fenolik içerikleri araştırılmıştır. Uçucu yağlar, bitkilerin çiçekli kısımlarından hidrodistilasyon yöntemi ile elde edilmiş ve uçucu yağ bileşenleri Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi (GC-MS) ile analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, *S. cretica* için  $\alpha$ -kurkumen; *S. pinardii* için cedrandiol ve karyofilen dioksit; *S. aleurites* için ise (Z)- $\beta$ -karyofilen başlıca uçucu bileşenler olarak saptanmıştır. Toplam fenolik içerik (TPC), Folin-Ciocalteu kalorimetrik yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar mg gallik asit eşdeğeri (GAE) kuru bitki olarak ifade edilmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde incelenen taksonlar arasında en yüksek toplam fenolik içeriğe sahip tür *S. cretica* subsp. *mersinea* olmuştur. Bu bağlamda, *Stachys* türlerinin fitokimyasal içeriğini ortaya koyan bir diğer önemli çalışma da Fakir ve ark. (2010:527) tarafından gerçekleştirilmiştir. *Stachys antalyensis*'in uçucu yağ bileşiminin belirlendiği bu araştırmada, toprak üstü kısımlarından hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilen uçucu yağ, GC-MS ile analiz edilmiştir. Analizler sonucunda 19 bileşen tanımlanmış olup, en baskın bileşikler bicyclogermacrene,  $\beta$ -karyofillen ve spathulenol olarak saptanmıştır. Sonuçlar, *S. antalyensis*'in uçucu yağının kimyasal bileşiminin esas olarak seskiterpenlerden oluştuğunu ortaya koymaktadır (Fakir vd., 2010:527). Bu bulgulara paralel olarak, Cellat ve ark. (2011:58) tarafından yapılan bir diğer çalışmada *Stachys rupestris*'in kimyasal karakterizasyonu araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, toprak üstü kısımlarından uçucu yağ, hidrodistilasyon ve subkritik su ekstraksiyonu yöntemleriyle elde edilmiş ve GC/MS ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda başlıca bileşenler olarak  $\alpha$ -pinen, vitamin A alkolü, ökaliptol ve terpinen-4-ol tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, *S. rupestris*'in zengin kimyasal içeriğiyle potansiyel farmakolojik etkilere sahip önemli bir tür olduğunu ortaya koymaktadır.

(Cellat vd., 2011:58). *Stachys rupestris* üzerine yapılan araştırmalar, kimyasal içeriğın ötesinde biyolojik aktivite potansiyelini de ortaya koymaktadır. Nitekim, Erdoğan ve ark. (2013:1637) tarafından yapılan bir çalışmada, *Stachys rupestris*'in uçucu yağı, hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilerek GC ve GC-MS teknikleriyle analiz edilmiş ve toplamda 22 bileşik tanımlanmıştır. Özellikle diterpenoid bileşikler açısından zengin olan bu uçucu yağ, kimyasal yapısıyla dikkat çekmektedir. Ayrıca, *in vitro* alışmalarda PC-3 (prostat kanseri) ve MCF-7 (meme kanseri) hücre hatlarına karşı anlamlı düzeyde antiproliferatif (büyümeıi durdurucu) aktivite göstermiştir (Erdoğan vd., 2013:1637).

*Stachys* cinsinin farklı türleri arasındaki kimyasal çeşitliliğın, coğrafi faktörlerle ilişkisi de önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, İlçim ve ark. (2014:49) tarafından yapılan çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerinden toplanan *Stachys amanica* ve *S. petrokosmos* bitkilerinden elde edilen uçucu yağların kimyasal bileşimi analiz edilmiştir. Uçucu yağlar, su buharı distilasyonu yöntemiyle çıkarılmış, yağların bileşenleri GC-MS ile tanımlanmış, miktarları ise Gaz Kromatografi Alev İyonlaşmalı Dedektör (GC-FID) ile belirlenmiştir. *S. amanica* türündeki baskın bileşikler  $\alpha$ -pinen,  $\beta$ -pinen ve  $\alpha$ -bisabolol; *S. petrokosmos* örneklerinde ise  $\alpha$ -pinen,  $\gamma$ -kurkumen,  $\alpha$ -zingiberen ve 16-kauren olarak gözlemlenmiştir. Her iki türde ortak bileşenler bulunmuş fakat baskın bileşiklerin oranları ve bileşim profili, toplandıkları coğrafi bölgelere göre önemli farklılıklar göstermiştir.

Bu zengin kimyasal içeriğın daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmassı ve türler arassı farklılıkların belirlenmesi amacıyla, *Stachys* cinsine ait farklı taksonların uçucu yağ bileşimleri üzerine yapılan araştırmalar yoğunluk kazanmaktadır. Bir diğerk çalışmada, üç *Stachys* türünden hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilen uçucu yağların kimyasal bileşimi, GC-FID ve GC-MS teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, *S. sericantha*'da hekzadekanoik asit, dodekanoik asit ve karyofilen oksit; *S. gaziantepeensis*'te  $\alpha$ -pinen ve  $\beta$ -pinen; *S. mardinensis*'te ise mentil asetat, izomenton, pulegon, spatulenol ve karyofilen oksitin başlıca bileşenler olduğı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, söz konusu türlerin uçucu yağ profillerinin birbirinden belirgin şekilde farklılaştığını ve bileşenlerin türlere özgü dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. şen ve ark. (2019:326) tarafından yapılan bir başka araştırmada, *Stachys subnuda* türünün toprak üstü kısımlarından hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilen uçucu yağ GC-MS analiz edilmiş ve yapılan analiz sonucunda 62 bileşen tanımlanmış olup, başlıca bileşiklerin fitol,  $\beta$ -karyofillen, germakren-D ve hekzadekanoik asit olduğı saptanmıştır.

Uçucu bileşenlerin elde edilmesinde farklı ekstraksiyon yöntemlerinin kullanılması, türlerin kimyasal profilini daha detaylı ortaya koymaktadır. Sarıkaya (2018:7) tarafından yapılan çalışmada, *Stachys cretica* subsp. *anatolica* bitkisinin uçucu bileşenleri incelenmiştir. Uçucu bileşenlerin analizi, SPME (Katı Faz Mikro Ekstraksiyonu) sonrası GC-MS ile yapılmıştır. Bitkinin topraküstü organları 25°C'de kurutulmuş, ardından 2 gram bitki

materyali 10 mL'lik vialde 60 °C'de 30 dakika ısıtılarak uçucular adsorbe edilmiştir. Bu bileşenler Shimadzu 2010 Plus GC-MS sistemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda toplam 58 uçucu bileşen tespit edilmiş; en baskın bileşikler sırasıyla germacrene-D,  $\beta$ -karyofillen ve (E)-2-heksenal olmuştur.

*Stachys cretica* subsp. *mersinaea* endemik taksonu ile yapılan bir başka çalışmada, *Stachys cretica* subsp. *mersinaea*'nın fenolik bileşik içeriği hem toplam düzeyde hem de bireysel bileşikler açısından detaylı olarak incelenmiştir. Toplam fenolik içerik (TPC), Folin-Ciocalteu yöntemi ile belirlenmiş ve sonuçlar mg GAE cinsinden ifade edilmiştir. En yüksek TPC değeri metanol ekstraktında ölçülmüş olup, bunu su ekstraktı takip etmiştir. TFC (Toplam flavonoid içeriği) ise alüminyum klorür ( $AlCl_3$ ) yöntemiyle tayin edilmiş ve en yüksek değer su ekstraktında elde edilmiştir. Ayrıca, bireysel fenolik bileşiklerin belirlenmesi için 23 standart bileşik kullanılarak ters fazlı yüksek performanslı sıvı kromatografi (RP-HPLC) analizi uygulanmış ve bu analiz sonucunda en bol bulunan fenolik bileşikler hesperidin, kersetin, kaempferol ve benzoik asit olarak tanımlanmıştır. Bulgular, özellikle metanol ve su ekstraktlarının fenolik bileşikler açısından zengin olduğunu göstermiştir (Bahadori vd., 2019:85).

Elfalleh ve ark. (2019:212) tarafından yapılan bir diğer çalışmada *Stachys tmolea*'nın toprak üstü kısımlarından elde edilen özütlerin fitokimyasal bileşimi ve antioksidan özellikleri değerlendirilmiştir. Su ve metanol özütleri, sırasıyla infüzyon ve ultrason destekli ekstraksiyon teknikleriyle hazırlanmıştır. Elde edilen özütlerde TPC e TFC içerikleri ölçülmüş; fenolik bileşikler LC-ESI-MS/MS yöntemiyle analiz edilmiştir. Her iki özütte toplam 20 fenolik bileşik tanımlanmış olup, en baskın bileşikler olarak verbaskosid, klorojenik asit, apigenin 7-glikozit ve 4-hidroksibenzoik asit tespit edilmiştir. Ayrıca metanolün bu bileşiklerin ekstraksiyonunda daha etkili bir çözücü olduğu bildirilmiştir (Elfalleh vd, 2019:212). Benzer şekilde, *Stachys tmolea* subsp. *tmolea* bitkisinin toprak üstü kısımlarından elde edilen uçucu yağ, hidrodistilasyon yöntemiyle ekstrakte edilerek heksan özütü elde edilmiş ve uçucu yağın bileşimi GC-FID ve GC-MS analizleriyle belirlenmiştir. Uçucu yağın başlıca bileşenleri arasında heksahidrofarnesil aseton, viridiflorol, heksadekanoik asit ve 9-geranil-p-cymene yer almıştır. Analiz sonucunda uçucu yağın kimyasal kompozisyonunun, daha önce yapılan çalışmalardan farklılık gösterdiği, bu farklılığın ise coğrafi bölge, hasat zamanı, toprak özellikleri ve iklim koşulları gibi çevresel faktörlerden kaynaklanabileceği belirtilmiştir (Demiray vd., 2019:799). Bununla birlikte, Kürkçüoğlu ve ark. (2021:53) tarafından yürütülen çalışmada *Stachys megalodonta* subsp. *mardinensis*'in uçucu yağ bileşenleri hidrodistilasyon yöntemi ile elde edilip GC ve GC/MS kullanılarak analiz edilmiştir. Toplamda 83 bileşik belirlenmiş ve başlıca bileşikler  $\alpha$ -pinen, germakren D ve 1,8-sineol olarak belirlenmiştir.

Lamiaceae familyasından endemik bir tür olan *Stachys cretica* subsp. *kutahyensis*'in fitokimyasal bileşiminin değerlendirildiği bir diğer çalışmada,

bitkinin toprak üstü kısımları su ve metanol kullanılarak ekstrakte edilmiş, ardından her iki özütteki fenolik bileşiklerin analizi LC–ESI–MS/MS yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. TPC ve TFC içerikleri sırasıyla Folin-Ciocalteu reaktifi ve alüminyum klorür yöntemi ile belirlenmiştir. Analizler sonucunda her iki özütte 26 fenolik bileşik tanımlanmış olup, klorojenik asit ve verbaskosid en baskın bileşikler olarak öne çıkmıştır. Bu baskın bileşiklerin metanol özütünde daha yüksek oranlarda bulunduğu bildirilmiştir (Benabderrahim vd., 2021:124). Benzer şekilde, Carev ve Sarıkürkçü (2021:1054) tarafından yürütülen çalışmada *Stachys cretica* subsp. *anatolica*'nın sulu ve metanol ekstraktları sıvı kromatografi-kütle spektrometresi (LC-MS/MS) yöntemiyle analiz edilmiş; ana bileşenler olarak klorojenik asit, apigenin-7-glikozit ve verbaskosid gibi polifenoller tespit edilmiştir. Her iki ekstrakt da güçlü antioksidan aktivite göstermiş olmakla birlikte, sulu ekstraktların daha yüksek biyolojik aktiviteye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca *Stachys rizeensis*'in toprak üstü kısımlarının etanol, metanol, su, etil asetat ve hekzan kullanılarak ekstrakte edildiği çalışmada, fenolik bileşikler sıvı kromatografi-kütle spektrometresi (LC-MS/MS) yöntemiyle analiz edilmiş olup toplam fenolik içerik Folin-Ciocalteu, flavonoid içeriği ise modifiye  $AlCl_3$  yöntemiyle belirlenmiştir. En yüksek toplam fenolik ve flavonoid içerikleri metanol ekstraktında gözlemlenmiş; toplam 20 fenolik bileşik tanımlanmış ve klorojenik asit, verbaskosid, luteolin ve kaempferol en yüksek miktarlarda bulunan bileşikler olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, metanolün en etkili çözücü olduğunu göstermiştir (Gerçek vd., 2022:19). Aksoy ve Demir (2022:1271) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise *Stachys tmolea* türünün metanol ve aseton ekstraktlarının toplam fenolik içerikleri, Folin–Ciocalteu yöntemiyle belirlenmiş; metanol ekstraktının fenolik içeriğinin aseton ekstraktından anlamlı derecede yüksek olduğu ve bu değerin sentetik antioksidan BHA'ya yakın seviyede bulunduğu raporlanmıştır.

*Stachys tundjeliensis* türünün toprak üstü kısımlarından hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilen uçucu yağ bileşenlerinin GC–MS ile analiz edildiği bir çalışmada 29 bileşen tespit edilmiş olup, en baskın bileşenlerin sırasıyla okaliptol, timol, 4-karvomethanol, d-piperiton, pinen ve terpineol olduğu bildirilmiştir (Yüce Babacan, 2022:563). Benzer şekilde, *Stachys buttleri* ve *Stachys pinardii* türlerinin toprak üstü kısımlarından hidrodistilasyon yöntemi kullanılarak elde edilen uçucu yağların kimyasal bileşimleri GC–MS analizi ile belirlenmiş; *S. buttleri* uçucu yağında 41 bileşik tespit edilirken ana bileşik kolavelool, *S. pinardii* yağında ise 33 bileşik tanımlanmış olup en baskın bileşiklerin trans-nerolidol ve geranyl- $\alpha$ -terpinene olduğu saptanmıştır. Her iki türden elde edilen uçucu yağların antikanser, antioksidan ve antidiyabetik aktiviteleri açısından değerlendirilmiş ve özellikle antikanser aktivitelerinin belirgin şekilde yüksek olduğu ortaya konmuştur (Üstüner vd., 2023:1502).

Emir ve ark. (2024:1504) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, iki endemik *Stachys* türünün uçucu yağlarının kimyasal profilleri ve biyolojik aktivitelerini incelemiştir. GC-MS analizleri sonucunda, *S. sivasica* türündeki başlıca bileşenlerin fitol ve 2-metil-1-penten; *S. cataonica*'da 16-kauren ve  $\alpha$ -bisabolol olduğu belirlenmiştir (Emir vd., 2024:1504). *Stachys annua* subsp. *cilicica*, bitkisinin çiçek ve yapraklarından elde edilen uçucu aroma bileşenleri Headspace Katı Faz Mikroekstraksiyon (HS-SPME) yöntemi ile GC-MS kullanılarak analiz edilmiştir. Örnekler 60°C'de 30 dakika bekletilmiş, uçucu bileşikler 75  $\mu$ m kalınlığında Carboxen/Polydimethylsiloxane (CAR/PDMS) kaplamalı fiber ile absorbe edilip, HS-SPME uyumlu GC-MS cihazına enjekte edilmiştir. Toplamda 37 uçucu bileşik tanımlanmış; başlıca bileşenler arasında  $\beta$ -pinen,  $\alpha$ -pinen, benzaldehit ve germakren-D yer almıştır. Monoterpen ve seskiterpen hidrokarbonların baskın kimyasal gruplar olduğu ortaya konmuştur (Sarıkaya vd., 2025). *Stachys cretica* subsp. *anatolica*'nın değerlendirildiği bir başka çalışmada LC-MS/MS analizi ile toplam 24 bileşik tanımlanmış; kinik asit ve klorojenik asit başlıca fenolik bileşikler olarak belirlenmiş, üsiranosid ve izoquercitrin ise orta düzeylerde bulunduğu ortaya konulmuştur (Bulut vd., 2025:1) (Tablo 1).

Bu çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, *Stachys* türlerinin hem fenolik içerikler hem de uçucu yağ bileşenleri bakımından oldukça zengin ve çeşitlilik gösteren fitokimyasal profillere sahip olduğu; kullanılan ekstraksiyon yöntemleri ile çözücü türlerinin, bitkinin fitokimyasal içeriğini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Ayrıca uçucu yağların antikanser, antioksidan ve antidiyabetik aktivite potansiyellerinin belirgin olduğu; fenolik bileşikler açısından ise çoğunlukla klorojenik asit ve verbaskosid gibi biyolojik açıdan önemli metabolitlerin öne çıktığı anlaşılmaktadır. Bu bulgular, *Stachys* türlerinin farmakolojik açıdan değer taşıyan önemli kaynaklar olduğunu göstermekte ve ileride yapılacak biyoyararlanım, mekanizma ve farmakolojik etkinlik çalışmalarına bilimsel temel oluşturmaktadır.

## ENDEMİK *Stachys* TÜRLERİNİN *IN VITRO* ÇOĞALTIMI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tıbbi açıdan önemli endemik bitkilerin korunmasında doku kültürü teknikleriyle çoğaltım, alternatif ve etkili bir strateji olarak öne çıkmakta; her bitki türüne özgü *in vitro* çoğaltım protokollerinin geliştirilip optimize edilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Akın, 2020:253; Işıksalan vd., 2020:911) (Tablo 1).

Bu bağlamda, çalışmada yer alan türlerden *Stachys cretica* subsp. *kutahyensis*'in mikroçoğaltımına yönelik literatürdeki ilk *in vitro* çoğaltım ve köklenme protokolü Akın ve ark. (2024:1653) tarafından geliştirilmiştir. Çalışmada en iyi sürgün gelişimi 2 mg/L 6-benzilaminopurin içeren ortamda elde edilirken, köklenmenin  $10^{-7}$  M juglon içeren modifiye MS ortamında

başarılı şekilde gerçekleştiği bildirilmiştir. Köklenen bitkiler adaptasyon aşamasının ardından başarılı bir şekilde toprağa aktarılmıştır. Bu yaklaşım, endemik, nadir ve nesilleri tehdit altındaki tıbbi bitki türlerinin korunmasına yönelik çalışmalar için önemli bir yöntemsel temel sunmaktadır.

## TARTIŞMA- SONUÇ

Bu derleme kapsamında, Türkiye’ de yayılış gösteren endemik *Stachys* cinsine ait türlerle yapılmış olan antimikrobiyal, uçucu yağ ve fenolik içerik analizleri ile in vitro çoğaltım çalışmalarına ilişkin güncel literatür incelenmiş ve bir araya getirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, farklı *Stachys* türlerinin zengin fitokimyasal bileşen profiline sahip olduğu ve özellikle uçucu yağ ile fenolik bileşiklerin güçlü antimikrobiyal aktivite gösterdiği gözlemlenmiştir. Çalışmaların materyal ve yöntemi ele alındığında, disk difüzyon tekniğinin yaygın olarak kullanılması ve çözücü ekstraktlarının çoğunlukla etanol ve metanol olduğu gözlemlenmektedir.

Antimikrobiyal etki çalışmalarına bakıldığında, literatürde yer alan çalışmalar, türler arasında antimikrobiyal etkinlik açısından birtakım farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. *Stachys aleurites*’in etil asetat ekstraktı (Güven vd., 2009:169) ve *S. pseudopinardii*’nin etanol ekstraktı (Dülger ve Aki, 2009:371) belirgin antibakteriyel aktivite sergilerken; *S. cretica* subsp. *smyrnaea*’nın uçucu yağı ve ana bileşeni trans- $\beta$ -karyofillen, hem bakterilere hem de mayalara karşı yüksek düzeyde antimikrobiyal etki göstermiştir (Gören vd., 2011:448). Benzer şekilde, *S. rupestris* ve *S. amanica* uçucu yağlarının özellikle Gram-pozitif bakterilere karşı etkili olduğu gözlemlenirken (Uğur vd., 2013:201), bir diğer çalışmada yine *S. rupestris*’in *Candida* türlerine karşı güçlü antikandidal etki sergilediği (İşcan vd., 2015:41) belirlenmiştir. *S. cretica* subsp. *lesbiaca* ve *S. cretica* subsp. *trapezuntica*’nın uçucu yağlarının antifungal etki göstermesine karşılık antibakteriyel aktiviteye sahip olmadığı (Şerbetçi vd., 2010:1369); *S. cretica* subsp. türlerinin *S. aureus*’a karşı yüksek etkinlik gösterdiği (Leblebici vd., 2016:18) ve *S. tmolea* subsp. *tmolea* metanol ekstraktlarının özellikle *Candida* türlerine karşı belirgin etki sergilediği (Bilgi vd., 2024:91) rapor edilmiştir. Antibakteriyel etki söz konusu olduğunda, uçucu yağlar özellikle *S. aureus* ve *Bacillus* türleri gibi Gram-pozitif türleri karşı daha belirgin antimikrobiyal etki gösterirken, Gram-negatif bakterilere karşı etkilerin genelde daha sınırlı olduğu belirtilmiştir (Leblebici vd., 2016:18; Uğur vd., 2013:201). Çalışma sonuçları, *Stachys* türlerinin antimikrobiyal aktivitesinin bitki türü, kullanılan bitki organı, ekstraksiyon yöntemi ve çözücü tipine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Uçucu yağ bileşeni ve fenolik içerik konulu çalışma sonuçları değerlendirildiğinde, yapılan çalışmalar, *Stachys* türlerinin uçucu yağ ve fenolik bileşik profillerinin tür, alt tür, coğrafi bölge, ekstraksiyon yöntemi gibi parametrelere bağlı olarak çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmaların materyal ve yöntemi ele alındığında, uçucu yağ analizinde en çok kullanılan yöntem en yaygın yöntem hidrodistilasyon ve GC-MS iken fenolik içerik analizleri ise Folin–Ciocalteu,  $AlCl_3$ , LC-MS/MS yöntemleriyle yapılmıştır. Çalışmalarda çözücü olarak aseton, etanol, etil asetat, hekzan, n-bütanol kullanılmış olup en çok biyolojik etkinlik metanol ve su ekstraktlarında (Bahadori vd., 2019:85) gözlemlenmiştir. Birçok türde uçucu yağların temel bileşenlerinin seskiterpenler (örn.  $\beta$ -karyofillen, germakren D, bisiklogermakren) olduğu gözlemlenirken (Flamini vd., 2005:61); bazı türlerde düz zincirli alkanlar (örn. nonakosan), fitol veya diterpenoidlerin baskın olduğu ortaya konulmuştur (Duman vd., 2005:48). Fenolik bileşik analizlerinde ise klorojenik asit, verbaskosid, hesperidin, kaempferol ve apigenin türevleri birçok türde ortak ve baskın bileşikler olarak öne çıkmıştır. Biyolojik aktivite çalışmalarında çoğu *Stachys* türünün antioksidan kapasite, antikanser ve kısmen antimikrobiyal etkiler gösterdiği; bazı türlerin ise özellikle belirli kanser hücre hatlarına karşı anlamlı antiproliferatif aktiviteye sahip olduğu bildirilmiştir (Üstüner vd., 2023:1502). Bu bulgular, *Stachys* türlerinin zengin kimyasal çeşitliliği ve biyolojik aktiviteleri sayesinde farmakolojik açıdan potansiyel değerlere sahip önemli bitkiler olduğunu göstermektedir.

*S. cretica* subsp. *kutahyensis*'in mikroçoğaltımı için geliştirilen *in vitro* protokolde bitkinin hızlı ve verimli bir şekilde çoğaltımını sağlamış olup ayrıca bitkinin köklenme sonrası adaptasyonu da başarıyla tamamlanmıştır (Akın vd., 2024:1653). Bu yöntem, endemik ve nesli tehlike altında olan tıbbi bitki türlerinin korunmasında ve sürdürülebilirliğinde önemli bir strateji olarak görülmektedir. Geliştirilen protokol, özellikle bitkinin doğal popülasyonlarının azalmasını önlemeye ve gelecekteki farmakolojik araştırmalar için güvenilir bitki materyali temin etmeye olanak sağlamaktadır (Akın 2020:253; Işıkalın vd., 2020:911; Akın vd., 2024:1653).

Sonuç olarak, endemik *Stachys* türleri zengin uçucu yağ profilleri, güçlü antimikrobiyal etkileri ve biyolojik aktiviteleri ile önemli bir farmakolojik potansiyele sahip olup, *in vitro* çoğaltım yöntemleriyle korunmaları ve sürdürülebilir şekilde çoğaltılabilmeleri mümkündür. Bununla birlikte, bu türlerin kimyasal bileşimleri, biyolojik aktiviteleri ve çoğaltım tekniklerine ilişkin mevcut bilgiler oldukça sınırlı düzeydedir. Tıbbi açıdan yüksek değere sahip *Stachys* türlerinin biyoteknolojik ve farmakolojik potansiyelinin daha kapsamlı biçimde ortaya konulabilmesi için sistematik, çok yönlü ve ileri düzey araştırmalara ihtiyaç olduğu açıktır.

Tablo 1: Endemik *Stachys* Türlerinin Yayılış Alanları ve Çalışılan Konular

| Tür/Bitki Organı                                                                                                        | Bölge                         | Çalışma Konusu                                                                                                  | Referans                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <i>S. aleurites</i> Boiss. & Heldr.<br>(tohum; gövde, yaprak, çiçek ve meyve ekstraktları; çiçekli topraküstü organlar) | Antalya                       | Uçucu yağ bileşeni ve fenolik içerik/<br>Antimikrobiyal aktivite/Uçucu yağ bileşeni/<br>Antimikrobiyal aktivite | Özkan vd., 2006<br>Güven vd., 2009<br>Flamini vd., 2005<br>Dulger vd., 2005 |
| <i>S. amanica</i> P. H. Davis<br>(topraküstü organlar)                                                                  | Adana                         | Uçucu yağ bileşenlerinin antimikrobiyal aktivitesi/ Uçucu yağ bileşeni                                          | Uğur vd., 2013<br>İlçim vd., 2014                                           |
| <i>S. anamurensis</i> Sumbul<br>(topraküstü organlar)                                                                   | Adana                         | Antimikrobiyal aktivite                                                                                         | Dulger ve Gonuz, 2004                                                       |
| <i>S. antalyensis</i> Ayaşlıgil & P. H. Davis (topraküstü organlar)                                                     | Antalya                       | Uçucu yağ bileşeni                                                                                              | Fakir vd., 2010                                                             |
| <i>S. annua</i> subsp. <i>cilicica</i> (Boiss.) R. Bhattacharjee<br>(yaprak ekstraktı; topraküstü organlar)             | Batı ve Orta Karadeniz, Adana | Antimikrobiyal aktivite/<br>Uçucu yağ bileşeni                                                                  | Leblebici vd., 2016<br>Sankaya vd., 2025                                    |
| <i>S. bayburtensis</i> R. Bhattacharjee & Hub.-Mor. (topraküstü organlar)                                               | Doğu Karadeniz                | Uçucu yağ bileşenlerinin antimikrobiyal etkisi                                                                  | Gören vd., 2011                                                             |
| <i>S. butleri</i> R.R.Mill<br>(topraküstü organlar)                                                                     | Antalya                       | Uçucu yağ bileşenlerinin antikanser, antidiyabetik ve antioksidan aktivitesi                                    | Üstüner vd., 2023                                                           |
| <i>S. cataonica</i> R. Bhattacharjee & Hub. Mor. (topraküstü organlar)                                                  | Yukarı Fırat                  | Uçucu yağ bileşeni                                                                                              | Emir vd., 2024                                                              |

|                                                                                                                            |                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>S. cretica</i> subsp. <i>anatolica</i><br>Rech.f.<br>(yaprak, çiçek ve tohum; yaprak<br>ekstraktı; topraküstü organlar) | Adana, Antalya, Asıl<br>ve İç Batı Ege,<br>Ergene, Yukarı Fırat,<br>Batı ve Doğu<br>Karadeniz, Orta ve<br>Yukarı Kızılırmak,<br>Konya, Yukarı<br>Sakarya | Antimikrobiyal<br>aktivite/<br>Antimikrobiyal<br>aktivite/<br>Fenolik İçerik/Uçucu<br>yağ bileşeni/Yağ<br>Bileşimi ve Fatty<br>Asit/Fenolik içerik | Benli vd., 2004<br>Leblebici vd., 2016<br>Carev ve<br>Sarıkürkçü, 2021<br>Sarıkaya vd., 2018<br>Özkan vd., 2018<br>Bulut vd., 2025 |
| <i>S. cretica</i> subsp. <i>kutahyensis</i><br>(topraküstü organlar; sürgün<br>ucu eksplantı)                              | İç Batı Anadolu                                                                                                                                          | Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal etkisi;<br>Fenolik içerik;<br>Mikroçoğaltım                                                          | Gören vd., 2011<br>Benabderrahim vd.,<br>2021<br>Akın vd., 2024                                                                    |
| <i>S. cretica</i> subsp. <i>mersinaea</i><br>(Boiss.) Rech.f. (topraküstü<br>organlar)                                     | Adana, Antalya,<br>Konya, Orta Fırat ve<br>Orta Kızılırmak                                                                                               | Uçucu yağ bileşeni ve<br>fenolik içerik/<br>Farmakolojik<br>aktiviteleri                                                                           | Özkan vd., 2006<br>Bahadori vd., 2019                                                                                              |
| <i>S. cretica</i> subsp. <i>trapezuntica</i><br>Rech. Fil (topraküstü organlar)                                            | Doğu Karadeniz                                                                                                                                           | Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal ve<br>sitotoksik aktiviteleri                                                                        | Şerbetçi vd., 2010                                                                                                                 |
| <i>S. cydni</i> Kotschy ex Gemici &<br>Leblebici (topraküstü organlar)                                                     | Adana                                                                                                                                                    | Antimikrobiyal<br>aktivite                                                                                                                         | Dülger ve Gönüz,<br>2004                                                                                                           |
| <i>S. gaziantepeensis</i> Dinç & Doğu<br>(topraküstü organlar)                                                             | Güneydoğu Anadolu                                                                                                                                        | Uçucu yağ bileşeni                                                                                                                                 | Kaya vd., 2017                                                                                                                     |
| <i>S. huber-morathii</i> R.<br>Bhattacharjee (topraküstü<br>organlar)                                                      | Orta Karadeniz, Orta<br>Kızılırmak                                                                                                                       | Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal etkisi                                                                                               | Gören vd., 2011                                                                                                                    |
| <i>S. huetii</i> Boiss.<br>(topraküstü organlar)                                                                           | Erzurum-Kars                                                                                                                                             | Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal etkisi                                                                                               | Gören vd., 2011                                                                                                                    |
| <i>S. iberica</i> subsp. <i>iberica</i> var.<br><i>densipilosa</i> R. Bhattacharjee<br>(yaprak ekstraktı)                  | Antalya, Batı ve Orta<br>Karadeniz, Konya ve<br>Yukarı Sakarya                                                                                           | Antimikrobiyal<br>aktivite                                                                                                                         | Leblebici vd., 2016                                                                                                                |
| <i>S. laetivirens</i> Kotschy & Boiss.<br>ex Rech. fil. (topraküstü<br>organlar)                                           | Doğu Karadeniz,<br>Yukarı Kızılırmak,<br>Yukarı Fırat                                                                                                    | Uçucu yağ bileşeni                                                                                                                                 | Duman vd., 2005                                                                                                                    |

|                                                                                                                                    |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>S. megalodonta</i><br>Hausskn. & Bornm. ex P. H.<br>Davis subsp. <i>ardinensis</i> R.<br>Bhattacharjee (topraküstü<br>organlar) | Yukarı Fırat,<br>Hakkari, Dicle | Uçucu yağ bileşeni                                                                                                                                                                                                                                                | Kürkçüoğlu vd.,<br>2021                                                                                  |
| <i>S. petrokosmos</i> Rech.f.<br>(topraküstü organlar)                                                                             | Adana                           | Uçucu yağ bileşeni                                                                                                                                                                                                                                                | İlçim vd., 2014                                                                                          |
| <i>S. pinardii</i> Boiss.<br>(topraküstü organlar)                                                                                 | Antalya                         | Antimikrobiyal<br>Aktivite<br>Uçucu yağ bileşeni ve<br>fenolik içerik/<br>Antimikrobiyal<br>aktivite/<br>Uçucu yağlarının<br>antikanser,<br>antidiyabetik ve<br>antioksidan aktiviteleri                                                                          | Dülger vd., 2005<br>Özkan vd., 2006<br>Üstüner vd., 2023                                                 |
| <i>S. pseudopinardii</i> R.<br>Bhattacharjee & Hub.-Mor.<br>(yaprak ekstraktı)                                                     | Adana                           | Antimikrobiyal<br>aktivite                                                                                                                                                                                                                                        | Dülger ve Aki,<br>2009<br>Dülger ve Dülger,<br>2015                                                      |
| <i>S. pumilia</i> Banks & Sol<br>(gövde ve yaprak)                                                                                 | Adana ve Orta<br>Fırat          | Antimikrobiyal<br>aktivite                                                                                                                                                                                                                                        | Dıǧrak vd., 2001                                                                                         |
| <i>S. rizeensis</i> R. Bhattacharjee<br>(topraküstü organlar)                                                                      | Doğu Karadeniz                  | Fitokimyasal profil                                                                                                                                                                                                                                               | Gerçek vd., 2022                                                                                         |
| <i>S. rupestris</i> Montbret & Aucher<br>ex Benth.<br>(topraküstü organlar)                                                        | Adana                           | Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal<br>aktivitesi/ Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal<br>aktivitesi/Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal<br>aktivitesi/ Uçucu yağ<br>bileşeni/ Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal etkisi | Erdoğan vd., 2013<br>Uğur vd., 2013<br>İşcan vd., 2015<br>Cellat vd., 2011<br>Erdoğan-Eliuz vd.,<br>2022 |
| <i>S. sericantha</i> P. H. Davis<br>(topraküstü organlar)                                                                          | Adana                           | Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal etkisi<br>Uçucu yağ bileşeni                                                                                                                                                                                        | Gören vd., 2011<br>Kaya vd., 2017                                                                        |

|                                                                                                                    |                                                                                                                              |                                                                                                                                |                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>S. setifera</i> subsp. <i>lycia</i> (Gand.)<br>R. Bhattacharjee<br>(yaprak ekstraktı)                           | Antalya, Batı ve Orta<br>Karadeniz, İç Batı<br>Anadolu, Orta<br>Kızılırmak, Orta<br>Fırat, Yukarı Fırat ve<br>Yukarı Sakarya | Antimikrobiyal<br>Aktivite                                                                                                     | Leblebici vd., 2016                                                                      |
| <i>S. sivasica</i> Kit Tan & Yıldız<br>(topraküstü organlar)                                                       | Yukarı Kızılırmak                                                                                                            | Uçucu yağ bileşeni<br>/Antimikrobiyal<br>aktivite                                                                              | Emir vd., 2024<br>Dülger ve Gonuz,<br>2004                                               |
| <i>S. sosnowskyi</i> Kopell.<br>(yaprak ekstraktı)                                                                 | Erzurum-Kars                                                                                                                 | Antimikrobiyal<br>Aktivite                                                                                                     | Leblebici vd., 2016                                                                      |
| <i>S. subnuda</i> Montbret & Aucher<br>ex Benth. (topraküstü organlar)                                             | Hakkari ve Yukarı<br>Murat-Van                                                                                               | Uçucu yağ bileşeni                                                                                                             | Şen vd.,2019                                                                             |
| <i>S. tmolea</i> Boiss. (topraküstü<br>organlar; topraküstü organlar;<br>yaprak ekstraktı; topraküstü<br>organlar) | Asıl Ege, Güney<br>Marmara, İç Batı<br>Anadolu ve Yukarı<br>Sakarya                                                          | Uçucu yağ<br>bileşenlerinin<br>antimikrobiyal etkisi;<br>Fitokimyasal profil;<br>Antimikrobiyal<br>Aktivite;<br>Fenolik İçerik | Gören vd., 2011<br>Elfalleh vd., 2019.<br>Leblebici vd., 2016<br>Aksoy ve Demir,<br>2022 |
| <i>S. tmolea</i> Boiss. subsp. <i>tmolea</i><br>(topraküstü organlar; yaprak ve<br>sap)                            | Akdeniz                                                                                                                      | Uçucu yağ bileşeni<br>Antimikrobiyal<br>Aktivite                                                                               | Demiray vd., 2019<br>Bilgi vd., 2024                                                     |
| <i>S. tundjeliensis</i> Kit Tan &<br>Sorger (topraküstü organlar)                                                  | Yukarı Fırat                                                                                                                 | Uçucu yağ bileşeni                                                                                                             | Yüce Babacan,<br>2022                                                                    |

## REFERANSLAR

- Akçiçek, E., Dirmenci, T., Kılıç, T., Çelenk, S. ve Dündar, E. (2015). Türkiye'de Yetişen *Stachys* L. (Setifolia, *Stachys*, *Fragilicaulis* ve *Olisia* Seksiyonları) (Lamiaceae) Türlerinin Taksonomik Revizyonu
- Akcicek, E., Dündar, E. ve Çelenk, S. (2010). Türkiye'de yetişen *Stachys* L. cinsi *Eriostomum* (Hoffmanns.& Link) Dumort. (Lamiaceae) seksiyonu revizyonu.
- Akçiçek, E. & Güner, Ö. (2022). A new subspecies of *Stachys cretica* (Lamiaceae) from western Turkey. *Phytotaxa*, 539(3), 257–264.
- Akçiçek, E., Fırat, M. ve Güner, Ö. (2016). *Stachys hakkariensis* (Lamiaceae), a new species from eastern Anatolia (Turkey) belonging to *Stachys* sect. *Olisia*. *Phytotaxa*, 257(2), 167–173.
- Akın, B. (2020). Tissue culture techniques of medicinal ve aromatic plants: History, cultivation and micropropagation. *Journal of Scientific Reports – A*, 45, 253–266.
- Akın, B., Bingöl, N.A. ve Bulman, G.C. (2024). A first approach for the micropropagation of threatened endemic subspecies of *Stachys cretica* subsp. *kutahyensis*. *Biologia*, 79, 1653–1661.
- Aksoy, L., & Demir, S. (2022). Total Phenolic Content, Antioxidant Properties and Element Concentrations of Methanol and Acetone Extracts of *Stachys tmolea* Boiss. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 1271-1278.
- Anderson, S. (1994). Area and endemism. *The Quarterly Review of Biology*, 69, 451–471.
- Bahadori, M. B., Kirkan, B., Sarikurcu, C., ve Ceylan, O. (2019). Metabolite profiling and health benefits of *Stachys cretica* subsp. *mersinaea* as a medicinal food. *Industrial Crops and Products*, 131, 85–89.
- Baytop, T. (1999). *Türkiye'de Bitkiler ile Tedavi*. İstanbul: Nobel Tıp Kitabevleri.
- Benabderrahim, M. A., Sarikurcu, C., Elfalleh, W., Ozer, M. S., ve Ceylan, O. (2021). Phenolic composition and biological activities of Turkish endemic plant: *Stachys cretica* subsp. *kutahyensis*. *South African Journal of Botany*, 138, 124–128.
- Benedec, D., Oniga, I., Hanganu, D., Tiperciuc, B., Nistor, A., Vlase, A.-M., Vlase, L., Pușcaș, C., Duma, M., Login, C. C., Niculae, M., ve Silaghi Dumitrescu, R. (2023). *Stachys* Species: Comparative Evaluation of Phenolic Profile and Antimicrobial and Antioxidant Potential. *Antibiotics*, 12(11), 1644.
- Benli, M., Güney, K., Bingöl, Ü., Geven, F. ve Yiğit, N. (2007). Antimicrobial activity of some endemic plant species from Turkey. *African Journal of Biotechnology*, 6(15), 1774-1778.
- Bhattacharjee R (1980). Taxonomic studies in *Stachys* II: A new infrageneric classification of *Stachys* L. *Notes Royal Bot. Garden Edinburgh* 38, 65-96.
- Bhattacharjee, R., (1982). Flora of Turkey and the East Aegean Islands, *Stachys* L, 7, 199-262.
- Bilgi, Ç., Demiray, H., ve Kaplan, E. (2024). Evaluation of Antimicrobial Effects of Some Plant Species Growing in Türkiye: *Verbascum lydium* Boiss. var. *lydium* Boiss., *Euphorbia anacampseros* Boiss. var. *tmolea* M.S. Khan., *Rosa pisiformis* subsp. *pisiformis* (Christ) D. Sosn., *Stachys tmolea* Boiss. subsp. *tmolea* and *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 17(1), 91-99.

- Bulut, S., Toslak, R., Muhammed, M. T., Kahraman, A., ve Yilmaz, M. A. (2025). Antioxidant, antidiabetic, and antiobesity properties of *Stachys cretica* subsp. *anatolica* and its LC-MS/MS analysis: In vitro and in silico studies. *Chemistry & Biodiversity*, 30, 1-14.
- Carev, I., & Sarikurkcu, C. (2021). LC-MS/MS Profiles and In Vitro Biological Activities of Extracts of an Endemic Species from Turkey: *Stachys cretica* ssp. *anatolica*. *Plants*, 10(6), 1054.
- Celep, F., & Dirmenci, T. (2017). Systematic and biogeographic overview of Lamiaceae in Turkey. *Natural Volatiles and Essential Oils*, 4(4), 14-27.
- Cellat, K., Gül, Ş., ve Everest, A. (2011). Mersin'deki *Stachys Rupestris* Montbret Et Aucher Ex Bentham Türünün Eterik Yağ İçeriğinin Araştırılması. *Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi*, 58.
- Çalış, İ. (2025). A mini review on the chemodiversity of Lamiaceae plants that are native to Türkiye and Turkish Republic of Northern Cyprus. *Records of Natural Products*, 19(SI), 350–374.
- Davis P.H (1982b). *Stachys* L. In: Flora of Turkey and the East Aegean Islands (ss. 199-261). Edinburgh: University Press.
- Demiray, H., Tabanca, N., Estep, A. S., Becnel, J. J., ve Demirci, B. (2019). Chemical composition of the essential oil and n-hexane extract of *Stachys tmolea* subsp. *tmolea* Boiss., an endemic species of Turkey, and their mosquitocidal activity against dengue vector *Aedes aegypti*. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 27(6), 799–804.
- Dığrak, M., Alma, M.H., ve İlçim, A. (2001). Antibacterial and Antifungal Activities of Turkish Medicinal Plants. *Pharmaceutical Biology*, 39(5), 346–350.
- Dulger, B., Ugurlu, E., Aki, C., Suerdem, T. B., Camdeviren, A., ve Tazeler, G. (2005). Evaluation of antimicrobial activity of some endemic *Verbascum*, *Sideritis* and *Stachys* species from Turkey. *Pharmaceutical Biology*, 43, 270–274.
- Dulger, B. & Gonuz, A. (2004). Bazı Endemik *Verbascum*, *Salvia* ve *Stachys* Türlerinin Antimikrobiyal Aktivitesi. *Farmasötik Biyoloji*, 42 (4–5), 301–304.
- Dulger, G., & Aki, C. (2009). Antimicrobial activity of the leaves of endemic *Stachys pseudopinardii* in Turkey. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 8(4), 371–375.
- Dulger, G., & Dulger, B. (2015). Antimicrobial potential of the leaves of *Stachys pseudopinardii* on microorganisms isolated from urinary tract infections. *British Journal of Medicine & Medical Research*, 7(10), 821–826.
- Duman, H., Kartal, M., Altun, L., Demirci, B. ve Başer, K.H.C. (2005), The essential oil of *Stachys laetivirens* Kotschy & Boiss. ex Rech. fil., endemic in Turkey. *Flavour and Fragrance Journal*, 20, 48-50.
- El Beyrouthy, M. (2009). Contribution à l'ethnopharmacologie libanaise et aux Lamiaceae du Liban. *Acta Botanica Gallica*, 156(3), 515-521.
- Elfalleh, W., Kirkan, B., ve Sarikurkcu, C. (2019). Antioxidant potential and phenolic composition of extracts from *Stachys tmolea*: An endemic plant from Turkey. *Industrial Crops and Products*, 127, 212–216.
- Emir, C., Yıldırım Buharaloğlu, G., İlhan, R., Yıldırım, H., ve Emir, A. (2024). Chemical profiles and biological activities of essential oils from two endemic species: *Stachys sivasica* Kit Tan & Yıldız and *Stachys cataonica* R.

- Bhattacharjee & Hub. *Mor. Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 27(6), 1504–1515.
- Erdogan, E. A., Everest, A., De Martino, L., Mancini, E., Festa, M., ve De Feo, V. (2013). Chemical composition and in vitro cytotoxic activity of the essential oils of *Stachys rupestris* and *Salvia heldreichiana*, two endemic plants of Turkey. *Natural Product Communications*, 8(11), 1637–1640.
- Erdoğan Eliuz, E. A., Everest, A., ve Serin, M. S. (2022). Antimicrobial activity of *Stachys rupestris* Montbret et Aucher ex Benth. and inactivation of the pathogens inoculated on lab-made skin by the essential oil. *International Journal of Environmental Health Research*, 33(12), 1749–1759.
- Fakir, H., Yaşar, S., & Erbaş, S. (2010). Essential Oil Composition of *Stachys antalyensis* Y. Ayasligil and PH Davis Described Endemic Species from Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, 22, 527-530.
- Flamini, G., Cioni, P. L., Morelli, I., Çelik, S., Gokturk, R. S., ve Unal, Ö. (2005). Essential oil of *Stachys aleurites* from Turkey. *Biochemical Systematics and Ecology*, 33(1), 61–66.
- Gerçek, Y. C., Şahin, A. A., Bayram, N. E., Çelik, S., Sefalı, A., Gıdık, B., Öz, G. C., ve Pınar, N. M. (2022). Anatomy, trichome micromorphology and phytochemical profile of *Stachys rizeensis* R. Bhattacharjee from Turkey. *South African Journal of Botany*, 149, 19-28.
- Gören, A. C., Piozzi, F., Akcicek, E., Kılıç, T., Çarıkçı, S., Mozioğlu, E., ve Setzer, W. N. (2011). Essential oil composition of twenty-two *Stachys* species (mountain tea) and their biological activities. *Phytochemistry Letters*, 4(4), 448–453.
- Güven, K., Karabacak, E., Celik, S., & Uysal, İ. (2009). Antimicrobial Activity of *Centaurea derderiifolia*, *Stachys aleurites* and *Anthemis aciphylla*. *Journal of Applied Biological Sciences*, 3(2), 169-174.
- Güner, A., Aslan, S., Ekim, T., Vural, M., ve Babaç, M. T. (2012). *Türkiye bitkileri listesi (Damarlı bitkiler)* (Flora Dizisi, No. 1). Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayını. İstanbul
- Güner, Ö. (2016). *Türkiye’de yetişen Stachys L. (Lamiaceae) cinsine ait Fragilicaulis R. Bhattacharjee sekiyonunun taksonomik revizyonu ve moleküler filogenetik analizi* (Yüksek lisans tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güner, Ö. (2022). *Stachys istanbulensis* (Lamiaceae) Türkiye’den yeni bir tür: morfolojik, mikromorfolojik ve moleküler analizlerden elde edilen kanıtlar. *Turkish Journal of Botany*, 46, 624–635.
- Güner, Ö., Özdöl, T., ve Yıldırım, H. (2023). A New Rupicolous Species from West of Türkiye: *Stachys cuhacioglu* (Lamiaceae). *Türler ve Habitatlar*, 4(2), 98-109.
- Ilçim, A., Alma, M. H., & Karaogul, E. (2014). Investigation of Volatile Constituents in *Stachys amanica* P.H. Davis and *S. petrokosmos* Rech. fil. Collected in Different Regions of Turkey. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 17(1), 49–55.
- İşıkalın, Ç., Orcan, P., Akbaş, F., Namli, S., Kuru, İ. S., ve Buluş, Ş. (2020). Effect of cytokinins on in vitro propagation of *Ajuga xylorrhiza* Kit Tan (critically endangered), endemic to Turkey. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 56, 911–914.
- İşcan, G., Köse, Y. B., ve Demirci, B. (2015). *Stachys rupestris* (Lamiaceae)’in uçucu yağ bileşimi ve antimikrobiyal etkileri. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi C - Yaşam Bilimleri ve Biyoteknoloji*, 4(1), 41–47.

- Kaya, A. (2024). Lamiaceae Familyasının Tüy Morfolojisi. *Journal of Faculty of Pharmacy of Ankara University*, 48(3), 1219-1235.
- Kaya, A., Demirci, B., Doğu, S., ve Dinç, M. (2017). Composition of the essential oil of *Stachys sericantha*, *S. gaziantepeensis*, and *S. mardinensis* (Lamiaceae) from Turkey. *International Journal of Food Properties*, 20(11), 2639–2644.
- Kaya, Y., & Aksakal, Ö. (2005). Endemik Bitkilerin Dünya ve Türkiye’deki Dağılımı. *Erzincan Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 7(1), 85-99.
- Kemer, Ç., Akın, M., ve Taner Saraçoğlu, H. (2022). Lamiaceae Familyasına Mensup Bazı Baharat Bitkilerinin Antimikrobiyal Etkilerinin Belirlenmesi. *Selcuk University Journal of Science Faculty*, 48(1), 19-24.
- Küçük, S., Kayalar, E., Kürkçüoğlu, M., ve Eröz-Poyraz, İ. (2021). Edremit-Akçay (Balıkesir-Türkiye) semt pazarlarında halk ilacı olarak satılan Lamiaceae familyasına ait bazı tıbbi ve aromatik bitkilerin yöresel isimleri ve uçucu yağ bileşikleri. *Biological Diversity and Conservation*, 14(3), 372–379.
- Kürkçüoğlu, M., Küçük, S., Kürşat, M., ve Başer, K. H. C. (2021). Essential oil composition and anatomical characteristics of *Stachys megalodonta* Hausskn. & Bornm. ex P. H. Davis subsp. *mardinensis* R. Bhattacharjee endemic in Turkey. *Annals of Phytomedicine: An International Journal*, 10(2), 53–58.
- Leblebici, S., Kaygusuz, Ö., Korkmaz, T., ve Darcan, C. (2016). The antimicrobial activities of the leaves of some endemic *Stachys* species spreading in West Anatolia, Turkey. *Mitteilungen Klosterneuburg*, 66(6), 18-28.
- Özhatay, N., Byfield, A., ve Atay, S. (2003). *Türkiye’nin 122 Önemli Bitki Alanı* (1. Baskı). İstanbul: WWF Doğal Hayatı Koruma Derneği, (DHKD).
- Özkan, G., Göktürk, RS., Ünal, O., ve Çelik, S. (2006). Türkiye'deki bazı endemik *Stachys* taksonlarının uçucu bileşenlerinin ve toplam fenolik içeriklerinin belirlenmesi. *Chemistry of Natural Compounds*, 42, 172–174.
- Pashova, S., Karcheva-Bahchevanska, D., Ivanov, K., ve Ivanova, S. (2024). Genus *Stachys*-Phytochemistry, Traditional Medicinal Uses, and Future Perspectives. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 29(22), 5345.
- Sarıkaya, A. G. (2018). Volatile components of *Stachys cretica* subsp. *anatolica* Rech. F., Ann. in Koçtepe province of Isparta, Turkey. *Reserach Journal of Agricultural Sciences*, 11(1), 7-9.
- Sarıkaya, A. G., Malkoç, E., ve Arslan, M. (2025). Volatile aroma components of the endemic *Stachys annua* subsp. *cilicica* (Boiss.) R. Bhattacharjee naturally distributed in Bilecik, Türkiye. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 6(2), 1637–1641.
- Satıl, F., & Açar, M. (2020). Ethnobotanical use of *Stachys* L.(Lamiaceae) taxa in Turkey. *International Journal of Nature and Life Sciences*, 4(2), 66-86.
- Sen, A., Kurkuoğlu, M., Bitis, L., Dogan, A., ve Baser, K. H. C. (2019). Chemical composition of endemic *Stachys subnuda* Montbret & Aucher ex Benth. essential oil and its anti-inflammatory and antioxidant activities. *Journal of Essential Oil Research*, 31(4), 326–334.
- Serbetçi, T., Demirci, B., Güzel, C. B., Kültür, S., Ergüven, M., ve Başer, K. H. (2010). Essential oil composition, antimicrobial and cytotoxic activities of two endemic *Stachys cretica* subspecies (Lamiaceae) from Turkey. *Natural Product Communications*, 5(9), 1369–1374.

- Uğur, A., Saraç, N., ve Varol, O. (2013). Antimicrobial activities of the essential oils of endemic *Stachys rupestris* and *Stachys amanica* against multi-resistant bacteria. *Indian Journal of Pharmacology*, 45(2), 201-202.
- Üstüner, H., Barak, T. H., Servi, H., Ertekin, S. K., Sen, A., Dinç, M., ve Özkan, V. K. (2023). Anticancer, antidiabetic, and antioxidant activities of endemic *Stachys buttleri* Mill. and *Stachys pinardii* Boiss. essential oils. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 26(6), 1502–1514.
- Vundać, V. B., Pfeifhofer, H. W., Brantner, A. H., Maleš, Ž., ve Plazibat, M. (2006). Essential oils of seven *Stachys* taxa from Croatia. *Biochemical Systematics and Ecology*, 34, 875–881.
- Vundać V. B. (2019). Taxonomical and Phytochemical Characterisation of 10 *Stachys* Taxa Recorded in the Balkan Peninsula Flora: A Review. *Plants (Basel, Switzerland)*, 8(2), 32.
- Watson, L., & Dallwitz, M. J. (2002). The Families of Flowering Plants. Retrieved from <http://biodiversity.uno.edu/delta/angio/www/labiateae.htm>
- Yüce Babacan, E. (2022). Endemik *Stachys tundjeliensis* Kit Tan & Sorger (Lamiaceae)’ in Uçucu Yağ Bileşenleri ve Kemotaksonomik Bir Yaklaşım. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(2), 563-570.



# ***N*-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid Türevleri ile 2,6-Pridindikaboksilik asit in Proton Transfer Tuzunun Sentezi ve Karakterizasyonu**

**Halil İLKİMEN<sup>1</sup>**

**Cengiz YENİKAYA<sup>2</sup>**

**Aysel GÜLBANDILAR<sup>3</sup>**

- 1- Dr. Öğr. Üyesi; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Kütahya Türkiye. halil.ilkimen@dpu.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-1747-159X.
- 2- Prof. Dr.; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Kütahya Türkiye. cengiz.yenikaya@dpu.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-5867-9146.
- 3- Doç. Dr.; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye. aysel.gulbandilar@ogu.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-9075-9923.

## ÖZET

Antifungal, antiproliferatif, antibakteriyel, antioksidan, antikanser, anti-Zika virüs, antitüberküloz, antiviral, anti-inflamatuar, antiHIV, antiarteriosklerotik and antitümör gibi çeşitli farmakolojik aktivitelere sahip olan 2-aminobenzotiyazol amit türevleri yeni bir ilaç molekülü sınıfının araştırılmasında temel bir yapı taşı kabul edilmektedir. Bu çalışmanın birinci aşamasında 4-tiyüroidobenzensülfonamit (3), sülfanilamit'in (1) ile potasyum tiyosiyanür'ün (2) reaksiyonundan elde edildi. İkinci aşamasında, 3 bileşiğinin Br<sub>2</sub> ile reaksiyonundan 2-aminobenzotiyazol-6-sülfonamit (4) sentezlendi. Üçüncü aşamasında, 4 bileşiği ile benzoilklorür (5), 4-florobenzoilklorür (6) ve 4-klorobenzoilklorür'ün (7) reaksiyonlarında N-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid (smabtbz, 8), 4-floro-N-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid (Fsmabtbz, 9), 4-kloro-N-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid (Clsmabtbz, 10) bileşikler elde edildi. Son aşamasında ise 8-10 bileşikler ile 2,6-piridindikarboksilik asit (11) yeni proton transfer tuzları {(Hsmabtbz)(Hdpc).(smabtbz).H<sub>2</sub>O, 12), (HFsmabtbz)(Hdpc).0,5H<sub>2</sub>O.0,1EtOH (13), (HClsmabtbz)(Hdpc).(Clsmabtbz).0,4H<sub>2</sub>O.0,25EtOH (14)} sentezlendi. Tuzların (12-14) yapıları, element analiz, IR, <sup>1</sup>H ve <sup>13</sup>C NMR analizleri ile önerildi. Spektroskopik analiz değerlendirmelerin sonucunda tuzlardaki asit:baz oranları 12 tuzunda 2:1, 13 tuzunda 1:1 ve 14 tuzunda 2:1 olarak bulunmuştur. Ayrıca, çalışmada kullanılan (1 ve 2) ve sentezlenen maddelerin (3, 4, 8-14) *E. faecalis*, *E. coli*, *L. monocytogenes*, *S. aureus*, *P. aeruginosa* ve *B. subtilis* (bakteri) ve *C. albicans* (maya) karşı antimikrobiyal aktiviteleri incelendi. Aktiviteler Ketokonazol, Flukonazol, Levofloksasin, Kloramfenikol, Vankomisin ve Sefepim ile karşılaştırıldı. Aktivite çalışmalarında en iyi aktiviteler, *S. aureus* bakterisinde 1, 2 ve 14, *B. subtilis* bakterisinde 3, 9 ve 14, *E. coli* bakterisinde 1, 2 ve 9, *E. faecalis* bakterisinde 1, *L. monocytogenes* bakterisinde 1, 2, 4 ve 14, *P. aeruginosa* bakterisinde 1-4, 10 ve 12-14, ve *C. albicans* mayasında tüm bileşiklerde (11 hariç) gözlenmiştir.

*Anahtar Kelimeler* – N-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid, 4-floro-N-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid, 4-kloro-N-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid, 2,6-piridindikarboksilik asit, proton transfer tuzu, antimikrobiyal aktivite.

---

## GİRİŞ

Çeşitli farmakolojik aktivitelere sahip yeni bir ilaç molekülü sınıfının araştırılmasında temel bir yapı taşı olarak kabul edilen (Yadav ve Senthilkumar, 2011:1; Ali ve Siddiqui, 2013; Achaiah vd., 2016:1375; Yadav vd., 2023:21890) 2-aminobenzotiyazol amit türevlerinin antifungal (Singh vd., 2023:134128), antiproliferatif (Wang vd., 2024:129647), antibakteriyel (Galieva vd., 2021:495; Shadap vd., 2021:121731; Gurram vd., 2021:5435; Bonnett vd., 2023:1; Al-Farraj ve Fetoh, 2023:e7248; Sharma vd., 2023:e202300647; Alazmaa vd., 2024:963), antioksidan (Taj vd., 2018:2425; Sovic vd., 2019:1880; Shadan vd., 2021:121731; Al-Farraj ve Fetoh, 2023:e7248), antikanser (Wei vd., 2021:9196; Al-Farraj ve Fetoh, 2023:e7248; Ricci vd., 2023:e202300330; Chiou vd., 2023), anti-Zika virüs (Dias vd., 2023:117488), antiviral (Leal vd., 2017:3851; Maus vd., 2021:116392; Dittmar vd., 2023:1), anti-inflamatuvar (Jyothi vd., 2023:861; Muhammed Aziz vd., 2023:34534), antiHIV (Taj vd., 2019:1047), antiarteriosklerotik (Lapierre vd., 2024:e14525) and antitümör (Chini vd., 2020:783; Ramos vd., 2023:17474) aktiviteleri vardır. *N*-(benzotiyazol-2-il)benzamid türevleri literatürde bol miktarda sentezlenirken, 2-amino-6-sülfonamidbenzotiyazol-benzamid'in hiç sentezlenmediği gözlenmiştir. Ayrıca *N*-(benzotiyazol-2-il)benzamid türevlerinin proton transfer tuzları ile ilgili grubumuzun yaptığı çalışma mevcuttur. Burada *N*-(benzotiyazol-2-il)benzamid ile 2,6-piridindikarboksilik asitin tuzu ve tuzun Fe(III), Co(II), Ni(II) ve Cu(II) kompleksleri sentezlenmiştir (İlkimen vd., 2025). Ancak *N*-(benzotiyazol-2-il)benzamid türevlerinin Fe(II), Ni(II), Cu(II) (İlkimen vd., 2025:1), Fe(II), Cu(II) (İlkimen vd., 2025), Pd(II) (Irzoqi vd., 2021:18854; Caruso vd., 2011:46), Cu(II), Zn(II) (Angulo-Cornejo vd., 2000:38), Ru, Rh, Ir (Shadan vd., 2021:121731), BF<sub>2</sub> (Zheng vd., 2024:11611) ve Fe(III), Co(II), Cr(III) (Al-Farraj ve Fetoh, 2023:e7248) kompleksleri sentezlenmiş ve yapıları çeşitli analiz metotları ile açıklanmıştır. 2-Amino-6-sülfonamidbenzotiyazol-benzamidin tuz ve metal kompleksleri sentezlenmediği gözlenmiştir.

Bu çalışmada *N*-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid türevleri ile 2,6-piridindikarboksilik asitin yeni proton transfer tuzları sentezlenmiş ve yapıları element analiz, IR, <sup>1</sup>H ve <sup>13</sup>C NMR analizleri ile önerilmiştir.

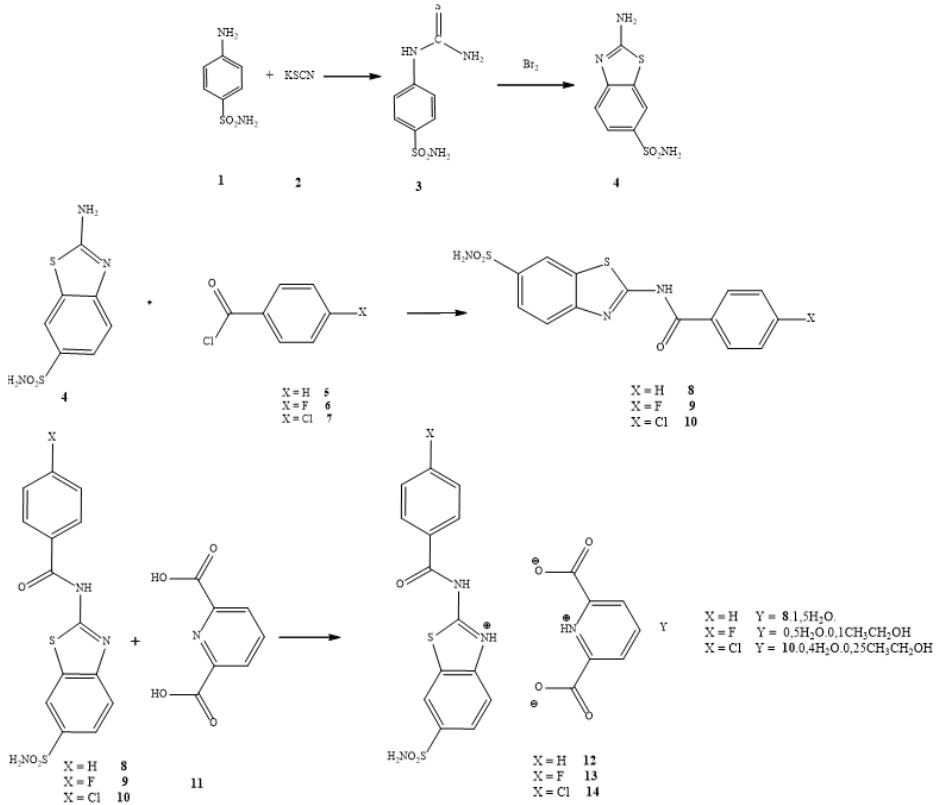
## MATERYAL VE YÖNTEM

### *Materyal*

Kullanılan tüm kimyasallar Chemazone ve Aldrich'ten satın alındı. Element analizleri için Elementar Vario III EL, NMR analizi için Agilent Premium Compact NMR (600 MHz) ve IR için Bruker Optics Vertex 70 (KBr ile) spektral ve analitik ölçümler için kullanıldı.

## 12-14 Tuzlarının Sentezi

10 mmol **8-10** bileşikleri ayrı ayrı 50 mL saf etanolde çözüldü. üzerlerine 50 mL saf etanolde çözünmüş 10 mmol **11** damla damla ilave edildi. Yaklaşık bir günlük karışma işleminden sonra çöken beyaz katılar (**12** için 1,8676 g, 85% verim, **12** için 4,7890 g, 90% verim ve **14** için 1,8676 g, 90% verim) süzüldü ve kurutuldu (Şekil 1).



Şekil 1: 12-14 Tuzlarının sentezi

## Antimikrobiyal aktivite

Antimikrobiyal aktiviteler mikrodilüsyon yöntemi ile minimum inhibitör konsantrasyon (MİK) değerleri bulunmuştur. Bu amaçla mikrodilüsyon yönteminde U şeklinde 96 gözlü mikropalakalar kullanılmıştır. Mueller Hinton Buyyon (MHB) ortamı, tek ve çift kuvvette hazırlanmıştır. Tüm maddeler (4 mg) 2 mL DMSO'da çözülmüştür. Kullanılan bakteri ve mantarlar gece boyunca tek güçlü MHB ortamında inkübe edilmiş ve kültürleri taze olarak hazırlanmıştır. Daha sonra kültür süspansiyonları hazırlanmış ve hücre yoğunlukları 0,5 McFarland tüpü bulanıklığına

(1,0x10<sup>8</sup> (cfu)/mL) ayarlanmıştır (Kaplancıklı vd., 2004:55; 2007:79; Avan vd., 2013:271).

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### *Tuzların elementel analiz sonuçları*

Tuzların elementel analiz sonuçları %deneysel(teorik): **12** için C 48,80(48,77); H 3,60(3,63); N 11,40(11,38), S 15,00(14,88); **13** için C 47,85(47,85); H 3,10(3,14); N 10,60(10,53) ve S 12,00(12,05) ve **14** için C 46,20(46,22); H 3,10(3,09); N 10,60(10,63) ve S 14,00(13,09) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre tuzlardaki asit:baz oranları **12** tuzunda 2:1, **13** tuzunda 1:1 ve **14** tuzunda 2:1, olarak bulunmuştur.

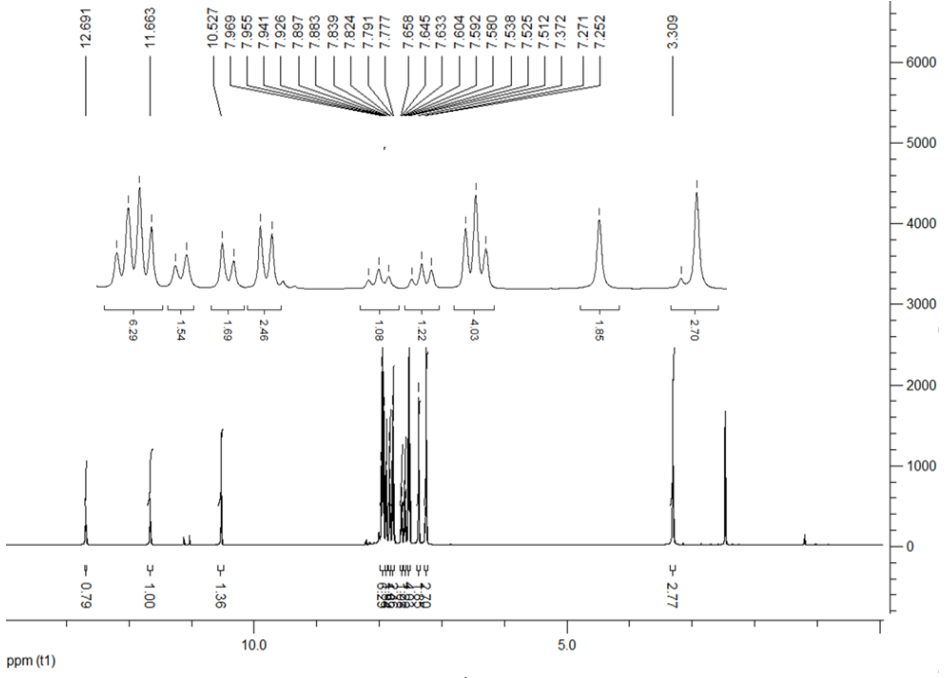
### *Tuzların NMR Sonuçları*

Sentezlenen **12-14** tuzlarının DMSO-d<sub>6</sub> içerisinde alınan <sup>1</sup>H ve <sup>13</sup>C-NMR spektrum değerleri Tablolar 1-3'te ve spektrumları Şekiller 2-7'de verilmiştir.

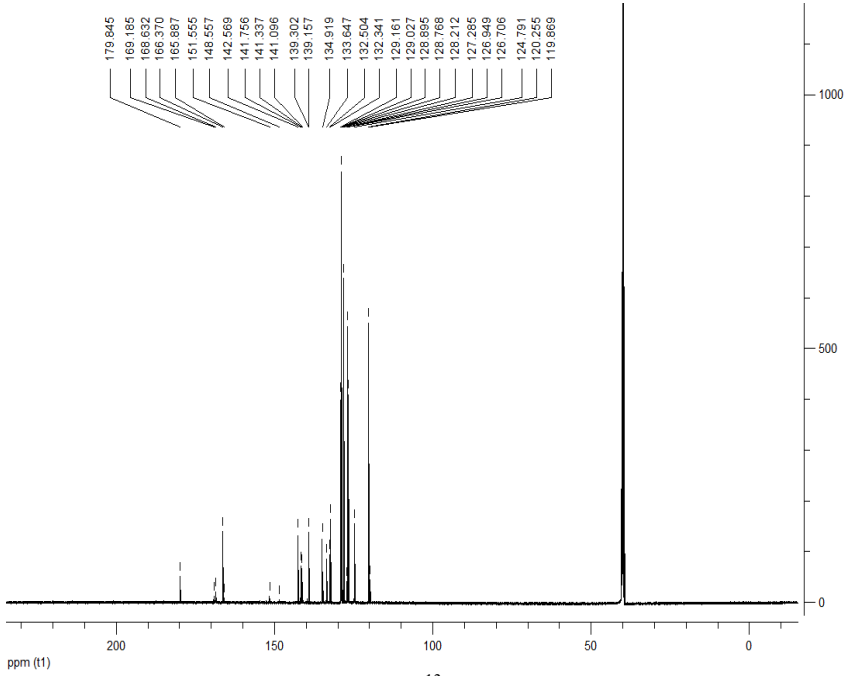
### *12 Tuzunun NMR Sonuçları*

**12** Tuzunun <sup>1</sup>H-NMR spektrumunda (Tablo 1, Şekil 2); 7,96 ppm'de 6H'lık doublet+doublet (H<sup>4</sup>, H<sup>4'</sup>, H<sup>19</sup>, H<sup>19'</sup>, H<sup>35</sup>, H<sup>35'</sup>, <sup>3</sup>J<sub>H4/H4'-H5</sub> = 8,52 Hz, <sup>3</sup>J<sub>H19/H19'-H20/H20'</sub> = 8,83 Hz), 7,25 ppm'de 3H'lık doublet+singlet (H<sup>5</sup>, H<sup>41</sup>, <sup>3</sup>J<sub>H5-H4/H4'</sub> = 1,62 Hz), 7,88 ppm'de 2H'lık doublet (H<sup>10</sup>, H<sup>28</sup>, <sup>3</sup>J<sub>H10/H31-H11/H32</sub> = 8,41 Hz), 7,83 ppm'de 2H'lık doublet (H<sup>11</sup>, H<sup>29</sup>, <sup>3</sup>J<sub>H11/H32-H10/31</sub> = 8,50 Hz), 7,53 ppm'de 4H'lık triplet (H<sup>20</sup>, H<sup>20'</sup>, H<sup>38</sup>, H<sup>38'</sup>, <sup>3</sup>J = 7,59 Hz), 7,65 ppm'de 4H'lık triplet (H<sup>21</sup>, <sup>3</sup>J<sub>H21-H20/H20'</sub> = 7,38 Hz), 7,59 ppm'de 1H'lık triplet (H<sup>21</sup>, <sup>3</sup>J<sub>H42-H41/H41'</sub> = 7,31 Hz), 10,53 ppm'de 2H'lık singlet (H<sup>13</sup>, H<sup>31</sup>), 12,69 ppm'de 1H'lık singlet (H<sup>16</sup>), 7,37 ppm'de 2H'lık singlet (H<sup>23</sup>) ve 11,66 ppm'de 1H'lık singlet (H<sup>34</sup>) olarak gözlenmiştir. Yapıda bulunan bir buçuk mol su 3,31 ppm'de 3H'lık singlet (H<sup>22</sup>) pik olarak gözlenmiştir. **12** Tuzunun yapısında bulunan H<sup>6</sup> ve H<sup>9</sup> protonları NMR spektrumunda gözlenmemiştir. Bu piklerin varlığı IR spektrumlarında 2500-2700 cm<sup>-1</sup> aralığında zayıf pik olarak gözlenmektedir (Şekil 8).

**12** Tuzunun <sup>13</sup>C-NMR spektrumunda (Tablo 1, Şekil 3); asit grubuna ait karbon pikleri 163,401 (C<sup>2</sup>, C<sup>2'</sup>), 148,544 (C<sup>3</sup>, C<sup>3'</sup>), 135,465 (C<sup>4</sup>, C<sup>4'</sup>), 124,548 (C<sup>5</sup>) ppm'de, baz grubuna ait karbon pikleri 165,125 (C<sup>8</sup>, C<sup>29</sup>), 150,316 (C<sup>10</sup>), 130,482 (C<sup>11</sup>), 124,095 (C<sup>12</sup>), 123,908 (C<sup>13</sup>), 137,951 (C<sup>14</sup>), 139,843 (C<sup>15</sup>), 165,751 (C<sup>17</sup>), 130,446 (C<sup>18</sup>), 131,811 (C<sup>19</sup>, C<sup>19'</sup>, C<sup>40</sup>, C<sup>40'</sup>), 126,229 (C<sup>20</sup>, C<sup>20'</sup>, C<sup>41</sup>, C<sup>41'</sup>), 165,886 (C<sup>21</sup>), 9,0884 (C<sup>25</sup>), 46,233 (C<sup>25</sup>), 150,153 (C<sup>31</sup>), 130,354 (C<sup>32</sup>), 120,784 (C<sup>33</sup>), 123,476 (C<sup>34</sup>), 137,862 (C<sup>35</sup>), 139,651 (C<sup>36</sup>), 162,450 (C<sup>38</sup>) ve 127,907 (C<sup>39</sup>) ppm'de gözlenmiştir.

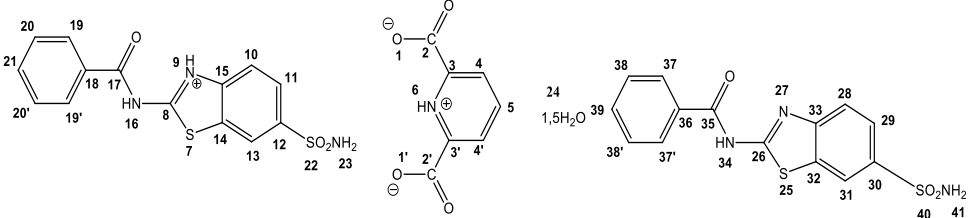


Şekil 2: 12 Tuzunun <sup>1</sup>H-NMR Spektrumu



Şekil 3: 12 Tuzunun <sup>13</sup>C-NMR Spektrumu

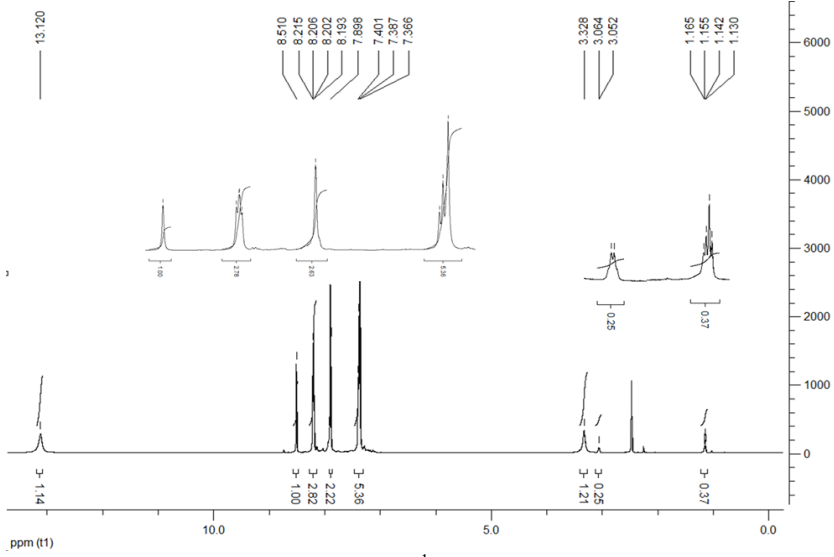
Tablo 1: 12 Tuzunun NMR sonuçları  $\delta$ (ppm)

|         |                                                                                                                                                   |                                                                |                     |                                                                |                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------|
| $^1\text{H}$ NMR                                                                          |                                                                                                                                                   |                                                                | $^{13}\text{C}$ NMR |                                                                |                    |
| $\text{H}^4, \text{H}^{4'}, \text{H}^{19}, \text{H}^{19'}, \text{H}^{35}, \text{H}^{35'}$ | 7,96 (6H, d+d) [ $^3\text{J}_{\text{H}4/\text{H}4'-\text{H}5} = 8,52$ Hz, $^3\text{J}_{\text{H}19/\text{H}19'-\text{H}20/\text{H}20'} = 8,83$ Hz] | $\text{C}^2, \text{C}^{2'}$                                    | 163,401             | $\text{C}^{20}, \text{C}^{20'}, \text{C}^{41}, \text{C}^{41'}$ | 126,229            |
| $\text{H}^5, \text{H}^{41}$                                                               | 7,25 (3H, d+s) [ $^3\text{J}_{\text{H}5-\text{H}4/\text{H}4'} = 1,62$ Hz]                                                                         | $\text{C}^3, \text{C}^{3'}$                                    | 148,544             | $\text{C}^{21}$                                                | 165,886            |
| $\text{H}^6$                                                                              | -                                                                                                                                                 | $\text{C}^4, \text{C}^{4'}$                                    | 135,465             | $\text{C}^{25}$                                                | 9,0884             |
| $\text{H}^9$                                                                              | -                                                                                                                                                 | $\text{C}^5$                                                   | 124,548             | $\text{C}^{26}$                                                | 46,233             |
| $\text{H}^{10}, \text{H}^{28}$                                                            | 7,88 (2H, d) [ $^3\text{J}_{\text{H}10/\text{H}31-\text{H}11/\text{H}32} = 8,41$ Hz]                                                              | $\text{C}^8, \text{C}^{29}$                                    | 165,125             | $\text{C}^{31}$                                                | 150,153            |
| $\text{H}^{11}, \text{H}^{29}$                                                            | 7,83 (2H, d) [ $^3\text{J}_{\text{H}11/\text{H}32-\text{H}10/31} = 8,50$ Hz]                                                                      | $\text{C}^{10}$                                                | 150,316             | $\text{C}^{32}$                                                | 130,354            |
| $\text{H}^{13}, \text{H}^{31}$                                                            | 10,53 (2H, s)                                                                                                                                     | $\text{C}^{11}$                                                | 130,482             | $\text{C}^{33}$                                                | 120,784            |
| $\text{H}^{16}$                                                                           | 12,69 (1H, s)                                                                                                                                     | $\text{C}^{12}, \text{C}^{13}$                                 | 124,095<br>123,908  | $\text{C}^{34}, \text{C}^{35}$                                 | 123,476<br>137,862 |
| $\text{H}^{20}, \text{H}^{20'}, \text{H}^{38}, \text{H}^{38'}$                            | 7,53 (4H, t) [ $^3\text{J} = 7,59$ Hz]                                                                                                            | $\text{C}^{14}$                                                | 137,951             | $\text{C}^{36}$                                                | 139,651            |
| $\text{H}^{21}$                                                                           | 7,65 (1H, t) [ $^3\text{J}_{\text{H}21-\text{H}20/\text{H}20'} = 7,38$ Hz]                                                                        | $\text{C}^{15}$                                                | 139,843             | $\text{C}^{38}$                                                | 162,450            |
| $\text{H}^{23}$                                                                           | 7,37 (2H, s)                                                                                                                                      | $\text{C}^{17}$                                                | 165,751             | $\text{C}^{39}$                                                | 127,907            |
| $\text{H}^{24}$                                                                           | 3,31 (3H, s)                                                                                                                                      | $\text{C}^{18}$                                                | 130,446             |                                                                |                    |
| $\text{H}^{34}$                                                                           | 11,66 (1H, s)                                                                                                                                     | $\text{C}^{19}, \text{C}^{19'}, \text{C}^{40}, \text{C}^{40'}$ | 131,811             |                                                                |                    |
| $\text{H}^{39}$                                                                           | 7,59 (1H, t) [ $^3\text{J}_{\text{H}42-\text{H}41/\text{H}41'} = 7,31$ Hz]                                                                        |                                                                |                     |                                                                |                    |

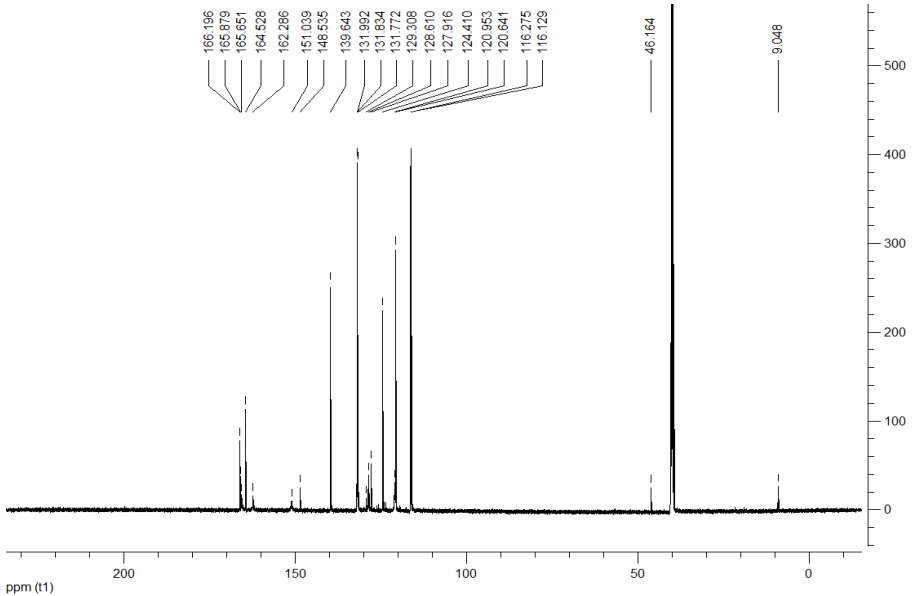
### 13 Tuzunun NMR Sonuçları

**13** Tuzunun  $^1\text{H}$ -NMR spektrumunda (Tablo 2, Şekil 4); 8,21 ppm'de 3H'lık multiyet ( $\text{H}^4, \text{H}^{4'}, \text{H}^{20}, \text{H}^{20'}$ ), 7,38 ppm'de 3H'lık multiyet ( $\text{H}^5, \text{H}^{19}, \text{H}^{19'}, \text{H}^{10}, \text{H}^{11}, \text{H}^{12}$ ), 8,51 ppm'de 1H'lık singlet ( $\text{H}^{13}$ ), 13,12 ppm'de 1H'lık singlet ( $\text{H}^{16}$ ), 7,90 ppm'de 2H'lık singlet ( $\text{H}^{23}$ ), Yapıda bulunan yarım mol su 3,32 ppm'de 1H'lık singlet ( $\text{H}^{22}$ ) pik olarak gözlenmiştir. Yapıda bulunan 0,5 mol su 3,32 ppm'de 1H'lık singlet ( $\text{H}^{24}$ ), 0,1 mol etanol 1,15 ppm'de 0,3H'lık kuartet beklenirken triyet ( $\text{H}^{25}, ^3\text{J}_{\text{H}26-\text{H}25} = 5,24$  Hz) ve 3,07 ppm'de 1H'lık triyet beklenirken doublet ( $\text{H}^6, ^3\text{J}_{\text{H}25-\text{H}26} = 6,98$  Hz) pikler olarak gözlenmiştir. **13** Tuzunun yapısında bulunan  $\text{H}^6$  ve  $\text{H}^9$  protonları NMR spektrumunda gözlenmemiştir. Bu piklerin varlığı IR spektrumlarında 2500-2700  $\text{cm}^{-1}$  aralığında zayıf pik olarak gözlenmektedir (Şekil 9).

**13** Tuzun  $^{13}\text{C}$ -NMR spektrumunda (Tablo 2, Şekil 5); asit grubuna ait karbon pikleri 164,528 ( $\text{C}^2$ ,  $\text{C}^{2'}$ ), 148,535 ( $\text{C}^3$ ,  $\text{C}^{3'}$ ), 131,992 ( $\text{C}^4$ ,  $\text{C}^{4'}$ ), 124,410 ( $\text{C}^5$ ) ppm'de, baz grubuna ait karbon pikleri 165,651 ( $\text{C}^5$ ), 120,641 ( $\text{C}^{10}$ ), 129,308 ( $\text{C}^{11}$ ), 120,953 ( $\text{C}^{12}$ ), 151,039 ( $\text{C}^{13}$ ), 128,610 ( $\text{C}^{14}$ ), 139,643 ( $\text{C}^{15}$ ), 165,879 ( $\text{C}^{17}$ ), 127,916 ( $\text{C}^{18}$ ), 131,834, 131,772 ( $\text{C}^{19}$ ,  $\text{C}^{19'}$ ), 116,275, 116,129 ( $\text{C}^{20}$ ,  $\text{C}^{20'}$ ), 166,196, 162,286 ( $\text{C}^{21}$ ) ppm'de ve etanol pikleri ise 9,048 ( $\text{C}^{25}$ ), 46,164 ( $\text{C}^{26}$ ) ppm'de gözlenmiştir.

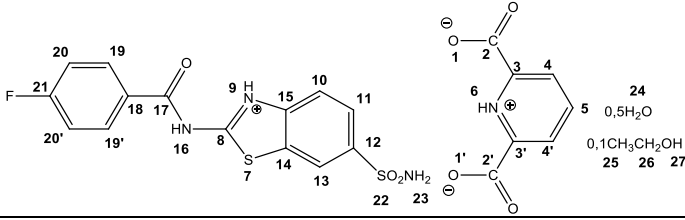


Şekil 4: 13 Tuzunun  $^1\text{H}$ -NMR Spektrumu



Şekil 5: 13 Tuzunun  $^{13}\text{C}$ -NMR Spektrumu

Tablo 2: 13 Tuzunun NMR sonuçları  $\delta$ (ppm)



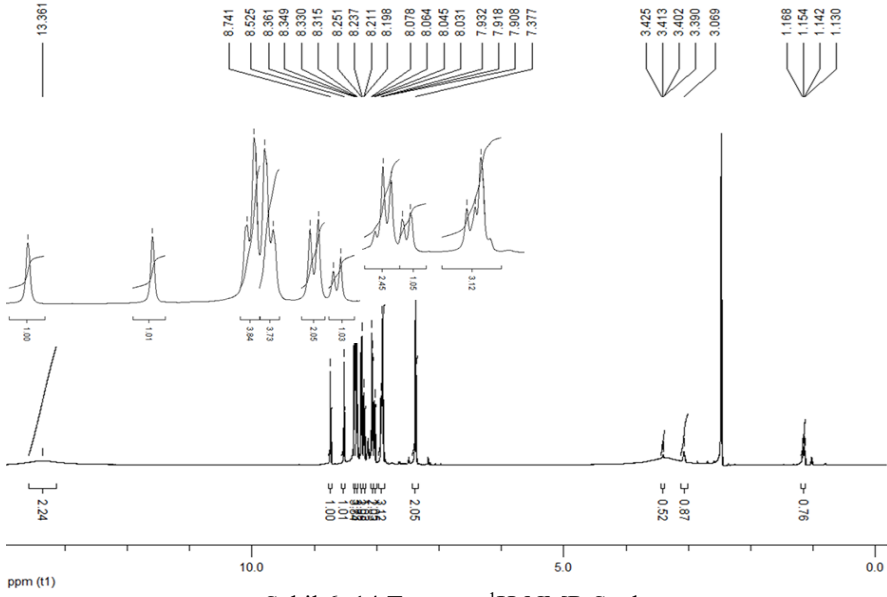
| $^1\text{H}$ NMR                                                                         |                                                                                 | $^{13}\text{C}$ NMR         |         |                                 |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------|---------------------------------|--------------------|
| $\text{H}^4, \text{H}^{4'}, \text{H}^{20}, \text{H}^{20'}$                               | 8,21 (3H, m)                                                                    | $\text{C}^2, \text{C}^{2'}$ | 164,528 | $\text{C}^{14}$                 | 128,610            |
| $\text{H}^5, \text{H}^{19}, \text{H}^{19'}, \text{H}^{10}, \text{H}^{11}, \text{H}^{12}$ | 7,38 (5H, m)                                                                    | $\text{C}^3, \text{C}^{3'}$ | 148,535 | $\text{C}^{15}$                 | 139,643            |
| $\text{H}^6, \text{H}^9, \text{H}^{27}$                                                  | -                                                                               | $\text{C}^4, \text{C}^{4'}$ | 131,992 | $\text{C}^{17}$                 | 165,879            |
| $\text{H}^{13}$                                                                          | 8,51 (1H, s)                                                                    | $\text{C}^5$                | 124,410 | $\text{C}^{18}$                 | 127,916            |
| $\text{H}^{16}$                                                                          | 13,12 (1H, s)                                                                   | $\text{C}^8$                | 165,651 | $\text{C}^{19}, \text{C}^{19'}$ | 131,834<br>131,772 |
| $\text{H}^{23}$                                                                          | 7,90 (2H, s)                                                                    | $\text{C}^{10}$             | 120,641 | $\text{C}^{20}, \text{C}^{20'}$ | 116,275<br>116,129 |
| $\text{H}^{24}$                                                                          | 3,32 (1H, s)                                                                    | $\text{C}^{11}$             | 129,308 | $\text{C}^{21}$                 | 166,196<br>162,286 |
| $\text{H}^{25}$                                                                          | 1,15 (0,3H, t) [ $^3\text{J}_{\text{H}^{26}-\text{H}^{25}} = 5,24 \text{ Hz}$ ] | $\text{C}^{12}$             | 120,953 | $\text{C}^{25}$                 | 9,048              |
| $\text{H}^{26}$                                                                          | 3,06 (0,2H, d) [ $^3\text{J}_{\text{H}^{25}-\text{H}^{26}} = 6,98 \text{ Hz}$ ] | $\text{C}^{13}$             | 151,039 | $\text{C}^{26}$                 | 46,164             |

#### 14 Tuzunun NMR Sonuçları

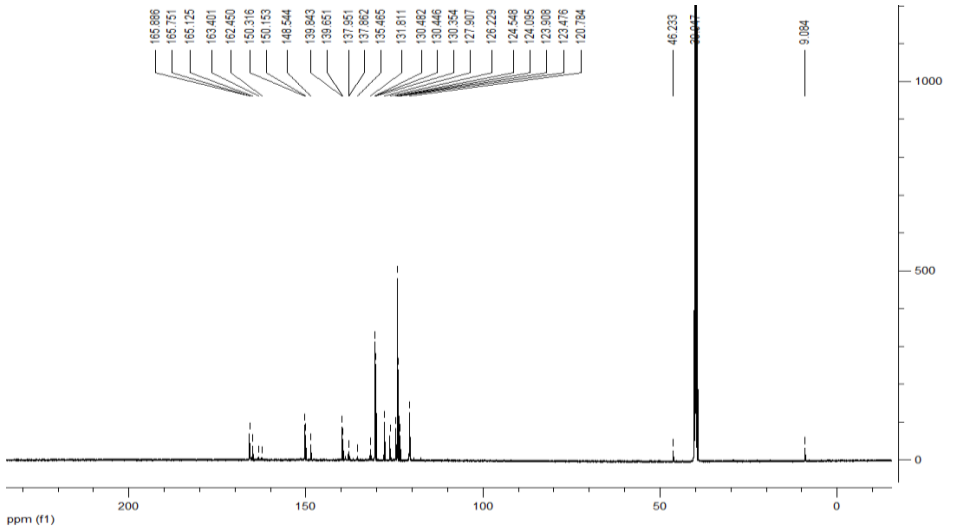
**14** Tuzunun  $^1\text{H}$ -NMR spektrumunda (Tablo 3, Şekil 6); 8,24 ppm'de 2H'lık doublet ( $\text{H}^4, \text{H}^{4'}$ ,  $^3\text{J}_{\text{H}^4/\text{H}^{4'}-\text{H}^5} = 8,60 \text{ Hz}$ ), 8,21 ppm'de 1H'lık doublet ( $\text{H}^{10}$ ,  $^3\text{J}_{\text{H}^{13}-\text{H}^{12}} = 7,66 \text{ Hz}$ ), 8,08 ppm'de 2H'lık doublet ( $\text{H}^{11}, \text{H}^{32}$ ,  $^3\text{J} = 8,57 \text{ Hz}$ ), 8,32 ppm'de 4H'lık doublet ( $\text{H}^{19}, \text{H}^{19'}, \text{H}^{40}, \text{H}^{40'}$ ,  $^3\text{J} = 8,72 \text{ Hz}$ ), 8,35 ppm'de 4H'lık doublet ( $\text{H}^{20}, \text{H}^{20'}, \text{H}^{41}, \text{H}^{41'}$ ,  $^3\text{J} = 7,35 \text{ Hz}$ ), 8,03 ppm'de 2H'lık doublet ( $\text{H}^{31}$ ,  $^3\text{J} = 8,51 \text{ Hz}$ ), 7,91 ppm'de 3H'lık doublet+singlet ( $\text{H}^5, \text{H}^{23}$ ,  $^3\text{J}_{\text{H}^5-\text{H}^4/\text{H}^{4'}} = 8,64 \text{ Hz}$ ), 8,74 ppm'de 1H'lık singlet ( $\text{H}^{13}$ ), 13,36 ppm'de 2H'lık singlet ( $\text{H}^{16}, \text{H}^{37}$ ), 8,53 ppm'de 1H'lık singlet ( $\text{H}^{34}$ ) ve 7,38 ppm'de 2H'lık singlet ( $\text{H}^{44}$ ) olarak gözlenmiştir. Yapıda bulunan yarım mol su 3,32 ppm'de H'lık singlet ( $\text{H}^{22}$ ) pik olarak gözlenmiştir. Yapıda bulunan 0,4 mol su 3,07 ppm'de 0,8H'lık singlet ( $\text{H}^{24}$ ), 0,25 mol etanol 1,15 ppm'de 0,75H'lık kuartet beklenirken triplet ( $\text{H}^{25}$ ,  $^3\text{J}_{\text{H}^{26}-\text{H}^{25}} = 11,32 \text{ Hz}$ ) ve 3,07 ppm'de 0,5H'lık triplet beklenirken kuartet ( $\text{H}^6$ ,  $^3\text{J}_{\text{H}^{25}-\text{H}^{26}} = 9,94 \text{ Hz}$ ) pikler olarak gözlenmiştir. **14** Tuzunun yapısında bulunan  $\text{H}^6$  ve  $\text{H}^9$  protonları NMR spektrumunda gözlenmemiştir. Bu piklerin varlığı IR spektrumlarında  $2500\text{-}2700 \text{ cm}^{-1}$  aralığında zayıf pik olarak gözlenmektedir (Şekil 10).

**14** Tuzun  $^{13}\text{C}$ -NMR spektrumunda (Tablo 3, Şekil 7); asit grubuna ait karbon pikleri 163,401 ( $\text{C}^2, \text{C}^{2'}$ ), 148,544 ( $\text{C}^3, \text{C}^{3'}$ ), 135,465 ( $\text{C}^4, \text{C}^{4'}$ ),

124,548 (C<sup>5</sup>) ppm'de, baz grubuna ait karbon pikleri 165,125 (C<sup>8</sup>, C<sup>29</sup>), 123,908 (C<sup>10</sup>), 130,482 (C<sup>11</sup>), 124,095 (C<sup>12</sup>), 150,316 (C<sup>13</sup>), 137,951 (C<sup>14</sup>), 139,843 (C<sup>15</sup>), 165,751 (C<sup>17</sup>), 130,446 (C<sup>18</sup>), 131,811 (C<sup>19</sup>, C<sup>19'</sup>, C<sup>40</sup>, C<sup>40'</sup>), 126,229 (C<sup>20</sup>, C<sup>20'</sup>, C<sup>41</sup>, C<sup>41'</sup>), 165,886 (C<sup>21</sup>), 123,476 (C<sup>31</sup>), 130,354 (C<sup>32</sup>), 120,784 (C<sup>33</sup>), 150,153 (C<sup>34</sup>), 137,862 (C<sup>35</sup>), 139,651 (C<sup>36</sup>), 162,450 (C<sup>38</sup>) ve 127,907 (C<sup>39</sup>) ppm'de ve etanol pikleri ise 9,0884 (C<sup>25</sup>), 46,233 (C<sup>26</sup>) ppm'de gözlenmiştir.

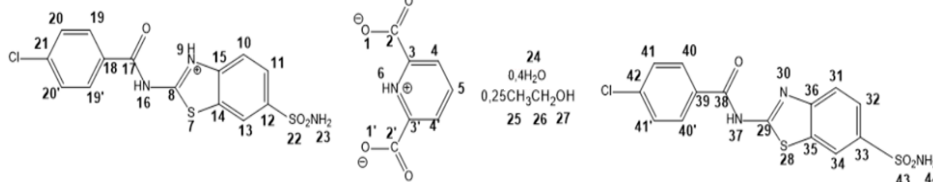


Şekil 6: 14 Tuzunun <sup>1</sup>H-NMR Spektrumu



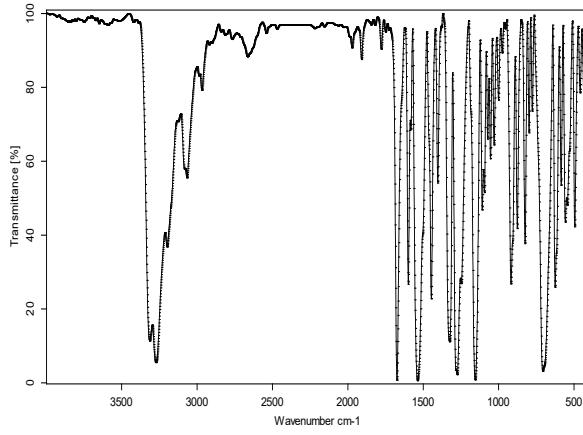
Şekil 7: 14 Tuzunun <sup>13</sup>C-NMR Spektrumu

Tablo 3: 14 Tuzunun NMR sonuçları  $\delta$ (ppm)

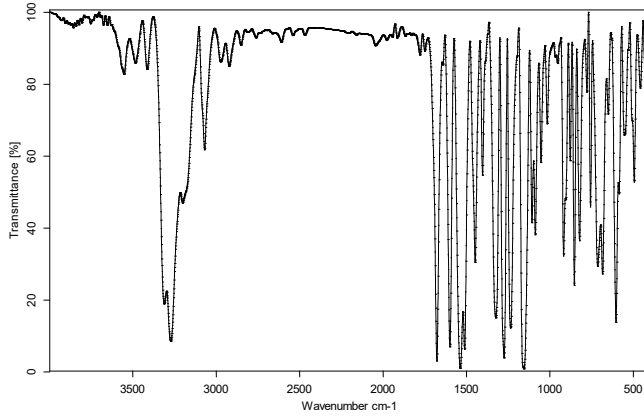
|  |                                                                 |                                                                            |                     |                 |         |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------|---------|
| <sup>1</sup> H NMR                                                                 |                                                                 |                                                                            | <sup>13</sup> C NMR |                 |         |
| H <sup>4</sup> , H <sup>4'</sup>                                                   | 8,24 (2H, d) [ <sup>3</sup> J <sub>H4/H4'-H5</sub> = 8,60 Hz]   | C <sup>2</sup> , C <sup>2'</sup>                                           | 163,401             | C <sup>25</sup> | 9,0884  |
| H <sup>5</sup> , H <sup>23</sup>                                                   | 7,91 (3H, d+s) [ <sup>3</sup> J <sub>H5-H4/H4'</sub> = 8,64 Hz] | C <sup>3</sup> , C <sup>3'</sup>                                           | 148,544             | C <sup>26</sup> | 46,233  |
| H <sup>6</sup> , H <sup>9</sup>                                                    | -                                                               | C <sup>4</sup> , C <sup>4'</sup>                                           | 135,465             | C <sup>31</sup> | 123,476 |
| H <sup>10</sup>                                                                    | 8,21 (1H, d) [ <sup>3</sup> J <sub>H13-H12</sub> = 7,66 Hz]     | C <sup>5</sup>                                                             | 124,548             | C <sup>32</sup> | 130,354 |
| H <sup>11</sup> , H <sup>32</sup>                                                  | 8,08 (2H, d) [ <sup>3</sup> J = 8,57 Hz]                        | C <sup>8</sup> , C <sup>29</sup>                                           | 165,125             | C <sup>33</sup> | 120,784 |
| H <sup>13</sup>                                                                    | 8,74 (1H, s)                                                    | C <sup>10</sup>                                                            | 123,908             | C <sup>34</sup> | 150,153 |
| H <sup>16</sup> , H <sup>37</sup>                                                  | 13,36 (2H, s)                                                   | C <sup>11</sup>                                                            | 130,482             | C <sup>35</sup> | 137,862 |
| H <sup>31</sup>                                                                    | 8,03 (2H, d) [ <sup>3</sup> J = 8,51 Hz]                        | C <sup>12</sup>                                                            | 124,095             | C <sup>36</sup> | 139,651 |
| H <sup>34</sup>                                                                    | 8,53 (1H, s)                                                    | C <sup>13</sup>                                                            | 150,316             | C <sup>38</sup> | 162,450 |
| H <sup>44</sup>                                                                    | 7,38 (2H, s)                                                    | C <sup>14</sup>                                                            | 137,951             | C <sup>39</sup> | 127,907 |
| H <sup>19</sup> , H <sup>19'</sup> ,<br>H <sup>40</sup> , H <sup>40'</sup>         | 8,32 (4H, d) [ <sup>3</sup> J = 8,72 Hz]                        | C <sup>15</sup>                                                            | 139,843             |                 |         |
| H <sup>20</sup> , H <sup>20'</sup> ,<br>H <sup>41</sup> , H <sup>41'</sup>         | 8,35 (4H, d) [ <sup>3</sup> J = 7,35 Hz]                        | C <sup>17</sup>                                                            | 165,751             |                 |         |
| H <sup>24</sup>                                                                    | 3,07 (0,8H, s)                                                  | C <sup>18</sup>                                                            | 130,446             |                 |         |
| H <sup>25</sup>                                                                    | 1,15 (0,75H, q) [ <sup>3</sup> J <sub>H25-H26</sub> = 11,32 Hz] | C <sup>19</sup> , C <sup>19'</sup> ,<br>C <sup>40</sup> , C <sup>40'</sup> | 131,811             |                 |         |
| H <sup>26</sup>                                                                    | 3,06 (0,50H, q) [ <sup>3</sup> J <sub>H26-H25</sub> = 9,94 Hz]  | C <sup>20</sup> , C <sup>20'</sup> ,<br>C <sup>41</sup> , C <sup>41'</sup> | 126,229             |                 |         |
| H <sup>44</sup>                                                                    | 7,38 (2H, s)                                                    | C <sup>21</sup>                                                            | 165,886             |                 |         |

### FT-IR sonuçları

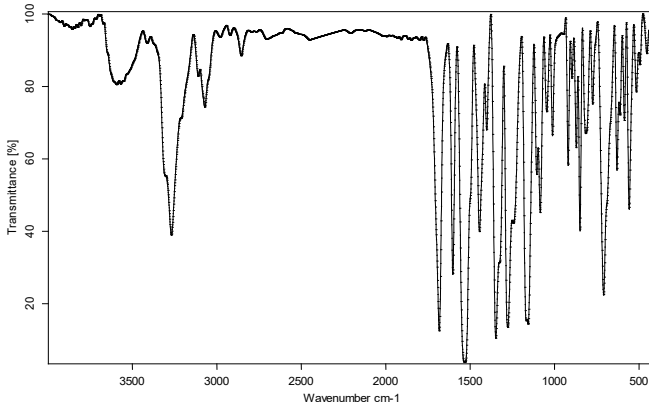
**12-14** Tuzlarının FT-IR spektrumları Şekiller 8-10'da, **8-14** bileşiklerinin data değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Tuzların önerilen yapısında bulunan sudan kaynaklanan  $\nu(\text{O-H})$  titreşimi 3350-3580  $\text{cm}^{-1}$  de yayvan olarak gözlenmiştir. Bileşiğin  $\nu(\text{N-H})$  grubundan kaynaklanan gerilim pikleri **8** için 3407, 3368 ve 3263  $\text{cm}^{-1}$ , **9** için 3485, 3417 ve 3312  $\text{cm}^{-1}$ , **10** için 3484, 3312 ve 3284  $\text{cm}^{-1}$ , **12** için 3314, 3274, ve 3199  $\text{cm}^{-1}$ , **13** için 3312, 3272 ve 3201  $\text{cm}^{-1}$ , ve **14** için 3307, 3269 ve 3205  $\text{cm}^{-1}$  de gözlenmiştir. Tuzların  $\nu(\text{N}^+-\text{H})$  grubundan kaynaklanan gerilim pikleri ise 2796 ve 2538  $\text{cm}^{-1}$  aralığında gözlenmiştir. Tuzların önerilen yapısındaki aromatik  $\nu(\text{C-H})$  gerilmeleri 3067-3071  $\text{cm}^{-1}$ , asit  $\nu(\text{C=O})$  gerilmeleri 1674-1683 ve 1445-1448  $\text{cm}^{-1}$  de, amit  $\nu(\text{C=O})$  gerilmesi 1603-1652  $\text{cm}^{-1}$  de, aromatik  $\nu(\text{C=C})$  ve  $\nu(\text{C=N})$  gerilmeleri 1599-1403  $\text{cm}^{-1}$  aralığında,  $\nu(\text{C-O})$  gerilmeleri 1348-1088 aralığında  $\text{cm}^{-1}$  de,  $\nu(\text{S=O})$  gerilmeleri 1247-1072  $\text{cm}^{-1}$  aralığında ve piridin gerilmesi 775-778  $\text{cm}^{-1}$  de gözlenmiştir.



Şekil 8: 12 Tuzunun IR spektrumu



Şekil 9: 13 Tuzunun IR spektrumu



Şekil 10: 14 Tuzunun IR spektrumu

Tablo 4: Bileşiklerin IR değerleri (cm<sup>-1</sup>).

|                        | 11      | 8        | 12       | 9        | 13       | 10       | 14       |
|------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| v(OH)                  | 2900(y) | -        | 3350(y)  | -        | 3553(y)  | 3558(y)  | 3580(y)  |
| v(NH <sub>2</sub> )    | -       | 3407(oş) | 3314(oş) | 3485(oş) | 3312(oş) | 3484(oş) | 3307(oş) |
|                        |         | 3368(oş) | 3274(oş) | 3417(oş) | 3272(oş) | 3312(oş) | 3269(oş) |
|                        |         | 3263(oş) | 3199(oş) | 3312(oş) | 3201(oş) | 3284(oş) | 3205(oş) |
| v(CH) <sub>Ar</sub>    | 3067(z) | 3055(z)  | 3067(z)  | 3070(z)  | 3070(z)  | 3069(z)  | 3071(z)  |
| v(N <sup>+</sup> -H)   | -       | -        | 2768(z)  | -        | 2761(z)  | -        | 2796(z)  |
|                        |         |          | 2541(z)  |          | 2538(z)  |          | 2451(z)  |
| v(C=O) <sub>asit</sub> | 1693(ş) | -        | 1674(ş)  | -        | 1678(ş)  | -        | 1683(ş)  |
|                        | 1455(ş) |          | 1446(ş)  |          | 1448(ş)  |          | 1445(ş)  |
| v(C=O) <sub>amit</sub> | -       | 1660(ş)  | 1652(ş)  | 1678(ş)  | 1641(ş)  | 1675(ş)  | 1603(ş)  |
| v(C=N)                 | 1638(ş) | 1598(ş)  | 1599(ş)  | 1638(ş)  | 1599(ş)  | 1639(ş)  | 1535(ş)  |
| v(C=C)                 | 1573(ş) | 1525(ş)  | 1582(ş)  | 1600(ş)  | 1538(ş)  | 1611(ş)  | 1499(ş)  |
|                        | 1517(ş) | 1488(ş)  | 1538(ş)  | 1537(ş)  | 1511(ş)  | 1537(ş)  | 1445(ş)  |
|                        | 1455(ş) | 1403(ş)  | 1403(ş)  | 1512(ş)  | 1448(ş)  | 1448(ş)  | 1402(ş)  |
|                        | 1411(ş) |          |          | 1448(ş)  | 1404(ş)  | 1405(ş)  |          |
| v(C-O)                 | 1329(ş) | -        | 1325(ş)  | -        | 1324(ş)  | -        | 1348(ş)  |
|                        | 1297(ş) |          | 1274(ş)  |          | 1274(ş)  |          | 1278(ş)  |
|                        | 1080(ş) |          | 1094(ş)  |          | 1088(ş)  |          | 1106(ş)  |
| v(S=O)                 | -       | 1263(ş)  | 1247(ş)  | 1237(ş)  | 1236(ş)  | 1275(ş)  | 1244(ş)  |
|                        |         | 1157(ş)  | 1155(ş)  | 1156(ş)  | 1156(ş)  | 1155(ş)  | 1157(ş)  |
|                        |         | 1079(ş)  | 1072(ş)  | 1089(ş)  | 1108(ş)  | 1055(ş)  | 1085(ş)  |
| v(py)                  | 749(ş)  | -        | 777(ş)   | -        | 778(ş)   | -        | 775(ş)   |

\*y: yayvan, ş: şiddetli, oş: orta şiddetli, z: zayıf

### Antimikrobiyal aktivite sonuçları

Tüm bileşiklerin MİK değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Antibakteriyel sonuçlar Levoflaksın, Kloromfenikol, Sefepim ve Vankomisin ile, antifungal sonuçlar ise Ketokonazol ve Flukonazol ile karşılaştırılmıştır.

Bileşiklerin *S. aureus* bakterisine karşı MİK değerleri karşılaştırılmasında; **1**, **2** ve **14** bileşikler Vankomisin ve Sefepim ile aynı aktivite gözlenirken (31,25 µg/mL) diğer bileşikler Kloromfenikol ve Levoflaksın ile aynı aktivite gözlenmiştir (62,50 µg/mL).

Bileşiklerin *B. subtilis* bakterisine karşı MİK değerleri kıyaslamasında; **3**, **9** ve **14** bileşikler Vankomisin ve Levoflaksın ile aynı aktivite gözlenirken (31,25 µg/mL) diğer bileşikler Kloromfenikol ve Sefepim ile aynı aktivite gözlenmiştir (62,50 µg/mL).

Bileşiklerin *E. coli* bakterisine karşı MİK değerleri kıyaslamasında; tüm bileşikler Vankomisin'den daha fazla aktivite göstermiştir (125,00 µg/mL). **1**, **2**, **9** ve **14** bileşikler Levoflaksın ve Sefepim ile aynı aktivite gözlenirken (31,25 µg/mL) diğer bileşikler Kloromfenikol ile aynı aktivite gözlenmiştir (62,50 µg/mL).

Bileşiklerin *E. faecalis* bakterisine karşı MİK değerleri karşılaştırılmasında; **1** bileşiği tüm antibiyotiklerden daha iyi aktiviteye

sahiptir (15,62 µg/mL). **9** ve **12** bileşikler Vankomisin ve Levoflaksın ile aynı aktivite gözlenirken (31,25 µg/mL) diğer bileşikler Kloromfenikol ve Sefepim ile aynı aktivite gözlenmiştir (62,50 µg/mL).

Bileşiklerin *L. monocytogens* bakterisine karşı MİK değerleri karşılaştırılmasında; tüm bileşikler Vankomisin'den daha fazla aktivite göstermiştir (125,00 µg/mL). **1**, **2**, **4** ve **14** bileşikler tüm antibiyotiklerden daha iyi aktiviteye sahiptir (31,25 µg/mL). Diğer bileşikler Sefepim, Levoflaksın ve Kloromfenikol ile aynı aktivite gözlenmiştir (62,50 µg/mL).

Bileşiklerin *P. aeruginosa* bakterisine karşı MİK değerleri Levoflaksın ve Sefepim ile kıyaslamasında; tüm bileşikler (**8**, **9** ve **11** hariç) aynı etki gözlenmiştir (31,25 µg/mL). **8**, **9** ve **11** bileşikler Vankomisin ile aynı etki gözlenmiştir (62,50 µg/mL). Tüm bileşikler Kloromfenikol'den (125,00 µg/mL) daha fazla aktivite göstermiştir.

Bileşiklerin *Candida Albican* mayasına karşı MİK değerleri kıyaslamasında; tüm bileşikler (**11** hariç) Ketokonazol ve Flukonazol ile aynı derece etki göstermiştir (62,50 µg/mL). **11** Bileşiği daha az etki göstermiştir (125,00 µg/mL).

Tablo 5: Bileşiklerin antimikrobiyal aktivite sonuçları (µg/mL).

|               | a     | b     | c      | d     | e      | f      | g      |
|---------------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Vankomisin    | 31,25 | 31,25 | 125,00 | 31,25 | 125,00 | 62,50  |        |
| Levoflaksasın | 62,50 | 31,25 | 31,25  | 31,25 | 62,50  | 31,25  |        |
| Sefepim       | 31,25 | 62,50 | 31,25  | 62,50 | 62,50  | 31,25  |        |
| Kloromfenikol | 62,50 | 62,50 | 62,50  | 62,50 | 62,50  | 125,00 |        |
| Flukonazol    | -     | -     | -      | -     | -      | -      | 62,50  |
| Ketokonazol   | -     | -     | -      | -     | -      | -      | 62,50  |
| <b>1</b>      | 31,25 | 62,50 | 31,25  | 15,62 | 31,25  | 31,25  | 62,50  |
| <b>2</b>      | 31,25 | 62,50 | 31,25  | 62,50 | 31,25  | 31,25  | 62,50  |
| <b>3</b>      | 62,50 | 31,25 | 62,50  | 62,50 | 62,50  | 31,25  | 62,50  |
| <b>4</b>      | 62,50 | 62,50 | 62,50  | 62,50 | 31,25  | 31,25  | 62,50  |
| <b>8</b>      | 62,50 | 62,50 | 62,50  | 62,50 | 62,50  | 62,50  | 62,50  |
| <b>9</b>      | 62,50 | 31,25 | 31,25  | 31,25 | 62,50  | 62,50  | 62,50  |
| <b>10</b>     | 62,50 | 62,50 | 62,50  | 62,50 | 62,50  | 31,25  | 62,50  |
| <b>11</b>     | 62,50 | 62,50 | 62,50  | 62,50 | 62,50  | 62,50  | 125,00 |
| <b>12</b>     | 62,50 | 62,50 | 62,50  | 31,25 | 62,50  | 31,25  | 62,50  |
| <b>13</b>     | 62,50 | 62,50 | 62,50  | 62,50 | 62,50  | 31,25  | 62,50  |
| <b>14</b>     | 31,25 | 31,25 | 62,50  | 62,50 | 31,25  | 31,25  | 62,50  |

\*a: *S. aureus*; b: *B. subtilis*; c: *E. Coli*; d: *E. faecalis*; e: *L. monocytogenes*; g: *P. aeruginosa*; g: *C. albicans*

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, *N*-(6-sülfamoilbenzotiyazol-2-il)benzamid türevleri ile 2,6-piridindikarboksilik asitin yeni proton transfer tuzları (**12-14**) sentezlendi. Tuzların yapıları, element analiz, IR, <sup>1</sup>H ve <sup>13</sup>C NMR analizleri ile önerildi. Sentezlenen tüm maddeler DMSO, DMF gibi polar çözücülerde

çözünmektedir. Sentezlenen maddelerin deneysel olarak elde edilen elementel analiz sonuçları spektroskopik çalışmalar sonucunda önerilen yapıda hesaplanan element miktarları ile uyum içerisinde. FT-IR çalışmalarında başlangıç maddelerinde gözlenen fonksiyonel gruplar tuz yapılarında da gözükmemektedir. Spektroskopik sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda tuzlardaki asit:baz oranları **12** tuzunda 2:1, **13** tuzunda 1:1 ve **14** tuzunda 2:1 olarak bulunmuştur. Ayrıca, çalışmada kullanılan (**1** ve **2**) ve sentezlenen maddelerin (**3**, **4**, **8-14**) *E. faecalis*, *E. coli*, *L. monocytogenes*, *S. aureus*, *P. aeruginosa* ve *B. subtilis* (bakteri) ve *C. albicans* (maya) karşı antimikrobiyal aktiviteleri incelendi. Aktiviteler Ketokonazol, Flukonazol, Levofloksasin, Kloramfenikol, Vankomisin ve Sefepim ile karşılaştırıldı. Aktivite çalışmalarında en iyi aktiviteler, *S. aureus* bakterisinde **1**, **2** ve **14**, *B. subtilis* bakterisinde **3**, **9** ve **14**, *E. coli* bakterisinde **1**, **2** ve **9**, *E. faecalis* bakterisinde **1**, *L. monocytogenes* bakterisinde **1**, **2**, **4** ve **14**, *P. aeruginosa* bakterisinde **1-4**, **10** ve **12-14**, ve *C. albicans* mayasında tüm bileşiklerde (**11** hariç) gözlenmiştir.

### **Teşekkür**

Bu çalışma, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon'unca, 2024/16 numaralı proje olarak desteklenmiştir. Katkılarından dolayı komisyona teşekkür ederiz.

### **REFERANSLAR**

- Achaiah, G., Goud, N.S., Kumar, K.P., ve Mayuri, P. (2016). Review on 2-substituted benzothiazoles: diversity of synthetic methods and biological activities. International Journal of Pharmaceutical Sciences and Drug Research, 7(4), 1375-1382.
- Alazmaa, H.M., Avupati, V.R., ve Santiago, C., (2024). Synthesis, characterization, in vitro biological evaluation of a series of benzothiazole amides as antibacterial agents. Asian Journal of Chemistry, 36(4), 963-968.
- Al-Farraj, E.S., ve Fetoh, A. (2023). Synthesis of new Fe(III), Co(II), and Cr(III) complexes of N-(benzo[d]thiazol-2-ylcarbamothioyl)benzamide (H<sub>2</sub>L<sub>2</sub>): Structural characterization and biological activities. Applied Organometallic Chemistry, 37(11), e7248.
- Ali, R., ve Siddiqui, N. (2013). Biological Aspects of Emerging Benzothiazoles: A Short Review. Academic Editor: Gabriel Navarrete-Vazquez, Kaustubha Mohanty, Indian Institute of Technology Guwahati, India.
- Angulo-Cornejo, J., Lino-Pacheco, M., Richter, R., Hennig, L., Hallmeier, K.H., ve Beyer, L. (2000). Metal chelates of N-benzothiazol-2-yl-, N-benzoxazol-2-yl- and N-(1H-benzimidazol-2-yl)-benzamide. Inorganica Chimica Acta, 305(1), 38-45.
- Assignee: Institute of Medicinal Biotechnology, Chinese Academy of Medical Sciences, Substituted benzo-1,3-hetero-azoles useful in treatment of tuberculosis and their preparation. China, CN103772376 (2014).

- Avan, İ., Güven, A., ve Güven, K., (2013). Synthesis and antimicrobial investigation of some 5H-pyridazino[4,5-b]indoles. *Turkish Journal of Chemistry*, 37, 271-291.
- Bonnett, S., Jee, J.A., Chettiar, S., Ovechkina, Y., Korkegian, A., Greve, E., Odingo, J., ve Parish, T. (2023). Identification of 2-amino benzothiazoles with bactericidal activity against *Mycobacterium tuberculosis*. *Microbiology Spectrum*, 11(1), 1-17.
- Caruso, U., Panunzi, B., Roviello, A., Tingoli, M., ve Tuzi, A. (2011). Two aminobenzothiazole derivatives for Pd(II) and Zn(II) coordination. *Inorganic Chemistry Communications*, 14(1), 46-48.
- Chini, M.G., Giordano, A., Potenza, M., Terracciano, S., Fisher, K., Vaccaro, M.C., Colarusso, E., Bruno, I., Riccio, R., Koeberle, A., Werz, O., Bifulco, G. (2020). Targeting mPGES-1 by a combinatorial approach: identification of the aminobenzothiazole scaffold to suppress PGE levels. *ACS Medicinal Chemistry Letters*, 11(5), 783-789.
- Chiou, J.T., Wu, Y.Y., Lee, Y.C., ve Chang, L.S. (2023). BCL2L1 inhibitor A-1331852 inhibits MCL1 transcription and triggers apoptosis in acute myeloid leukemia cells. *Biochemical Pharmacology*, 215, 115738,
- Dias, R.F.C., Ribeiro, B.M.R.M., Cassani, N.M., Farago, D.N., Antonucci, G.A., de Oliveira Rocha, R.E., de Oliveira Souza, F., Pilau, E.J., Jardim, A.C.G., Ferreira, R.S., ve Júnior, C.O.R., (2023). Discovery and structural optimization of a new series of N-acyl-2-aminobenzothiazole as inhibitors of Zika virus. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 95(15), 117488.
- Dittmar, M., Whig, K., Miller, J., Kamalia, B., Suppiah, S., Pereyigina, L., Sullivan, K.E., Schultz, D.C., ve Cherry, S. (2023). Nucleoside analogs NM107 and AT-527 are antiviral against rubella virus. *PNAS Nexus*, 2(9), 1-8.
- Galieva, N.A., Saveliev, D.A., Eltsov, O.S., Bakulev, V.A., Lubec, G., Xing, J., Fan, Z., ve Beryozkina, T.V., (2021). Antimicrobial activity of new benzazolyl N-sulfonyl amidines. *Mendeleev Communications*, 31(4), 495-497.
- Gurram, S.R., ve Azam, M.A. (2021). Design, synthesis and biological evaluation of some novel N'-(1,3-benzothiazol-2-yl)-arylamide derivatives as antibacterial agents. *Chemical Papers*, 75(10), 5435-5452.
- İlkimen, H., Yenikaya, C. (2025). *N*-benzotiyazol-2-il-benzamit ile 2,6-piridindikarboksilik asit içeren tuz ve metal komplekslerinin sentezi ve karakterizasyonu. *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, (baskıda).
- İlkimen, H., Yenikaya, C., Gülbandılar, A. (2025). 4-Nitro-N-(6-sülfamoylbenzotiazol-2-il)benzamidin metal komplekslerinin sentezi ve karakterizasyonu. *Ata-Kimya Dergisi*, 5(2) 1-7.
- İlkimen, H., Yenikaya, C., Gülbandılar, A. (2025). *N*-(benzotiazol-2-il)benzamid türevlerinin Fe(II) ve Cu(II) komplekslerinin sentezi ve karakterizasyonu. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, (Baskıda).
- Irzoqi, A.A., Salman, F.A., Alasadi, Y.K., ve Alheety, M.A. (2021). Synthesis and structural characterization of palladium(II) mixed-ligand complexes of N-(benzothiazol-2-yl)benzamide and 1,2-bis(diphenylphosphino)ethane. *Inorganic Chemistry*, 60(24), 18854-18858.
- Jyothi, M., Ranganatha, V.L., Khamees, H.A., Khadri, M.J.N., veKhanum, S.A., (2023). Design, synthesis, characterization and analysis of anti-inflammatory properties of novel N-(benzo[d]thiazol-2-yl)-2-[phenyl(2-(piperidin-1-

- yl)ethylamino]benzamides and *N*-(benzo[d]thiazol-2-yl)-2-[phenyl (2-morpholino)ethylamino]benzamides derivatives through in vitro and in silico approach. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 20(4), 861-873.
- Kaplançıklı, Z.A., Turan-Zitouni, G., Özdemir, A., Revial, G., ve Güven, K., (2007). Synthesis and antimicrobial activity of some thiazolyl-pyrazoline derivatives. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 182(4), 749-764.
- Kaplançıklı, Z.A., Turan-Zitouni, G., Özdemir, A., ve Güven, K., (2004). Synthesis and study of antibacterial and antifungal activities of novel 2-[[[(benzoxazole/benzimidazole-2-yl)sulfanyl] acetyl amino]thiazoles. *Archives of Pharmacal Research*, 27(11), 1081-1085.
- Lapierre, T.J.W.J.D., Farago, D.N., de Moura Lodi Cruz, M.G.F., de Melo Resende, D., de Oliveira, A.C.R., dos Santos, B.R.M., de Oliveira Souza, F., Michelin-Duarte, S., Chelucci, R.C., Andricopulo, A.D., Ferreira, L.L.G., Pilau, E.J., Murta, S.M.F., ve Júnior, C.O.R. (2024). Evaluation and discovery of novel benzothiazole derivatives as promising hits against *Leishmania Infantum*. *Chemical Biology & Drug Design*, 103(4), e14525.
- Leal, E.S., Aucar, M.G., Gebhard, L.G., Iglesias, N.G., Pascual, M.J., Casal, J.J., Gamarnik, A.V., Cavasotto, C.N., ve Bollini, M. (2017). Discovery of novel dengue virus entry inhibitors via a structure-based approach. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 27(16), 3851-3855.
- Maus, H., Barthels, F., Hammerschmidt, S.J., Kopp, K., Millies, B., Gellert, A., Ruggieri, A., ve Schirmeister, T. (2021). SAR of novel benzothiazoles targeting an allosteric pocket of DENV and ZIKV NS2B/NS3 proteases. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 47, 116392.
- Muhammed Aziz, D., Hassan, S.A., Amin, A.A.M., Abdullah, M.N., Qurbani, K., Ave ziz, S.B. (2023). A synergistic investigation of azo-thiazole derivatives incorporating thiazole moieties: a comprehensive exploration of their synthesis, characterization, computational insights, solvatochromism and multimodal biological activity assessment. *RSC Advances*, 13(49), 34534-34555.
- Ramos, S., Vicente-Blazquez, A., Lopez-Rubio, M., Gallego-Yerga, L., Alvarez, R., ve Pelaez, R., (2023). Frentizole, a nontoxic immunosuppressive drug, and its analogs display antitumor activity via tubulin inhibition. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(24), 17474.
- Ricci, F., Angeli, A., Mancuso, F., De Luca, L., Supuran, C.T., ve Gitto, R., (2023). Screening campaign and docking investigations in identifying new hit compounds as inhibitors of human carbonic anhydrases expressed in tumour cells. *ChemMedChem*, 18(20), e202300330.
- Shadap, L., Agarwal, N., Chetry, V., Poluri, K.M., Kaminsky, W., ve Kollipara, M.R. (2021). Arene ruthenium, rhodium and iridium complexes containing benzamide derivative ligands: Study of interesting bonding modes, antibacterial, antioxidant and DNA binding studies. *Journal of Organometallic Chemistry*, 937, 121731.
- Sharma, N., Srivastava, N., Kaushal, A., Das, B., Vashistha, A., Kumar, L., Kumar, R., ve Yadav, A.K. (2023). Synthesis, in silico study and biological evaluation of *N*-(benzothiazol/thiazol-2-yl)benzamide derivatives as quorum sensing inhibitors against *Pseudomonas aeruginosa*. *Chemistry and Biodiversity*, 20(9), e202300647.

- Singh, M., Verma, H., Bhandu, P., Kumar, M., Narendra, G., Choudhary, S., Singh, P.K., ve Silakari, O. (2023). Network analysis guided designing of multi-targeted anti-fungal agents: synthesis and biological evaluation. *Journal of Molecular Structure*, 1272, 134128.
- Sovic, I., Cindric, M., Perin, N., Bocek, I., Novakovic, I., Damjanovic, A., Stanojkovic, T., Zlatovic, M., Hranjec, M., ve Bertosa, B. (2019). Biological potential of novel methoxy and hydroxy substituted heteroaromatic amides designed as promising antioxidative agents: synthesis, 3D-QSAR analysis, and biological activity. *Chemical Research in Toxicology*, 32(9), 1880-1892.
- Taj, M.B., Raheel, A., Alelwani, W., Babteen, N., Kattan, S., Alnajeebi, A., Sharif, M., Ahmad, R.H., Hazeeq, A.A., Tirmizi, S.A., ve Ali, H.B.M., (2019). One-Pot CuO-catalyzed green synthesis of N(N')-arylbenzamidines as potential enzyme inhibitors., *Russian Journal of Organic Chemistry*, 55(7), 1047-1052,
- Taj, M.B., Tirmizi, S.A., Raheel, A., Alelwani, W., Hajjar, D., Makki, A.A., Ali, U., Darroudi, M., ve Ali, H.B.M. (2018). Facile synthesis of N-phenyl benzamidine derivatives, their skin protecting, and anti-aging activity. *Russian Journal of General Chemistry*, 88(11), 2425-2431.
- Wang, X., Zhao, M., Chang, Y., Guan, S., Li, M., Yang, H., ve Sun, M. (2024). Identification of novel benzothiazole derivatives as inhibitors of NEDDylation pathway to inhibit the progression of gastric cancer., *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 100, 129647.
- Wei, Y., Zhang, M., Lyu, Z., Yang, G., Tian, T., Ding, M., Zeng, X., F., Xu, Wang, P., Li, F., Liu, Y., Cao, Z., Lu, J., Hong, X., ve Wang H., (2021). Benzothiazole amides as TRPC3/6 Inhibitors for gastric cancer treatment. *ACS Omega*, 6(13), 9196-9203.
- Yadav, P.S., ve Senthilkumar, G.P. (2011). Benzothiazole: different methods of synthesis and diverse biological activities., *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Drug Research*, 3, 1-7.,
- Yadav, R., Meena, D., Singh, K., Tyagi, R., Yadav, Y., ve Sagar, R. (2023). Recent advances in the synthesis of new benzothiazole based anti-tubercular compounds. *RSC Advances*, 13, 21890-21925.
- Zheng, H., Li, Y.X., Xiong, W.C., Wang, X.C., Gong, S.S., Pu, S., Shi, R., ve Sun, Q. (2024). Mechanistic insights into diversified photoluminescence behaviors of BF<sub>2</sub> complexes of N-benzoyl 2-aminobenzothiazoles. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 26(15), 11611-11617.



# **2,3,5,6-Pirazintetrakarboksilik Asitin Diğer Bileşiklerle Verdiği Tuz, co-Kristal ve Metal Komplekslerinin İncelenmesi**

**Halil İLKİMEN<sup>1\*</sup>**

**Cengiz YENİKAYA<sup>2</sup>**

- 1- Dr. Öğr. Üyesi; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Kütahya Türkiye. halil.ilkimen@dpu.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-1747-159X.
- 2- Prof. Dr.; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Kütahya Türkiye. cengiz.yenikaya@dpu.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-5867-9146.

## ÖZET

Pirazinkarboksilik asitlerin izomerleri 2-pirazinkarboksilik asit, 2,3-pirazindikarboksilik asit, 2,5-pirazindikarboksilik asit ve 2,6-pirazindikarboksilik asit, 2,3,5-pirazintrikarboksilik asit ve 2,3,5,6-pirazintetrakarboksilik asittir. 2,3,5,6-Pirazintetrakarboksilik asit ve deprotonlanmış anyonları, pirazin halkasının azot atomlarını ve karboksilik grupların oksijen atomlarını içeren potansiyel koordinasyon bölgesine sahiptir ve metal komplekslerinde köprü ligandları olarak görev yapan çok işlevli ligandlar olarak işlev görebilmektedir. Bu çalışmada, 2,3,5,6-Pirazintetraakarboksilik asit ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. 2,3,5,6-Pirazintetrakarboksilik asitin 4,4'-bipiridin ile co-kristal, 8-hidroksikinolin ve hidrazin ile proton transfer tuzu, Li(I), Na(I), K(I), Cs(I), Ca (II), V(IV), Mn(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II), Sn(IV), La(III), Yb(III), Gd(III), Dy(III), Ho(III), Yb(III), Tb(III), Eu(III), Lu(III), Er(III), Ce(II), Ce(III), Sm(III), Gd(III), U(IV), Co(II)/Ni(II), Cu(II)/Cs, Cu(II)/Mg, U(VI)/Ag(I), U(VI)/Na, U(VI)/K, U(VI)/K ve U(VI)/Rb kompleksleri ve piridin'in Co(II), Cu(II), Cd(II), 2,2'-bipiridin'in Mn(II), Co(II), Ni(II), Cu(II), Zn(II), 4,4'-bipiridin'in Cu(II), Zn(II), Cd(II), Ag(I), 1,2-bis(4-piridil)etan'ın Zn(II), Cd(II), Ag(I), 1,10-fenantrolin (phen) Mn(II), Cu(II), Zn(II), Ag(I), trifenilfosfin'in Ru(II), guanidin'in U(VI), etilendiamin'in U(VI)/Co(II), cucurbit[6]uril'in U(VI), 1,5-siklopentadienil'in Ti(VI), Ti(III), Ti(III)/Zr(III), metilamin, etilamin, propilamin, bütülin, pentilamin, heksilamin, heptilamin ve oktilamin'in V(II) karışık ligandlı metal kompleksleri sentezleyip, yapıları çeşitli spektroskopik analiz yöntemleri ile karakterize edilmiştir.

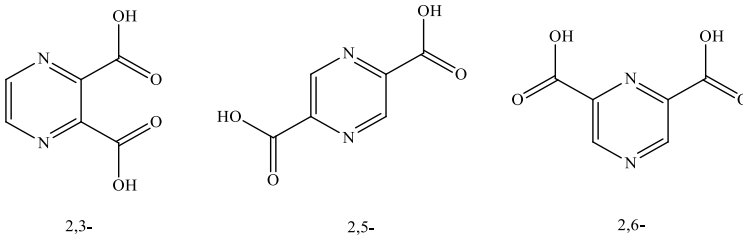
*Anahtar Kelimeler – 2,3,5,6-Pirazintetraakarboksilik asit, metal kompleksi, co-kristal, proton transfer tuzu, karışık ligand kompleksi.*

## GİRİŞ

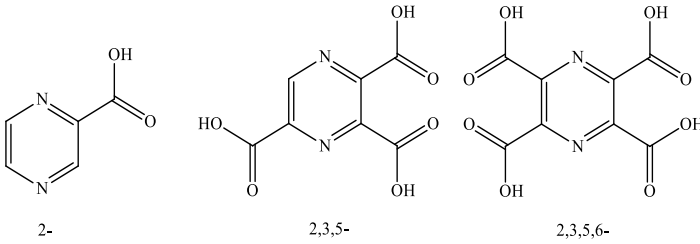
Pirazinkarboksilik asit kafes yapılı bileşiklerin oluşumunda en çok aranan ligandlardır. Bu bileşikler, malzeme bilimleri, tıp, endüstriyel kataliz, ışık özellikleri ve biyolojik sistemlerde moleküler tanıma süreçleri gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir (Chen vd., 1997:338; Long vd., 2002:2026; Dalgarno vd., 2005:649; Moitsheki vd., 2006:m542). Pirazinkarboksilik asit ligandı ile d-blok geçiş metalleri ve lantanidiner arasında genellikle oluşturulan yapılar genellikle 1D (Gao vd., 2009:97; Zhai vd., 2012:2535; Zhang vd., 2014:2014; Golafale vd., 2017:163), 2D (Ghosh ve Bharadwaj, 2006:119; Li vd., 2014; Xu vd., 2015:1845; Golafale vd., 2017:163) ve 3D (Xu vd., 2015:1845; Golafale vd., 2017:163; Liu vd., 2023:13498) koordinasyon modlarına sahiptir.

Pirazinkarboksilik asitler, mono, di, tri ve tetra-karboksilik asit grubu içerebilmektedir. Dipirazinkarboksilik asitin 2,3-, 2,5- ve 2,6-pirazindikarboksilik asit izomerleri vardır (Şekil 1). Monopirazinkarboksilik asitin izomeri 2-pirazinkarboksilik asit, tripirazinkarboksilik asitin izomeri 2,3,5-pirazintrikarboksilik asit ve tetrapirazinkarboksilik asitin izomeri ise 2,3,5,6-pirazintetrakarboksilik asittir (Şekil 2).

2,3,5,6-Pirazintetrakarboksilik asit ve deprotonlanmış anyonları, pirazin halkasının azot atomlarını ve karboksilik grupların oksijen atomlarını içeren potansiyel koordinasyon bölgesine sahiptir ve metal komplekslerinde köprü ligandları olarak görev yapan çok işlevli ligandlar olarak işlev görebilmektedir.



Şekil 1: Prazindikarboksilik asit türevleri



Şekil 2: Mono, tri ve tetra-pirazinkarboksilik asit türevleri

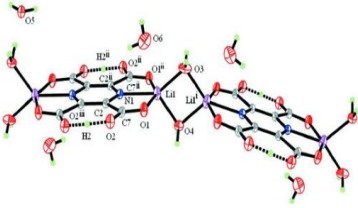
## MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Scifinder programı kullanarak 2,3,5,6-pirazintetrakarboksilik asitin metal kompleksleri ve diğer bileşikler ile yapılan co-kristal, tuz ve karışık ligandlı metal kompleksleri incelenmiştir.

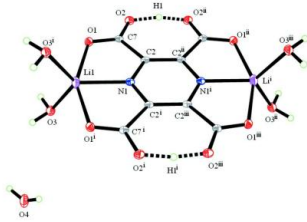
## BULGULAR VE TARTIŞMA

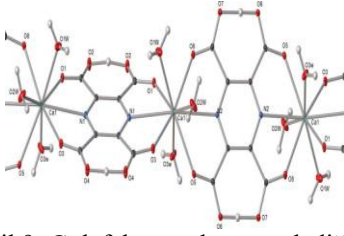
2,3,5,6-Pirazintetraakarboksilik asit ile Li(I)  $\{([Li_2(C_8H_2N_2O_8)(H_2O)_2] \cdot 2.5H_2O)_n\}$  (Şekil 3) (Starosta ve Leciejewicz, 2014:m234),  $[Li_2(pta)(H_2O)_4] \cdot H_2O$  (Şekil 4) (Starosta ve Leciejewicz, 2014:m172),  $[Li_2(pta)(H_2O)_5]$  (Şekil 5) (Starosta ve Leciejewicz, 2010:m151), Na(I)  $\{[Na_2(H_2pta)(H_2O)_2]\}$  (Şekil 6) (Masci vd., 2010:2004), K(I)  $\{[K(H_3pta)]\}$  (Şekil 7) (Masci vd., 2010:2004), Cs(I)  $\{[Cs_2(H_2pta)]\}$  (Şekil 8) (Masci vd., 2010:2004), Ca (II)  $\{[Ca(H_2pta)(H_2O)]_n\}$  (Şekil 9) (Golafale vd., 2016:163),  $\{[Ca_4(pta)_2(H_2O)_2]\}$  (Şekil 10) (Starosta ve Leciejewicz, 2008:490), V(IV)  $\{[V_2O_2(pta)(H_2O)_4]\}$  (Şekil 11) (Rambaran vd., 2023:121662), Mn(II)  $\{[Mn_2(pta)]_n\}$  (Cao vd., 2019),  $\{([Mn(H_2pta)(H_2O)_2] \cdot 2H_2O)_n\}$  (Şekil 12) (Marioni vd., 1994:161),  $\{[K_2[Mn(pta)(H_2O)] \cdot 2.25H_2O)_n\}$  (Şekil 13) (Marioni vd., 1994:161),  $\{[Mn_2(pta)]_n(H_2O)_2\}$  (Şekil 14) (Moitsheki vd., 2026:m542),  $\{[Mn_2(pta)(H_2O)_2]_n\}$  (Şekil 15) (Golafale vd., 2016:163), Co(II)/Ni(II)  $\{[(pta)_{0.5}Co(H_2O)_4Ni(pta)_{0.5}(H_2O)_2]\}$  (Şekil 16) (Li vd., 2021:230), Ni(II)  $\{([Ni(pta)(H_2O)_2]Ni(H_2O)_4)_n\}$  (Şekil 17) (Alfonso vd., 2001:1144), Cu(II)/Cs  $\{Cs_4[Cu_2(pta)_2(H_2O)_2] \cdot 9H_2O)_n\}$  (Şekil 18) (Graf vd., 1993:202), Cu(II)/Mg  $\{[Mg(H_2O)_6][Cu(pta)(H_2O)_2] \cdot 2H_2O)_n\}$  (Şekil 19) (Graf vd., 1993:202), Zn(II)  $\{[Zn(H_2pta)]_n\}$  (Şekil 20) (Ding vd., 2025),  $\{[Zn(pta)(H_2O)_2Zn(H_2O)_4]_n\}$  (Şekil 21) (Golafale vd., 2016:163), Cd(II)  $\{[Cd(pta)(H_2O)_2]_n\}$  (Şekil 22) (Zhao vd., 2011:1245),  $\{([Cd(H_2pza)(H_2O)_2] \cdot 2H_2O)_n\}$  (Şekil 23) (Wang vd., 2005:856), Sn(IV)  $\{[Sn_4(Ph)_{12}(pta)]\}$  (Şekil 24) (Li vd., 2020a),  $\{[Sn(Ph)_3(pta)]_n\}$  (Şekil 25) (Li vd., 2020b), La(III)  $\{[La(pta)_{1.5}La(H_2O)_6]_n\}$  (Şekil 26) (Ning vd., 2016:302),  $\{[La_2(pta)_{1.5}(H_2O)_6] \cdot 7H_2O\}$  (Ning vd., 2016:229), Yb(III)  $\{[Yb_2(pta)_{1.5}(H_2O)_6] \cdot 7H_2O\}$  (Ning vd., 2016:302; 2016:229), Gd(III)  $\{([Gd_4(pta)_3(H_2O)_{11}] \cdot 10H_2O)_n\}$  (Şekil 27) (Ingram vd., 2015:5377), Dy(III)  $\{[K_5Dy_5(pta)_5(H_2O)_{19}] \cdot 7H_2O\}$  (Şekil 28) (Zhang vd., 2014:2014),  $\{K_5[Dy_5(pta)_5(H_2O)_{19}] \cdot 7H_2O\}$  (Ning vd., 2023), Ho(III)  $\{[K_5Ho_5(pta)_5(H_2O)_{19}] \cdot 7H_2O\}$  (Zhang vd., 2014:2014), Yb(III)  $\{[K_5Yb_5(pta)_5(H_2O)_{19}] \cdot 7H_2O\}$  (Zhang vd., 2014:2014), Tb(III)  $\{([Tb_2(pta)_3] \cdot 6.5H_2O)_n\}$  (Şekil 29) (Yang vd., 2010:1309),  $\{[Tb_2(H_2pta)_3] \cdot 3.5H_2O\}$  (Şekil 30) (Thuery ve Masci, 2010:2982),  $\{([Tb_4(pta)_3(H_2O)_{11}] \cdot 10H_2O)_n\}$  (Ingram vd., 2015:5377), Eu(III)  $\{[EuK(pta)(H_2O)_4]\}$  (Şekil 31) (Thuery ve Masci, 2010:2982), Yb(III)  $\{[Yb_2(pta)_{1.5}(H_2O)_6] \cdot 7H_2O\}$  (Şekil 32) (Quan vd., 2009:1679), Lu(III)  $\{[Lu_2(pta)_{1.5}(H_2O)_6] \cdot 7.5H_2O\}$  (Quan vd., 2009:1679), Er(III)  $\{[Er_2(pta)_{1.5}(H_2O)_6] \cdot 7H_2O\}$  (Quan vd., 2009:1679), Ce(II)  $\{[Ce_2(pta)(H_2O)_6]_n\}$  (Ning vd., 2017:12885), Ce(III)  $\{[NaCe(pta)(H_2O)_3] \cdot H_2O\}$  (Şekil 33) (Zhang vd., 2014:12574), Sm(III)  $\{[NaSm(pta)(H_2O)_3] \cdot H_2O\}$  (Zhang vd., 2014:12574), Eu(III)  $\{[NaEu(pta)(H_2O)_3] \cdot H_2O\}$  (Zhang vd., 2014:12574), Gd(III)

$\{[\text{NaGd}(\text{pta})(\text{H}_2\text{O})_3] \cdot \text{H}_2\text{O}\}$  (Zhang vd., 2014:12574), Tb(III)  
 $\{[\text{NaTb}(\text{pta})(\text{H}_2\text{O})_3] \cdot \text{H}_2\text{O}\}$  (Zhang vd., 2014:12574), Eu(III)  
 $\{([\text{KEu}(\text{pta})(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot \text{H}_2\text{O})_n\}$  (Şekil 34) (Yang vd., 2014:2296), Tb(III)  
 $\{[\text{KTb}(\text{pta})(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 1,25\text{H}_2\text{O}\}_n$  (Yang vd., 2014:2296), U(IV)  
 $\{[(\text{UO}_2)_2(\text{pta})(\text{H}_2\text{O})] \cdot 2\text{H}_2\text{O}\}$  (Şekil 35) (Masci ve Thuery, 2008:1689),  
U(VI)/Ag(I)  $\{[\text{UO}_2\text{Ag}_2(\text{pta})]\}$  (Şekil 36) (Thuery ve Harrowfield, 2022:116118), U(VI)/Na  $\{[\text{UO}_2\text{Na}_2(\text{pta})(\text{H}_2\text{O})_4]\}$  (Şekil 37) (Masci ve Thuery, 2008:1689), U(VI)/K  $\{[\text{UO}_2\text{K}_2(\text{H}_2\text{pta})_2(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}\}$  (Şekil 38) (Masci ve Thuery, 2008:1689), U(VI)/K  $\{[\text{UO}_2\text{K}_2(\text{H}_2\text{pta})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}\}$  (Masci ve Thuery, 2008:1689) ve U(VI)/Rb  $\{[\text{UO}_2\text{Rb}_2(\text{H}_2\text{pta})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}\}$  (Şekil 39) (Masci ve Thuery, 2008:1689) kompleksleri sentezleyip, yapıları çeşitli spektroskopik analiz teknikleri ile aydınlatılmıştır.

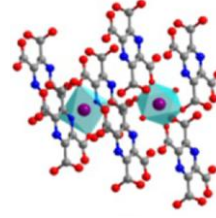


Şekil 3: Starosta ve Leciejewicz'in sentezlediği Li kompleksi

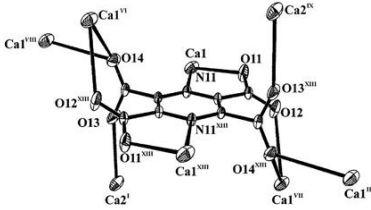




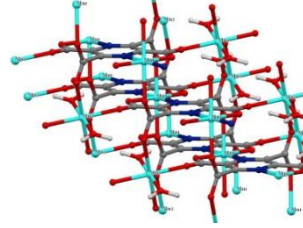
Şekil 9: Golafale ve ark. sentezlediği Ca kompleksi



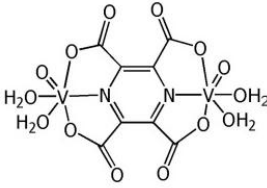
Şekil 14: Liu ve ark. sentezlediği Mn(II) kompleksi



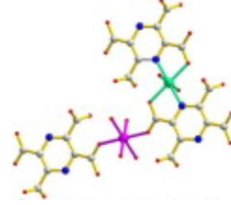
Şekil 10: Starosta ve Leciejewicz'in sentezlediği Ca kompleksi



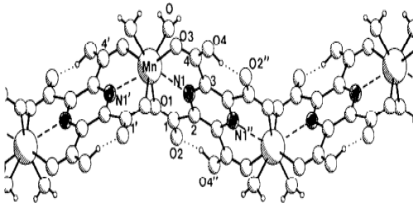
Şekil 15: Golafale ve ark. sentezlediği Ca kompleksi



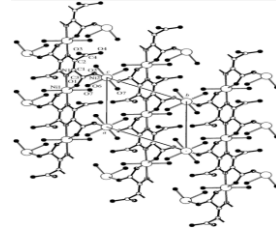
Şekil 11: Rambaran ve ark. sentezlediği V(IV) kompleksi



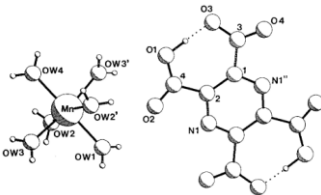
Şekil 16: Li ve ark. sentezlediği Co(II)/Ni(II) kompleksi



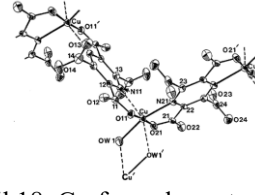
Şekil 12: Marioni ve ark. sentezlediği Mn(II) kompleksi



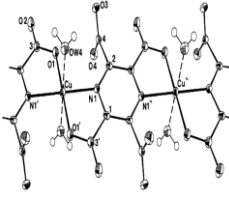
Şekil 17: Alfonso ve ark. sentezlediği Ni(II) kompleksi



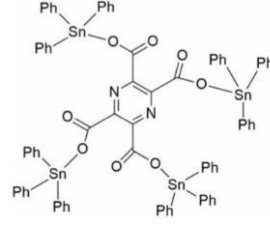
Şekil 13: Marioni ve ark. sentezlediği Mn(II) kompleksi



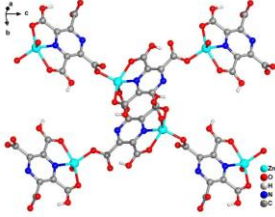
Şekil 18: Graf ve ark. sentezlediği Cu(II)/Cs(I) kompleksi



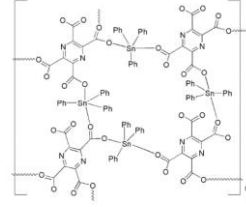
Şekil 19: Graf ve ark. sentezlediği  
Cu(II)/Mg(II) kompleksi



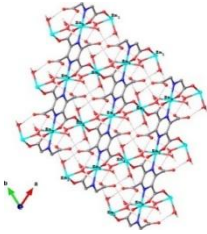
Şekil 24: Li ve ark. sentezlediği Sn(IV)  
kompleksi



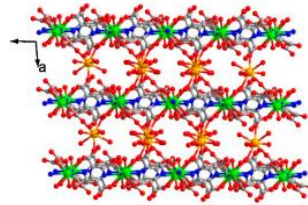
Şekil 20: Ding ve ark. sentezlediği  
Zn(II) kompleksi



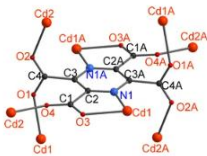
Şekil 25: Li ve ark. sentezlediği Sn(IV)  
kompleksi



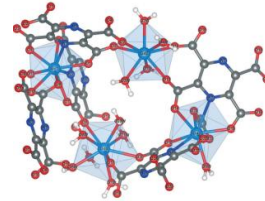
Şekil 21: Golafale ve ark. sentezlediği  
Zn(II) kompleksi



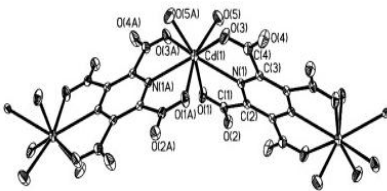
Şekil 26: Ning ve ark. sentezlediği  
La(III) kompleksi



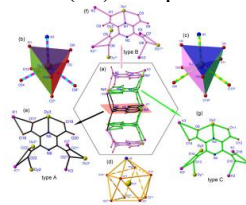
Şekil 22: Zhao ve ark. sentezlediği  
Cd(II) kompleksi



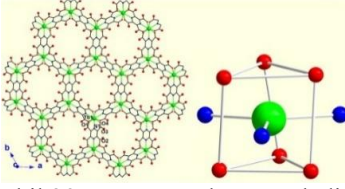
Şekil 27: Ingram ve ark. sentezlediği  
Gd(III) kompleksi



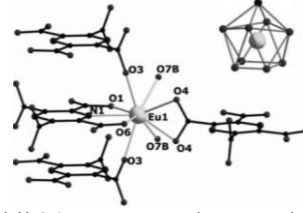
Şekil 23: Wang ve ark. sentezlediği  
Cd(II) kompleksi



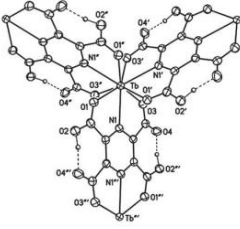
Şekil 28: Zhang ve ark. sentezlediği  
Dy(III) kompleksi



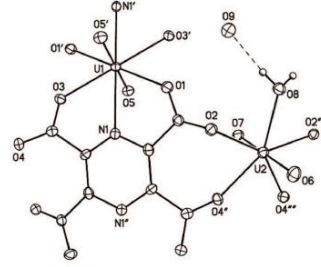
Şekil 29: Yang ve ark. sentezlediği Tb(III) kompleksi



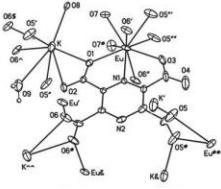
Şekil 34: Yang ve ark. sentezlediği Eu(III) kompleksi



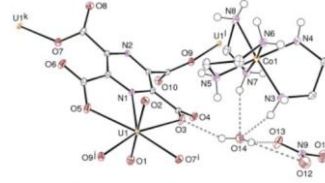
Şekil 30: Thuery ve Masci'nın sentezlediği Tb(III) kompleksi



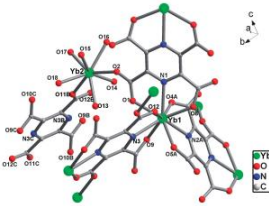
Şekil 35: Masci ve Thuery'nin sentezlediği U(IV) kompleksi



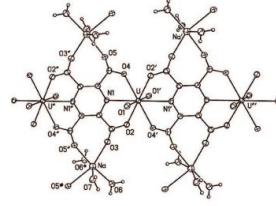
Şekil 31: Thuery ve Masci'nın sentezlediği Tb(III) kompleksi



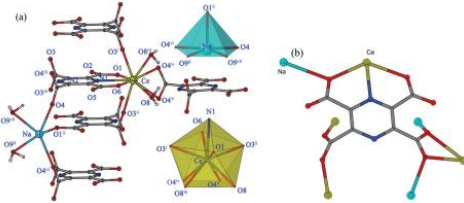
Şekil 36: Thuery ve Harrowfield'ın sentezlediği U(VI)/Ag(I) kompleksi



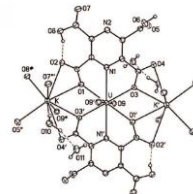
Şekil 32: Quan ve ark. sentezlediği Yb(III) kompleksi



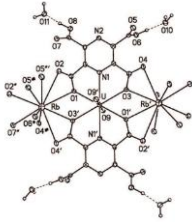
Şekil 37: Thuery ve Harrowfield'ın sentezlediği U(VI)/Na(I) kompleksi



Şekil 33: Zhang ve ark. sentezlediği Ce(III) kompleksi



Şekil 38: Thuery ve Harrowfield'ın sentezlediği U(VI)/K(I) kompleksi

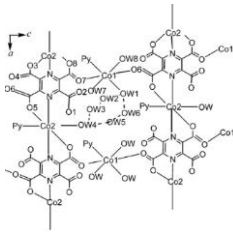


Şekil 39: Thuery ve Harrowfield'ın sentezlediği U(VI)/Rb(I) kompleksi

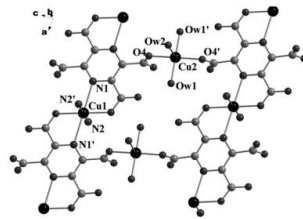
2,3,5,6-Pirazintetrakarboksilik asitin 4,4'-bipiridin (4,4'-bpy) [(4,4'-bipyH<sub>2</sub>)(H<sub>2</sub>pta)], [(4,4'-bipyH<sub>2</sub>)(H<sub>2</sub>pta)(Cl)].4H<sub>2</sub>O (Mei vd., 2016:1031) ile co-kristal, 8-hidroksikinolin (Q) [HQ]<sub>2</sub>[H<sub>2</sub>pta].2H<sub>2</sub>O (Xu vd., 2015:1845) ve hidrazin (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) {(N<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)(H<sub>3</sub>pta).6H<sub>2</sub>O} (Starosta ve Leciejewicz, 2007:o3734) ile proton transfer tuzu bileşikleri sentezlenip yapıları çeşitleri spektroskopik analiz metotları ile açıklanmıştır.

2,3,5,6-Pirazintetrakarboksilik asit ile piridin'in (py) Co(II) {[Co<sub>2</sub>(ptc)(py)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>4</sub>].4H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 40) (Ghosh ve Bharadwaj, 2005:4880), Cu(II) {[Cu<sub>2</sub>(ptc)(py)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>3</sub>].4H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 41) (Ghosh vd., 2006:468), {[Cu<sub>2.5</sub>(ptc)(py)<sub>8</sub>(NO<sub>3</sub>)].10H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 42) (Ghosh ve Bharadwaj, 2004:6887), Cd(II) {[Cd<sub>2</sub>(ptc)(py)<sub>5</sub>H<sub>2</sub>O].5H<sub>2</sub>O.py}<sub>n</sub> (Şekil 43) (Ghosh ve Bharadwaj, 2006:119), 2,2'-bipiridin'in (2,2'-bpy) Mn(II) {[Mn<sub>2</sub>(pta)(2,2'-bpy)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>].2H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 44) (Gao vd., 2009:97), Co(II) {[Co(H<sub>2</sub>pta)(2,2'-bpy)(H<sub>2</sub>O)]} (Şekil 45) (Fang vd., 2008:393), Ni(II) {[Ni(H<sub>2</sub>pta)(2,2'-bpy)(H<sub>2</sub>O)]} (Yang vd., 2009:487), Cu(II) {[Cu<sub>2</sub>(pta)(2,2'-bpy)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)].4H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 46) (Yang vd., 2009:2719), {[Cu<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>pta)(2,2'-bpy)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>](NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O} (Şekil 47) (Yang vd., 2009:2719), {[Cu<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>pta)(ox)(2,2'-bpy)<sub>2</sub>].8H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 48) (Yang vd., 2009:3306), Zn(II) {[Zn<sub>2</sub>(pta)(2,2'-bpy)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>].2H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 49) (Yang vd., 2009:2719), 4,4'-bipiridin'in (4,4'-bpy) Cu(II) {[Cu<sub>2</sub>(pta)(4,4'-bpy)(H<sub>2</sub>O)<sub>4</sub>].6H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Gao vd., 2015:1603), {[Cu<sub>6</sub>(pta)<sub>4</sub>(Hbpy)<sub>4</sub>(bpy)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>8</sub>].17H<sub>2</sub>O} (Shi vd., 2014:2174), Zn(II) {[Zn<sub>3</sub>(pta)<sub>2</sub>(Hbpy)<sub>2</sub>(bpy)(H<sub>2</sub>O)<sub>4</sub>].7H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Shi vd., 2014:2174), Cd(II) {[Cd<sub>2</sub>(pta)(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>].3H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Shi vd., 2014:2174), Ag(I) {[Ag<sub>4</sub>(4,4'-bpy)<sub>3</sub>(pta)]<sub>n</sub>} (Şekil 50) (Qu vd., 2012:3740), {[Ag<sub>6</sub>(4,4'-bpy)<sub>2</sub>(pta)(CN)<sub>2</sub>].2.6H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 51) (Qu vd., 2012:3740), 1,2-bis(4-piridil)etan'ın (bpe) Zn(II) {[Zn(Hpta)(Hbpe)(H<sub>2</sub>O)]} (Şekil 52) (Li vd., 2014:10424), {[Zn<sub>2</sub>(pta)(bpe)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)].9H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 53) (Li vd., 2014:10424), Cd(II) {[Cd<sub>2</sub>(pta)(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>].2.5H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Gao vd., 2015:1603), Ag(I) {[Ag<sub>4</sub>(pta)(bpe)<sub>3</sub>].5H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 54) (Gao vd., 2014:194), 1,10-fenantrolin (phen) Mn(II) {[Mn<sub>2</sub>(pta)(phen)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>].4H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Şekil 55) (Gao vd., 2009:97), {[Mn<sub>2</sub>(phen)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>pta)Mn<sub>2</sub>(phen)<sub>2</sub>(Hpta)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>].4H<sub>2</sub>O}<sub>n</sub> (Zhai vd., 2012:2535), Cu(II) {[Cu<sub>2</sub>(pta)(phen)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>].2HNO<sub>3</sub>.2H<sub>2</sub>O} (Şekil 56) (Fang vd., 2009:137), Zn(II) {[Zn<sub>2</sub>(pta)(phen)<sub>4</sub>].12H<sub>2</sub>O} (Şekil 57) (Yang

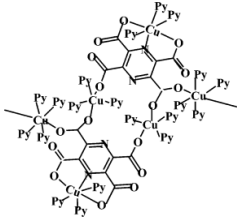
vd., 2009:3306), Ag(I)  $\{[Ag_4(pta)(phen)_4].8H_2O\}$  (Şekil 58) (Gao vd., 2014:194),  
 trifenilfosfin'in (PPh<sub>3</sub>) Ru(II)  $\{[(PPh_3)_2(Cl)Ru(H_2pta)Ru(Cl)(PPh_3)_2]\}$  (Şekil 59) (Duerr vd., 2017:14912),  
 guanidin'in (C(NH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>) U(VI)  $\{[C(NH_2)_3]_2[O_2(pta).2H_2O]\}$  (Şekil 60) (Thuery ve Harrowfield, 2022:116118),  
 etilendiamin'in (en) U(VI)/Co(II)  $\{[Co(en)_3][O_2(pta)](NO_3).H_2O\}$  (Şekil 61) (Thuery ve Harrowfield, 2022:116118),  
 cucurbit[6]uril'in (CB6) U(VI)  $\{[(UO_2)_2(pta)(CB6)(H_2O)_2].12H_2O\}$  (Şekil 62) (Thuery ve Masci, 2010:716),  
 1,5-siklopentadienil'in (Cp) Ti(VI)  $\{[Cp_2Ti(pta)]\}$  (Şekil 63) (Guethner ve Thewalt, 1989:43),  
 Ti(III)  $\{[Cp_2Ti(pta)TiCp_2]_2\}$  (Şekil 64) (Guethner ve Thewalt, 1989:43),  
 Ti(III)/Zr(III)  $\{[Cp_2Ti(pta)ZrCp_2]_2\}$  (Şekil 65) (Guethner ve Thewalt, 1989:43),  
 metilamin'in (ma) V(II)  $\{[V_2O_2(ma)_2(pta)(H_2O)_2]\}$  (Şekil 66),  $\{[V_2O_2(ma)_4(pta)]\}$  (Şekil 67) (Rambaran ve Mani, 2018),  
 etilamin'in (ea) V(II)  $\{[V_2O_2(ea)_2(pta)(H_2O)_2]\}$  (Şekil 68),  $\{[V_2O_2(ea)_4(pta)]\}$  (Şekil 69) (Rambaran ve Mani, 2018),  
 propilamin'in (pa) V(II)  $\{[V_2O_2(pa)_2(pta)(H_2O)_2]\}$  (Şekil 70),  $\{[V_2O_2(pa)_4(pta)]\}$  (Şekil 71) (Rambaran ve Mani, 2018),  
 bütilamin'in (ba) V(II)  $\{[V_2O_2(ba)_2(pta)(H_2O)_2]\}$  (Şekil 72),  $\{[V_2O_2(ba)_4(pta)]\}$  (Şekil 73) (Rambaran ve Mani, 2018),  
 pentilamin'in (pea) V(II)  $\{[V_2O_2(pea)_2(pta)(H_2O)_2]\}$  (Şekil 74),  $\{[V_2O_2(pea)_4(pta)]\}$  (Şekil 75) (Rambaran ve Mani, 2018),  
 hekzilamin'in (ha) V(II)  $\{[V_2O_2(ha)_2(pta)(H_2O)_2]\}$  (Şekil 76),  $\{[V_2O_2(ha)_4(pta)]\}$  (Şekil 77) (Rambaran ve Mani, 2018),  
 heptilamin'in (ha) V(II)  $\{[V_2O_2(hea)_2(pta)(H_2O)_2]\}$  (Şekil 78),  $\{[V_2O_2(hea)_4(pta)]\}$  (Şekil 79) [31],  
 oktilamin'in (oa) V(II)  $\{[V_2O_2(oa)_2(pta)(H_2O)_2]\}$  (Şekil 80),  $\{[V_2O_2(oa)_4(pta)]\}$  (Şekil 81) (Rambaran ve Mani, 2018) karışık ligandlı metal kompleksleri sentezleyip, yapıları çeşitli spektroskopik analiz yöntemleri ile aydınlatılmıştır.



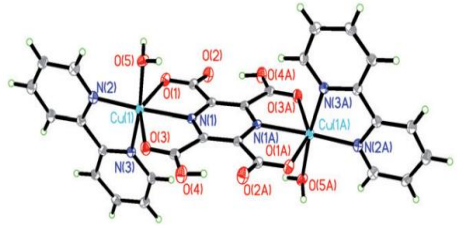
Şekil 40: Ghosh ve Bharadwaj'ın sentezlediği Co(II) kompleksi



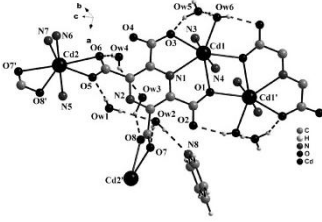
Şekil 41: Ghosh ve ark. sentezlediği Cu(II) kompleksi



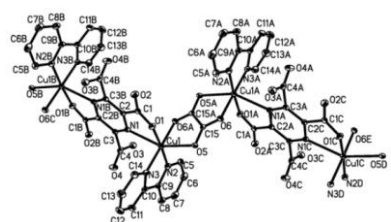
Şekil 42: Ghosh ve Bharadwaj'ın sentezlediği Cu(II) kompleksi



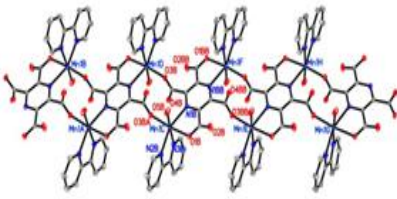
Şekil 47: Yang ve ark. sentezlediği Cu(II) kompleksi



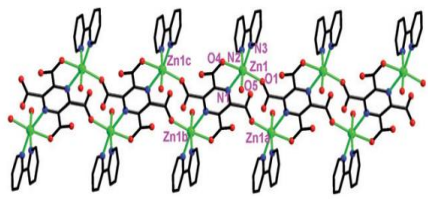
Şekil 43: Ghosh ve Bharadwaj'ın sentezlediği Cd(II) kompleksi



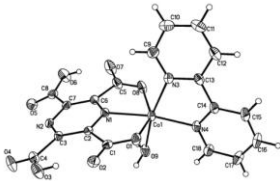
Şekil 48: Yang ve ark. sentezlediği Cu(II) kompleksi



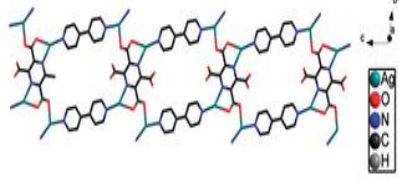
Şekil 44: Gao ve ark. sentezlediği Mn(II) kompleksi



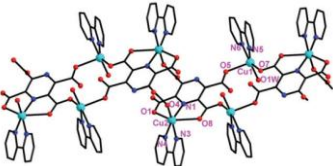
Şekil 49: Yang ve ark. sentezlediği Zn(II) kompleksi



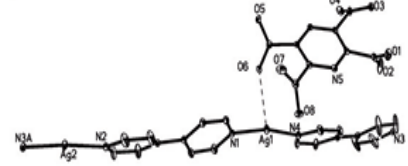
Şekil 45: Fang ve ark. sentezlediği Co(II) kompleksi



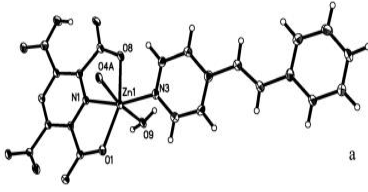
Şekil 50: Ou ve ark. sentezlediği Ag(I) kompleksi



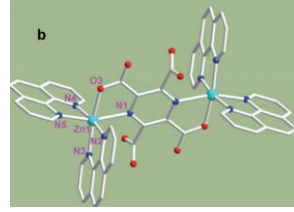
Şekil 45: Fang ve ark. sentezlediği Cu(II) kompleksi



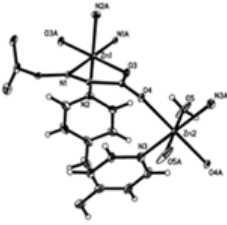
Şekil 51: Gao ve ark. sentezlediği Ag(I) kompleksi



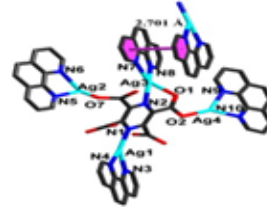
Şekil 52: Li ve ark. sentezlediği Zn(II) kompleksi



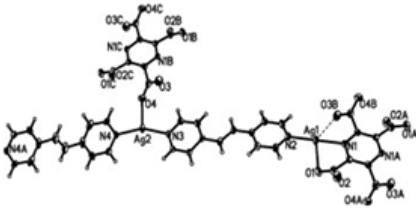
Şekil 57: Yang ve ark. sentezlediği Zn(II) kompleksi



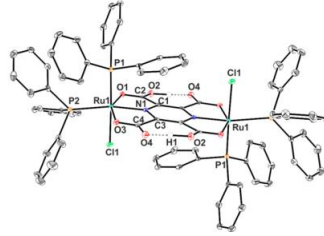
Şekil 53: Li ve ark. sentezlediği Zn(II) kompleksi



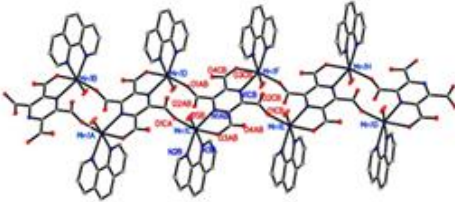
Şekil 58: Yang ve ark. sentezlediği Ag(I) kompleksi



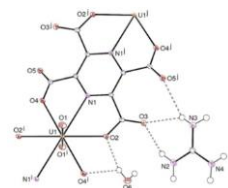
Şekil 54: Yang ve ark. sentezlediği Ag(I) kompleksi



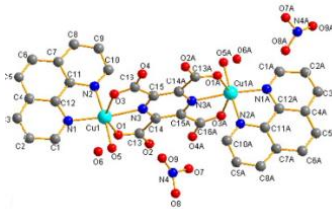
Şekil 59: Shi ve ark. sentezlediği Ru(II) kompleksi



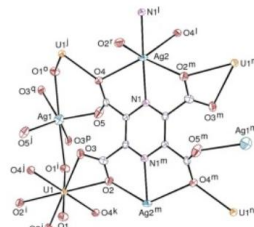
Şekil 55: Yang ve ark. sentezlediği Mn(II) kompleksi



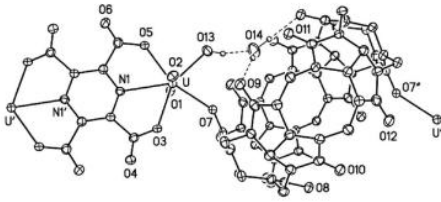
Şekil 60: Yang ve ark. sentezlediği U(VI) kompleksi



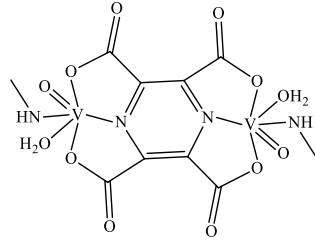
Şekil 56: Fang ve ark. sentezlediği Cu(II) kompleksi



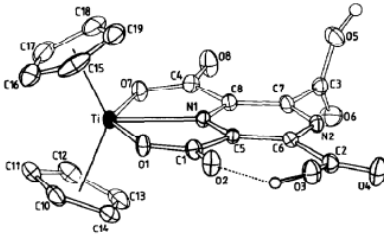
Şekil 61: Yang ve ark. sentezlediği U(VI)/Co(II) kompleksi



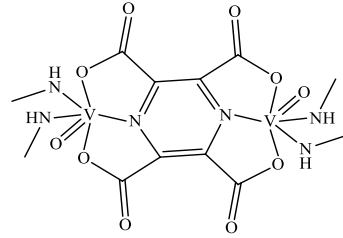
Şekil 62: Thuery ve Masci'nin sentezlediği U(VI) kompleksi



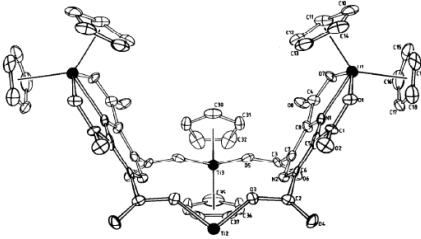
Şekil 66: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



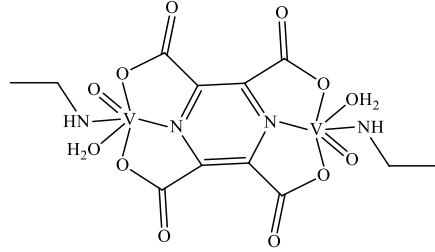
Şekil 63: Guethner ve Thewalt'ın sentezlediği Ti(VI) kompleksi



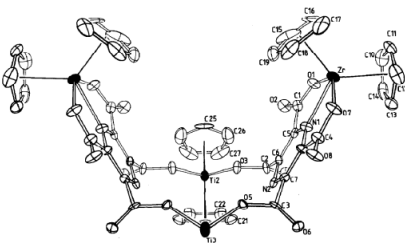
Şekil 67: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



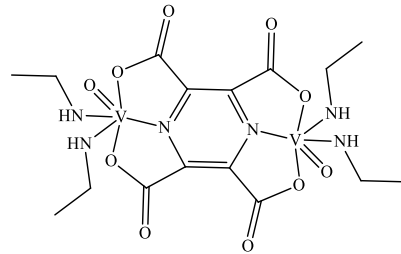
Şekil 64: Guethner ve Thewalt'ın sentezlediği Ti(III) kompleksi



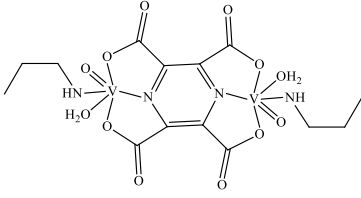
Şekil 68: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



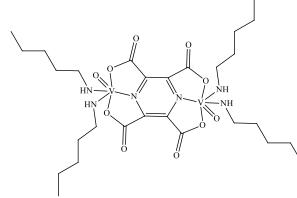
Şekil 65: Guethner ve Thewalt'ın sentezlediği Ti(III)/Zr(III) kompleksi



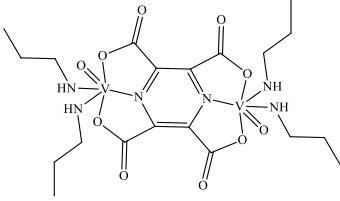
Şekil 69: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



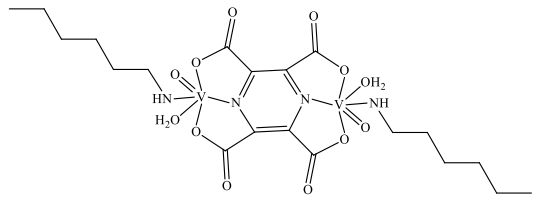
Şekil 70: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



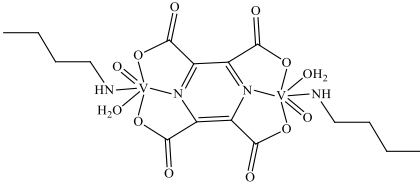
Şekil 75: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



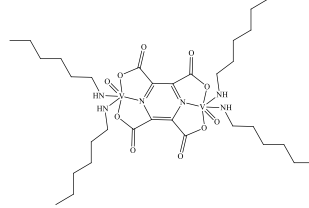
Şekil 71: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



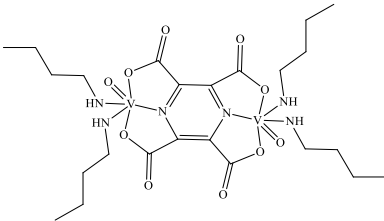
Şekil 76: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



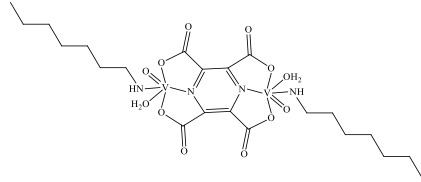
Şekil 72: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



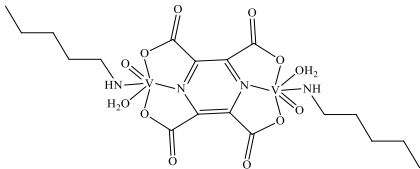
Şekil 77: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



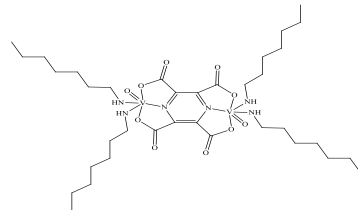
Şekil 73: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



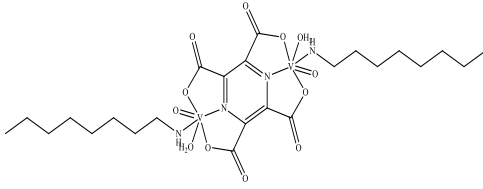
Şekil 78: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



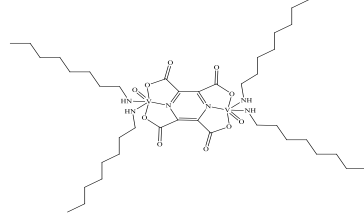
Şekil 74: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



Şekil 79: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



Şekil 80: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi



Şekil 81: Rambaran ve Mani'nin sentezlediği V(II) kompleksi

## SONUÇLAR

2,3,5,6-Pirazintetrakarboksilik asit türevlerinin malzeme bilimleri, tıp, endüstriyel kataliz, ışık özellikleri ve biyolojik sistemlerde moleküler tanıma süreçleri gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. 2,3,5,6-Pirazintetrakarboksilik asit ve deprotonlanmış anyonları, pirazin halkasının azot atomlarını ve karboksilik grupların oksijen atomlarını içeren potansiyel koordinasyon bölgesine sahiptir ve metal komplekslerinde köprü ligandları olarak görev yapan çok işlevli ligandlar olarak işlev görür

Bu çalışmada 2,3,5,6-pirazintetrakarboksilik asit ile yapılan tuz, co-kristal ve metal kompleksi çalışmaları incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda tuz, co-kristal ve metal kompleksleri ve biyolojik özelliklerinin çok az çalışıldığı görülmüştür. Bu çalışma literatürdeki bu boşluğu dikkat çekmek ve bundan sonraki çalışmalara ışık tutmak için yapılmıştır. Pirazintetrakarboksilik asit ve diğer ligandlar ile yapılabilecek co-kristal, proton transfer tuzu ve karışık ligandlı metal kompleksleri ve biyolojik özelliklerinin incelenmesi literatüre önemli bir katkı olacaktır.

## REFERANSLAR

- Alfonso, M., Neels, A., ve Stoeckli-Evans, H. (2001). X-ray powder structure of a new two-dimensional nickel(II) coordination polymer with pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Acta Crystallographica, Section C: Crystal Structure Communications*, C57(10), 1144-1146.
- Cao, J., Wang, Y., Xu, J., ve Zhao, Y. (2019). Method for constructing metal manganese organic framework compound based on pyrazine polycarboxylic acid ligand and application of the compound. Assignee: Changzhou University, China, CN109320729.
- Chen, Y., Songsheng, S., ve Rex, E., (1997). The effect of zinc(II) on the formation of 2,2'- and 2,3'-bipyridine complexes of  $[Ru_2^{II}(ttha)]^{2-}$  ( $ttha^{6-}$  = triethylenetetraminehexa-acetate). *Transition Metal Chemistry*, 22, 338-346.
- Dalgarno, S.J., Hardie, M.D., Atwood, J.L., Warren, J.E., ve Raston, C.L., (2005). A complex 3D 'wavy brick wall' coordination polymer based on p-sulfonatocalix[8]arene. *New Journal of Chemistry*, 29, 649-652.
- Ding, B., Yao, W., ve Gao, E. (2025). Fluorescent probe for iron ion detection, application and fluorescence detection method. Assignee: Shanxi Shanchuan New Material Co. Ltd. China, CN120271835.

- Duerr, M., Klein, J., Kahnt, A., Becker, S., Puchta, R., Sarkar, B., ve Ivanovic-Burmazovic, I. (2017). Redox behavior of a dinuclear ruthenium(II) complex bearing an uncommon bridging ligand: insights from high-pressure electrochemistry. *Inorganic Chemistry*, 56(24), 14912-14925.
- Fang, M.J., Li, M.X., He, X., Shao, M., Pang, W., ve Zhu, S.R. (2009). Synthesis, structure and thermal stability of ternary metal complexes based on polycarboxylate and N-heterocyclic ligands. *Journal of Molecular Structure*, 921(1-3), 137-143.
- Fang, S.R., Yang, A.H., Zhang, Y.P., Gao, H.L., ve Cui, Z., J. (2008). Synthesis, crystal structure of a new Co(II) complex with pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Journal of Chemical Crystallography*, 38(5), 393-396.
- Gao, H.L., Bi, Y.X., Zhang, Q.Q., ve Cui, J.Z. (2015). Syntheses and characterizations of two complexes with pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Wuji Huaxue Xuebao*, 31(8), 1603-1608.
- Gao, H.L., Zhang, Q.Q., Cheung, C.W., Yi, Y.L., Li, F.F., Qu, J., Jiang, S.X., Shi, X.Y., ve Cui, J.Z. (2014). Syntheses, structures and properties of silver(I) complexes constructed from nitrogenous aromatic heterocyclic carboxylic acids and N-donor ligands. *Inorganic Chemistry Communications*, 46, 194-197.
- Gao, H.L., Zhang, Y.P., Yang, A.H., Fang, S.R., ve Cui, J.Z. (2009). 1D slide-fastener-like coordination polymers of Mn(II) derived from pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Journal of Molecular Structure*, 918(1-3), 97-100, 2009.
- Ghosh, S.K., ve Bharadwaj, P.K. (2004). Structure of a discrete hexadecameric water cluster in a metal-organic framework structure. *Inorganic Chemistry*, 43(22), 6887-6889.
- Ghosh, S.K., ve Bharadwaj, P.K. (2005). Infinite chains of quasi-planar hexameric water clusters stabilized in a metal-organic framework built from Co<sup>II</sup> and pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 24, 4880-4885.
- Ghosh, S.K., ve Bharadwaj, P.K. (2006). Self-assembly of alternating left- and right-handed infinite Cd(II) helicates into a 2D open framework structure. *Journal of Molecular Structure*, 796(1-3), 119-122.
- Ghosh, S.K., El Fallah, M.S., Ribas, J., ve Bharadwaj, P.K. (2006). Coordination polymers built from Cu(II) and pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylate or pyridine-2,4,6-tricarboxylate: Structural and magnetic studies. *Inorganica Chimica Acta*, 359(2), 468-474.
- Golafale, S.T., Ingram, C.W., Holder, A.A., Chen, W.Y., ve Zhang, Z.J. (2017). 1-D calcium, 2-D zinc and 3-D manganese coordination polymers derived from pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Inorganica Chimica Acta*, 467, 163-168, 2017.
- Graf, M., Stoeckli-Evans, H., Whitaker, C., Marioni, P.A., ve Marty, W. (1993). Coordination polymers of copper(II) with the ligand pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Chimia*, 47(6), 202-205.
- Guethner, T., ve Thewalt, U. (1989). Titanocene and zirconocene complexes with pyrazinetetracarboxylate ligands. *Journal of Organometallic Chemistry*, 371(1), 43-56.
- Ingram, C.W., Kibakaya, G., Bacsá, J., Mathis, S.R., II, Holder, A.A., Rambaran, V.H., Dennis, B., Castaneda, E., Robbins, J.S., ve John Zhang, Z. (2015). Complex three-dimensional lanthanide metal-organic frameworks with

- variable coordination spheres based on pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylate. *CrystEngComm*, 17(29), 5377-5388.
- Li, F., Song, W., ve Li, G. (2020). Preparing method and application of heterocyclic aromatic macrocyclic tin compound. Assignees: Weifang Medical University, Shandong Daoyi Pharmaceutical Technology Co. Ltd. Shandong Daozhen Pharmaceutical Technology Co. Ltd. China, CN111004275.
- Li, F., Song, W., Yue, X., ve Wang, G. (2020). Preparing method and application of aromatic carboxylic acid tetramer compound. Assignees: Weifang Medical University, Shandong Daoyi Pharmaceutical Technology Co. Ltd. Shandong Daozhen Pharmaceutical Technology Co. Ltd. China, CN110981904.
- Li, F.F., Zhang, Q.Q., Zhao, Y.Y., Jiang, S.X., Shi, X.Y., Cui, J.Z., ve Gao, H.L. (2014). Syntheses, structures, and properties of six new coordination polymers constructed from *N*-heterocyclic multicarboxylic acids. *RSC Advances*, 4(21), 10424-10433.
- Li, Q., Lu, L., Liu, J., Shi, W., ve Cheng, P. (2021). Two-dimensional bimetallic coordination polymers as bifunctional evolved electrocatalysts for enhanced oxygen evolution reaction and urea oxidation reaction. *Journal of Energy Chemistry*, 63, 230-238.
- Liu, J., Zheng, M., Dang, S., Zhang, L., ve Wu, S. (2023). Design of 3D metal-organic material with multiple redox-active sites for high-performance lithium-ion batteries. *Energy & Fuels*, 37(17), 13498-13505.
- Long, D.L., Blake, A.J., Champness, N.R., ve Schroder, M., (2002). Constructing terbium co-ordination polymers of 4,4'-bipyridine-*N,N'*-dioxide by means of diffusion solvent mixtures. *Chemistry – A European Journal*, 8(9), 2026-2033.
- Marioni, P.A., Marty, W., Stoeckli-Evans, H., ve Whitaker, C., (1994). Coordination polymers of Mn(II) with the ligand pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Inorganica Chimica Acta*, 219(1-2), 161-168.
- Masci, B., Pasquale, S., ve Thuery, P. (2010). Alkali metal ion complexes with pyrazinetetracarboxylate: two- and three-dimensional frameworks. *Crystal Growth & Design*, 10(4), 2004-2010.
- Masci, B., ve Thuery, P., (2008). Pyrazinetetracarboxylic acid as an assembler ligand in uranyl-organic frameworks. *Crystal Growth & Design*, 8(5), 1689-1696.
- Mei, Y.X., Xu, F., Wei, Z.H., ve Cai, H. (2016). pH dependent supramolecules based on co-crystallization of pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid with 4,4'-bipyridine through intermolecular hydrogen bonds. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 35(7), 1031-1037.
- Moitsheki, L.J., Bourne, S.A., ve Nassimbeni, L.R. (2006). A coordination polymer of thallium(III) nitrate with 4,4'-bipyridine-*N,N'*-dioxide. *Acta Crystallographica Section E, Crystallographic Communications*, E62, m542-m544.
- Ning, Z., He, X., He, L., Lei, X., Lu, Y., Bi, J., Gao, D., Sun, C., ve Li, W. (2017). Uniform cerium-based metal-organic framework microflowers: Controlled synthesis, characterization and formation mechanism. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(17), 12885-12890.
- Ning, Z., Li, W., Chang, Z., Gao, D., ve Bi, J. (2016). Facile and rapid preparation of Ln (Ln = Eu, Tb) doped lanthanum pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylate

- submicroparticles and their tunable luminescence properties. *Materials Research Bulletin*, 83, 302-308.
- Ning, Z., Li, W., Fan, Y., ve Zhao, Y., (2023). Dye-functionalized rare earth metal-organic frameworks comprising terbium nitrate and pyrazinetetracarboxylic acid for sulfide recognition. Assignee: Sichuan Normal University, China, CN116925750.
- Ning, Z., Wang, H., Li, W., Sun, C., ve Gao, D. (2016). Facile synthesis of flower-like La-based coordination polymer and Its UV absorption property. *Chemistry Letters*, 45(2), 229-231.
- Qu, J., Yi, Y.L., Hu, Y.M., Chen, W.T., Gao, H.L., Cui, J.Z., ve Zhai, B. (2012). Syntheses, structures, and photo-luminescence of three silver complexes with N-heterocyclic multicarboxylic acids and 4,4'-bipyridine. *Journal of Coordination Chemistry*, 65(21), 3740-3751.
- Quan, Y.P., Zhao, L.H., Yang, A.H., Cui, J.Z., Gao, H.L., Lu, F.L., Shi, W., ve Cheng, P., (2009). Novel lanthanide coordination polymers based on bis-tridentate chelator pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylate with nano-channels and water clusters. *CrystEngComm*, 11(8), 1679-1685.
- Rambaran, V., ve Mani, S.S. (2018). Vanadium insulin-mimetics, methods of preparation, and methods for treatment of diabetes. Assignee: The University of Trinidad and Tobago, World Intellectual Property Organization, WO2018222169.
- Rambaran, V.H., Sue Chee Ming, W., Singh, N., Nandini, R.J., Tang Kai, M., Surendran, A., Krishna, M., ve Jaleel, A. (2023). The design, spectrochemistry and toxicity evaluations of two vanadium (IV) complexes: [V(IV)O(2,6-pyridine diacetato)(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>] (PDOV) and V<sub>2</sub>(IV)O<sub>2</sub>(pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylato)(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> (PYTOV). *Inorganica Chimica Acta*, 556, 121662.
- Shi, X.Y., Yang, A.H., Qu, J., Chen, W.T., Gao, H.L., ve Cui, J.Z. (2014). Syntheses, structures, and fluorescent properties of three ds-block metal complexes with pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid and 4,4'-bipyridine. *Wuji Huaxue Xuebao*, 30(9), 2174-2180.
- Starosta, W., ve Leciejewicz, J. (2007). Hydrazinedium bis(3,5,6-tricarboxypyrazine-2-carboxylate) hexahydrate. *Acta Crystallographica, Section E: Structure Reports Online*, 63(9), o3734.
- Starosta, W., ve Leciejewicz, J. (2010). catena-Poly[[ (3,5-dicarboxypyrazine-2,6-dicarboxylato-κ<sup>3</sup>-O<sup>2</sup>,N<sup>1</sup>,O<sup>6</sup>)lithium(I)]-μ-aqua-[tri-aqua-lithium(I)]-μ-aqua]. *Acta Crystallographica, Section E: Structure Reports Online*, 66(12), m1561-m1562.
- Starosta, W., ve Leciejewicz, J. (2008). Three-dimensional polymeric molecular pattern in the structure of a Ca(II) complex with pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylate and water ligands. *Journal of Coordination Chemistry*, 61(4), 490-498.
- Starosta, W., ve Leciejewicz, J. (2014). (1-Dihydrogen pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylato-κ<sup>6</sup>-O<sup>2</sup>,N<sup>1</sup>,O<sup>6</sup>;O<sup>3</sup>,N<sup>4</sup>,O<sup>5</sup>)bis- (diaqualithium) monohydrate. *Acta Crystallographica, Section E: Structure Reports Online*, 70(5), m172.
- Starosta, W., ve Leciejewicz, J. (2014). catena-Poly[[lithium-μ -(dihydrogen pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylato)-κ<sup>6</sup>-O<sup>2</sup>,N<sup>1</sup>,O<sup>6</sup>;O<sup>3</sup>,N<sup>4</sup>,O<sup>5</sup>)-lithium-di-μ-aqua-κ O:O] 2.5-hydrate]. *Acta Crystallographica, Section E: Structure Reports Online*, 70(6), m234-m235.

- Thuery, P., ve Harrowfield, J. (2022). Anionic uranyl ion complexes with pyrazinetetracarboxylate: Influence of structure-directing cations. *Polyhedron*, 227, 116118.
- Thuery, P., ve Masci, B. (2010). Uranyl in complexation by cucurbiturils in the presence of perhenic, phosphoric, or polycarboxylic acids. Novel mixed-ligand uranyl-organic frameworks. *Crystal Growth & Design*, 10(2), 716-725.
- Thuery, P., ve Masci, B., (2010). Lanthanide-organic assemblies with pyrazinetetracarboxylic and benzophenone-3,3',4,4'-tetracarboxylic acids. *CrystEngComm*, 12(10), 2982-2988.
- Wang, H.S., Shi, W., Xia, J., Song, H.B., Wang, H.G., ve Cheng, P. (2005). Six-, seven- and eight-coordinated Cd(II) ions with N-heterocyclic multicarboxylic acids. *Inorganic Chemistry Communications*, 10(8), 856-859.
- Xu, F., Wei, Z.H., Huang, X.L., Mei, Y.X., ve Cai, H., (2015). A hydrogen bond stabilized 3d network built from pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid and 8-hydroxyquinoline. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 34(12), 1845-1850, 2015.
- Yang, A.H., Fang, S.R., Zhang, Y.P., Gao, H.L., ve Cui, J.Z. (2008). Hydrothermal synthesis, crystal structure and properties of a nickel(II) complex of pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Wuji Huaxue Xuebao*, 24(3), 487-490.
- Yang, A.H., Gao, H.L., ve Cui, J.Z., (2010). A hexagonal  $C_3$ -symmetric  $(H_2O)_7$  guest fits well into a  $C_3$ -symmetric terbium complex cavity. *Inorganic Chemistry Communications*, 13(11), 1309-1313.
- Yang, A.H., Quan, Y.P., Gao, H.L., Fang, S.R., Xhang, Y.P., Zhao, L.H., Cui, J.Z., Wang, J.H., Shi, W., ve Cheng, P., (2009). ds-Block metal ions catalyzed decarboxylation of pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid and the complexes obtained from hydrothermal reactions and novel water clusters. *CrystEngComm*, 11(12), 2719-2727.
- Yang, A.H., Quan, Y.P., Zhao, L.H., Cui, J.Z., Gao, H.L., Lu, F.L., Shi, W., ve Cheng, P. (2009). 1-D zigzag copper(II) complex with pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylate and oxalate. *Journal of Coordination Chemistry*, 62(20), 3306-3313.
- Yang, A.H., Zhao, L.H., Qi, X.J., ve Lu, Y.W. (2014). Syntheses, structures, and properties of the 3D lanthanide organic frameworks with n-heterocyclic polycarboxylic acids. *Zeitschrift fuer Anorganische und Allgemeine Chemie*, 640(11), 2296-2300.
- Zhai, B., Yi, Y.L., Han, N.N., ve Zhang, X.F., (2012). Synthesis, crystal structure and magnetic research of 1D Chain manganese coordination polymer based on pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Wuji Huaxue Xuebao*, 28(12), 2535-2539.
- Zhang, F., Yan, P., Li, H., Zou, X., Hou, G., ve Li, G. (2014). Towards full-color-tunable emission of two component Eu(III)-doped Gd(III) coordination frameworks by the variation of excitation light. *Dalton Transactions*, 43(33), 12574-12581, 2014.
- Zhang, F., Yan, P., Zou, X., Zhang, J., Hou, G., ve Li, G. (2014). Novel 3D alkali-lanthanide heterometal-organic frameworks with pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid: Synthesis, structure, and magnetism. *Crystal Growth & Design*, 14, no 4), 2014-2021.

Zhao, L.H., Yang, A.H., Quan, Y.P., Gao, H.L., ve Cui, J.Z. (2011). 3D metal-organic framework based on cadmium complex of pyrazine-2,3,5,6-tetracarboxylic acid. *Journal of Chemical Crystallography*, 41(8), 1245-1248.



# **Bilimsel Araştırma Yöntemleri ve Yayın İhlalleri Üzerine Bir İnceleme**

**Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ömür ÖZER<sup>1</sup>  
Öğr. Gör. Dr. İbrahim Tamer EMECAN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programı, [hasanomer.azer@iuc.edu.tr](mailto:hasanomer.azer@iuc.edu.tr), ORCID No: 0000-0002-6388-4638

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Sualtı Teknolojisi Programı, [emecan@iuc.edu.tr](mailto:emecan@iuc.edu.tr), ORCID No: 0000-0002-4312-7947

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hasan Ömür ÖZER, [hasanomer.azer@iuc.edu.tr](mailto:hasanomer.azer@iuc.edu.tr)

## ÖZET

Bilimsel araştırmalar, bilgi üretimi ve doğrulanabilir bilginin elde edilmesi sürecinde temel bir rol oynar. Araştırma yöntemleri, deneysel, gözlemsel, nitel ve nicel yaklaşımlar olmak üzere çeşitlenir ve her biri farklı araştırma sorularına uygun olarak seçilir. Etkin bir araştırma süreci, sistematik bir planlama, nesnellik, doğrulanabilirlik ve genellenebilirlik gibi temel ilkelere dayanır. Bu ilkeler, araştırmanın güvenilirliğini ve geçerliliğini artırırken, elde edilen bulguların bilimsel topluluk tarafından kabul görmesini sağlar. Ayrıca, veri toplama ve analiz sürecinde tutarlılık ve dikkat, araştırmanın sonuçlarının tekrar edilebilir olmasını mümkün kılar.

Bilimsel bilginin paylaşımı sürecinde ise yayın etiğı hayati önem taşır. Araştırmacılar, verileri dürüst, tarafsız ve şeffaf bir şekilde raporlamakla yükümlüdür. Yayın ihlallerinden kaçınmak, yazar katkılarını doğru biçimde belirtmek, hakemlik süreçlerinde etik kurallara uymak ve veri paylaşımında şeffaf olmak, bilimsel güvenin korunmasını sağlar. Yayın etiğine uyulmadığında, hem araştırmanın geçerliliğı tehlikeye girer hem de bilimsel topluluk ve toplum nezdinde güven sarsılır. Bu nedenle, bilimsel araştırma yöntemleri ile yayın etiğı ilkeleri birlikte ele alındığında, hem kaliteli bilgi üretimi hem de güvenilir bilginin paylaşımı mümkün hale gelir.

Çalışmada, bilimsel araştırma süreçlerinin yönetsel temelleri ile akademik yayıncılıkta karşılaşılan etik ihlallerin kapsamlı biçimde analiz edilmesini amaçlamaktadır. Bilimsel araştırma yöntemleri, bilginin güvenilir, geçerli ve tekrarlanabilir şekilde üretilmesini sağlayan sistematik bir çerçeve sunar. Ancak bu yöntemlerin doğru uygulanması kadar, araştırmacıların etik ilkelere bağılılığı da bilimsel bilginin bütünlüğü açısından hayati önem taşımaktadır. Bilimsel araştırma ekosistemi, yalnızca teknik süreçlerden değil, aynı zamanda etik sorumluluklardan oluşan bir bütündür ve yönetsel doğruluk ile etik duruşun birlikte sağlanması, bilimin güvenilirliğinin temelidir.

*Anahtar Kelimeler – Bilimsel Araştırma, Yayın Etiğı, Yayın İhlalleri, Şeffaflık, Araştırma Türleri*

---

## GİRİŞ

Bilimsel bilgi, insanlık tarihinin en önemli kazanımlarından biridir. Toplumların gelişmesi, ilerlemesi ve sorunlarına çözüm bulabilmesi için bilimsel yöntemlerle üretilmiş bilgiye ihtiyaç duyulur. Ancak bilimin işlevini yerine getirebilmesi, yalnızca doğru yöntemlerin uygulanmasına değil, aynı zamanda etik kurallara bağılı kalınmasına da bağılıdır. Bu nedenle bilimsel araştırma yöntemleri ve yayın etiğı konuları, birlikte değerlendirilmesi gereken iki önemli alandır.

Bilim, insanlığın evreni, doğayı ve toplumu anlama çabasında en önemli araçtır. Bu çaba yalnızca gözlem yapmakla sınırlı kalmaz; aynı zamanda sistematik ve mantıklı bir süreç aracılığıyla bilgi üretmeyi, doğrulamayı ve paylaşmayı gerektirir. Bilimsel araştırma, bu sürecin temel yapı taşıdır ve bilgi üretiminde güvenilirliği ve geçerliliği garanti eden yöntemlerle yürütülmelidir. Araştırma sürecinde kullanılan yöntemler, elde edilen bulguların doğruluğunu ve genellenebilirliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle araştırmacıların yöntem seçiminde, veri toplama ve analiz süreçlerinde titiz davranmaları zorunludur.

Bilimsel araştırmalar, belirli sorulara yanıt aramak, hipotezleri test etmek veya bir fenomeni açıklamak amacıyla yürütülür. Bu süreçte deneysel, gözlemsel, nitel ve nicel yöntemler araştırmacılara farklı yaklaşımlar sunar. Deneysel yöntemler, sebep-sonuç ilişkilerini ortaya koyarken; gözlemsel araştırmalar, doğal ortamda meydana gelen olguları incelemeye olanak tanır. Nitel araştırmalar, bireylerin deneyimlerini ve düşünce yapısını derinlemesine anlamaya çalışırken, nicel araştırmalar sayısal veriler aracılığıyla objektif ve genellenebilir sonuçlar sunar. Bu yöntemlerin her biri, kendi bağlamı içinde güçlü ve sınırlı yönleri sahiptir. Araştırmacının amacı, sorusu ve kaynakları, yöntemin seçiminde belirleyici olur.

Bununla birlikte, bilimsel süreç yalnızca doğru yöntemlerin uygulanmasıyla sınırlı değildir. Araştırma sürecinde etik ilkeler de en az yöntemsel doğruluk kadar önemlidir. Araştırmacıların dürüst, şeffaf ve sorumlu davranması, bilimsel bilginin güvenilirliğini sağlar. Yayın etiği, araştırmanın sonuçlarının paylaşımı sırasında uyulması gereken kuralları belirler. Bu kapsamda intihalden kaçınmak, yazar katkılarını doğru biçimde belirtmek, veri manipülasyonundan uzak durmak ve hakemlik sürecinde etik davranmak temel sorumluluklardandır. Etik ihlaller, yalnızca araştırmanın geçerliliğini tehlikeye atmakla kalmaz; aynı zamanda bilim dünyasına ve topluma duyulan güveni de zedeler.

Bilimsel araştırma yöntemleri ve yayın etiği, birbirini tamamlayan iki temel unsurdur. Yöntemsel titizlik, elde edilen bulguların doğruluğunu garanti ederken, etik kurallar bu bilgilerin güvenilir ve adil bir şekilde paylaşılmasını sağlar. Araştırmacılar, bu iki unsuru bir arada uyguladıklarında bilimsel sürecin kalitesini artırır ve toplumsal katkısını güçlendirirler.

Bu bağlamda, bu bölümde bilimsel araştırma yöntemleri ayrıntılı olarak incelenecek; veri toplama, analiz ve raporlama süreçleri açıklanacaktır. Ardından, yayın etiği temel ilkeleri, olası etik ihlaller ve önleyici stratejiler üzerinde durulacaktır. Amaç, okuyucuya bilimsel sürecin hem metodolojik hem de etik boyutunu bütüncül bir şekilde aktarmaktır.

## ***1- Bilimsel Araştırmanın Temelleri***

### ***1.1- Bilimsel Bilginin Özellikleri***

Bilimsel bilgi, diğer bilgi türlerinden farklıdır. Günlük bilgi, dinsel bilgi, felsefi bilgi gibi bilgi türleri daha çok öznel ya da dogmatik özellikler taşıyabilir. Bilimsel bilginin öne çıkan özellikleri şunlardır:

#### ***1.1.1. Nesnellik (Objectivity)***

Bir araştırma veya değerlendirme sürecinde kişisel görüş, önyargı, inanç veya duygulardan bağımsız olarak gerçeklerin ve verilerin tarafsız bir biçimde ele alınması durumudur. Bilimsel bağlamda nesnellik, araştırmacının kendi değer yargılarını, beklentilerini veya sosyal etkileri sürece dahil etmeden verileri toplaması, analiz etmesi ve yorumlaması anlamına gelir. Bu yaklaşım, sonuçların güvenilirliğini ve genellenebilirliğini artırır, bilimsel bilginin doğruluğunu korur ve araştırmaların tekrar edilebilir olmasını sağlar.

Bilimsel araştırmalarda nesnellik, elde edilen verilerin ve gözlemlerin araştırmacının kişisel görüşlerinden bağımsız olarak değerlendirilmesini gerektirir. Araştırmacı, kendi inanç veya önyargılarını sürece dahil etmeden, sadece gözlem ve kanıtlar doğrultusunda analiz yapmalıdır. Bu yaklaşım, hem araştırma sonuçlarının güvenilirliğini artırır hem de bilimsel bilginin tarafsız bir şekilde paylaşılmasını sağlar. Nesnellik, özellikle tartışmalı veya sosyal bilimlerdeki araştırmalarda, bulguların toplumda kabul görmesi ve diğer araştırmacılar tarafından doğrulanabilir olması açısından kritik bir öneme sahiptir.

#### ***1.1.2. Sistematiklik***

Belirli yöntem ve aşamalarla elde edilir. Sistematiklik (Systematicity), bir araştırma veya çalışma sürecinde adım adım planlı, düzenli ve tutarlı bir yaklaşım izleme durumudur (Karasar, 2020). Bilimsel bağlamda sistematiklik, veri toplama, analiz ve yorumlama aşamalarının belirli bir mantıksal sıra ve metodolojiye göre yürütülmesi anlamına gelir. Bu sayede araştırma süreci kontrol altında tutulur, hatalar minimize edilir ve elde edilen sonuçların doğruluğu ile tekrarlanabilirliği sağlanır.

Bilimsel araştırmalarda sistematiklik, çalışmanın baştan sona belirli bir plan ve yöntem çerçevesinde yürütülmesini ifade eder. Araştırmacı, problemin belirlenmesinden veri toplama ve analiz sürecine kadar her aşamada tutarlı ve mantıklı bir sıra izlemelidir (Arıkan, 2017). Bu yaklaşım, hem sürecin kontrolünü kolaylaştırır hem de bulguların güvenilirliğini artırır. Sistematik bir yöntem izlenmediğinde, veri eksiklikleri, analiz hataları veya çelişkili sonuçlar ortaya çıkabilir. Dolayısıyla, sistematiklik bilimsel çalışmalarda doğruluk ve tekrarlanabilirlik için temel bir ilkedir.

### **1.1.3. Doğrulanabilirlik**

Başka araştırmacılar tarafından tekrarlandığında aynı sonuçlar alınabilir. Doğrulanabilirlik (Verifiability), bir araştırmada elde edilen bulguların ve sonuçların diğer araştırmacılar tarafından aynı yöntem ve koşullar altında tekrarlanarak test edilebilmesi ve onaylanabilmesi durumudur. Bilimsel bağlamda doğrulanabilirlik, araştırma sonuçlarının nesnel ve güvenilir olmasını sağlar, hatalı veya önyargılı bilgilerin bilim dünyasında yayılmasını önler. Bilimsel araştırmalarda doğrulanabilirlik, elde edilen sonuçların başka araştırmacılar tarafından aynı yöntem ve süreçle tekrar edilebilmesini ifade eder. Araştırmacı, deney tasarımını, veri toplama sürecini ve analiz yöntemlerini açık ve detaylı bir şekilde sunarak başkalarının çalışmayı yeniden yürütebilmesine olanak tanır. Bu yaklaşım, bulguların güvenilirliğini artırır ve bilimsel bilginin nesnel bir temele dayanmasını sağlar (Resnik, 2020). Doğrulanabilirlik, özellikle deneysel ve nicel araştırmalarda, sonuçların tekrarlanabilirliği ve bilimsel topluluk tarafından kabul görmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

### **1.1.4. Genellenebilirlik**

Belli koşullarda elde edilen bulgular, benzer durumlara uyarlanabilir. Genellenebilirlik (Generalizability), bir araştırmada elde edilen bulguların, çalışmanın yapıldığı örneklem veya ortam dışında, benzer koşullara sahip daha geniş bir grup veya duruma uygulanabilme durumudur. Bilimsel bağlamda genellenebilirlik, araştırma sonuçlarının yalnızca sınırlı bir örneklemle değil, daha geniş bir popülasyon veya bağlam için de geçerli olmasını sağlar. Bilimsel araştırmalarda genellenebilirlik, elde edilen bulguların yalnızca çalışmaya katılan bireyler veya ortamla sınırlı kalmayıp, benzer koşullara sahip diğer popülasyonlara da uygulanabilmesini ifade eder. Araştırmacılar, örneklem seçimi ve veri toplama yöntemlerini dikkatli planlayarak sonuçların genellenebilirliğini artırabilirler. Yeterince temsil edici bir örneklem kullanılmadığında veya veri toplama süreci hatalı yürütüldüğünde, bulgular yalnızca sınırlı bir bağlam için geçerli olur ve genellenebilirlik azalır. Bu nedenle, genellenebilirlik araştırma bulgularının bilimsel topluluk ve toplum açısından değerini belirleyen kritik bir ölçüttür.

### **1.1.5. Şeffaflık**

Süreçler ve sonuçlar açık biçimde paylaşılır. Şeffaflık (Transparency), bir araştırma sürecinde yöntemlerin, veri toplama ve analiz süreçlerinin, kullanılan kaynakların ve sonuçların açık, anlaşılır ve erişilebilir biçimde sunulması durumudur. Bilimsel bağlamda şeffaflık, diğer araştırmacıların

çalışmayı değerlendirmesini, tekrar etmesini ve sonuçları doğrulamasını kolaylaştırır. Bilimsel araştırmalarda şeffaflık, araştırma sürecinin tüm aşamalarının açık bir şekilde raporlanmasını ifade eder. Araştırmacı, kullanılan yöntemleri, veri toplama sürecini, analiz tekniklerini ve elde edilen sonuçları detaylı biçimde sunarak, çalışmanın doğrulanabilirliğini ve güvenilirliğini artırır. Şeffaflık sayesinde diğer araştırmacılar, bulguları eleştirel bir şekilde inceleyebilir ve gerektiğinde aynı yöntemi kullanarak çalışmayı tekrarlayabilirler. Bu yaklaşım, bilimsel bilginin güvenilirliğini ve toplumsal güveni güçlendiren temel bir ilkedir.

## ***2- Bilimsel Araştırma Türleri***

Araştırmalar farklı amaçlara ve yöntemlere göre sınıflandırılabilir:

### ***2.2. Temel araştırmalar***

Kuramsal bilgi üretmeyi hedefler. Temel araştırmalar (Fundamental Research), bilgi bir konu veya olgu hakkında derinlemesine ve sistematik bir anlayış geliştirmek amacıyla yürütülen araştırmalardır. Bu tür araştırmalar, doğrudan bir uygulama veya pratik çözüm üretme amacından ziyade, bilimsel bilgi birikimini artırmayı hedefler. Temel araştırmalar, teorik çerçeveler geliştirmek, kavramları açıklamak ve olgular arasındaki ilişkileri ortaya koymak için yürütülür. Örneğin, fizik alanında atom yapısının incelenmesi veya biyolojide hücre mekanizmalarının araştırılması temel araştırmalara örnek olarak verilebilir. Bu araştırmalar, uzun vadede uygulamalı araştırmalar için bir temel oluşturur ve bilimin ilerlemesine katkıda bulunur.

### ***2.2. Uygulamalı araştırmalar***

Pratik sorunlara çözüm arar. Uygulamalı araştırmalar (Applied Research), belirli bir problem veya ihtiyaca çözüm bulmak amacıyla yürütülen araştırmalardır. Bu tür araştırmalar, elde edilen bilimsel bilgiyi doğrudan pratik bir uygulamaya dönüştürmeyi hedefler ve genellikle toplumsal, teknolojik veya endüstriyel sorunların çözümüne odaklanır. Örneğin, yeni bir ilaç geliştirmek için yapılan klinik çalışmalar veya eğitim alanında öğrenme yöntemlerinin etkinliğini ölçen çalışmalar uygulamalı araştırmalara örnek teşkil eder. Uygulamalı araştırmalar, temel araştırmalardan elde edilen teorik bilgiye dayanır ve bu bilgiyi gerçek dünyadaki sorunlara uyarlayarak somut çözümler üretir.

### **2.3. Nicel araştırmalar**

Sayısal veriler üzerinden ölçüm ve analiz yapar. Nicel araştırmalar (Quantitative Research), sayısal verilerin toplanması, analiz edilmesi ve istatistiksel yöntemlerle yorumlanması yoluyla gerçekleştirilen araştırmalardır (Punch, 2013). Bu tür araştırmalar, olgular arasındaki ilişkileri ölçmek, genellemeler yapmak ve neden-sonuç ilişkilerini ortaya koymak için kullanılır. Nicel araştırmalarda veri toplama sürecinde anketler, testler, gözlem formları veya deneysel ölçümler gibi araçlar sıklıkla tercih edilir. Elde edilen sayısal veriler, matematiksel ve istatistiksel analizlerle değerlendirilir; sonuçlar tablolar, grafikler ve istatistiksel göstergelerle desteklenir. Örneğin, bir eğitim araştırmasında farklı öğretim yöntemlerinin öğrenci başarısına etkisini ölçmek için test puanları üzerinde yapılan analizler nicel araştırmalara örnek olarak verilebilir. Bu yaklaşım, verilerin objektif, ölçülebilir ve genellenebilir olmasını sağlar.

### **2.4. Nitel araştırmalar**

İnsan deneyimlerini ve anlamlarını inceler. Nitel araştırmalar (Qualitative Research), insanların deneyimlerini, algılarını, düşüncelerini ve sosyal etkileşimlerini derinlemesine anlamayı amaçlayan araştırma türüdür. Bu yaklaşım, sayısal verilerden ziyade sözel ve gözlemsel verilerin toplanmasına dayanır. Veri toplama sürecinde görüşmeler, odak grup çalışmaları, gözlemler ve doküman analizi gibi yöntemler sıklıkla kullanılır. Nitel araştırmalar, katılımcıların perspektifini anlamaya, süreçleri açıklamaya ve karmaşık sosyal olguları detaylı biçimde incelemeye yöneliktir. Örneğin, bir eğitim araştırmasında öğrencilerin öğrenme deneyimlerini ve motivasyonlarını anlamak için yapılan derinlemesine görüşmeler nitel araştırmalara örnek olarak verilebilir. Bu tür araştırmalar, genellenebilirlikten çok derinlemesine anlayış ve bağlamın yorumlanmasını ön planda tutar.

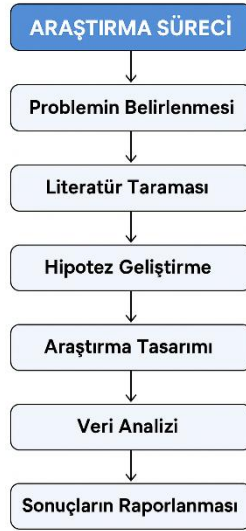
### **2.5. Karma yöntem araştırmaları:**

Nicel ve nitel yöntemleri birlikte kullanır. Karma yöntem araştırmalar (Mixed Methods Research), nicel ve nitel araştırma yaklaşımlarının bir arada kullanıldığı, veri toplama ve analiz süreçlerini bütünleştiren araştırmalardır (Creswell, 2014). Bu tür araştırmalar, bir olgunun hem sayısal olarak ölçülebilir yönlerini hem de katılımcıların deneyim ve algılarını derinlemesine anlamayı amaçlar. Karma yöntemler, araştırmacılara daha kapsamlı ve bütüncül bir bakış açısı sağlar; zira nicel veriler genellemeler yapmaya olanak tanırken, nitel veriler sürecin bağlamını ve derinliğini açıklar. Örneğin, bir sağlık araştırmasında hastaların tedaviye uyum düzeyi nicel yöntemlerle ölçülürken, tedavi deneyimlerine dair görüşleri nitel yöntemlerle

incelenebilir. Karma yöntem araştırmalar, tek bir yöntemin sınırlılıklarını aşarak, daha güvenilir ve zengin bilgiler elde etmeyi mümkün kılar.

### 3- Bilimsel Araştırma Süreci

- Araştırma probleminin tanımlanması
- Literatür taraması
- Hipotez veya araştırma sorularının geliştirilmesi
- Yöntem seçimi
- Veri toplama araçlarının hazırlanması
- Veri toplama
- Veri analizi
- Bulguların yorumlanması
- Sonuç ve önerilerin sunulması



Şekil 1: Araştırma süreci

#### **4- Bilimsel Araştırma Etiği**

##### **4.1. Katılımcı Hakları**

Araştırmalarda katılımcı haklarına saygı gösterilmesi temel bir etik ilkedir. Bu kapsamda:

- Katılım gönüllülük esasına dayanmalıdır.
- Katılımcıların kimlik bilgileri gizli tutulmalıdır.
- Araştırma, katılımcılara fiziksel veya psikolojik zarar vermemelidir.

##### **4.2. Veri Toplama ve Saklama Etiği**

Veriler doğru yöntemlerle toplanmalı, manipüle edilmemeli ve güvenli şekilde saklanmalıdır. Veri gizliliği özellikle sağlık ve sosyal bilimlerde kritik bir öneme sahiptir.

##### **4.3. Yazar Sorumlulukları**

Yazarlar; kullanılan kaynakları doğru biçimde aktarmalı, araştırmaya gerçek katkı sağlayanları yazar listesine dahil etmeli ve gereksiz yazar eklememelidir. Ayrıca çıkar çatışmalarını beyan etmek de etik bir zorunluluktur.

#### **5- Yayın Etiği İlkeleri**

Yayın etiği ilkeleri, bilimsel bilginin güvenilir, şeffaf ve doğrulanabilir biçimde üretilmesi ve yayımlanması için uyulması gereken temel kuralları ifade eder. Bu ilkeler, araştırmacıların, editörlerin, hakemlerin ve yayınevlerinin bilimsel yayın süreçlerini dürüstlük, nesnellik ve sorumluluk çerçevesinde yürütmesini amaçlamaktadır. Uluslararası kabul gören yayın etiği ilkeleri aşağıda özetlenmektedir.

##### **5.1. Dürüstlük ve Doğruluk**

Tüm bilimsel yayınların, gerçeğe uygun şekilde hazırlanması, verilerin doğru biçimde sunulması ve hata veya çarpıtma içermemesi esastır. Veri uydurma (fabrication), çarpıtma (falsification) ve manipülasyon kesin olarak yasaktır.

### **5.2. Özgünlük ve İntihalden Kaçınma**

Sunulan çalışma özgün olmalı, başka eserlerden alınan bilgi ve ifadeler uygun kaynak gösterilerek belirtilmelidir. İntihal; birebir kopyalama, yeniden yazım yoluyla gizli intihal veya fikir hırsızlığı dahil olmak üzere hiçbir biçimde kabul edilemez.

### **5.3. Çoklu veya Çifte Yayından Kaçınma**

Bir araştırmanın sonuçları, aynı anda birden fazla dergiye gönderilemez ve aynı içerikte makaleler farklı yayın organlarında tekrar yayımlanamaz. Yayın tekrarına veya dilimlemeye (salami slicing) izin verilmez.

### **5.4. Adil ve Şeffaf Yazarlık**

Yazar listesi, yalnızca çalışmaya bilimsel anlamda katkı sunan kişilerden oluşmalıdır. Haksız yazarlık (hediye, baskıcı veya hayalet yazarlık) etik dışıdır. Her yazar, çalışmanın tüm süreçlerinden sorumlu olduğunu beyan etmelidir.

### **5.5. Çıkar Çatışmalarının Açık Beyanı**

Araştırmacılar, çalışmayı etkileyebilecek finansal, kişisel veya kurumsal çıkar ilişkilerini açıkça beyan etmelidir. Gizlenen çıkar çatışmaları güvenilirlik ihlali olarak değerlendirilir.

### **5.6. Hakemlik Sürecine Saygı**

Hakemler değerlendirme sürecini gizlilik, tarafsızlık ve profesyonellik ilkelerine uygun biçimde yürütmelidir. Hakemlik sürecinin kötüye kullanılması (yorum geciktirme, gizli bilgileri kullanma vb.) ciddi bir etik ihlaldir.

### **5.7. Etik Kurul ve Yasal Gerekliliklere Uygunluk**

İnsan, hayvan veya çevreyi içeren araştırmalarda ilgili etik kurul onayının alınması zorunludur. Etik izinlerin belirtilmemesi veya yanlış beyan edilmesi yayın etiğine aykırıdır.

### **5.8. Kaynakların Doğru ve Uygun Kullanımı**

Atıflar, araştırmanın kapsamına uygun ve gerekli olan kaynaklara yapılmalıdır. Atıf şişirme (citation stacking) veya yanıltıcı atıf uygulamaları kabul edilemez.

### **5.9. Düzeltme, Geri Çekme ve Şeffaflık**

Yayımlanan bir çalışmada hata tespit edildiğinde, yazarların editörle iş birliği içerisinde düzeltme (corrigendum) veya geri çekme (retraction) sürecini işletmesi beklenir. Şeffaflık, bilimin güvenilirliği için zorunludur.

### **5.10. Editör ve Yayıncı Sorumluluğu**

Editörler, değerlendirme süreçlerini adil biçimde yönetmek, hakemlerin bağımsızlığını korumak, etik iddiaları ciddiyetle incelemek ve bilimsel niteliği korumakla yükümlüdür. Yayıncılar ise editöryal bağımsızlığı güvence altına almalıdır.

## **6- Yaygın İhlaller**

Yayın etiğinde yapılan ihlaller, akademik dürüstlüğü ve bilimsel iletişimin güvenilirliğini zedeleyen davranışlardır (Stroebe, 2012). Başlıca ihlaller şunlardır:

### **6.1. İntihal (Plagiarism)**

İntihal (plagiarism), bir başkasının fikirlerini, bulgularını, metinlerini, görsellerini ya da özgün katkılarını kaynak göstermeden kendi eseriymiş gibi sunma eylemidir ve yayın etiğinin en ciddi ihlallerinden biridir. Bu davranış, akademik dürüstlüğü zedeler, bilginin güvenilirliğini ve bilimsel iletişimin şeffaflığını bozar. İntihal yalnızca kelime kelime kopyalamayı değil, başkasının fikirlerini uygun atıf vermeden yeniden ifade etmeyi, kendi önceki çalışmalarını kaynak göstermeksizin tekrar kullanmayı (öz-intihal) da kapsar. Araştırmacıların etik sorumlulukları doğrultusunda, kullanılan her türlü bilgi ve fikrin kaynağını açıkça belirtmeleri, özgün katkılarını net şekilde ortaya koymaları ve akademik bütünlüğü korumaları esastır.

### **6.2. Uydurma ve Çarpıtma (Fabrication / Falsification)**

Uydurma ve çarpıtma (fabrication/falsification), araştırma verilerinin kasıtlı olarak oluşturulması, değiştirilmesi veya bilimsel gerçeklerle uyumsuz biçimde manipüle edilmesi anlamına gelen ciddi bir yayın etiği ihhalidir.

Uydurma, gerçekte hiç toplanmamış veya gözlemlenmemiş verilerin varmış gibi sunulmasını; çarpıtma ise elde edilen verilerin değiştirilerek abartılması, gizlenmesi ya da sonuçların araştırmacının istediği yönde görünmesini sağlayacak şekilde manipüle edilmesini içerir. Bu tür etik dışı davranışlar, bilimsel bilginin güvenilirliğini temelden sarsar, yanlış yönlendirilmiş araştırmalara ve toplumsal zararlara yol açabilir. Araştırmacılar, verilerin doğruluğunu, şeffaflığını ve bütünlüğünü korumakla yükümlüdür ve bilimsel süreçte en temel sorumluluk, gerçek verilerle dürüst bir şekilde çalışmaktır.

### **6.3. Dilimleme (Salami slicing)**

Dilimleme (salami slicing), tek bir araştırmadan elde edilen verilerin bilimsel açıdan anlamlı bir bütün oluşturmalarına rağmen yapay olarak parçalara bölünerek birden fazla yayın haline getirilmesi şeklindeki etik dışı bir uygulamadır. Bu yöntem, araştırmanın gerçek değerini olduğundan fazla göstermek, yayın sayısını artırmak veya akademik performansı yapay biçimde yükseltmek amacıyla kullanılır. Dilimleme, bilimsel literatürde gereksiz tekrarlar oluşturur, kaynakların verimsiz kullanılmasına neden olur ve araştırma bulgularının bütüncül olarak değerlendirilmesini zorlaştırır. Etik yayıncılık, verilerin bütünlüğünü korumayı ve bilimsel katkıyı doğru biçimde yansıtmayı gerektirdiğinden, araştırmacıların çalışmaları bölmek yerine anlamlı ve bütünlüklü sonuçlar sunması beklenir.

### **6.4. Çifte Yayın (Duplicate publication)**

Çifte yayın (duplicate publication), aynı araştırmanın veya büyük ölçüde benzer içerikteki bir çalışmanın birden fazla dergide yayımlanması ya da eşzamanlı olarak yayımlanmaya gönderilmesi anlamına gelen ciddi bir yayın etiği ihlalidir. Bu uygulama, bilimsel literatürde gereksiz tekrarlar oluşturur, araştırmanın önemini ve etkisini olduğundan fazla gösterir ve hakemlik ile editörlük süreçlerini gereksiz yere meşgul ederek kaynak israfına yol açar. Ayrıca, aynı verilerin birden fazla çalışmada yer alması, meta-analiz gibi toplu değerlendirmelerde sonuçların yanıltıcı biçimde şişmesine neden olabilir. Etik yayıncılık, her araştırmanın özgün ve tek bir bilimsel katkı olarak sunulmasını gerektirir; dolayısıyla araştırmacıların aynı içeriği farklı platformlarda çoğaltmaktan kaçınması esastır.

### **6.5. Haksız Yazar Ekleme / Yazar Dışlama**

Haksız yazar ekleme ve yazar dışlama, bilimsel yayınların en önemli etik sorunlarından biri olup akademik katkının adil biçimde tanımlanmasını engeller. Haksız yazar ekleme (hediye, onursal veya zorunlu yazarlık), çalışmaya gerçek anlamda bilimsel katkısı olmayan kişilerin yazar listesine

dahil edilmesiyle ortaya çıkar ve araştırmanın sahipliğini yanıltıcı şekilde gösterir. Yazar dışlama ise, çalışmanın tasarımı, veri toplama, analiz veya yazım süreçlerine anlamlı katkıda bulunmuş kişilerin yazar olarak belirtilmemesi durumudur. Her iki durum da akademik emek hırsızlığı niteliği taşır ve bilimsel topluluğun güvenini zedeler. Etik yayıncılık, yazarlığın yalnızca gerçek katkıya dayandırılmasını ve tüm yazarların sorumluluklarının açıkça paylaşılmasını gerektirir.

#### **6.6. Kaynakların Yanlış veya Hileli Kullanımı**

Kaynakların yanlış veya hileli kullanımı, bilimsel çalışmalarda atıf sisteminin güvenilirliğini zedeleyen ve yayın etiğini ihlal eden bir davranıştır. Bu tür ihlaller; kaynak göstermeden alıntı yapmak, gerçekte var olmayan çalışmalara atıf vermek, kaynakları yanlış aktararak okuyucuyu yanıltmak ya da çalışmanın dayandığı literatürü kasıtlı olarak çarpıtmak gibi farklı biçimlerde ortaya çıkabilir. Ayrıca yalnızca atıf sayısını artırmak amacıyla gereksiz veya alakasız kaynak eklemek de etik dışı kabul edilir. Bu tür uygulamalar, bilimsel bilginin şeffaflığını ve doğruluğunu bozar, okuyucunun araştırmanın dayandığı temelleri sağlıklı biçimde değerlendirmesini engeller. Etik bir yayın sürecinde araştırmacılar, tüm kaynakları doğru, eksiksiz ve dürüst bir şekilde kullanmakla yükümlüdür.

#### **6.7. Hakemlik Sürecini İstismar**

Hakemlik sürecini istismar, bilimsel yayıncılığın güvenilirliğini zayıflatan ve akademik etikle bağdaşmayan bir davranış biçimidir. Bu ihlal; hakemin, değerlendirmek üzere kendisine gönderilen gizli bilgileri kendi araştırmalarında kullanması, makaleyi kasıtlı olarak geciktirerek rekabet avantajı sağlaması, kişisel veya kurumsal çıkar çatışmalarını gizlemesi ya da yazarlarla adil olmayan iletişim kurması gibi çeşitli şekillerde ortaya çıkabilir. Hakemlik, bilimsel bilginin kalitesini ve güvenilirliğini artırmayı amaçlayan tarafsız bir değerlendirme sürecidir; bu nedenle hakemlerin gizlilik, tarafsızlık, dürüstlük ve profesyonellik ilkelerine bağlı kalması esastır. Sürecin kötüye kullanılması, hem araştırmacılara haksızlık yaratır hem de bilimsel yayın sisteminin bütünlüğünü zedeler.

#### **6.8. Çıkar Çatışmalarını Gizleme**

Çıkar çatışmalarını gizleme, araştırmacıların veya yazarların finansal, kişisel, kurumsal ya da profesyonel ilişkilerinin çalışmanın tasarımı, yürütülmesini, yorumlanmasını veya yayımlanmasını etkileyebilecek olmasına rağmen bu durumu beyan etmemeleriyle ortaya çıkan önemli bir yayın etiği ihlalidir. Bu tür gizlemeler, okuyucuların araştırmanın tarafsızlığını doğru biçimde değerlendirmesini engeller ve bilimsel bulguların güvenilirliğini zedeler. Çıkar çatışmaları her zaman etik dışı bir duruma işaret

etmese de, bunların açıkça paylaşılmaması bilimsel şeffaflığa aykırıdır ve potansiyel manipölasyonları gizleyebilir. Etik yayıncılık anlayışı, tüm araştırmacıların olası çıkar çatışmalarını açık, dürüst ve eksiksiz bir şekilde beyan etmesini; böylece bilimsel topluluğun güveninin korunmasını gerektirir.

## **7- Etik Dışı Davranışlara İlişkin Örnekler**

### **7.1. Andrew Wakefield – MMR Aşısı ve Otizm İddiası (1998)**

1998’de The Lancet dergisinde yayımlanan Wakefield’in makalesi, kızamık-kabakulak-kızamıkçık (MMR) aşısının otizme neden olduğunu iddia ediyordu. Çalışmada kullanılan örneklem küçüktü ve metodolojik hatalar vardı. Daha sonra yapılan soruşturmalar, Wakefield’in hem finansal çıkar çatışmalarını gizlediğini hem de verileri çarpıttığını gösterdi. Aşılama karşıtı hareketi ateşleyen bu makale, milyonlarca insanın aşıya olan güvenini zedeledi. The Lancet makaleyi geri çekti ve Wakefield’in doktorluk lisansı iptal edildi (Godlee vd., 2011; Deer, 2011).

### **7.2. Hwang Woo-suk – İnsan Kök Hücre Kopyalama Sahteciliği (2004–2005)**

Güney Koreli bilim insanı Hwang, insan embriyonik kök hücrelerini klonlamayı başardığını iddia eden iki makale yayımladı (Science dergisinde). Bu, bilim dünyasında devrim niteliğinde karşılanmıştı. Ancak sonradan verilerin manipüle edildiği, fotoğrafların montajlandığı ve kök hücre hatlarının aslında klonlama sonucu oluşmadığı tespit edildi. Ayrıca laboratuvarındaki kadın öğrencilerin yumurta bağışı için baskıya maruz bırakıldığı ortaya çıktı. Makaleler geri çekildi ve Hwang büyük bir etik skandalın merkezine yerleşti (Korean Government Investigation Board, 2006; Cyranoski, 2006; Kennedy, 2006).

### **7.3. Climategate – İklim Bilimi E-postalarının Çarpıtılarak Sunulması (2009)**

2009’da bazı iklim bilimcilerin e-postaları hacklenerek yayımlandı. E-postalarda iklim verilerini saklama veya manipüle etme iddiaları bulunduğu ileri sürüldü. Birçok resmi soruşturmada bilimsel sahtecilik olmadığı sonucuna varıldı; ancak olay, iklim biliminin şeffaflığı ve iletişim biçimi üzerine büyük bir güven krizi yarattı. Bu olay, etik sorunlardan ziyade bilimsel iletişimdeki şeffaflık tartışmalarının örneğidir (Russell, 2010; House of Commons Science and Technology Committee, 2010).

#### **7.4. Diederik Stapel – Sosyal Psikolojide Yaygın Veri Uydurma (2011)**

Hollanda'daki Tilburg Üniversitesi'nde çalışan sosyal psikolog Stapel'in yıllar boyunca onlarca makalesinde tamamen uydurulmuş veriler kullandığı ortaya çıktı. Sözde deneyler hiç yapılmamıştı; tablolar, ölçekler ve istatistiksel sonuçlar tamamen masa başında üretilmişti. Soruşturma sonucunda 50'den fazla makalesi geri çekildi (Levelt Committee vd., 2012). Stapel olayı, sosyal psikolojide tekrarlanabilirlik krizinin de sembollerinden biri haline geldi.

#### **7.5. Yüksek Sayıda Makale Geri Çekilmesi – Yayıncı Açıklamaları (2024)**

Springer Nature, 2024'te "araştırma bütünlüğü / kalite kontrol çabaları" kapsamında toplam 2.923 makaleyi geri çektiğini ilan etti. Bu geri çekilmelerin bir kısmı 2023 sonrası yayımlanan makalelerden geliyordu (Retraction Watch, 2025a). Bu durum, "daha önce fark edilmemiş ancak etik/kalite sorunlu çok sayıda çalışma" olduğunu göstermektedir.

#### **7.1. Yapay Zekâ ile Oluşturulmuş / Şüpheli İçerikli Makaleler "Paper Mill" Sorunu (2025)**

2025'te, Neurosurgical Review dergisi, yapay zekâ tarafından üretilmiş olma şüphesi taşıyan çok sayıda makaleyi geri çektiğini açıkladı. Özellikle yorumlar ve editöre mektuplar gibi kategorilerde yoğunlaşan bu geri çekilmeler, "yapay zeka yardımıyla yazılmış, atıf/özgünlük beyanı yapılmamış yazılar" problemi olduğunu göstermektedir (Retraction Watch, 2025b).

Bu örnekler, etik dışı davranışların hem bireysel hem de kurumsal düzeyde ciddi sonuçlar doğurduğunu göstermektedir.

### **SONUÇ**

Bilimsel araştırma, sistematik yöntemler aracılığıyla güvenilir ve geçerli bilgi üretmeyi amaçlayan, toplumun ilerlemesine doğrudan katkı sağlayan bir faaliyetdir. Bu faaliyetlerin bilimsel nitelik taşıyabilmesi, araştırma sürecinin her aşamasında etik ilkelere bağlı kalınmasıyla mümkündür. Araştırma ve yayın etiği; doğruluk, dürüstlük, nesnellik, şeffaflık, hesap verebilirlik ve saygı ilkeleri temelinde bilimsel bilginin bütünlüğünü korumayı hedeflemektedir. Söz konusu ilkelerin ihlali, yalnızca bireysel araştırmacıların değil, aynı zamanda bilimsel kurumların ve literatürün güvenilirliğini de zedelemektedir.

Son yıllarda araştırma sahteciliği, veri çarpıtma, intihal, haksız yazarlık uygulamaları, çıkar çatışmalarının gizlenmesi ve hakemlik sürecinin kötüye kullanılması gibi etik dışı davranışların artış göstermesi, araştırma ekosisteminde daha güçlü denetim mekanizmalarının gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, araştırmacıların etik farkındalık düzeyinin yükseltilmesini, etik kurulların etkinliğinin artırılmasını ve yayın süreçlerinin uluslararası standartlara uygun biçimde yürütülmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, araştırma verilerinin doğru şekilde üretilmesi, saklanması ve raporlanması, açık bilim uygulamalarının teşvik edilmesi ve şeffaflık ilkesi doğrultusunda hareket edilmesi, bilimin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çerçevede, bilimsel araştırma yöntemleri ile yayın etiğinin birbirini tamamlayan iki temel unsur olduğu değerlendirilmelidir. Etik ilkelere bağlılık, bilimsel üretim sürecinin ayrılmaz bir parçası olup, ulusal ve uluslararası düzeyde bilimsel güvenin sağlanması için vazgeçilmezdir. Sonuç olarak, araştırmacıların, akademik kurumların ve yayın organlarının etik sorumluluklarını en üst düzeyde yerine getirmesi; bilimsel kalitenin korunması, bilginin güvenilirliğinin sürdürülmesi ve bilimin toplumsal itibarının devamı açısından zorunlu bir gereklilik olarak görülmektedir.

## REFERANSLAR

- Arikan, R. (2017). *Araştırma yöntem ve teknikleri*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). Sage Publications.
- Cyranoski, D. (2006). Korean scandal will have global fallout. *Nature*, 439, 122–123. <https://doi.org/10.1038/439122a>
- Deer, B. (2011). How the case against the MMR vaccine was fixed. *BMJ*, 342, c5347. <https://doi.org/10.1136/bmj.c5347>
- Godlee, F., Smith, J., & Marcovitch, H. (2011). Wakefield's article linking MMR vaccine and autism was fraudulent. *BMJ*, 342, c7452. <https://doi.org/10.1136/bmj.c7452>
- House of Commons Science and Technology Committee. (2010). *The disclosure of climate data from the Climatic Research Unit at the University of East Anglia*.
- Karasar, N. (2020). *Bilimsel araştırma yöntemi*. Nobel Yayıncılık.
- Kennedy, D. (2006). Editorial retraction. *Science*, 311(5759), 335. <https://doi.org/10.1126/science.1124926>
- Korean Government Investigation Board. (2006). *Final report on the Hwang case*.
- Levelt Committee, Noort Committee, & Drenth Committee. (2012). *Report on the scientific misconduct of Prof. D. A. Stapel*.
- Muir Russell Report. (2010). *The independent climate change e-mails review*.
- Nature Editorial. (2010). Climategate and the politics of climate science. *Nature*, 468, 345–346. <https://doi.org/10.1038/468345a>
- Punch, K. F. (2013). *Introduction to social research: Quantitative and qualitative approaches* (3rd ed.). Sage Publications.

- Resnik, D. B. (2020). *The ethics of research with human subjects: Protecting people, advancing science, promoting trust*. Springer.
- Retraction Watch. (2025a). *Springer Nature retracted 2,923 papers last year*. <https://retractionwatch.com/2025/02/17/springer-nature-journal-retractions-2024/>
- Retraction Watch. (2025b). *AI-Generated Papers Lead to Retractions in Neurosurgical Review*. <https://retractionwatch.com/2025/02/10/as-springer-nature-journal-clears-ai-papers-one-universitys-retractions-rise-drastically/>
- Stroebe, W., Postmes, T., & Spears, R. (2012). Scientific misconduct and the myth of self-correction in science. *Perspectives on Psychological Science*, 7(6), 670–688. <https://doi.org/10.1177/1745691612460687>
- The Lancet. (2010). Retraction: Ileal-lymphoid-nodular hyperplasia, non-specific colitis, and pervasive developmental disorder in children. *The Lancet*, 375(9713), 445. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)60175-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)60175-4)
- Yıldırım, A., & Şimşek, H. (2018). *Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri*. Seçkin Yayıncılık.



# **İhtiyohelmintolojide Preparasyon Teknikleri**

**Mehmet Oğuz ÖZTÜRK<sup>1</sup>**

- 1- Prof. Dr.; Afyon Kocatepe University, Science and Literature Faculty, Department of Molecular Biology and Genetics, Afyonkarahisar, Turkey [oozturk@aku.edu.tr](mailto:oozturk@aku.edu.tr) ORCID No: 0000-0001-7263-3585

## ÖZET

Helmintlerin preparasyonuna ilişkin yöntemler, taksonomik inceleme, morfolojik analiz, moleküler çalışma, canlı gözlem ve benzeri çalışmanın türüne göre değişkenlik gösterir. Bu çalışmada helmint örneklerinin toplanması, işlenmesi, fiksasyonu, saydamlaştırma, boyanması ve mikroskopik incelemeye hazırlanmasına yönelik yaygın olarak kullanılan temel prensipler detaylı olarak anlatılmıştır. Helmintlerin bozulmadan korunması için uygun fiksatifler kullanılmalıdır. Türün yapısal özelliklerine göre Asit alkol, Nötral formalin, Carnoy solüsyonu, 70–80% etanol gibi farklı solüsyonlar tercih edilir. Mayer's hematoxylin veya Mayer's carmalum helmintler için en iyi boyalardır. Bir diğeri de Malzacher's tekniği boyamadır. Bu teknik iç organları birbirinden belirgin bir şekilde ayırtmaya yarar. Büyük helmintlerde büzülme ve katlanma eğilimi vardır. Bu durumu önlemek için fizyolojik su ortamında buzlu suda veya buzdolabında birkaç saat bekletilir. Diğer metot helmintleri oda sıcaklığında %5-10'luk etil alkolde bekletmektir. Orta büyüklükteki helmintler bir cam çubuk yardımı ile ılık suda veya seyreltik fiksatif içinde döndürülerek gevşetilir. Bunun sonucunda parazit kolayca uzar. Büyük helmintler ilgili ortama bırakılmadan önce en geniş yerinden kesilirse parazit daha rahat gevşeyecektir. Helmintlerin kistleri suni yolla patlatıldıktan sonra canlı kistler konaktan dikkatli bir şekilde alınarak fizyolojik suya bırakılır. Her bir kist, kist çeperinden kurtarılır. Üzeri kistli olan numuneler tuzlu su solüsyonuna da bırakılır. Örnekler genellikle burada 20 saniye içinde hareketlenme gösterirler. Daha sonra küçük helmintlere uygulanan yöntemler takip edilir. Helmintler her zaman daimi preperat haline getirilmezler. Küçük örnekler gliserol-jel ile preparasyona tabi tutulur. Büyük numuneler gliserolde muhafaza edilir, çalışma zamanı ise lam üzerine bir miktar gliserol damlatılarak incelenir.

*Anahtar Kelimeler –İhtiyohelminтологи, Konak, Parazit, Pisces, Preparasyon*

---

## GİRİŞ

Sucul ekosistem üyelerinden balıklarda parazit yaşam gösteren helmintler, trematodlar, sestodlar, nematodlar ve akantosefalalar olmak üzere dört ana gruba ayrılır. Trematodlar olgun ve metaserkarya evresinde konaklarının deri, solungaç ve iç organlarda yerleşerek patoloji oluşturur. Sestodlar çoğunlukla balıkların bağırsak lümeninde yaşayan erişkin evreleri ile özgünlük gösterir. Nematodlar konakların bağırsak lümeni, vücut boşluğu ve kas dokularında parazitlenme yapar. Akantosefalalar da benzer şekilde genellikle bağırsakta bulunurlar (Roberts vd. 2024).

İhtiyohelminтологи çalışmalarında helmintlerinin doğru tanımlanması anatomik ve morfolojik yapıların doğru olarak gözlenmesine bağlı

olduğundan uygun yöntemlerle uygulanan preparasyon teknikleri helmint tanımlamasının esasını teşkil eder. Trematod, sestod, nematod ve akantosefal taksonlarına ait ihtiyohelminthlerin tanımlanması sürecinde fiksasyon, şaydamlştırma, boyama ve daimi preparat haline getirme işlemleri önem arz eder. Zamanında ve doğru uygulama ile etil alkol, sıcak formalin ve AFA fiksatifleri helmitlerin bozulmasını önleyen fiksatiflerdir. Hematoksilin, Giemsa, –Karmalaun gibi boyaların türlere özgü anatomik ayrıntıları belirginleştirmesi, tanıyı önemli ölçüde kolaylaştırır. Ayrıca nematod ve akantosefal örneklerinde laktifenol veya gliserin-jelatinle şeffaflştırma, kutikula, proboskis kancaları ve genital yapılar gibi ayırt edici karakterlerin net görünmesini sağlar. Bu nedenle uygun preparasyon prosedürü hem morfolometrik analizlerin güvenilirliği hem de taksonomik doğruluk açısından vazgeçilmezdir (Janovy ve Esch 2016, Woo ve Buchmann 2012).

Bu çalışmanın amacı, balık helmintlerinin doğru ve güvenilir biçimde tanımlanabilmesi için uygulanan yöntemlerin açıklanması ve bu tekniklerin anatomik-morfolojik özelliklerin belirgin şekilde ortaya çıkmasına katkı yapmaktır. Çalışamda, helmint taksonlarındaki örneklerin fiksasyon, şaydamlştırma, boyama ve daimi preparat haline getirme metotları ele alınarak trematod, sestod, nematod ve akantosefal gruplarında tür düzeyinde ayırt ediciliği artıran yöntemler belirlenmiştir. Böylece helmit örneklerinin ait olduğu taksonomik doğruluğu ortaya çıkarmanın yanısıra helmintolojik çalışmalarda tekrarlanabilir yöntemler oluşturacak uygun bir preparasyon metodolojisi hedeflenmiştir.

### ***Monogenean Helmintlerin Preparasyon Teknikleri***

Monogenea'lar deniz ve tatlı su balıklarının solungaç ve kloak boşluklarında, deri ve solungaçlarında, ağız içinde, amfibilerin üriner sistemlerinde ve çok seyrek olarak reptillerde bulunur.

### ***Monogenlerin Toplanması, Gevşetilmesi, Kurban Edilmesi ve Fiksasyonu***

Küçük balıklar, amfibiler, yüzgeçler veya solungaçlar ve solungaçların her biri diğerinden ayrılmalıdır ve 1:4000 formol içine konulmalıdır. Ya da monogenlerin gevşek ve rahat düz konumlu olmaları ve çoğunlukla parazitlere sıkıca yapışan mukusun oluşumunu önlemek için, balığın tümü yada solungaçları 6–24 saat dondurulur. Daha sonra ağız kapaklı küçük şişe veya kavanoz içindeki balık ya da solungaçlar 1 dakika hızlı bir şekilde çalkalanır. Veya izole edilen monogenler, solungaçlar, balığın veya amfibinin tamamı 1/3 oranında tuzlu suya veya deniz suyuna yerleştirilir. Kapaklı kavanozda birkaç dakika boyunca hızlıca çalkalanır. Daha sonra 250 ml suya 1 gram chloretan karışım hazırlanarak tekrar birkaç dakika hızlı bir biçimde çalkalanır.

Yukarıdaki yöntem takip edildikten sonra, karışım yayvan bir kap içine boşaltılır, monogenlerin dibe çökmesi için birkaç dakika beklenir. Daha sonra sıvının üzerinde yüzen yabancı partiküller alınır. Geri kalan inceleme

sedimenti bir petri kutusuna dökülür ve disseksiyon mikroskobu altında helmint arama yapılır. Bulunan monogenler bir pipet ile alınıp AFA çözeltisi içine bırakılır.

### ***Depolama, Saydamlaştırma ve Preparasyon***

Monogenler küçük helmintler oldukları için, bir veya iki saat içinde fiksatifte tutulduktan sonra %70'lik etil alkol içine alınabilir. Monogenealar gliserol-jel ortamında genellikle boyanmadan incelenirler. Preparasyon için Gerekli malzemeler: 45 °C sıcaklıkta su banyosu, yapıştırıcı aplikatör gliserin jeli, lam, 18 mm veya 22mm lamel, Kanada balsamı.

Jel eriyinceye kadar gliserol-jel şişesini sıcak su banyosuna yerleştirilir. Jel aşırı ısıtılırsa katılaşamayan kolloide dönüşür ve jel harap olur. Lam üzerine bir damla gliserin jel konur, numunenin pozisyonu ayarlanır ve örtücü lamel ile kapatılır. Preparasyon soğumaya ve katılaşmaya bırakılır, lamel kenarındaki fazla jel kazınır. Sıcak bir plak üzerinde ısıtılan lam, lamelin kalkmasına veya numunenin rotasyonuna imkân sağlar, fakat küçük monogenler bu süreçte kolay kırılabilir, bu nedenle dikkatli olunmalıdır. Bu aşamada dikkat edilecek birkaç önemli kurallar da şunlardır. Sudan ya da % 70 lik alkolden nakledilen numuneler gliserol yada diğer sıvı ortamda inceleneceği zaman absölü alkole alınmamalıdır. Çok yüksek osmotik basınca sahip gliserollü ortam, fiske edilmiş numunelerde bile çekme ve büzülmelere neden olabilir. Bu nedenle nazik kırılğan objeler gliserolün orta dilitasyonlu ortamından geçirilmelidir. Numune eğer gliserol-jelde incelenirse soğuk ve karanlık yerde tutulmamalıdır, çünkü gliserol-jel sıvılaşabilir ve lamdan akabilir.

Monogenean helmintlerin daimi preparasyonu için aşağıdaki teknikler kullanılır: Isıtılmış bir plakanın üzerine geniş bir örtü lameli yavaşça sürülerek yerleştirilir. Örtü lamelinin ortasına bir damla erimiş jel damlatılır ve jelin ortasına numune bırakılır. Küçük lamel preparasyon için üste konur. Parçaların soğuyarak birleşmesi sağlanır ve bir gece boyunca oda sıcaklığında jel katılaşmaya bırakılır. Lamel kenarındaki fazla jel kazınır. Bir lamın merkezine bir damla balsam konur. Çift lamelli asamble çevrilerek büyük lamel üstte getirilir ve balsam damlası üzerine bırakılır. Balsam yavaşça geniş lamele doğru yayılıp, materyali etkili şekilde daimi olarak kapatmasına izin verilir. Preparatlar birkaç hafta oda sıcaklığında kurutulmalıdır.

### ***Digenean Helmintlerin Preparasyon Teknikleri***

Digeneaların gelişim safhaları olan sporokist, redi ve serkaria evreleri molluskalarda görülür. Metaserkaria, birçok vertabrata ve invertabratalarda yaygındır. 1-3 haftalık periyottan sonra yetişkin formuna gelen olgun digenealar birçok organlara bulaşabilmelerine rağmen en yaygın şekilde balıkların ve vertabratların bağırsaklarında bulunurlar.

### ***Olgun Digeneaların Toplanması, Kurban Edilmesi ve Fiksasyonu***

Genelde digenealar çok hassastır. Hemen sabit bir duruş alır ve daha sonra yumuşamayı önleyici hal alırlar. İyi bir sonuç için, onları canlıyken sabit hale getirmek gerekir. Dahili yapıda yumurtayla dolu digeneaları tanımlamak güç olabilir. Bunun için söz konusu canlılar birkaç dakika saf su içine konularak bir miktar yumurtanın dışarı çıkması sağlanabilir. Eğer 15 dakika içinde bir miktar yumurtayı çıkarmazlarsa damla damla Glacial Asetik Asit eklemek gerekir. Büyük digenealar buzlu suda veya soğutucuda soğutularak ayrıştırılır. Bu grup için en yaygın olarak kullanılan fiksatif AFA (30 ml Formalin, 250 ml Etil Alkol-%95, 20 ml Asetik Asit, 200 ml saf su) dır.

Fiksasyon için Yöntem: Örnekler fırça veya pipet yardımıyla alınıp fizyolojik su damlatılan lamın üzerine taşınır. Materyali dorsovental yönde tutup üzerine lamel kapatılır. Fizyolojik suyu kurutma kağıdı ile bir taraftan çekerken diğer taraftan fiksasyon sıvısı ilave edilir. Materyalin esneme derecesine göre basınç uygulanarak yassılaştırma işlemi yapılabilir. Yassılaştırma işlemi iç organların doğal şeklini bozduğu için yapılan ölçüm ve incelemeler gerçek sonuçları vermeyebilir. Bu nedenle materyal-metotta yassılaştırma işleminin yapılıp yapılmadığı mutlaka belirtilmelidir. Yassılaştırma işleminde 3 mm'den küçük örnekler için kağıt kısıpacından yapılan basınç aleti uygulanabilir. Fiksatif süresi normalde 24 saattir. Bazı araştırmacılar ise örneklerle basınç uygulamadan kaynar olmayan sıcak su ile fikse etmektedir. Bunun için materyal, fizyolojik suyun içinde tutulur ve üzerine sıcak su eklenir, 1-2 saniye sonra soğuk fiksatife nakledilir. Digenea örneklerini kurban etmek ve gevşetmek için 50 santigrat derece sıcaklıktaki AFA kullanılabilir. Daha sonra soğuk %70 alkolde stoklanır.

### ***Kist İçindeki Larval Digenealarda Fiksasyon İşlemi***

Digenea kistleri disseksiyon iğnesi ile yırtılıp patlatılır veya metaserkaria yada progenik ergin bireyin kisti, kist eritici kimyasallara maruz bırakılır. Bunun için kist %0.6 NaCl çözeltisi içine atılır ve oda sıcaklığında larva serbest kalıncaya kadar bekletilir. Kisti eritmek için bir diğer metot şudur: Kist, eritici solüsyon (10 kısım HCL-%0.3, 4 kısım Pepsin-%0.5) içine atılıp 30 dakika bekletilir. Daha sonra kist fizyolojik suda yıkanır. İçinde %0.5 Tripsin olan 7.8 pH değerindeki %0.85 lik NaCl ( $K_2HPO_4$ ) solüsyonunda 10 dakika tutulur. 1:20 000 oranında Streptomisin ilave edilen fizyolojik suda yıkanır.

### ***Depolama ve Boyama***

Toplama numarası verilen materyal %70 etil alkol içinde muhafaza edilir. Mayer's hematoxylin veya Mayer's carmalum digenea'lar için en iyi boyadır. Bir diğeri de Malzacher's tekniğidir. Bu teknik iç organları birbirinden belirgin bir şekilde ayırtmaya yarar.

## **Sestod Helmintlerin Preparasyon Teknikleri**

Olgun sestodlar birçok vertebratların bağırsağında yaygın olarak bulunur. Proserkoid larvaları normalde crustacea'ların hemosolünde bulunur. Pleroserkoid larvaları balık ve yılanların kas dokusu, sölom, karaciğer ve benzeri organlarında yaygındır. Sistiserkoid larvaları genellikle crustacea, insekta, oligoket ve diğer invertabratlar ile nadir olarak vertebratların hemosöllerinde ve çeşitli organlarında yer alır.

### **Örnek Toplama ve Ayırıştırma**

Bazı larva türleri direkt olarak insana bulaşabildiği için, sestod larvaları çalışılırken dikkatli olunmalıdır. Bu yassı solucanların skolekslerini konaktan ayırırken de dikkatli olunmalıdır. Bunun için skoleks gömülü olduğu mukoza içinden kör bir skapel ile didiklenerek çıkarılır. Ya da skoleks gömülü bağırsak parçası kesilerek içinde fizyoloji su bulan ortama bırakılır ve soğutucuda veya oda sıcaklığında serbest kalıncaya kadar bekletilir.

Sestodlarda büzülme ve katlanma eğilimi vardır. Bu durumu önlemek için fizyoloji su ortamındaki sestodlar buzlu suda veya buzdolabında birkaç saat bekletilir. Diğer metot ise parazitleri oda sıcaklığında %5-10'luk etil alkolde bekletmektir.

Orta büyüklükteki sestodlar bir cam çubuk yardımı ile ılık suda veya seyreltik fiksatif içinde döndürülerek gevşetilir. Bunun sonucunda parazit kolayca uzayacaktır. Büyük sestodlar ilgili ortama bırakılmadan önce en geniş yerinden kesilirse parazit daha rahat gevşeyecektir.

### **Kurban Etmek ve Fiksasyon**

Yaygın fiksatifler AFA ve Bouin's çözeltileridir. Sestodlar gevşek hale getirildikten sonra şu işlemler yapılır: Küçük sestodlar, digenea grubu parazitlere benzer bir muamele yapılabilir. Bu süreçte skoleks ve strobila gövde ile birlikte dikkatlice alınmalıdır.

30 cm den büyük orta büyüklükteki sestodlar, fizyolojik su ortamı cam kap içine bir lam konulur ve üzerine parazit uzatılır. Parazitin üzeri bir lamelle kapatılıp, lamın kenarından bir pipet yardımı ile fiksatif damlatılır. Bunun amacı yassı numuneler elde etmektir. Bu yüzden lamaların yüzmemesine dikkat edilmelidir. Numunelerin kurumasına izin verilmeden bu şekilde 35-40 dakika bekletilir. Daha sonra lamel alınıp, strobila 3-4 cm uzunluğunda kesilir ve fiksatifli bir petri kabına nakledilir.

Büyük numuneler, bir beher yada şişe etrafına sarılır, bu süreçte strobilanın üst üste gelmediğinden emin olunmalıdır. Sıcak fiksatif hızlıca numune üzerine dökülür. Daha sonra 3-4 cm uzunluğunda kesilen parçalar, içinde fiksatif olan bir petride birkaç saat veya bir gece bekletilir.

Isıtılan AFA dan çıkan alkol buharı kuvvetli bir yanıcıdır. Orta büyüklükteki sestodlar kaynama derecesinde olmayan (yaklaşık 75°C) sıcak su içine atılarak da kurban edilebilirler. Bunu takiben AFA veya Bouin's

fiksatifleri ile fiksasyona tabi tutulurlar. Alternatif olarak, uzun bir lam üzerine nemlendirilmiş kurutma kağıdı yayılır. Yumuşak bir fırça vasıtasıyla uzatılan sestodların üzerine ikinci bir lam örtülür. Lam tabakasının kenarlarından fiksatif dökülerek fiksasyon gerçekleştirilir. Örnekler daha sonra AFA ortamına alınır.

Larva safhasındaki sestodlara digenealar için uygulanan yöntem takip edilir. Sestodların kistleri suni yolla patlatıldıktan sonra canlı kistler konaktan dikkatli bir şekilde alınarak fizyolojik suya bırakılır. Her bir sistiserkus, kist çeperinden kurtarılır. Üzeri kistli olan numuneler tuzlu su solüsyonuna da bırakılabilir. Örnekler genellikle burada 20 saniye içinde hareketlenme gösterirler. Daha sonra küçük digenealara uygulanan prosedür takip edilir. Ayrıca, sestodları toplama ve preparasyon aşamasında acele edilmemelidir. Konağın sindirim borusu ve muhtevası %10 formolde muhafaza edilmelidir.

### ***Depolama, Boyama ve Kapama***

Örnekler, içinde %70 alkol bulunan şişelere konulur. Sestodlara genel boyama prosedürü uygulanır. Boya olarak Mayer's carmalum ve Semichon's aceto-carmin gibi karmin boyaları sestodlar için kullanılan uygun boyalardır. Bir diğer boyama metodu Malzacher's tekniği olup, sestodların çeşitli organlarının birbirinden belirgin bir şekilde ayrıtılmasında kullanılır.

Bir lamin sağ tarafının 2/3 lük kısmına viskos balsam sürülür. Sestodlar lama paralel sıralar halinde bırakılır. Balsam sestod parçaları boyunca dökülür. Xylol ile yıkanan örtü lamelinin bir ucu kurutma kâğıdına dokundurularak fazla xylol uzaklaştırılır. Bunu takiben lamin sağ köşesine 45 °C açıyla yaklaştırılan lamel ile yavaşça lamin üzeri örtülür. Burada dikkat edilecek bir diğer husus, lam üzerine dökülen balsamın sestod parçaları ile lam-lamel arasını dolduracak kadar yeterli olmalıdır. Eğer sestod numuneleri çok kalın ise ince uzun küçük lam parçaları lamin kenarlarına veya sestod parçaları arasına örtü lamelini desteklemesi amacıyla yerleştirilir.

Sestodların kapatılması aşamasında, numune üzerindeki örtü lameli ve balsam kuruyuncaya kadar bazen sıkıştırma uygulaması gerekebilir. Bunun için kağıt atacısı kullanılabilir. Bu aşamada söz konusu kısıkların materyale zarar vermemesine dikkat edilmelidir.

### ***Sestod Kancalarının Tanımlanması***

Kanca tanımlaması için en uygun kapama ortamı Berlese's ortamıdır. Bu solüsyon dokuları şeffaflaştırır. Skoleksin kapatılmasında veya preparasyonunda da Berlese's ortamı kullanılabilir, veya çift örtü lamel tekniği uygulanabilir.

## **Acantocephala Helmintlerin Preparasyon Teknikleri**

Ergin Acantocephala helmintleri vertabratların bağırsaklarında bulunurlar. Proboscis denen kancalı hortum istemli olarak çeperi içine gömülebilir. Acantocephallerin tanımlanmasında proboscis önemli yer tutar. Bu nedenle proboscis preparasyonda tamamen genişletilerek açılmalıdır. Kistik acantocephallerin preparasyonu olgun bireylerinkiyle aynıdır. Larval digen preperasyonunda digenealara uygulanan yöntem kullanılır.

### ***Toplama, Kurban Etmek ve Hortumun Genleştirilmesi***

Konaktan akantocephalleri toplama sürecinde çok dikkatli olunmalıdır. Bu yüzden proboscis kancalarının deforme olmamasına dikkat edilmelidir. Olgun bireyleri toplamak için en güvenli prosedür, proboscisin gömülü olduğu bağırsak duvarının küçük kare şeklinde kesilmesi, daha sonra konak dokusunun diseksiyon iğnesi ile yardımıyla yırtılarak proboscisin serbest kalmasını sağlamaktır. Bu süreçte canlı olan parazitin hasar görmemesine dikkat edilmelidir.

Parazitler oda sıcaklığındaki veya soğuk musluk ya da distile suda ölünceye kadar bekletilir. Bunun için 48 saatten daha fazla bir süreye gereksinim duyulabilir. Büyük helmintler buzdolabına konulmalı ve belirli aralıklarla morfolojik durumu mikroskopuyla takip edilmelidir. Bu süreçte su parazitin içine osmozla girmesi sonucu artan iç basınçla proboscis dışarı çıkacaktır.

### ***Fiksasyon ve Muhafaza***

Acantocephaller stoklama için etil alkolle nakledilmeden önce yaklaşık 48 saat fiksatifte (AFA) bekletilmelidir. Fiksatif değişimine olanak sağlamak için vücudun orta bölümünden ve proboscis'in kaide kısmından böcek iğnesiyle birkaç delik açılmalıdır. Muhafaza için % 70 etil alkol ortamında tutulmalıdır.

### ***Boyama ve Saydamlaştırma***

Küçük numuneler Mayer's hematoxylen veya Mayer's carmalum ile boyanmalıdır. *Macracanthorhynchus* sp gibi büyük örnekler boyanmaz ve lam üzerine konulup preparatı yapılamaz. Bunlar temizlendikten sonra gliserolde muhafaza edilmelidir.

Örnekleri saydamlaştırmak için aşağıdaki prosedür takip edilir. Önce petri kabına yeterli miktarda saydamlaştırma ajanı doldurulur. Daha sonra yeterli miktarda absolu alkol bir pipet yardımı ile dikkatlice ilave edilir. Bu ortama numuneler bırakılır. Örnekler önce iki sıvının ortak yüzeyi arasında yüzeceklerdir. Derece derece sıvıdaki karışım arttıkça örnekler alt tabakaya doğru batır. Numuneler tamamen dibe çöktüğü zaman alkol pipetle çekilir. Absolu alkolden xylene götürülürken numunelerin kırılmaması için dikkatli olunmalıdır. Daha sonra örnekler daimi preparat yapılmadan önce yeni bir saydamlaştırma ajanına alınmalıdır.

### ***Nematoda Helminthlerin Preparasyon Teknikleri***

Nematoda, helminth taksonları içinde en büyük şube özelliğine sahiptir. Parazit nematodlar birçok konağın organ sistemlerinde ya da dokularında kist halinde veya serbest olarak bulunabilir. Dairesel kasların yokluğu bu helminthlere karakteristik kamçılama hareketini veririr. Formalin içine atıldığı zaman parazitin halka şeklinde büzüldüğü gözlenir.

#### ***Toplama ve Gevşetmek***

Nematodları konaktan toplarken numunelerin ergin ya da juvenil olup olmadıklarını anlamak oldukça zordur. Fakat her ikisi içinde benzer yöntemler uygulanır. Nematodlar organların lümenlerinde çoğunlukla serbest olarak bulunurlar ve buradan pipet ya da pens yardımıyla kolaylıkla toplanabilir.

Dokulardaki parazitler ise didiklenerek dışarı çıkarılır ya da doğal kistik konumunda fiks edilip seri kesitler alınarak incelenir. Kandaki mikrofilaryalar kalın kan yayma tekniği ile hazırlanan preperatlardan tanımlanır. Bunlara kan protozoanlarına benzer yöntemler uygulanabilir.

Pek çok nematod nadiren gevşer. Gevşek halka şeklinde kıvrık olan parazitler %0,05 seyreltik Glasial Asetik Asitli ılık su içerisinde döndürülerek uzatılabilir. Küçük nematodlar ise üzerinde tuzlu su veya musluk suyu olan bir lamın ispiroto alevi üzerinde tutularak ısıtılması sonucu gevşetilebilir.

#### ***Kurban Etmek ve Fiksasyon***

Güzel bir çalışma örneği elde etmek için nematodlar mümkün olduğunca düzgün bir şekil alacak şekilde kurban edilmelidir. Bunu için kaynamaya yakın bir %70 etil alkol veya Looss's sıvısı kullanılır. Nematodları kurban etmek ve fiksasyon işlemi için bir diğer basit alternatif metot ise soğuk asetik asit kullanmaktır. Nematodların katikülü geçirgen değildir. Eğer nematodlar histolojik çalışmalar için kullanılacak ise anterior ve posterior kısımları kesildikten sonra fiksasyon sıvısında bekletilmelidir.

#### ***Saydamlaştırma***

Nematodlar 1/1 oranında %70 etil alkol / gliserol karışımı içersine yerleştirilir. Ortamdaki gliserol oranı etil alkol buharlaştıkça derece derece artacaktır. Bu solüsyondaki gliserolün yüzdesi arttıkça örnekler yavaş yavaş saydamlaşacaktır.

Nematodlar fenol-alkolde de hızlı bir şekilde saydamlaşır. Bunun için bir kısım absolu alkol ve 4 kısım erimiş fenol kristali kullanılır. Bu solüsyon örnekleri hızlı şeffaflaştırmada kullanılır. Özellikle spikül gibi kütikül özellikli yapıların incelenmesinde yararlıdır. Solüsyon düşük sıcaklıkta kristalize olur, fakat bu durum ortama %5 kadar gliserol eklenerek önlenir. Depolama öncesi örneklerdeki fenolü uzaklaştırmak için %70 alkolle yıkanmalıdır.

Nematodları saydamlaştırmak için fenol alkol kullanmanın 3 önemli dezavantajı vardır: Solüsyon eğer ışığa maruz kalırsa kararır. Bu yüzden solüsyon kahverengi şişelerde depolanmalıdır. Geçici preperat yapılan materyaller çalışma zamanına kadar karanlık ortamlı kutularda saklanmalıdır. Saydamlaştırma işlemi yapıldığı için bazı dokular hasara uğrayabilir. Örneğin bazı nematodların bağırsak hücreleri ve kütikülalarında şişme meydana gelebilir. Fenol alkolde saydamlaştırılan nematodlar boyama ve kesit için uygun değildir. Fenol alkol, güneş ışığı ile kararma meydana geldiği için, laboratuvar çalışanı içinde hoş olmayan bir ortamdır. Hemen yıkanmadığı zaman deride yanma meydana getirir.

### ***Boyama ve Depolama***

Örnekler saydamlaştıktan sonra etil alkol-gliserol karışımı içerisinde saklanabilir. Alkol depolanan örneklerde bakteri ve mantarların gelişmesini önler. Genellikle nematodlar boyanmaz fakat belirli yapıları için birkaç boyama metodu vardır. Küçük nematodlar, canlı halde iken bulundukları ortamın içine nötral kırmızı gibi vital boyalar bırakılabilir.

Giemsa boyası ilave edilmiş PVA-Laktofenol, preperasyonun optik özelliğini artırır, nematodların içyapısına bir renk verir. Çözeltiliye atılacak boyanın miktarı, araştırmacının tecrübesine göre kendisi tarafından ayarlanmalıdır. Bu boya ile spikül ve gubernakulum boyanır.

### ***Daimi Preparasyon***

Nematodlar genellikle daimi preperat haline getirilmezler. Küçük örnekler gliserol-jel ile kapatılırlar. Büyük numuneler gliserolde muhafaza edilir, çalışma zamanı ise lam üzerine bir miktar gliserol damlatılarak incelenir. Nematodlardaki taksonomik çalışmalar için önemli olan sefalik yapıları incelemek için, canlının anterior kısmı kesilir, ağız açıklığı yukarı gelecek şekilde düzenleme yapılır ve örtü lameli ile kapatılır. Preparatlar doğrudan güneş ışığı almayan ortamda muhafaza edilir.

## **SONUÇ**

Bu çalışmada, balık helmintlerinin anatomik ve morfolojik yapılarına göre doğru tanımlanması için uygulanan preparasyon yöntemleri ortaya çıkarılmıştır. Helmintler için fiksatif maddelerin belirlenmesi, saydamlaştırma sürelerinin helmintlerin tür çeşitliliğine göre ayarlanması, boyama ve daimi preparasyon metodlarının tanımlanmış belirli bir adımlarla uygulanması, hem örneklerin yapılarının bozulmadan korunmasını hem de mikroskopik ayrıntıların net biçimde ortaya çıkmasına olanak sağladığı vurgulanmıştır. Bu yöntemlerin özellikle küçük boyutlu ve morfolojik ve anatomik olarak benzer türlerin ayırt edilmesinde güvenilir ve etkili bir üstünlük sağladığı belirtilmiştir.

## REFERANSLAR

- Janovy Jr, J., & Esch, G. W. (Eds.). (2016). *A Century of Parasitology: Discoveries, Ideas and Lessons Learned by Scientists Who Published in The Journal of Parasitology, 1914-2014*.
- Roberts, L. S., Janovy Jr, J. J., Nadler, S. A., Radev, V., & Gardner, S. L. (2024). Concepts in Animal Parasitology, Chapter 56: Strongyloidea and Trichostrongyloidea (Superfamilies): Bursate Nematodes.
- Woo, P. T., & Buchmann, K. (Eds.). (2012). *Fish parasites: pathobiology and protection*. Cabi Publishers.



# **6-Metil-2-Piridilokso-Süstitüe Siklotrifosfazen Bileşğinin 2,2'-Dihidroksibifenil İle Reaksiyonu**

**Saliha BEGEÇ<sup>1</sup>**

1- Prof. Dr., İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü,  
[saliha.begec@inonu.edu.tr](mailto:saliha.begec@inonu.edu.tr), ORCID: 0000-0001-5331-6736

## ÖZET

Fosfazenler önemli bileşiklerdir. Bu bileşikler düz zincirli ya da halkalı (siklo) yapıda olabilirler. Siklofosfazen bileşikleri değişik süstituentlerle etkileştirilerek yeni fosfazen türevi bileşikler hazırlanabilir. Hazırlanan bu bileşikler farklı fiziksel ve kimyasal özellikler sergilerler. Bu bileşikler süstitüe gruba bağlı olarak sıvı kristal, aleve dayanıklı malzeme, antikanser, antimikrobiyal aktivite, faz transfer katalizörü gibi özellikler sergilerler. Bu açıdan yeni fosfazen türevi bileşiklerin sentezi, yapılarının aydınlatılması oldukça önemlidir.

Siklofosfazen temelli çok merkezli koordinasyon ligandları son yıllarda yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Bu ligandlar geçiş metalleri ve baş grup metalleri ile metal kompleksleri oluşturabilirler.

Piridiloksofosfazenler çok merkezli koordinasyon ligandı olarak davranırlar. Bu bileşiklerde piridin siklofosfazen halkasının fosfor atomuna bir oksijen atomu aracılığıyla bağlanır.

Bu çalışmada kiral fosfor atomu içeren piridin ve bifenol süstitüe fosfazen türevi bileşiğin sentezlenmesi hedeflendi. Bu bileşiğin sentezi iki basamakta gerçekleştirildi. ilk basamakta 2-hidroksi-6-metil-piridin ile heksaklorosiklotrifosfazatrien metalik sodyumun varlığında tetrahidrofuran içinde etkileştirilerek başlangıç bileşiği olarak kullanılacak olan 6-metil-2-piridiloksosüstitüe siklofosfazen bileşiği sentezlendi. İkinci basamakta hazırlanan bu bileşik potasyum karbonatın varlığında aseton içinde 2,2'-dihidroksibifenil ile etkileştirildi. Bu reaksiyonun sonucunda kristal yapılı piridin ve bifenol süstitüe monospirofosfazen türevi bileşik elde edildi. Reaksiyon karışımlarından başlangıç bileşiği ve son ürün ince tabaka kromatografisi ve kolon kromatografisi teknikleri kullanılarak ayrılıp saflaştırıldı. Her iki bileşiğin yapısı elemental analiz  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  ve  $^{31}\text{P}$  NMR spektroskopisi teknikleri kullanılarak tayin edildi.

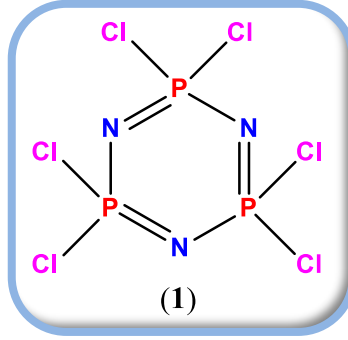
*Anahtar Kelimeler – Fosfazen, Spiro, Piridin, bifenol*

## GİRİŞ

Düz zincir, halkalı ya da yüksek molekül ağırlıklı polimerik yapıda bulunabilen fosfazenler,  $[\text{N}=\text{PR}_2]_n$ , inorganik kimyanın önemli bir sınıfını oluştururlar. Halkalı fosfazenler heterohalkalı bileşiklerin en iyi bilinen ve en çok çalışılan üyeleri arasındadır. Bu grubun en önemli bileşiklerinden bir tanesi heksaklorosiklotrifosfazendir [Ainscough 2007: 2575, Allcock 1972: 315, Allen 1991: 91119].

Hekzaklorosiklotrifosfazen (**1**, trimer,  $\text{N}_3\text{P}_3\text{Cl}_6$ , HCCP), beyaz kristal (e.n : 113 °C) yapılı azot ve fosfor atomlarının birbirine ardışık olarak bağlandığı altı üyeli düzlemsel halka şeklinde bir yapıya sahiptir. Bu bileşik

sübstitüe organofosfazen türevi bileşiklerin sentezinde en fazla kullanılan başlangıç bileşiğidir.



Şekil 1, Hekzaklorosiklotrifosfazatrien (1)'in yapısı

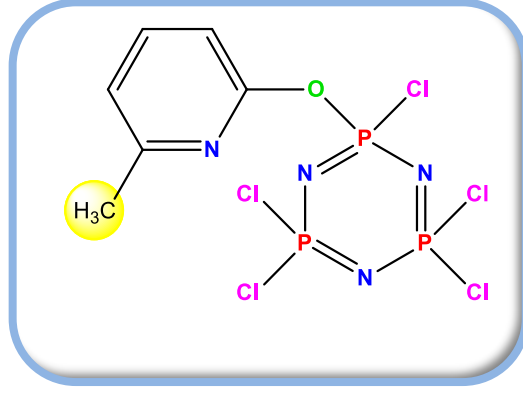
Siklotrifosfazenler, alifatik veya aromatik reaktiflerle süstitüsyon tepkimesi vererek yeni fosfazen türevi bileşiklerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bileşikler reaktiflerin sahip olduğu özelliklere ve reaksiyon şartlarına bağlı olarak şarj edilebilir lityum iyon pilleri [Wang, 2021:7101 ], yağlayıcılar [Liu, 2005:725], iyonik sıvılar [Akbaş 2019:2098], floresans kemosensörler [Tümay, 2021: 10561], aleve dayanıklı maddeler [Sun 2014: 231], gibi farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterirler.

Önemli bir siklotrifosfazen türevi olan trimerin yapısındaki Cl atomlarının farklı nükleofillerle yer değiştirme reaksiyonlarından çeşitli yeni siklotrifosfazen türevi bileşikler hazırlanabilir.

Trimerin tek dişli ya da iki dişli ligantlarla reaksiyonları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir [Jeevananthan 2022:23322, Balcı 2022:812, Tümer 2022:1897, Begeç 2022:109457, Mukundam 2016:3523, Begeç 2023:15]. Ancak hem tek dişli hem de çok dişli ligant içeren fosfazen türevi bileşik sayısı literatürde daha azdır [Çıralı 2015: 170, Ainscough 2012:10884, Akbaş 2024:122116, Carriedo 1999:1015, Begeç 2007:372, Brandt 2001:138, Tümer 2010-2449, Kumar 1995: 6323].

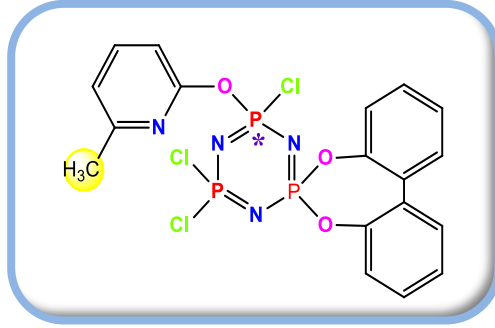
Bu çalışmada hem tek dişli (piridin) hem de iki dişli (bifenol) ligant içeren karışık süstitüentli sterojenik fosfor atomu içeren fosfazen türevi bileşiğin (5) sentezlenmesi hedeflendi.

Bu hedef doğrultusunda ilk basamakta 6-metil-2-piridilokso fosfazen türevi bileşik (3) hazırlandı.



Şekil 2, (3) Bileşiğinin yapısı

İkinci aşamada (3) bileşiği 2,2'-bifenol ile etkileştirilerek 6-metil-2-piridilokso sübstütüe monospiro fosfazen türevi bileşik (5) elde edildi. Her iki bileşiğin (3 ve 5) yapısı  $^1\text{H}$  NMR,  $^{13}\text{C}$  NMR,  $^{31}\text{P}$  NMR spektroskopisi ve elementel analiz yöntemleri ile tayin edildi.



Şekil 3, (5) Bileşiğinin yapısı  
\*P Kiral fosfor atomu

Reaksiyonların sonunda hem monofonksiyonel hem de di fonksiyonel ligant sübstütüe fosfazen türevi bileşik (5) sentezlendi. Sentezlenen bileşik (5) kiral fosfor atomu ve piridin halkası içermesi açısından önemlidir. Kiral fosfor atomu içeren fosfazen türevi bileşikler oldukça önemlidir ve yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [Kumar, 2014:13899, Mutlu Balcı, 2017:24].

Piridin içeren siklofosfazenler çok merkezli koordinasyon ligantlarıdır ve değişik metal komplekslerinin hazırlanması için oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde bu bileşiklerin metal kompleksleri ile ilgili pek çok çalışmanın olduğu görülmektedir

[Chandrasekhar 2007:1045, Chandrasekhar 2008:255, Ainscough 2005:7325, Chandrasekhar 2006:3510, Erdener Çıralı 2015: 1100, Erdener Çıralı 2015: 536].

## 2. DENEYSEL

### 2.1. Materyal ve Metod

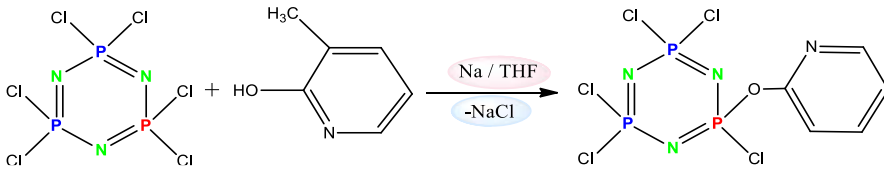
Hekzaklorosiklotrifosfazatrien ( $N_3P_3Cl_6$ , trimer), 2-hidroksi-6-metilpiridin, 2,2'-dihidroksibifenil, potasyum karbonat, metalik sodyum, diklorometan (DCM), *n*-hekzan, aseton, dötero kloroform, tetrahidrofuran (THF) Aldrich ve Merck firmalarından temin edilmiştir. Trimer *n*-hekzandan kristallendirilerek saflaştırıldıktan sonra diğer kimyasallar ise piyasadan temin edildiği şekli ile herhangi bir saflaştırma yapılmadan kullanıldı. Saf halde elde edilen bileşiklerin karakterizasyonunda element analizi için CHNS-932 (LECO) marka cihaz  $^1H$  NMR,  $^{13}C$  NMR,  $^{31}P$  NMR ölçümler için A Bruker Avance III HD 400 MHz NMR spektrofotometresi kullanıldı. NMR ölçümlerinde çözücü olarak  $CDCl_3$  kullanıldı.

### 2.2. Sentez ve Karakterizasyon

#### 2.2.1 6-metil-2-piridilokso süstitüe siklofosfazen (3) Bileşiğinin

##### Sentezi

20 mL kuru THF içinde çözülen 2-Hidroksi-6-metilpiridin [(2); (0.63 g; 5.75 mmol)]' in metalik sodyum ile sodyum tuzu hazırlandı. Daha sonra 15 mL kuru THF de çözülmüş trimer (2.0 g; 5.75 mmol) sıvı azot-aseton ile soğutuldu. Soğutulan trimer çözeltisi üzerine hazırlanan piridin tuz çözeltisi ilave edildi. Reaksiyon karışımı 2 gün magnetik karıştırıcı ile oda sıcaklığında karıştırıldı. Reaksiyonun tamamlanıp tamamlanmadığı TLC ile kontrol edildi. Reaksiyon sonunda beyaz bir çökeleğin oluştuğu gözlemlendi. Beyaz katı kısım süzülerek ayrıldı. Çöeltinin çözücüsü evaporatörle uzaklaştırıldı. Reaksiyon karışımı ince tabaka (TLC) kromatografisi ile kontrol edildi. DCM : *n*-hekzan (1:1) çözgen sisteminin kolon kromatografisi için uygun olduğu ve karışımında bir ürünün oluştuğu gözlemlendi. Ham ürün silika gel dolgulu kolondan [DCM : *n*-Hekzan (1:1)] elue edildiğinde (3) bileşiği ( $R_f = 0.408$ , e.n: 84-86 °C) % 67 verimle kristal halde elde edildi.

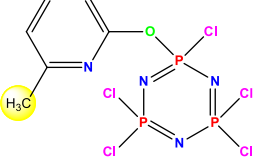


Şekil 4, (3) Bileşiğinin reaksiyon şeması

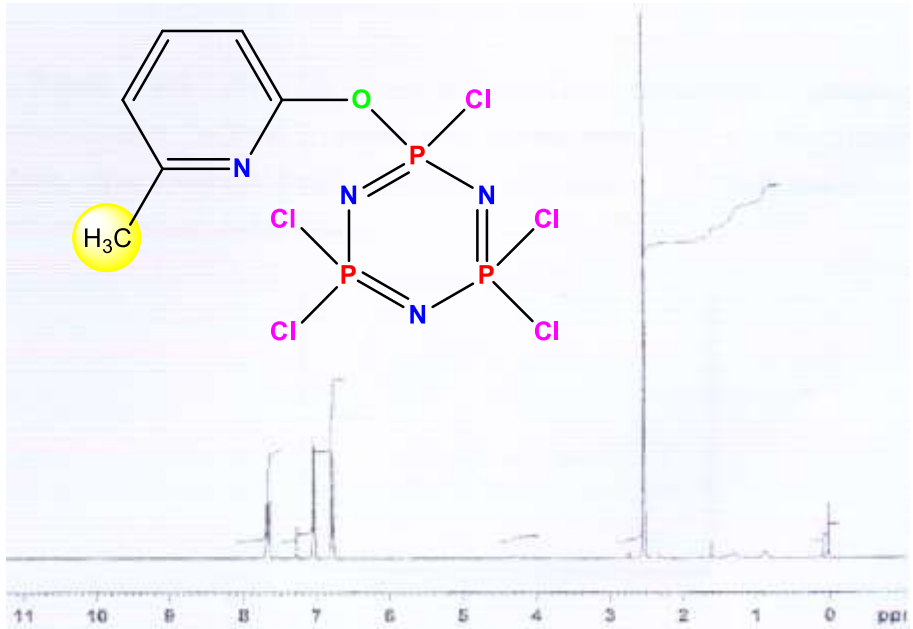
Bileşğin yapısı elementel analiz,  $^1\text{H}$  NMR,  $^{13}\text{C}$  NMR ve  $^{31}\text{P}$  NMR spektroskopisi teknikleri ile karakterize edildi.

(3) Bileşğinin elementel analiz sonucu elde edilen değerler hesaplanan değerlerle uyum göstermektedir (Tablo 1.).

Tablo 1, (3) Bileşğinin element analizi sonuçları

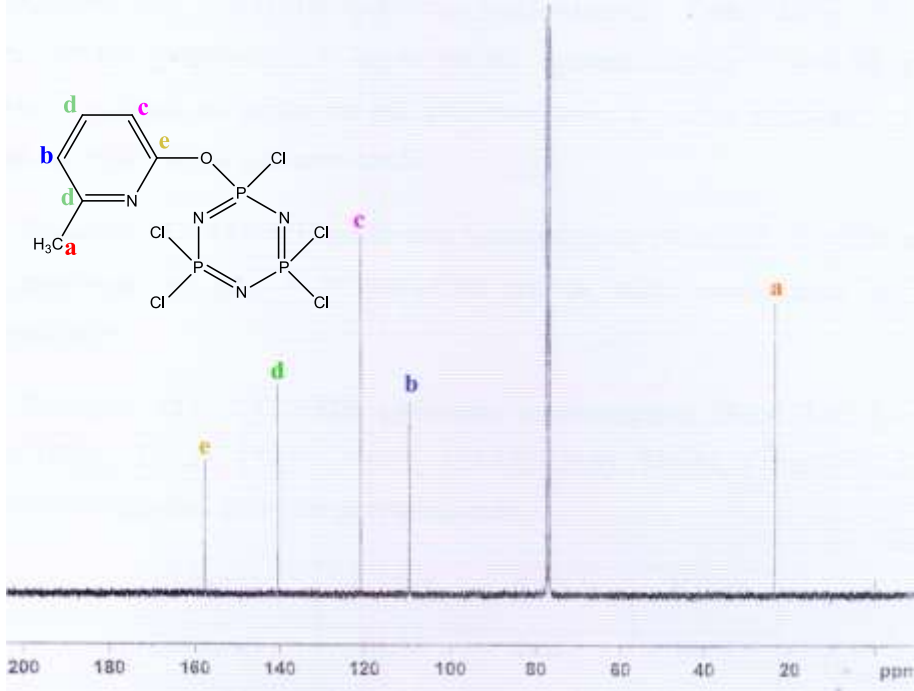
|  | Element    | % C   | % H  | % N   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|-------|------|-------|
|                                                                                   | Bulunan    | 17.56 | 1.51 | 12.91 |
|                                                                                   | Hesaplanan | 17.13 | 1.43 | 13.32 |

Bileşğın (3)  $^1\text{H}$  NMR spektrumu incelendiğinde (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  = 2.54 ppm de piridin halkasındaki metil protonlarına ait singulet bir pik,  $\delta$  = 6.77-7.70 ppm de piridin halka protonlarına ait çoklu bir pik gözlemlendi.



Şekil 5, (3) Bileşğinin  $^1\text{H}$  NMR spektrumu

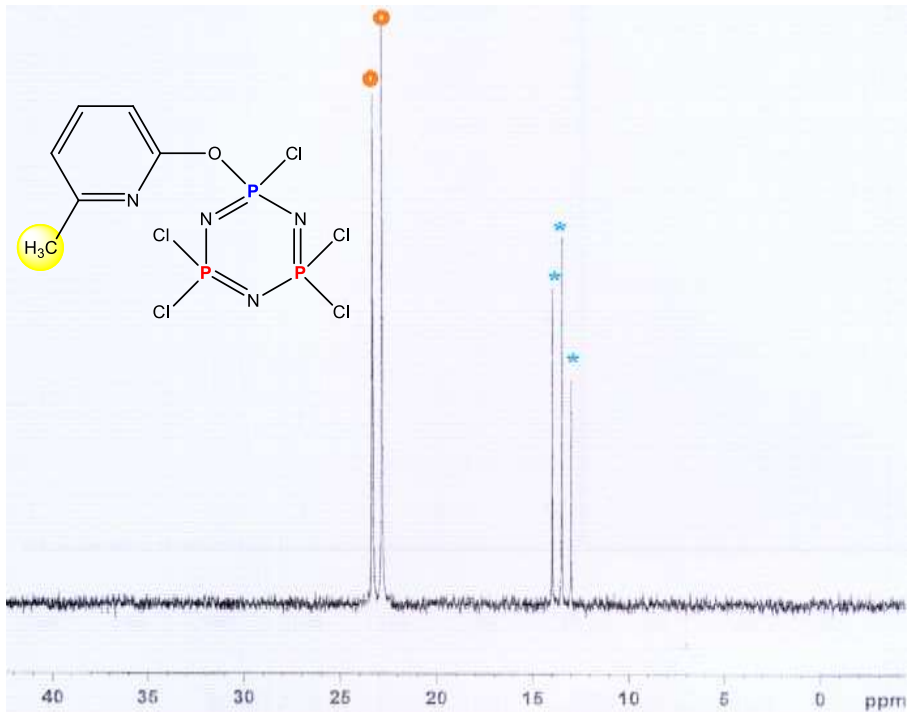
Bileşiğin (3)  $^{13}\text{C}$  NMR (101 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ) spektrumu incelendiğinde  $\delta = 23.57$  ppm de piridine bağlı  $\text{CH}_3$  karbonuna ait **C (a)** karbonuna ait;  $\delta = 109.56$  ppm de piridin halkası **C (b)** karbonuna ait singulet bir pik;  $\delta = 121.95$  ppm de piridin halkası **C (c)** karbonlarına ait singulet bir pik  $\delta = 140.41$  ppm de piridin halkası **C (d)** karbonuna ait singulet bir pik ;  $\delta = 157.57$  ppm de piridin halkası **C (e)** karbonuna ait singulet bir pik gözlenmektedir.



Şekil 6, (3) Bileşiğinin  $^{13}\text{C}$  NMR spektrumu

Bileşiğin (5)  $^{31}\text{P}$  NMR (162 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ) spektrumu incelendiğinde bileşiğin iki farklı çevreye sahip fosfor merkezine sahip olmasından dolayı  $\text{AB}_2$  spin sisteminde olduğu görülmektedir.  $\delta = 13.47$  ppm de  $\text{P}(\text{ClOAr})$  grubuna ait triplet ( $J = 28.4$  Hz) bir pik;  $\delta = 23.28$  ppm de ise  $\text{PCl}_2$  gruplarına ait dublet ( $J = 28.4$  Hz) bir pik gözlenmektedir.

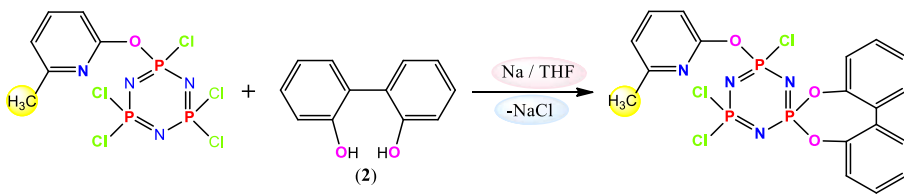
Bütün bu spektral veriler bileşiğin önerilen yapısını doğrulamaktadır.



Şekil 7, (3) Bileşiğinin  $^{31}\text{P}$  NMR spektrumu

### 2.2.2 Bileşik (1) ile 2,2'-dihidroksibifenil' in reaksiyonu

2,2'-dihidroksibifenil (0.66 g; 3.57 mmol) 40 ml aseton içinde çözülerek üzerine (3) bileşiği (1.5 g; 3.57 mmol) ve  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (1.0 g; 7.15 mmol) ilave edildi. Reaksiyon karışımı 2 gün magnetik karıştırıcı ile oda sıcaklığında karıştırıldı. Bu sürenin sonunda beyaz bir katının oluştuğu gözlemlendi. Reaksiyonda kaç ürün oluştuğunu, reaksiyonun tamamlanıp tamamlanmadığını ve kolon kromatografisi için ayırma koşullarını belirlemek için karışım TLC ile kontrol edildi. İncelemenin sonunda reaksiyonun tamamlandığı ve bir ürünün oluştuğu gözlemlendi. Kolon kromatografisi için DCM : *n*-hekzan (1:1) çözgen sisteminin uygun olduğu belirlendi. Daha sonra çöken kısım filtreden süzülerek ayrıldı. Süzüntünün çözücüsü vakum uygulanarak uzaklaştırıldı. Ham ürün silika gel dolgulu kolondan elue edildiğinde (5) bileşiği ( $R_f$  = 0.381, e.n : 177-178 °C) % 27 verimle kristal halde elde edildi. Bileşiğin yapısı elementel analiz,  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  ve  $^{31}\text{P}$  NMR spektroskopisi yöntemleri ile karakterize edildi.



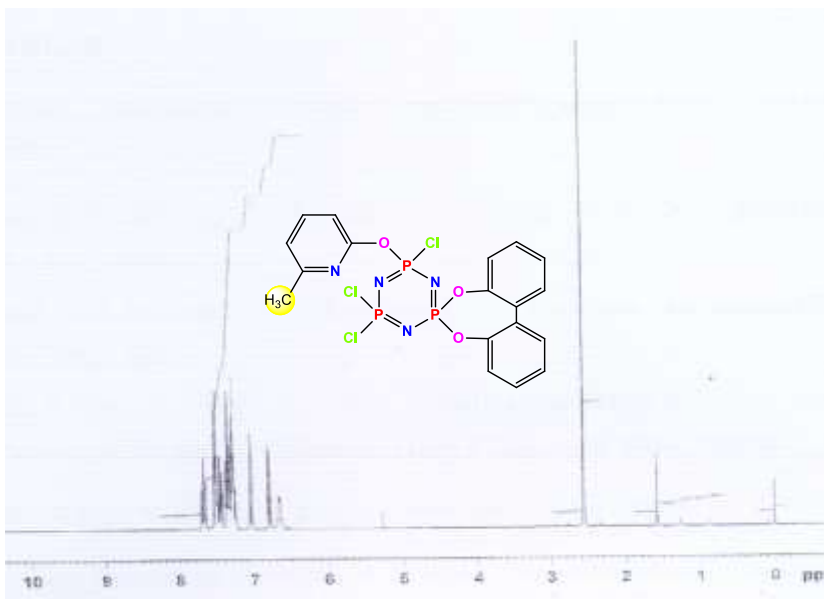
Şekil 8, (5) Bileşiğinin reaksiyon şeması

(5) Bileşiğinin elementel analiz sonucu elde edilen değerler hesaplanan değerlerle uyum göstermektedir (Tablo 2,).

Tablo 2, (5) Bileşiğinin Element Analizi Sonuçları

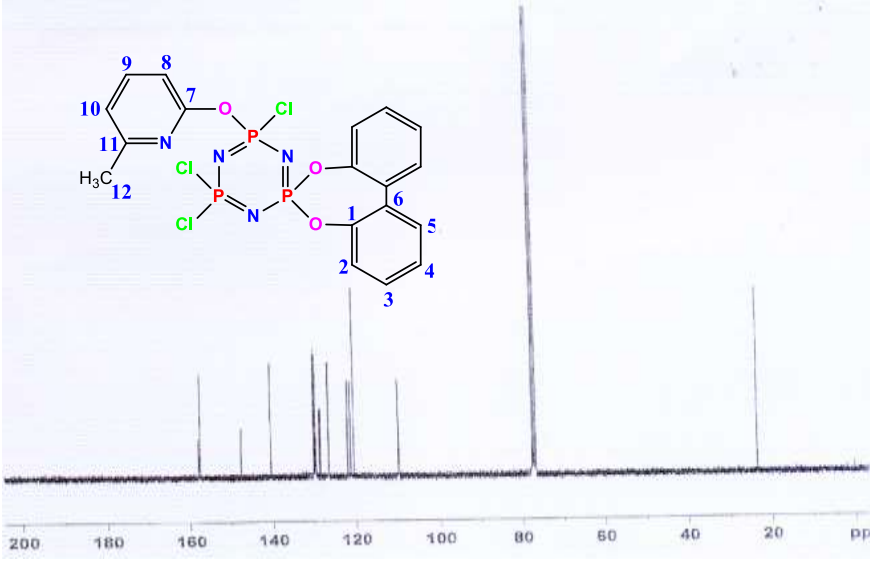
|  | Element    | % C   | % H  | % N   |
|--|------------|-------|------|-------|
|  | Bulunan    | 40.57 | 2.62 | 10.31 |
|  | Hesaplanan | 40.49 | 2.62 | 10.49 |

Bileşiğin (6)  $^1H$  NMR spektrumu (400 MHz,  $CDCl_3$ ) incelendiğinde metil protonlarının  $\delta = 2.56$  ppm de singulet bir pik verdiği, piridin halka protonlarının ise  $\delta = 6.67$ -7.70 ppm de multiplet bir pik verdiği gözlenmektedir.

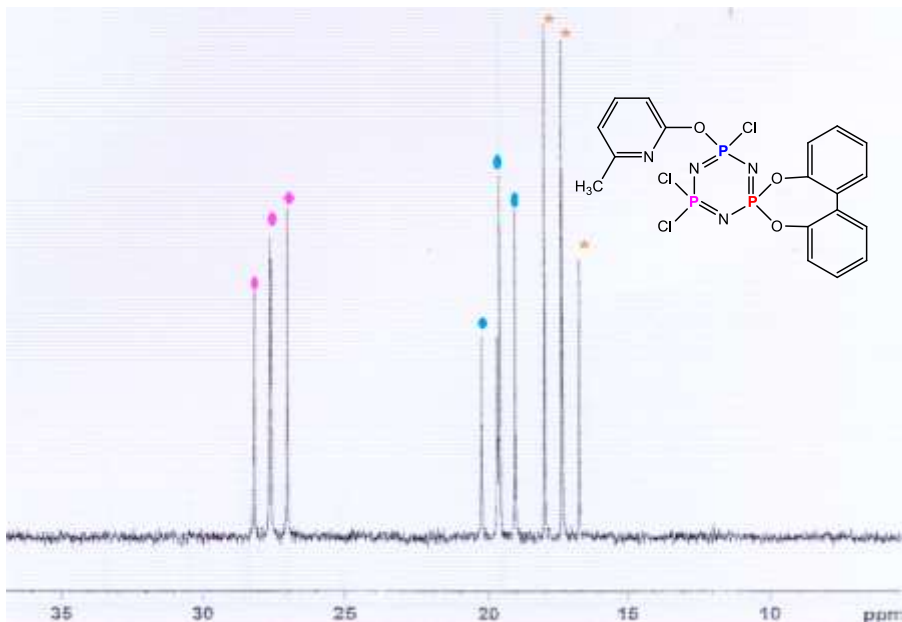


Şekil 9, (5) Bileşiğinin  $^1H$  NMR spektrumu

Bileşğin (3)  $^{13}\text{C}$  NMR spektrumu (101 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ) incelendiğinde;  $\delta$  23.57 ppm de piridin halkasına bağlı metil karbonuna C (12) ait;  $\delta$  = 109.56 ppm de C (10) karbonuna ait;  $\delta$  = 120.43 C(8) karbonuna ait; 121.27 ppm de C(2) karbonuna ait; 121.95 ppm de C(4) karbonuna ait ; 126.55 ppm de C (6) karbonuna ait ; 128.49 ppm de C(3) karbonuna ait ; 129.91 ppm de C(5) karbonuna ait;  $\delta$  = 140.41 C(9) karbonuna ait ;  $\delta$  = 147.60 C(11) karbonuna ait ;  $\delta$  = 157.57 ppm de C(1) karbonuna ait;  $\delta$  = 157.78 C(7) karbonuna ait singlet pikler gözlemlendi.



Şekil 10, (5) Bileşğinin  $^{13}\text{C}$  NMR spektrumu



Şekil 11, (5) Bileşiğinin  $^{31}\text{P}$  NMR spektrumu

Bileşiğin (2)  $^{31}\text{P}$  NMR spektrumu incelendiğinde spektrumun ABX spin sisteminde olduğu görülmektedir. ( $\text{PCl}_2$ ) gruplarına ait;  $\delta = 27.61$  ppm'de triplet, ( $\text{PClOPri}$ ) grubuna ait;  $\delta = 19.64$  ppm'de triplet bir pik ve ( $\text{POAr}$ ) grubuna ait;  $\delta = 17.34$  ppm de triplet bir pik gözlenmektedir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın sonucunda hazırlanan fosfazen türevi bileşik (5) ile ilgili elde edilebilecek sonuçları şu şekilde açıklayabiliriz:

\* Bileşik hem tek dişli (piridin) hem de iki dişli (bifenol) ligant içeren karışık sübstitüentli fosfazen türevi bileşiktir. Literatürde tek dişili ve iki dişli ligantları birlikte içeren fosfazen türevi bileşiklerin sayısı azdır. Bu nedenle elde edilen bileşik önemlidir.

\* Bileşikte kiral fosfor atomu bulunmaktadır. Kiral bileşikler özellikle ilaç endüstrisinde çok önemlidir. Bileşik bu açıdan da oldukça önemlidir.

\*Sentezlenen yeni bileşikde hem piridin hem de bifenol halkası bulunmaktadır. Bilindiği gibi piridin içeren bileşikler değişik biyolojik aktiviteler gösterebilir. Bu nedenle sentezlenen bileşiklerin biyolojik aktivitesi incelenebilir.

\*Piridilokso fosfazen türevi ligantlar mükemmel çok merkezli koordinasyon ligantlarıdır. Bu bakımdan bu bileşiğin baş grup ve geçiş metalleri ile kompleksleri hazırlanabilir.

\*Elde edilen bileşikte üç tane P-Cl bağı bulunmaktadır. Bu nedenle bu bileşik değişik fonksiyonel grup içeren nükleofillerle etkileştirilerek yeni fosfazen türevleri hazırlanabilir.

*Bütün bu özellikler dikkate alındığında hazırlanan bileşik (5) oldukça önemlidir.*

## KAYNAKÇA

- Ainscough, E. W., Brodie, A. M., Depree, C. V., Jameson, G. B., Otter, C. A., (2005). Polymer Building Blocks: Self- Assembly of Silver (I) Cyclotriphosphazene Cationic Columns. Inorganic Chemistry, 44, 7325-7327.
- Ainscough, E. W., Brodie, A. M., Depree, C. V., Jameson, G. B., Otter, C. A. (2006). Divalent cobalt, nickel and zinc halide complexes with multimodal ligands based on the cyclotriphosphazene platform: A structural study. Polyhedron, 25, 2341-2352.
- Ainscough, E. W., Brodie, A. M., Chaplin, A. B., Derwahl, A., Harrison, J. A., Otter, C. A. (2007). "The first coordination polymer containing a chiral cyclotriphosphazene ligand. Inorganic Chemistry, 7, 2575-2583.
- Ainscough, E. W., Brodie, A. M., Edwards, P. J. B., Jameson, G. B., Otter, C. A. Kirk, S. (2012). Zinc, Cadmium, and Mercury Complexes of a Pyridyloxy-Substituted Cyclotriphosphazene: Syntheses, Structures, and Fluxional Behavior. Inorganic Chemistry, 51 (20), 10884-10892.
- Akbaş, H., Karadağ, A., Destegül, A., Çakırlar, Ç., Yerli, Y., Tekin K. C., Malayoğlu U., Kılıç Z., (2019). Synthesis, and spectroscopic, thermal and dielectric properties of phosphazene based ionic liquids: OFET application and tribological behavior. New Journal of Chemistry, 43, 2098-2110.
- Akbaş, H. (2024). (2-Furanylmethyl)spiro(N,N)cyclotriphosphazenes and some quaternized derivatives: syntheses, structural elucidation and free radical scavenging activity studies. Inorganica Chimica Acta, 569, 122116.
- Allcock, H. R. (1972). Recent advances in phosphazene (phosphonitrilic) chemistry. Chemical Reviews, 72, 315-356.
- Allen, W.C. (1991). Regiochemical and stereochemical control in substitution-reactions of cyclophosphazenes. Chemical Reviews, 91 119-135.
- Begeç, S. (2007). Synthesis of Phenoxy-Substituted Spiro-Ansa Phosphazene Derivatives. Heteroatom Chemistry, 18 (4), 372-375
- Begeç, S. (2022). Synthesis and characterization of new spiro cyclotriphosphazene Derivatives. Inorganic Chemistry Communications, 140, 109457.
- Begeç, S. (2023). Synthesis and structural characterization of N,N-spiro cyclotriphosphazenederivatives with one stereogenic center. Phosphorus, Sulfur, and Silicon and The Related Elements, 198 (1), 15-20.

- Brandt, K., R. Kruszynski, T. J. Bartczak, and I. Porwolik-Czomperlik, (2001). AIDS-related lymphoma screen results and molecular structure determination of a new crown ether bearing aziridinylcyclophosphazene, potentially capable of ion-regulated DNA cleavage action. *Inorganica Chimica Acta*, 322, (1-2), 138-144.
- Carriedo, G. A. García Alonso, F. J., García, J. L., Carbajo, R. J., Ortiz, F. L. (1999). Synthesis and  $^1\text{H}$ -,  $^{15}\text{N}$ -,  $^{31}\text{P}$ -,  $^{183}\text{W}$ -Multinuclear Magnetic Resonance Study of the Cyclotriphosphazenes  $[\text{N}_3\text{P}_3(\text{dobp})_2(\text{OC}_5\text{H}_4\text{N}-4)_2]$  and  $[\text{N}_3\text{P}_3(\text{dobp})(\text{OC}_5\text{H}_4\text{N}-4)_4]$  and Their  $\text{W}(\text{CO})_5$  Complexes (dobp = 2,2'-dioxybiphenyl). *European Journal of Inorganic Chemistry*, 9, 1015-1020.
- Chandrasekhar, V., Thilagar, P., Pandian, B. M. (2007). Cyclophosphazene-based multi-site coordination ligands. *Coordination Chemistry Reviews*. 251, (9-10), 1045-1074.
- Chandrasekhar, V., Pandian, B. M., Azhakar, R. (2008). Synthesis, structure and metallation of spiro-  $\text{N}_3\text{P}_3(\text{O}_2\text{C}_{12}\text{H}_8)(\text{OC}_5\text{H}_4\text{N}-2)_4$ : A heptacoordinate  $\text{Co}(\text{II})$  in the molecular structure of  $\text{N}_3\text{P}_3(\text{O}_2\text{C}_{12}\text{H}_8)(\text{OC}_5\text{H}_4\text{N}-2)_4 \text{Co}(\text{NO}_3)_2$ . *Polyhedron*, 27(1), 255-262.
- Chandrasekhar, V., Pandian, B. M., Azhakar, R. (2006). Di- and Trinuclear Complexes Derived From Hexakis (2-pyridyloxy) cyclotriphosphazene. Unusual P-O Bond Cleavage in the Formation of  $[\{(\text{L}'\text{CuCl})_2(\text{Co}(\text{NO}_3)_3)\text{Cl}\}][\text{L}' = \text{N}_3\text{P}_3(\text{OC}_5\text{H}_4\text{N})_5(\text{O})]$ . *Inorganic Chemistry*, 45 (9), 3510-3518.
- Erdener Çıralı D., Dayan, O. (2015). Synthesis of tetranuclear ruthenium (II) complex of pyridyloxy-substituted 2,2-dioxybiphenyl-cyclotriphosphazene platform and its catalytic application in the transfer hydrogenation of ketones. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 190, 1100-1107.
- Erdener Çıralı, D., Uyar, Z. Koyuncu, İ., Hacıoğlu, N. (2015). Synthesis, characterization and catalytic, cytotoxic and antimicrobial activities of two novel cyclotriphosphazene-based multisite ligands and their  $\text{Ru}(\text{II})$  complexes. *Applied Organometallic Chemistry*, 29, 536-542.
- Erdener Çıralı, D. Dayan, O., Ozdemir, N., Hacıoğlu, N. (2015). “A new phosphazene derivative, spiro- $\text{N}_3\text{P}_3[(\text{O}_2\text{C}_{12}\text{H}_8)_2(\text{OC}_6\text{H}_4\text{N}-3)_2]$ , and its  $\text{Ru}(\text{II})$  complex: Syntheses, crystal structure, catalytic activity and antimicrobial activity studies. *Polyhedron*, 88, 170-175.
- Jeevananthan, V., Shanmugan, S. (2022). Halogen-free layered double hydroxide-cyclotriphosphazene carboxylate flame retardants: effects of cyclotriphosphazene di, tetra and hexacarboxylate intercalation on layered doublehydroxides against the combustible epoxy resin coated on wood substrates. *RSC Advances*, 12 (36), 23322-23336.
- Kumar, D., Gupta, A. D. (1995). Aromatic Cyclolinear Phosphazene Polyimides Based on a Novel Bis-Spiro-Substituted Cyclotriphosphazene Diamine. *Macromolecules*, 28 (18), 6323-6329.
- Kumar, D., Singh, J., Elias, A. J. (2014). Chiral Multidentate OxazolineLigands Based on Cyclophosphazene Cores: Synthesis, Characterization and Complexation Studies. *Dalton Transactions*. 43, 13899-13912.

- Liu, W., Zhu, J., Lian, Y., (2005). Effect of bridged cyclotriphosphazenes as lubricants on the tribological properties of a steel-on-steel system. *Wear*, 258, 725-729.
- Mukundam, V., Dhanunjayarao, K. Mamidala, R., Venkatasubbaiah, K. (2016). Synthesis, characterization and aggregation induced enhanced emission properties of tetraaryl pyrazole decorated cyclophosphazenes. *Journal of Material Chemistry C*, 4, 3523-3530.
- Mutlu Balcı, C., Beşli, S., Yuksel, F. (2017) Synthesis and Stereogenic Properties of *N,N*-Spiro Bridged Bis (Cyclotriphosphazene) Compounds Containing Two Equivalent Chiral Centres. *Polyhedron*, 137, 24-33.
- Mutlu Balcı, C., Palabıyık, D. (2022). 4-triphenylmethylaniline substituted cyclotriphosphazene derivatives assisted by multiple phenyl rings. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 69 (5), 812-821.
- Sun, J., Yu, Z., Wang, X., Wu, D. (2014). Synthesis and performance of cyclomatrix polyphosphazene derived from trispiro-cyclotriphosphazene as a halogen-free nonflammable material. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2, 231-238.
- Tümay S. O. (2021). A Novel Selective “Turn-On” Fluorescent Chemosensor Based on Thiophene Appended Cyclotriphosphazene Schiff Base for Detection of Ag<sup>+</sup> Ions. *Chemistry Select*, 6, 10561-10572.
- Tümer, Y., Yüksektepe, Ç., Batı, H., Çalışkan, N., Büyükgüngör, O. (2010). Preparation and Characterization of Hexakis[2-methoxy-4-(2,3-dimethylphenylimino) phenylato] cyclotriphosphazene. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 185 (12), 2449-2454.
- Tümer, Y. (2022). Synthesis, structural, and stereogenic characterizations of new Trispirocyclotriphosphazenes. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 69 (11), 1897-1907.
- Wang, W., Hu, H., Zeng, X., Fan, W., Yang, T., Zhao, X., Fan, C., Zuo, X., Nan, J. (2021). Comprehensive Insight into the Probability of Cyclotriphosphazene Derivatives as the Functional Electrolyte Additives in Lithium-Ion Batteries: Which Is Better and Why?. *ACS Applied Energy Materials*, 4, 7101-7111.



# **Ayva ve Ayva Kabuğu Kaynaklı Fermente Ürünlerde (Şarap ve Sirke) Biyoaktif Bileşenler ve Antioksidan Kapasite Analizi**

**Zuhal ŞAHİN<sup>1</sup>**

**Tülay DURAN<sup>2</sup>**

**Fatih SÖNMEZ<sup>3</sup>**

- 1- Öğr. Gör. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu Gıda İşleme Bölümü. zuhalsahin@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9856-8064
- 2- Öğr. Gör.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu Gıda İşleme Bölümü. tduran@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6061-5347
- 3- Prof. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu Eczane Hizmetleri Bölümü. fsonmez@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7486-6374

## ÖZET

Bu çalışmada ayva (*Cydonia oblonga* Mill.) meyvesi ve ayva kabuğundan üretilen şarap ve sirke örneklerinin toplam fenolik madde, flavonoid içeriği ve antioksidan aktiviteleri karşılaştırılmıştır. Deneyisel çalışmada ayva meyvesi (Q), ayva kabuğu (QP), ayva meyve şarabı (QW), ayva kabuğu şarabı (OPW), ayva sirkesi (QV), ayva kabuğu sirkesi (QPV) ve geleneksel ayva sirkesi (TQV) örnekleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, toplam fenolik madde miktarının  $117,97 \pm 21,58$  mg GAE/L ile  $12\,410 \pm 46,52$  mg GAE/L arasında değiştiğini göstermiştir. En yüksek fenolik ve flavonoid içerik ayva kabuğu (QP) örneğinde belirlenmiştir. Antioksidan kapasite analizlerinde DPPH ve ABTS testleri sırasıyla  $3,54 \cdot 10^{-3} \pm 21,97$  mM Trolox/mL ve  $26,61 \pm 99,01$  mM Trolox/mL aralığında bulunmuştur. Kabuğa dayalı ürünlerin (QP, QPV, OPW) antioksidan aktivitesi meyveye dayalı örneklerden anlamlı derecede yüksektir. Bu sonuçlar, ayva kabuğunun fenolik bileşiklerce zengin yapısının fermantasyon süreçlerinde biyoaktif bileşen geçişini artırdığını ve sirke ile şarap üretiminde fonksiyonel bir bileşen olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Çalışma, gıda atıklarının yeniden değerlendirilmesi yoluyla sürdürülebilir ve fonksiyonel gıda üretimine bilimsel katkı sağlamaktadır.

*Anahtar Kelimeler – Ayva, Ayva kabuğu, Sirke, Antioksidan aktivite*

---

## GİRİŞ

Sirke, tarih boyunca hem gıda muhafazasında hem de sağlık amaçlı kullanımda önemli bir biyoteknolojik ürün olarak yer almıştır. Temel olarak, karbonhidrat içeren hammaddelerin önce alkol fermantasyonu ile etanole, ardından aerobik koşullarda asetik asit bakterileri tarafından oksidasyonu sonucu asetik aside dönüştürülmesiyle elde edilir (Roman-Camacho vd., 2023:12). Bu iki aşamalı süreçte kullanılan hammadde, sirkenin duysal özellikleri, fenolik profili, organik asit kompozisyonu ve fonksiyonel bileşenleri üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır (Budak, 2021:38; Mathew vd., 2019:9). Son yıllarda, geleneksel meyve ve sebze atıklarının değerlendirilmesiyle sürdürülebilir ve fonksiyonel sirke üretimi yönündeki araştırmalar artmıştır (Pereira vd., 2023:12).

Ayva (*Cydonia oblonga* Mill.), Rosaceae familyasına ait olup Türkiye başta olmak üzere Akdeniz, Orta Doğu ve Asya ülkelerinde yaygın şekilde yetiştirilmektedir. Meyve, yüksek pektin içeriği, organik asitler (özellikle malik asit) ve fenolik bileşiklerce zengin yapısı nedeniyle hem besinsel hem de fonksiyonel gıda bileşeni olarak önem taşımaktadır (Othman vd., 2022:8). Sert dokusu ve buruk tadı nedeniyle genellikle taze olarak tüketilmek yerine

reçel, marmelat, jöle, meyve suyu ve sirke gibi işlenmiş ürünlerde kullanılmaktadır (Pereira vd., 2023:12). Bu işlemler sırasında ortaya çıkan kabuk ve posa gibi yan ürünlerin biyokimyasal olarak zengin içeriklerinin değerlendirilmesi, gıda endüstrisinde atık azaltımı ve “sıfır atık” yaklaşımının uygulanabilirliği açısından önem arz etmektedir (Othman vd., 2022:8).

Ayva kabuğu, meyve dokusuna kıyasla daha yüksek oranda fenolik bileşikler (örneğin klorojenik asit, kuersetin türevleri), malik asit, askorbik asit ve diyet lifi içermektedir (Pereira vd., 2023:12). Othman ve arkadaşlarının (2022:8) çalışmasında, ayva kabuğunun toplam fenolik içeriğinin 9.3 mg GAE/g’a, malik asit miktarının ise 7.6 g/100 g’a kadar ulaştığı bildirilmiştir. Bu nedenle, ayva kabuğu yalnızca bir gıda atığı değil, aynı zamanda fonksiyonel ve antioksidan özellikler taşıyan değerli bir hammadde olarak değerlendirilmelidir.

Sirke üretimi açısından değerlendirildiğinde, ayva ve ayva kabuğu şeker, fenolik ve asit bileşenleri bakımından uygun bir karbon kaynağı sunmaktadır. Alkolik fermantasyon aşamasında maya türleri (özellikle *Saccharomyces cerevisiae*) tarafından şekerlerin etanole dönüştürülmesi, sonrasında etanolün asetik aside oksitlemesiyle tipik bir sirke profili elde edilmektedir (Ge vd., 2025:13). Üretim sırasında sıcaklık, pH, oksijen düzeyi, inokülasyon oranı ve fermantasyon süresi gibi parametreler hem mikrobiyal gelişimi hem de fenolik bileşiklerin stabilitesini etkilemektedir (Kılıçgün, 2024:48).

Bu çalışmada, ayva ve ayva kabuğundan sirke üretimi sürecinin biyokimyasal yönlerini inceleyerek, atık yönetimi ile fonksiyonel gıda üretimi arasında bir köprü oluşturmayı amaçlamaktadır. Ayva ve ayva kabuğundan doğal yöntemlerle sirke üretimi yapılmış ve fitokimyasal özellikleri araştırılmıştır. Antioksidan aktivite, toplam fenolik madde ve toplam flavonoid madde değerleri belirlenmiştir. Ayva ve ayva kabuğundan elde edilen sirkenin tüm özellikleri, doğal fermente ayva sirkesiyle (ticari) karşılaştırılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Sirke Üretimi

Sirke üretimi, Karataş (2022)'a göre modifiye edilerek yapılmıştır. Sirke üretim süreci doğal yöntemle gerçekleştirilmiştir. Sirke üretim sürecinin ilk aşaması alkol fermantasyonu olup, bu aşamada 50 g ayva veya ayva kabuğu, steril su ve 0,25 g/L *Saccharomyces cerevisiae* bir kavanozda birleştirilmiştir. SÇKM 13 brix değerine ayarlanmıştır. 20±2 °C’de anaerobik koşullarda 8 hafta inkübe edilmiştir. Alkol içeriği yaklaşık %7-8’e ulaştığında alkol fermantasyon sona erer. Sirke işleminin ikinci aşaması asetik asit fermantasyonu olup, bu aşamada posa kısım süzülür. Kalan kısma

%5 sirke anası eklenir. Kavanozların ağzı ince bir tülbent ile kapatılır. Aerobik koşullarda 11 hafta inkübe edilir. Alkol içeriği yaklaşık %0,5'e ulaştığında asetik asit fermentasyonu sonlanır (Akbaş, 2008).

### **Ekstraksiyon**

Ayva ve ayva kabuğu örneği metanol ile homojen hale getirilir ve ardından metanolik ekstraktlar filtrelendir. Filtratlar daha sonra analiz edilmek üzere 40°C'de 2 gün muhafaza edilir.

### **Toplam Fenolik Madde İçeriği**

Toplam fenolik madde içeriği belirlenirken, Şahin ve Sönmez (2025:67) tarafından bildirilen yöntem uygulandı. 100 µl ayva (Q) ve ayva kabuğu (QP), ayva şarabı (QW) ve ayva kabuğu şarabı (QPW) ile ayva sirkesi (QV) ve ayva kabuğu sirkesine (QPV) seyreltilmiş Folin-Ciocalteu reaktifi eklenir ve 3 dakika inkübasyona bırakılır. %20 sulu Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> çözeltisi eklenerek numuneler 60 dakika inkübe edilir ve absorbans deferrer 765 nm'de UV-Vıs'de ölçülür. Standart grafik, gallik asit (GAE) kullanılarak oluşturuldu.

### **Toplam Flavonoid İçeriği**

Toplam flavonoid içeriğini belirlemek için Chlopicka ve arkadaşları (2012:46) tarafından uygulanan yöntem kullanılmıştır.

### **DPPH aktivite**

DPPH radikal süpürücü aktiviteleri, Güldane ve Cingöz (2023) tarafından belirtilen yöntem ile değerlendirilmiştir. Q, QP, QW, QPW, QV ve QPV örnekleri 3 mL DPPH ile karıştırılmıştır. Numuneler ve DPPH karışımı 30 dakika inkübe edilmiştir. İnkübasyon süresinden sonra absorbans değeri 517 nm'de ölçülmüştür.

### **ABTS aktivitesi**

Numunelerin ABTS aktivitesini belirlemek için, Sönmez vd. (2019:23) tarafından belirtilen yöntem kullanılmıştır. Öncelikle ABTS radikal çözeltisi hazırlanmıştır. Bunun için ABTS ve K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suda çözülür, karıştırılır ve 24 saat karanlıkta inkübasyona bırakılır. Hazırlanan numuneler ABTS radikali ile karıştırılıp 6 dakika UV-VIS spektrofotometresinde 734 nm'de absorbans değerleri ölçülür. Trolox standart grafiği hazırlanır ve sonuçlar bu grafiğe göre hesaplanır.

## SONUÇ VE TARTIŞMA

Ayva, ayva kabuğu, ayva şarabı, ayva kabuğu şarabı, ayva sirkesi, ayva kabuğu sirkesi ve doğal fermente ayva sirkesinin (ticari) çalışma sonucunda elde edilen toplam fenolik madde, toplam flavonoid ve antioksidan kapasiteleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Q, QP, QW, OPW, QV ve QPV numunelerinin toplam fenolik içeriği, toplam flavonoid madde içeriği, DPPH ve ABTS aktivite değerleri

| Örnek | Toplam fenolik madde içeriği (mg GAE/L) | Toplam flavanoid madde içeriği (mg kateşin/ L) | DPPH (mM trolox/ml)         | ABTS (mM trolox/ml)           |
|-------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Q     | 1098,5±12,22                            | 855,9±13,28                                    | 3,54 10 <sup>-3</sup> ±0,06 | 55,29 10 <sup>-3</sup> ± 0,76 |
| QP    | 12410±46,52                             | 9005,9±14,42                                   | 3,5810 <sup>-3</sup> ±0,07  | 99,01 10 <sup>-3</sup> ±11,71 |
| QW    | 117,97±21,58                            | 155,83±8,06                                    | 6,18±0,08                   | 26,61±0,70                    |
| OPW   | 331,52±24,54                            | 990,14±8,98                                    | 12,18±0,06                  | 52,06±0,63                    |
| QV    | 398,53±70,28                            | 30,31±2,32                                     | 20,96±0,06                  | 44,81±2,40                    |
| QPV   | 842,56±56,79                            | 264,32±89,89                                   | 12,47±5,52                  | 38,58±11,72                   |
| TQV   | 373,18±13,70                            | 65,95±2,58                                     | 21,97±0,34                  | 50,14±2,80                    |

Q: Ayva meyvesi; QP: Ayva kabuğu; QW: Ayva meyve şarabı; OPW: Ayva kabuğu şarabı; QV: Ayva sirkesi; QPV: Ayva kabuğu siekesi; TQV: Geleneksel ayva sirkesi

### Toplam fenolik madde içeriği

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, toplam fenolik madde miktarı 117,97 ± 21,58 mg GAE/L (QW) ile 12 410 ± 46,52 mg GAE/L (QP) arasında değişmiştir. En yüksek fenolik içeriğin ayva kabuğu örneğinde (QP) belirlenmesi, ayva kabuğunun fenolik bileşikler açısından zengin bir biyokütle olduğunu göstermektedir. Pereira vd. (2023:12), ayva kabuğunda toplam fenolik madde içeriğinin meyve etine göre yaklaşık 4–6 kat daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Aynı şekilde Othman vd. (2022:8), ayva kabuğunda klorojenik asit, kateşin, kuersetin türevleri gibi bileşiklerin yoğun bulunduğunu ve bu fenolik profilin özellikle antioksidan aktivite üzerinde belirleyici rol oynadığını belirtmiştir. Ayva meyvesinden (Q) üretilen sirkenin fenolik içeriği (398,53 ± 70,28 mg GAE/L), kabuktan üretilen sirkeye (QPV, 842,56 ± 56,79 mg GAE/L) göre belirgin biçimde daha düşüktür. Bu fark, kabuğun fenolik ekstraksiyon potansiyelinin yüksek olmasından ve fermentasyon sürecinde kabuktaki fenoliklerin ortama daha etkin geçiş yapmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, geleneksel yöntemle üretilen sirke örneğinin (TQV, 373,18 ± 13,70 mg GAE/L) nispeten düşük değeri, uzun süreli olgunlaştırma sırasında fenolik bileşiklerde oksidatif kayıpların meydana geldiğini göstermektedir (Budak, 2021:38). Şarap örnekleri incelendiğinde, ayva kabuğu şarabının (OPW, 331,52 ± 24,54 mg

GAE/L) fenolik içeriği meyve şarabına (QW,  $117,97 \pm 21,58$  mg GAE/L) kıyasla yaklaşık üç kat daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuç, alkol fermentasyonu sırasında etanolün fenolik bileşiklerin çözünürlüğünü artırması ve kabuktan fenolik ekstraksiyonunu kolaylaştırmasıyla açıklanabilir (Ge vd., 2025:13).

### **Toplam flavonoid madde içeriği**

Toplam flavonoid miktarı  $30,31 \pm 2,32$  mg kateşin/L (QV) ile  $9005,9 \pm 14,42$  mg kateşin/L (QP) arasında değişmiştir. Fenolik bileşiklerde olduğu gibi en yüksek flavonoid içeriği ayva kabuğu örneğinde (QP) belirlenmiştir. Flavonoidler bitkisel hücre duvarlarında ve özellikle kabuk dokusunda yoğun bulunduğundan, bu sonuç beklenen bir bulgudur (Othman vd., 2022:8). Ayva kabuğu şarabının (OPW) flavonoid içeriği  $990,14 \pm 8,98$  mg/L olarak belirlenmiş, ayva şarabına (QW,  $155,83 \pm 8,06$  mg/L) kıyasla oldukça yüksek bulunmuştur. Etanolün flavonoid çözünürlüğünü artırdığı bilindiğinden, kabuk varlığında elde edilen bu yüksek değerler alkolik fermentasyonun ekstraktif etkisini doğrulamaktadır. Ayva kabuğu sirkesinde (QPV,  $264,32 \pm 89,89$  mg/L) ve geleneksel sirke örneğinde (TQV,  $65,95 \pm 2,58$  mg/L) görülen farklılıklar, asetik asit fermentasyonunun süresi ve oksidatif koşulların flavonoid stabilitesini azaltmasıyla ilişkilendirilebilir. Özellikle kuersetin ve kateşin türevleri gibi bileşiklerin asidik ortamda izomerizasyon ve oksidasyon eğilimi gösterdiği bilinmektedir (Román-Camacho vd., 2023:12).

### **DPPH aktivitesi**

DPPH sonuçları  $3,54 \times 10^{-3} \pm 0,06$  mM Trolox/mL (Q) ile  $21,97 \pm 0,34$  mM Trolox/mL (TQV) arasında değişmiştir. En yüksek DPPH radikal süpürme kapasitesinin geleneksel ayva sirkesinde (TQV) elde edilmiştir. Ayva kabuğundan elde edilen sirke (QPV) ve şarap (OPW) örneklerinde de DPPH değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir ( $12,47 \pm 5,52$  ve  $12,18 \pm 0,06$  mM Trolox/mL). Bu sonuç, fenolik konsantrasyon ile antioksidan aktivite arasında doğrudan bir korelasyon bulunduğunu göstermektedir. Nitekim Othman vd. (2022:8), ayva kabuğu ekstraktlarının yüksek DPPH kapasitesine sahip olduğunu ve bu etkinin flavonoid profiliyle ilişkili olduğunu belirtmiştir.

### **ABTS aktivitesi**

ABTS değerleri  $26,61 \pm 0,70$  mM Trolox/mL (QW) ile  $99,01 \pm 11,71$  mM Trolox/mL (QP) arasında değişmiştir. En yüksek ABTS kapasitesi, ayva kabuğu örneğinde (QP) gözlenmiş; bu da ayva kabuğundaki fenolik ve flavonoid bileşiklerin güçlü elektron donör özelliklerine sahip olduğunu

göstermektedir. Kabuğa ait şarap (OPW,  $52,06 \pm 0,63$  mM Trolox/mL) ve sirke (QPV,  $38,58 \pm 11,72$  mM Trolox/mL) örneklerinde de yüksek ABTS aktiviteleri tespit edilmiştir. Fenolik bileşiklerin ABTS radikaline karşı etkinliği, yapılarındaki hidroksil gruplarının sayısı ve konumuyla ilişkilidir. Kuersetin, klorojenik asit ve gallik asit gibi bileşiklerin yüksek elektron verme kapasitesine sahip olması, ayva kabuğu kaynaklı örneklerdeki yüksek ABTS aktivitesini açıklamaktadır (Ge vd., 2025:13).

Sonuç olarak tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde, ayva kabuğu (QP) ve kabuktan üretilen ürünlerin (QPV ve OPW) fenolik, flavonoid ve antioksidan özellikler bakımından ayva meyvesine göre üstün olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, meyve işleme atıklarının fonksiyonel gıda üretiminde önemli bir kaynak olabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, literatürde bildirilen “kabuk fraksiyonlarının fonksiyonel bileşikler açısından daha zengin olduğu” görüşüyle örtüşmektedir (Pereira vd., 2023:12; Othman vd., 2022:8). Dolayısıyla ayva kabuğu, fenolik yoğunluğu ve antioksidan kapasitesiyle sürdürülebilir sirke üretiminde kullanılabilecek yüksek değerli bir hammadde olarak değerlendirilebilir.

## REFERANSLAR

- Akbaş, M. (2008). A research on the determination of composition of grape vinegars produced in turkey and their conformity to food legislation. MSc Thesis, Cukurova University
- Budak, H. N. (2021). Alteration of antioxidant activity and total phenolic content during the eight-week fermentation of apple cider vinegar. *Horticultural Studies*, 38(1), 39-45.
- Chlopicka, J., Pasko, P., Gorinstein, S., Jedryas, A., ve Zagrodzki, P. (2012). Total phenolic and total flavonoid content, antioxidant activity and sensory evaluation of pseudocereal breads. *Food Sci Technol*, 46, 548-555.
- Ge, Y., Wu, Y., Aihaiti, A., Wang, L., Wang, Y., Xing, J., Zhu, M., ve Hong, J. (2025). The metabolic pathways of yeast and acetic acid bacteria during fruit vinegar fermentation and their influence on flavor development. *Microorganisms*, 13(3), 477.
- Güldane, M., ve Cingöz, A. (2023). Extraction of bioactive compounds from yellow onion peels: Taguchi-SAW hybrid optimization. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 11(s1), 2589-2594.
- Karataş, D. (2022). Vinegar production from red beet (*beta vulgaris* l.) and some physicochemical and sensory properties in red beet vinegars. M.Sc. Thesis, Afyon Kocatepe University
- Kılıçgün, H. (2024). Physicochemical, bioactive, microbial, and sensory characterization of vinegar produced from apples. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 48(2), 233-244.

- Mathew, B., Agrawal, S., Nashikkar, N., Bundale, S., ve Upadhyay, A. (2019). Isolation of acetic acid bacteria and preparation of starter culture for apple cider vinegar fermentation. *Advances in Microbiology*, 9(8), 556-569.
- Othman, S., Anibarro-Ortega, M., Dias, M. I., Ciric, A., Mandim, F., Sokovic, M., Ferreira, I. C. F. R., Pinela, J., ve Barros, L. (2022). Valorization of quince (*Cydonia oblonga* Mill.) peel into functional food ingredients: A path towards “zero waste” and sustainable food systems. *Heliyon*, 8(10), e11042.
- Pereira, A., Anibarro-Ortega, M., Kostic, M., Nogueira, A., Sokovic, M., Pinela, J., ve Barros, L. (2023). Upcycling quince (*Cydonia oblonga* Mill.) peel into bioactive ingredients and fiber concentrates through multicomponent extraction processes. *Antioxidants*, 12(2), 260.
- Roman-Camacho, J. J., Garcia-Garcia, I., Santos-Duenas, I. M., Garcia-Martinez, T., ve Mauricio, J. C. (2023). Latest trends in industrial vinegar production and the role of acetic acid bacteria: classification, metabolism, and applications—a comprehensive review. *Foods*, 12(19), 3705.
- Sönmez, F., Güneşli, Z., Kurt, B.Z., Gazioğlu, I., Avci, D., ve Küçükislamoğlu, M., (2019). Synthesis, antioxidant activity and SAR study of novel spiro-isatin-based Schiff bases. *Mol Diversity*, 23,829-844.
- Şahin, Z., ve Sönmez, F. (2025). Determination of Antioxidant Activity, Vitamin C Content, GST Enzyme Inhibition and Phenolic Profile by LC-HRMS of Jujube Fruit and Seed. *Applied Fruit Science*, 67(1), 13.



# **Ayva ve Ayva Kabuğu Kaynaklı Fermente Ürünlerde (Şarap ve Sirke) Biyoaktif Bileşenler ve Antioksidan Kapasite Analizi**

**Zuhal ŞAHİN<sup>1</sup>**

**Tülay DURAN<sup>2</sup>**

**Fatih SÖNMEZ<sup>3</sup>**

- 1- Öğr. Gör. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu Gıda İşleme Bölümü. zuhalsahin@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9856-8064
- 2- Öğr. Gör.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu Gıda İşleme Bölümü. tduran@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6061-5347
- 3- Prof. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu Eczane Hizmetleri Bölümü. fsonmez@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7486-6374

## ÖZET

Bu çalışmada ayva (*Cydonia oblonga* Mill.) meyvesi ve ayva kabuğundan üretilen şarap ve sirke örneklerinin toplam fenolik madde, flavonoid içeriği ve antioksidan aktiviteleri karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada ayva meyvesi (Q), ayva kabuğu (QP), ayva meyve şarabı (QW), ayva kabuğu şarabı (OPW), ayva sirkesi (QV), ayva kabuğu sirkesi (QPV) ve geleneksel ayva sirkesi (TQV) örnekleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, toplam fenolik madde miktarının  $117,97 \pm 21,58$  mg GAE/L ile  $12\,410 \pm 46,52$  mg GAE/L arasında değiştiğini göstermiştir. En yüksek fenolik ve flavonoid içerik ayva kabuğu (QP) örneğinde belirlenmiştir. Antioksidan kapasite analizlerinde DPPH ve ABTS testleri sırasıyla  $3,54 \cdot 10^{-3} \pm 21,97$  mM Trolox/mL ve  $26,61 \pm 99,01$  mM Trolox/mL aralığında bulunmuştur. Kabuğa dayalı ürünlerin (QP, QPV, OPW) antioksidan aktivitesi meyveye dayalı örneklerden anlamlı derecede yüksektir. Bu sonuçlar, ayva kabuğunun fenolik bileşiklerce zengin yapısının fermantasyon süreçlerinde biyoaktif bileşen geçişini artırdığını ve sirke ile şarap üretiminde fonksiyonel bir bileşen olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Çalışma, gıda atıklarının yeniden değerlendirilmesi yoluyla sürdürülebilir ve fonksiyonel gıda üretimine bilimsel katkı sağlamaktadır.

*Anahtar Kelimeler – Ayva, Ayva kabuğu, Sirke, Antioksidan aktivite*

## GİRİŞ

Sirke, tarih boyunca hem gıda muhafazasında hem de sağlık amaçlı kullanımda önemli bir biyoteknolojik ürün olarak yer almıştır. Temel olarak, karbonhidrat içeren hammaddelerin önce alkol fermantasyonu ile etanole, ardından aerobik koşullarda asetik asit bakterileri tarafından oksidasyonu sonucu asetik aside dönüştürülmesiyle elde edilir (Roman-Camacho vd., 2023:12). Bu iki aşamalı süreçte kullanılan hammadde, sirkenin duysal özellikleri, fenolik profili, organik asit kompozisyonu ve fonksiyonel bileşenleri üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır (Budak, 2021:38; Mathew vd., 2019:9). Son yıllarda, geleneksel meyve ve sebze atıklarının değerlendirilmesiyle sürdürülebilir ve fonksiyonel sirke üretimi yönündeki araştırmalar artmıştır (Pereira vd., 2023:12).

Ayva (*Cydonia oblonga* Mill.), Rosaceae familyasına ait olup Türkiye başta olmak üzere Akdeniz, Orta Doğu ve Asya ülkelerinde yaygın şekilde yetiştirilmektedir. Meyve, yüksek pektin içeriği, organik asitler (özellikle malik asit) ve fenolik bileşiklerce zengin yapısı nedeniyle hem besinsel hem de fonksiyonel gıda bileşeni olarak önem taşımaktadır (Othman vd., 2022:8). Sert dokusu ve buruk tadı nedeniyle genellikle taze olarak tüketilmek yerine

reçel, marmelat, jöle, meyve suyu ve sirke gibi işlenmiş ürünlerde kullanılmaktadır (Pereira vd., 2023:12). Bu işlemler sırasında ortaya çıkan kabuk ve posa gibi yan ürünlerin biyokimyasal olarak zengin içeriklerinin değerlendirilmesi, gıda endüstrisinde atık azaltımı ve “sıfır atık” yaklaşımının uygulanabilirliği açısından önem arz etmektedir (Othman vd., 2022:8).

Ayva kabuğu, meyve dokusuna kıyasla daha yüksek oranda fenolik bileşikler (örneğin klorojenik asit, kuersetin türevleri), malik asit, askorbik asit ve diyet lifi içermektedir (Pereira vd., 2023:12). Othman ve arkadaşlarının (2022:8) çalışmasında, ayva kabuğunun toplam fenolik içeriğinin 9.3 mg GAE/g’a, malik asit miktarının ise 7.6 g/100 g’a kadar ulaştığı bildirilmiştir. Bu nedenle, ayva kabuğu yalnızca bir gıda atığı değil, aynı zamanda fonksiyonel ve antioksidan özellikler taşıyan değerli bir hammadde olarak değerlendirilmelidir.

Sirke üretimi açısından değerlendirildiğinde, ayva ve ayva kabuğu şeker, fenolik ve asit bileşenleri bakımından uygun bir karbon kaynağı sunmaktadır. Alkolik fermantasyon aşamasında maya türleri (özellikle *Saccharomyces cerevisiae*) tarafından şekerlerin etanole dönüştürülmesi, sonrasında etanolün asetik aside oksitlemesiyle tipik bir sirke profili elde edilmektedir (Ge vd., 2025:13). Üretim sırasında sıcaklık, pH, oksijen düzeyi, inokülasyon oranı ve fermantasyon süresi gibi parametreler hem mikrobiyal gelişimi hem de fenolik bileşiklerin stabilitesini etkilemektedir (Kılıçgün, 2024:48).

Bu çalışmada, ayva ve ayva kabuğundan sirke üretimi sürecinin biyokimyasal yönlerini inceleyerek, atık yönetimi ile fonksiyonel gıda üretimi arasında bir köprü oluşturmayı amaçlamaktadır. Ayva ve ayva kabuğundan doğal yöntemlerle sirke üretimi yapılmış ve fitokimyasal özellikleri araştırılmıştır. Antioksidan aktivite, toplam fenolik madde ve toplam flavonoid madde değerleri belirlenmiştir. Ayva ve ayva kabuğundan elde edilen sirkenin tüm özellikleri, doğal fermente ayva sirkesiyle (ticari) karşılaştırılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Sirke Üretimi

Sirke üretimi, Karataş (2022)'a göre modifiye edilerek yapılmıştır. Sirke üretim süreci doğal yöntemle gerçekleştirilmiştir. Sirke üretim sürecinin ilk aşaması alkol fermantasyonu olup, bu aşamada 50 g ayva veya ayva kabuğu, steril su ve 0,25 g/L *Saccharomyces cerevisiae* bir kavanozda birleştirilmiştir. SÇKM 13 brix değerine ayarlanmıştır. 20±2 °C’de anaerobik koşullarda 8 hafta inkübe edilmiştir. Alkol içeriği yaklaşık %7-8’e ulaştığında alkol fermantasyon sona erer. Sirke işleminin ikinci aşaması asetik asit fermantasyonu olup, bu aşamada posa kısım süzülür. Kalan kısma

%5 sirke anası eklenir. Kavanozların ağzı ince bir tülbent ile kapatılır. Aerobik koşullarda 11 hafta inkübe edilir. Alkol içeriği yaklaşık %0,5'e ulaştığında asetik asit fermentasyonu sonlanır (Akbaş, 2008).

### **Ekstraksiyon**

Ayva ve ayva kabuğu örneği metanol ile homojen hale getirilir ve ardından metanolik ekstraktlar filtrelendir. Filtratlar daha sonra analiz edilmek üzere 40°C'de 2 gün muhafaza edilir.

### **Toplam Fenolik Madde İçeriği**

Toplam fenolik madde içeriği belirlenirken, Şahin ve Sönmez (2025:67) tarafından bildirilen yöntem uygulandı. 100 µl ayva (Q) ve ayva kabuğu (QP), ayva şarabı (QW) ve ayva kabuğu şarabı (QPW) ile ayva sirkesi (QV) ve ayva kabuğu sirkesine (QPV) seyreltilmiş Folin-Ciocalteu reaktifi eklenir ve 3 dakika inkübasyona bırakılır. %20 sulu Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> çözeltisi eklenerek numuneler 60 dakika inkübe edilir ve absorbans deferrer 765 nm'de UV-Vıs'de ölçülür. Standart grafik, gallik asit (GAE) kullanılarak oluşturuldu.

### **Toplam Flavonoid İçeriği**

Toplam flavonoid içeriğini belirlemek için Chlopicka ve arkadaşları (2012:46) tarafından uygulanan yöntem kullanılmıştır.

### **DPPH aktivite**

DPPH radikal süpürücü aktiviteleri, Güldane ve Cingöz (2023) tarafından belirtilen yöntem ile değerlendirilmiştir. Q, QP, QW, QPW, QV ve QPV örnekleri 3 mL DPPH ile karıştırılmıştır. Numuneler ve DPPH karışımı 30 dakika inkübe edilmiştir. İnkübasyon süresinden sonra absorbans değeri 517 nm'de ölçülmüştür.

### **ABTS aktivitesi**

Numunelerin ABTS aktivitesini belirlemek için, Sönmez vd. (2019:23) tarafından belirtilen yöntem kullanılmıştır. Öncelikle ABTS radikal çözeltisi hazırlanmıştır. Bunun için ABTS ve K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suda çözülür, karıştırılır ve 24 saat karanlıkta inkübasyona bırakılır. Hazırlanan numuneler ABTS radikali ile karıştırılıp 6 dakika UV-VIS spektrofotometresinde 734 nm'de absorbans değerleri ölçülür. Trolox standart grafiği hazırlanır ve sonuçlar bu grafiğe göre hesaplanır.

## SONUÇ VE TARTIŞMA

Ayva, ayva kabuğu, ayva şarabı, ayva kabuğu şarabı, ayva sirkesi, ayva kabuğu sirkesi ve doğal fermente ayva sirkesinin (ticari) çalışma sonucunda elde edilen toplam fenolik madde, toplam flavonoid ve antioksidan kapasiteleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Q, QP, QW, OPW, QV ve QPV numunelerinin toplam fenolik içeriği, toplam flavonoid madde içeriği, DPPH ve ABTS aktivite değerleri

| Örnek | Toplam fenolik madde içeriği (mg GAE/L) | Toplam flavanoid madde içeriği (mg kateşin/ L) | DPPH (mM trolox/ml)         | ABTS (mM trolox/ml)           |
|-------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Q     | 1098,5±12,22                            | 855,9±13,28                                    | 3,54 10 <sup>-3</sup> ±0,06 | 55,29 10 <sup>-3</sup> ± 0,76 |
| QP    | 12410±46,52                             | 9005,9±14,42                                   | 3,5810 <sup>-3</sup> ±0,07  | 99,01 10 <sup>-3</sup> ±11,71 |
| QW    | 117,97±21,58                            | 155,83±8,06                                    | 6,18±0,08                   | 26,61±0,70                    |
| OPW   | 331,52±24,54                            | 990,14±8,98                                    | 12,18±0,06                  | 52,06±0,63                    |
| QV    | 398,53±70,28                            | 30,31±2,32                                     | 20,96±0,06                  | 44,81±2,40                    |
| QPV   | 842,56±56,79                            | 264,32±89,89                                   | 12,47±5,52                  | 38,58±11,72                   |
| TQV   | 373,18±13,70                            | 65,95±2,58                                     | 21,97±0,34                  | 50,14±2,80                    |

Q: Ayva meyvesi; QP: Ayva kabuğu; QW: Ayva meyve şarabı; OPW: Ayva kabuğu şarabı; QV: Ayva sirkesi; QPV: Ayva kabuğu siekesi; TQV: Geleneksel ayva sirkesi

### Toplam fenolik madde içeriği

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, toplam fenolik madde miktarı 117,97 ± 21,58 mg GAE/L (QW) ile 12 410 ± 46,52 mg GAE/L (QP) arasında değişmiştir. En yüksek fenolik içeriğin ayva kabuğu örneğinde (QP) belirlenmesi, ayva kabuğunun fenolik bileşikler açısından zengin bir biyokütle olduğunu göstermektedir. Pereira vd. (2023:12), ayva kabuğunda toplam fenolik madde içeriğinin meyve etine göre yaklaşık 4–6 kat daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Aynı şekilde Othman vd. (2022:8), ayva kabuğunda klorojenik asit, kateşin, kuersetin türevleri gibi bileşiklerin yoğun bulunduğunu ve bu fenolik profilin özellikle antioksidan aktivite üzerinde belirleyici rol oynadığını belirtmiştir. Ayva meyvesinden (Q) üretilen sirkenin fenolik içeriği (398,53 ± 70,28 mg GAE/L), kabuktan üretilen sirkeye (QPV, 842,56 ± 56,79 mg GAE/L) göre belirgin biçimde daha düşüktür. Bu fark, kabuğun fenolik ekstraksiyon potansiyelinin yüksek olmasından ve fermentasyon sürecinde kabuktaki fenoliklerin ortama daha etkin geçiş yapmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, geleneksel yöntemle üretilen sirke örneğinin (TQV, 373,18 ± 13,70 mg GAE/L) nispeten düşük değeri, uzun süreli olgunlaştırma sırasında fenolik bileşiklerde oksidatif kayıpların meydana geldiğini göstermektedir (Budak, 2021:38). Şarap örnekleri incelendiğinde, ayva kabuğu şarabının (OPW, 331,52 ± 24,54 mg

GAE/L) fenolik içeriği meyve şarabına (QW,  $117,97 \pm 21,58$  mg GAE/L) kıyasla yaklaşık üç kat daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuç, alkol fermentasyonu sırasında etanolün fenolik bileşiklerin çözünürlüğünü artırması ve kabuktan fenolik ekstraksiyonunu kolaylaştırmasıyla açıklanabilir (Ge vd., 2025:13).

### **Toplam flavonoid madde içeriği**

Toplam flavonoid miktarı  $30,31 \pm 2,32$  mg kateşin/L (QV) ile  $9005,9 \pm 14,42$  mg kateşin/L (QP) arasında değişmiştir. Fenolik bileşiklerde olduğu gibi en yüksek flavonoid içeriği ayva kabuğu örneğinde (QP) belirlenmiştir. Flavonoidler bitkisel hücre duvarlarında ve özellikle kabuk dokusunda yoğun bulunduğundan, bu sonuç beklenen bir bulgudur (Othman vd., 2022:8). Ayva kabuğu şarabının (OPW) flavonoid içeriği  $990,14 \pm 8,98$  mg/L olarak belirlenmiş, ayva şarabına (QW,  $155,83 \pm 8,06$  mg/L) kıyasla oldukça yüksek bulunmuştur. Etanolün flavonoid çözünürlüğünü artırdığı bilindiğinden, kabuk varlığında elde edilen bu yüksek değerler alkolik fermentasyonun ekstraktif etkisini doğrulamaktadır. Ayva kabuğu sirkesinde (QPV,  $264,32 \pm 89,89$  mg/L) ve geleneksel sirke örneğinde (TQV,  $65,95 \pm 2,58$  mg/L) görülen farklılıklar, asetik asit fermentasyonunun süresi ve oksidatif koşulların flavonoid stabilitesini azaltmasıyla ilişkilendirilebilir. Özellikle kuersetin ve kateşin türevleri gibi bileşiklerin asidik ortamda izomerizasyon ve oksidasyon eğilimi gösterdiği bilinmektedir (Román-Camacho vd., 2023:12).

### **DPPH aktivitesi**

DPPH sonuçları  $3,54 \times 10^{-3} \pm 0,06$  mM Trolox/mL (Q) ile  $21,97 \pm 0,34$  mM Trolox/mL (TQV) arasında değişmiştir. En yüksek DPPH radikal süpürme kapasitesinin geleneksel ayva sirkesinde (TQV) elde edilmiştir. Ayva kabuğundan elde edilen sirke (QPV) ve şarap (OPW) örneklerinde de DPPH değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir ( $12,47 \pm 5,52$  ve  $12,18 \pm 0,06$  mM Trolox/mL). Bu sonuç, fenolik konsantrasyon ile antioksidan aktivite arasında doğrudan bir korelasyon bulunduğunu göstermektedir. Nitekim Othman vd. (2022:8), ayva kabuğu ekstraktlarının yüksek DPPH kapasitesine sahip olduğunu ve bu etkinin flavonoid profiliyle ilişkili olduğunu belirtmiştir.

### **ABTS aktivitesi**

ABTS değerleri  $26,61 \pm 0,70$  mM Trolox/mL (QW) ile  $99,01 \pm 11,71$  mM Trolox/mL (QP) arasında değişmiştir. En yüksek ABTS kapasitesi, ayva kabuğu örneğinde (QP) gözlenmiş; bu da ayva kabuğundaki fenolik ve flavonoid bileşiklerin güçlü elektron donör özelliklerine sahip olduğunu

göstermektedir. Kabuğa ait şarap (OPW,  $52,06 \pm 0,63$  mM Trolox/mL) ve sirke (QPV,  $38,58 \pm 11,72$  mM Trolox/mL) örneklerinde de yüksek ABTS aktiviteleri tespit edilmiştir. Fenolik bileşiklerin ABTS radikaline karşı etkinliği, yapılarındaki hidroksil gruplarının sayısı ve konumuyla ilişkilidir. Kuersetin, klorojenik asit ve gallik asit gibi bileşiklerin yüksek elektron verme kapasitesine sahip olması, ayva kabuğu kaynaklı örneklerdeki yüksek ABTS aktivitesini açıklamaktadır (Ge vd., 2025:13).

Sonuç olarak tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde, ayva kabuğu (QP) ve kabuktan üretilen ürünlerin (QPV ve OPW) fenolik, flavonoid ve antioksidan özellikler bakımından ayva meyvesine göre üstün olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, meyve işleme atıklarının fonksiyonel gıda üretiminde önemli bir kaynak olabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, literatürde bildirilen “kabuk fraksiyonlarının fonksiyonel bileşikler açısından daha zengin olduğu” görüşüyle örtüşmektedir (Pereira vd., 2023:12; Othman vd., 2022:8). Dolayısıyla ayva kabuğu, fenolik yoğunluğu ve antioksidan kapasitesiyle sürdürülebilir sirke üretiminde kullanılabilecek yüksek değerli bir hammadde olarak değerlendirilebilir.

## REFERANSLAR

- Akbaş, M. (2008). A research on the determination of composition of grape vinegars produced in turkey and their conformity to food legislation. MSc Thesis, Cukurova University
- Budak, H. N. (2021). Alteration of antioxidant activity and total phenolic content during the eight-week fermentation of apple cider vinegar. *Horticultural Studies*, 38(1), 39-45.
- Chlopicka, J., Pasko, P., Gorinstein, S., Jedryas, A., ve Zagrodzki, P. (2012). Total phenolic and total flavonoid content, antioxidant activity and sensory evaluation of pseudocereal breads. *Food Sci Technol*, 46, 548-555.
- Ge, Y., Wu, Y., Aihaiti, A., Wang, L., Wang, Y., Xing, J., Zhu, M., ve Hong, J. (2025). The metabolic pathways of yeast and acetic acid bacteria during fruit vinegar fermentation and their influence on flavor development. *Microorganisms*, 13(3), 477.
- Güldane, M., ve Cingöz, A. (2023). Extraction of bioactive compounds from yellow onion peels: Taguchi-SAW hybrid optimization. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 11(s1), 2589-2594.
- Karataş, D. (2022). Vinegar production from red beet (*beta vulgaris* l.) and some physicochemical and sensory properties in red beet vinegars. M.Sc. Thesis, Afyon Kocatepe University
- Kılıçgün, H. (2024). Physicochemical, bioactive, microbial, and sensory characterization of vinegar produced from apples. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 48(2), 233-244.

- Mathew, B., Agrawal, S., Nashikkar, N., Bundale, S., ve Upadhyay, A. (2019). Isolation of acetic acid bacteria and preparation of starter culture for apple cider vinegar fermentation. *Advances in Microbiology*, 9(8), 556-569.
- Othman, S., Anibarro-Ortega, M., Dias, M. I., Ciric, A., Mandim, F., Sokovic, M., Ferreira, I. C. F. R., Pinela, J., ve Barros, L. (2022). Valorization of quince (*Cydonia oblonga* Mill.) peel into functional food ingredients: A path towards “zero waste” and sustainable food systems. *Heliyon*, 8(10), e11042.
- Pereira, A., Anibarro-Ortega, M., Kostic, M., Nogueira, A., Sokovic, M., Pinela, J., ve Barros, L. (2023). Upcycling quince (*Cydonia oblonga* Mill.) peel into bioactive ingredients and fiber concentrates through multicomponent extraction processes. *Antioxidants*, 12(2), 260.
- Roman-Camacho, J. J., Garcia-Garcia, I., Santos-Duenas, I. M., Garcia-Martinez, T., ve Mauricio, J. C. (2023). Latest trends in industrial vinegar production and the role of acetic acid bacteria: classification, metabolism, and applications—a comprehensive review. *Foods*, 12(19), 3705.
- Sönmez, F., Güneşli, Z., Kurt, B.Z., Gazioğlu, I., Avci, D., ve Küçükislamoğlu, M., (2019). Synthesis, antioxidant activity and SAR study of novel spiro-isatin-based Schiff bases. *Mol Diversity*, 23,829-844.
- Şahin, Z., ve Sönmez, F. (2025). Determination of Antioxidant Activity, Vitamin C Content, GST Enzyme Inhibition and Phenolic Profile by LC-HRMS of Jujube Fruit and Seed. *Applied Fruit Science*, 67(1), 13.



# **Polinom İnterpolasyonu ve Uygulamaları**

**Ahmet BOZ<sup>1</sup>**

1- Prof. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, ahmet.boz@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1438-2391.

## ÖZET

Polinom interpolasyonu, sayısal analiz ve uygulamalı matematikte temel bir yöntem olarak, belirli düğüm noktalarında bilinen fonksiyon değerlerini tam olarak karşılayan polinomların oluşturulmasını sağlar. Bu çalışma, polinom interpolasyonunun matematiksel temellerini, klasik yöntemlerini (Lagrange ve Newton polinomları), hata analizlerini ve modern uygulamalarını kapsamlı şekilde incelemektedir. İnterpolasyonun başarımı, düğüm noktalarının seçimi ve polinom derecesi ile yakından ilişkilidir; yüksek dereceli polinomlarda eşit aralıklı düğümlerde görülen Runge olgusu, Chebyshev düğümleri ve spline interpolasyonu ile minimize edilebilir. Çalışmada ayrıca interpolasyonun mühendislik, fizik ve bilgisayar bilimleri uygulamalarına örnekler verilmiştir. Örneğin, deneysel sıcaklık verilerinin ara değerlerinin tahmini ve köprü kolon yük dağılımlarının spline interpolasyonu ile modellenmesi gibi pratik uygulamalar gösterilmiştir. Sonuç olarak, polinom interpolasyonu hem teorik hem de uygulamalı açıdan güvenilir ve etkin bir yöntem olup, eğitimden ileri düzey araştırma ve mühendislik uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir.

*Anahtar Kelimeler – Polinom interpolasyonu, Lagrange, Newton, spline, Chebyshev, sayısal analiz*

---

## GİRİŞ

Sayısal analiz ve uygulamalı matematikte, yalnızca belirli noktalarındaki değerleri bilinen bir fonksiyonun sürekli bir modelle temsil edilmesi sıkça karşılaşılan bir problemdir. Ölçüm verileri, deney sonuçları veya karmaşık analitik ifadeler çoğu zaman ayırık veri noktaları şeklinde elde edilir. Bu noktalar arasında değerlerin tahmin edilmesi, veri analizi, simülasyon ve mühendislik hesaplamaları gibi birçok uygulama için temel gereksinimdir. İşte bu noktada polinom interpolasyonu, söz konusu verileri matematiksel olarak temsil eden ve ara değerleri tahmin edebilen en etkili araçlardan biri olarak ortaya çıkar (Atkinson, 1989; Burden & Faires, 2011).

Polinom interpolasyonu, verilen  $n + 1$  adet farklı düğüm noktasında fonksiyon değerlerini birebir sağlayan bir polinomun varlığını garanti eder. Bu yaklaşım, basit görünmesine rağmen hem teorik hem de uygulamalı açıdan birçok nüans içerir. Özellikle yüksek dereceli polinomlarla yapılan interpolasyonlarda, uç noktalar etrafında ortaya çıkan büyük salınımlar (Runge olgusu) dikkate alınmalıdır (Davis, 1975; Trefethen, 2013). Bu durum, interpolasyonun doğrudan uygulamada dikkatle ele alınmasını ve düğüm noktalarının seçimine özen gösterilmesini gerektirir.

Polinom interpolasyonu, sadece veri noktaları arasında değer tahmin etmekle kalmaz; aynı zamanda türev ve integral gibi analitik işlemlerin sayısal olarak yapılmasına olanak tanır. Örneğin, sayısal türev ve integral hesaplamalarında, karmaşık fonksiyonlar yerine interpolasyon polinomları kullanılarak daha hızlı ve hesaplı çözümler elde edilir (Quarteroni, Sacco, & Saleri, 2007). Bu yönüyle interpolasyon, mühendislik, fizik, ekonomi ve bilgisayar bilimleri gibi geniş bir uygulama alanında temel bir araç olarak konumlanır.

Matematiksel olarak polinom interpolasyonu, verilen düğüm noktaları  $\{x_0, x_1, \dots, x_n\}$  ve bu noktalardaki fonksiyon değerleri  $\{f(x_0), f(x_1), \dots, f(x_n)\}$  ile tanımlanır. Amaç, bu koşulları sağlayan en fazla  $n$  dereceli bir polinomu bulmaktır. Bu polinomun varlığı ve teklik özelliği, düğüm noktalarının birbirinden farklı olması durumunda garanti edilir ve Vandermonde matrisinin tersinirliği ile doğrulanabilir (Stoer & Bulirsch, 2002). Bu temel sonuç, interpolasyon polinomunun matematiksel olarak güvenilir bir yapı sunduğunu gösterir.

Polinom interpolasyonunun tarihi, yaklaşık yüz yılı aşkın bir süredir sayısal analiz literatüründe önemli bir yer tutar. İlk uygulamalar, astronomik hesaplamalar ve gökbilim ölçümleri gibi alanlarda başlamış, daha sonra mühendislik ve fizik problemlerinde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır (Süli & Mayers, 2003). Modern bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, interpolasyon teknikleri çok daha karmaşık ve büyük veri setlerine uygulanabilir hale gelmiş, Lagrange ve Newton gibi klasik yöntemlerin yanı sıra spline ve Chebyshev tabanlı teknikler de yaygınlaşmıştır.

Polinom interpolasyonu, aynı zamanda teorik ve pratik bağlamda karşılaştırmalı bir eğitim konusu olarak da önemlidir. Öğrenciler, bu konu üzerinden hem fonksiyon yaklaşımı hem de nümerik yöntemler hakkında kavramsal bir anlayış geliştirirler. Ayrıca, interpolasyonun hata analizi, yakınsaklık koşulları ve kararlılık kriterleri gibi yönleri, ileri düzey sayısal analiz çalışmalarına temel oluşturur (Kincaid & Cheney, 2002; Atkinson, 1989).

Bu bölümün amacı, polinom interpolasyonunun temel kavramlarını, matematiksel temellerini ve sayısal analizdeki önemini detaylı olarak ortaya koymaktır. Giriş kısmında interpolasyonun gerekliliği, matematiksel temeli ve tarihsel gelişimi ele alınmıştır. İzleyen bölümlerde, Lagrange ve Newton interpolasyon polinomları ayrıntılı biçimde incelenecek, interpolasyon hatası, düğüm seçimi ve uygulama alanları üzerinde durulacaktır. Bu yaklaşım, okuyucunun konuya hem teorik hem de uygulamalı bir perspektiften hakim olmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

## Polinom İnterpolasyonu ve Uygulamaları

Polinom interpolasyonu, sayısal analizde hem teorik hem de uygulamalı anlamda merkezi bir yer tutar. Bu yöntem, verilen düğüm noktalarındaki fonksiyon değerlerini birebir karşılayan polinomları oluşturmayı hedefler. Matematiksel olarak,  $n + 1$  adet farklı düğüm noktası  $\{x_0, x_1, \dots, x_n\}$  ve bu noktalardaki fonksiyon değerleri  $\{f(x_0), f(x_1), \dots, f(x_n)\}$  verildiğinde, bu koşulları sağlayan en fazla  $n$  dereceli bir polinom  $P_n(x)$  bulunur. Bu polinomun varlığı ve teklik özelliği, düğüm noktalarının farklı olması durumunda garantilenir ve lineer cebir perspektifinden Vandermonde matrisi yardımıyla doğrulanabilir (Stoer & Bulirsch, 2002). Vandermonde matrisinin determinantı sıfırdan farklı olduğunda, interpolasyon polinomu tek ve varlık gösterecek şekilde tanımlanabilir. Ancak doğrudan Vandermonde matrisinin kullanımı, özellikle yüksek dereceli polinomlar ve çok sayıda düğüm noktası için sayısal kararsızlığa yol açabilir. Bu nedenle pratik uygulamalarda Lagrange veya Newton polinomları gibi doğrudan polinom ifadeleri tercih edilir (Trefethen, 2013).

Lagrange interpolasyon polinomu, temel polinomların doğrusal birleşimi şeklinde ifade edilir ve her bir temel polinom yalnızca kendi düğüm noktasında bir değer alacak şekilde tanımlanır. Böylece interpolasyon koşulu otomatik olarak sağlanır (Süli & Mayers, 2003). Lagrange yöntemi, teorik analiz ve hata çalışmaları için oldukça uygundur; ancak yeni bir düğüm noktasının eklenmesi durumunda tüm polinomun yeniden hesaplanması gerektiğinden hesaplama açısından dezavantajlıdır. Newton interpolasyon polinomu ise bölünmüş farklar yaklaşımına dayanır ve polinomu hiyerarşik bir yapıda ifade eder. Bu form, yeni düğüm noktası eklendiğinde yalnızca ek terimin hesaplanmasını gerektirir ve bu nedenle artımlı veri durumlarında daha uygundur (Kincaid & Cheney, 2002). Newton formunun hiyerarşik yapısı, özellikle adaptif algoritmalarda ve gerçek zamanlı veri işleme uygulamalarında pratik avantajlar sağlar.

Polinom interpolasyonunun başarımı, elde edilen polinom ile gerçek fonksiyon arasındaki farkla ölçülür. İnterpolasyon hatası,

$$E_n(x) = f(x) - P_n(x)$$

şeklinde tanımlanır ve yeterli düzeyde türevlenebilir fonksiyonlar için

$$E_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \prod_{i=0}^n (x - x_i)$$

biçiminde ifade edilebilir. Burada  $\xi$ , aralık içinde bir noktadır (Burden & Faires, 2011). Bu ifade, düğüm noktalarının seçiminin hata üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu gösterir. Eşit aralıklı düğümlerle yapılan yüksek dereceli interpolasyonlarda uç noktalar çevresinde büyük salınımlar görülebilir; bu durum Runge olgusu olarak bilinir (Davis, 1975). Bu sorunun önüne geçmek için Chebyshev düğümleri önerilmiş ve maksimum

interpolasyon hatasını önemli ölçüde düşürdüğü gösterilmiştir (Trefethen, 2013). Chebyshev düğümleri,  $[-1,1]$  aralığında kosinüs fonksiyonu yardımıyla tanımlanır ve uç noktalarda düğüm yoğunluğu artırılarak uç salınımları dengeler.

Polinom interpolasyonu, tek başına yüksek dereceli polinomlarla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda parçalı polinomlar ve spline yöntemleri ile de desteklenmektedir. Kübik spline interpolasyonu, mühendislik ve fizik uygulamalarında yaygın olarak kullanılır; bu yöntem, her bir alt aralıkta üçüncü dereceden polinomlar tanımlar ve hem fonksiyon hem de belirli türevlerin sürekliliğini sağlar (Quarteroni, Sacco, & Saleri, 2007). Spline yöntemi, global interpolasyon polinomlarına kıyasla daha kararlı bir yaklaşım sunar ve veri noktalarındaki küçük hatalara karşı daha dirençlidir. Bu özellikler, spline interpolasyonunu modern uygulamalar için tercih edilen bir yöntem haline getirmektedir (Süli & Mayers, 2003).

Polinom interpolasyonunun uygulama alanları oldukça geniştir. Mühendislikte, yapı analizi, akışkanlar mekaniği ve kontrol sistemlerinde ölçüm verilerinin ara değerlerinin tahmini interpolasyon teknikleriyle yapılır. Fizikte, deneysel verilerin düzgün bir fonksiyonla temsil edilmesi ve türevsel büyüklüklerin yaklaşık hesaplanması interpolasyon polinomları aracılığıyla gerçekleştirilir (Kincaid & Cheney, 2002). Bilgisayar bilimlerinde ve grafik uygulamalarında, eğri ve yüzey modellemesi polinom interpolasyonu teknikleriyle sağlanır. Sayısal hesaplamalarda ise interpolasyon, karmaşık fonksiyonların türev ve integral hesaplamaları için bir ara adım olarak kullanılır; bu, hesaplama maliyetini düşürür ve sonuçların yorumlanmasını kolaylaştırır (Atkinson, 1989; Quarteroni et al., 2007).

Ayrıca, interpolasyonun hata analizi ve yakınsaklık koşulları, ileri düzey sayısal analiz çalışmaları için temel oluşturur. Yüksek dereceli polinomlarla yapılan interpolasyonda hatanın dağılımı ve maksimum değerleri incelenerek, düğüm seçimi ve polinom derecesi optimize edilebilir. Bu çerçevede, Chebyshev düğümleri ve spline tabanlı yaklaşımlar, hem teorik hem de pratik olarak güvenilir çözümler sunar. Polinom interpolasyonu, böylece yalnızca bir veri tahmin yöntemi değil, aynı zamanda sayısal yöntemlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu değerlendirmek için bir referans aracı olarak da kullanılmaktadır (Davis, 1975; Trefethen, 2013).

Sonuç olarak, polinom interpolasyonu hem klasik hem de modern sayısal analiz uygulamalarında merkezi bir rol oynar. Lagrange ve Newton polinomları gibi temel yöntemler, düğüm noktalarındaki verileri doğru şekilde temsil ederken; Chebyshev tabanlı ve spline yöntemleri, yüksek dereceli polinomların yol açabileceği sorunları minimize ederek daha kararlı ve güvenilir sonuçlar sağlar. Polinom interpolasyonu, hem teorik matematiksel çerçevede hem de mühendislik ve fizik problemlerinde vazgeçilmez bir araç olarak kullanılmaya devam etmektedir (Atkinson, 1989; Burden & Faires, 2011; Quarteroni et al., 2007; Trefethen, 2013).

## SONUÇ

Polinom interpolasyonu, sayısal analiz ve uygulamalı matematikte temel bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, belirli düğüm noktalarında bilinen fonksiyon değerlerini tam olarak karşılayan polinomların oluşturulmasına dayanır ve hem teorik hem de uygulamalı açıdan birçok avantaj sunar. İnterpolasyonun temel kavramları, Lagrange ve Newton polinomları ile matematiksel olarak açıklanabilirken, hata analizi ve düğüm seçiminin önemi, yöntemin güvenilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Elde edilen polinomların doğruluğu ve kararlılığı, düğüm noktalarının seçimi ve polinom derecesi ile doğrudan ilişkilidir; özellikle yüksek dereceli polinomlarda eşit aralıklı düğümlerle ortaya çıkan salınımlar, Runge olgusu olarak adlandırılmıştır (Davis, 1975; Trefethen, 2013).

Runge olgusunun önlenmesi ve maksimum hatanın minimize edilmesi amacıyla Chebyshev düğümleri gibi özel düğüm yerleşimleri geliştirilmiştir. Bu düğümler, uç noktalar etrafında yoğunlaşan dağılımları sayesinde interpolasyon polinomunun uç salınımlarını azaltır ve daha kararlı bir yaklaşım sağlar. Bununla birlikte, yüksek dereceli tek bir polinom kullanmak yerine, aralığı daha küçük alt aralıklara bölerek kübik veya daha düşük dereceli spline polinomları ile parçalı interpolasyon yapmak, nümerik kararlılığı ve hata toleransını artırır. Spline interpolasyonu, hem fonksiyonun hem de belirli türevlerin sürekliliğini sağlayarak, mühendislik, fizik ve bilgisayar grafikleri gibi uygulamalarda güvenilir ve düzgün bir yaklaşım sunar (Quarteroni et al., 2007; Süli & Mayers, 2003).

Polinom interpolasyonu, sadece veri tahmini veya fonksiyon yaklaşık hesaplamaları için değil, aynı zamanda sayısal türev ve integral gibi ileri düzey hesaplamalar için de bir temel sağlar. Karmaşık fonksiyonlar yerine interpolasyon polinomları kullanıldığında, hesaplama maliyeti düşer ve algoritmaların uygulanabilirliği artar. Bu yönüyle, polinom interpolasyonu, mühendislik simülasyonları, deneysel veri analizi, kontrol sistemleri ve fiziksel modelleme gibi çeşitli alanlarda kritik bir rol oynar (Kincaid & Cheney, 2002; Atkinson, 1989). Ayrıca, interpolasyonun hata analizi ve yakınsaklık koşulları, sayısal yöntemlerin doğruluk ve güvenilirlik değerlendirmesi açısından temel bir referans noktası sağlar.

Bu çalışmada polinom interpolasyonu, Lagrange ve Newton polinomları, hata davranışı, Runge olgusu, Chebyshev düğümleri ve spline yaklaşımlarıyla birlikte incelenmiştir. Elde edilen bulgular, interpolasyonun hem klasik hem de modern sayısal analiz problemlerinde vazgeçilmez bir araç olduğunu göstermektedir. Özellikle modern uygulamalarda, tek bir yüksek dereceli polinom yerine spline veya Chebyshev tabanlı polinomların kullanılması, hem hesaplama kararlılığını artırmakta hem de hata kontrolünü sağlamaktadır. Böylece polinom interpolasyonu, yalnızca teorik bir yöntem

olmanın ötesine geçerek, pratik problemlerde güvenilir ve etkin bir çözüm aracı haline gelmektedir.

Geleceğe yönelik çalışmalar, özellikle çok değişkenli ve yüksek boyutlu veri setlerinde interpolasyonun performansını artırmaya odaklanmaktadır. Adaptif düğüm yerleşimleri, barycentrik interpolasyon formülleri ve parçalı yüksek dereceli polinomlar, modern sayısal analiz uygulamalarında araştırılmaya devam etmektedir. Ayrıca, polinom interpolasyonu ile makine öğrenmesi ve veri bilimi tekniklerinin entegrasyonu, veri tahmin ve modelleme alanında yeni ufuklar açmaktadır. Bu gelişmeler, polinom interpolasyonunun yalnızca geleneksel sayısal analiz araçları arasında kalmayıp, aynı zamanda modern bilim ve mühendislik uygulamalarında da etkin bir rol üstlendiğini göstermektedir (Burden & Faires, 2011; Trefethen, 2013).

Sonuç olarak, polinom interpolasyonu, matematiksel temelleri sağlam, teorik ve uygulamalı açıdan zengin bir yöntem olarak önemini korumaktadır. Doğru düğüm seçimi, polinom derecesi ve modern spline veya Chebyshev tabanlı tekniklerin kullanımı ile interpolasyon, hem eğitim hem de araştırma ve uygulama alanlarında vazgeçilmez bir araç olmaya devam etmektedir. Bu bağlamda, polinom interpolasyonu, sayısal analiz literatüründe merkezi bir konumda bulunmakta ve gelecekteki sayısal yöntemler ve veri odaklı araştırmalar için sağlam bir temel sunmaktadır.

## REFERANSLAR

- Atkinson, K. E. (1989). An introduction to numerical analysis (2nd ed.). Wiley.
- Burden, R. L., & Faires, J. D. (2011). Numerical analysis (9th ed.). Cengage Learning.
- Davis, P. J. (1975). Interpolation and approximation. Dover Publications.
- Kincaid, D., & Cheney, W. (2002). Numerical analysis: Mathematics of *scientific computing* (3rd ed.). Brooks/Cole.
- Quarteroni, A., Sacco, R., & Saleri, F. (2007). Numerical mathematics (2nd ed.). Springer.
- Stoer, J., & Bulirsch, R. (2002). *Introduction to numerical analysis* (3rd ed.). Springer.
- Süli, E., & Mayers, D. (2003). An introduction to numerical analysis. Cambridge University Press.
- Trefethen, L. N. (2013). Approximation theory and approximation practice. SIAM.



# **Genelleştirilmiş Tipte Parçalı Sabit Gecikme İçeren Diferansiyel Denklemlerde Salınım ve Salınımsızlık Kriterleri**

**Güler KUTLU<sup>1</sup>**

**Duygu ARUĞASLAN ÇİNÇİN<sup>2</sup>**

1- Doktora öğrencisi; Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye  
[gulery2011@gmail.com](mailto:gulery2011@gmail.com) ORCID No: 0000-0001-9890-120X

2- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Isparta, Türkiye  
[duyguarugaslan@sdu.edu.tr](mailto:duyguarugaslan@sdu.edu.tr) ORCID No: 0000-0003-1867-0996.

## ÖZET

Klasik diferansiyel denklemler kullanılarak yapılan dinamik sistem modellemelerinde, sistemin gelecekteki davranışının mevcut durumuna bağlı olduğu varsayılmaktadır. Ancak gerçek hayatta karşılaşılan birçok süreçte, geçmişteki durumlar, mevcut durumun sonucunu etkilemektedir. Bu ise, daha doğru matematiksel modellemeler elde etmek için, sapma argümanlı diferansiyel denklemler teorisinin ortaya çıkıp geliştirilmesine yol açmıştır. Bu denklemler, popülasyon dinamiği, sinir ağları, kontrol teorisi gibi pek çok alanda önemli uygulamalara sahiptir.

Sapmanın sürekli olması durumunda elde edilen gecikmeli diferansiyel denklemler (GDD) üzerine literatürde oldukça kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Buna karşılık, sapma argümanının süresiz olduğu ve argüman fonksiyonu olarak zamanın tam değerinin alındığı parçalı sabit argümanlı diferansiyel denklemler (PSADD), argüman yapısının belirli zaman noktalarında değiştiği sistemlerin modellenmesi amacıyla geliştirilmiştir.

Argüman fonksiyonu olarak reel değişkenli artan bir reel sayı dizisinin kullanılmasıyla tanımlanan genelleştirilmiş parçalı sabit argümanlı diferansiyel denklemler (GPSADD) ise hem kesikli zamanlı hem de süresiz girdili sistemlerin daha genel ve esnek bir biçimde modellenmesini sağlamaktadır. Son yıllarda GPSADD'lerin çözümlerinin varlığı ve tekliği, kararlılık analizi, periyodik çözümleri, asimptotik davranışı ve salınım özellikleri üzerine önemli çalışmalar yapılmıştır (M. Akhmet 2008, Chiu ve Jeng 2015, Aruğaslan ve Güzel 2015).

Bu çalışmada, birinci mertebeden GPSADD'lerin belirli bir formu ele alınmış ve bu denklemlerin çözümlerinin salınımlı veya salınımsız olmasına ilişkin kriterler elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen teorik sonuçların doğruluğunu desteklemek amacıyla çeşitli örnekler sunulmuş ve bu örneklerle ait MATLAB simülasyonlarına yer verilmiştir.

*Anahtar Kelimeler –Diferansiyel denklemler, Genelleştirilmiş parçalı sabit argüman, Gecikme, Salınım davranışı, Nümerik simülasyon.*

---

## GİRİŞ

Adi diferansiyel denklemlerin çözümlerinin salınımlılığı veya salınımsızlığı ile ilgili literatürde oldukça fazla çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Modern teknoloji ve bilimin artan gereksinimleri doğrultusunda, klasik diferansiyel denklemlerle modellenmesi güç olan pek çok karmaşık dinamik sürecin ortaya çıkması, diferansiyel denklemlerin farklı sınıflarının geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu kapsamda, gecikme veya ileri argüman yapısının zamana bağlı olarak süreksiz değişim gösterdiği sistemlerin modellenebilmesi amacıyla, mevcut teorik altyapı, yeni denklem türlerini kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Parçalı sabit argümanlı diferansiyel denklemler (PSADD), argüman fonksiyonunun zamanın tam değeri olarak tanımlanmasıyla, sürekli zamanlı dinamikler ile ayrık zamanlı yapıların birlikte ele alındığı önemli bir modelleme aracı olarak ortaya çıkmıştır. Ancak PSADD çerçevesinde ardışık argümanlar arasındaki mesafenin sabit olması, modellenebilecek sistemlerin çeşitliliğini sınırlamaktadır. Bu sınırlamanın aşılması amacıyla, tam değer fonksiyonu yerine daha genel parçalı sabit fonksiyon dizilerinin kullanılmasıyla elde edilen genelleştirilmiş parçalı sabit argümanlı diferansiyel denklemler (GPSADD) geliştirilmiş ve böylece çok daha geniş bir dinamik sistem sınıfının salınım gibi özellikler bakımından incelenmesi mümkün hale gelmiştir (Myshkis 1950, Aftabizadeh ve Wiener 1985, Jaros ve Stavroulakis 1999, Akhmet 2007). Bu denklemlerin genel formu,

$$x'(t) = f(t, x(t), x(\beta(t)))$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki  $\beta(t)$  parçalı fonksiyonu;  $t \in R$  ve  $i \in Z$  olmak üzere,  $t \in [\theta_i, \theta_{i+1})$  aralığında  $\beta(t) = \theta_i$  olarak tanımlanmaktadır.  $\theta = \{\theta_i\}$ ,  $i \rightarrow \infty$  iken  $|\theta_i| \rightarrow \infty$  olacak şekilde reel değerli artan bir dizidir.

Mevcut çalışmada,  $a(t), b(t), f(t)$  sürekli reel değişkenli fonksiyonlar olmak üzere;

$$y'(t) + a(t)f(y(\beta(t))) = b(t)$$

tipindeki birinci mertebeden GPSADD'lerin çözümleri analiz edilerek, salınımlı ve salınımsız davranışları karakterize eden kuramsal sonuçlar sunulmuştur.

## ARAŞTIRMA VE BULGULAR

$a(t), b(t)$  ve  $f(t)$  sürekli reel değişkenli fonksiyonlar ve  $xf(x) > 0$  ( $x \neq 0$ ) olmak üzere,  $n \rightarrow \infty$  iken  $|\theta_n| \rightarrow \infty$  olacak şekilde reel değerli bir  $\theta = \{\theta_n\}$  artan dizisi verilsin.  $\beta(t)$  parçalı fonksiyonu;  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  aralığında  $\beta(t) = \theta_n$  olarak tanımlansın.

$$y'(t) + a(t)f(y(\beta(t))) = b(t) \quad (2.1)$$

$$y(\theta_0) = y_0(\theta_0)$$

tipindeki GPSADD verilsin.

**Tanım 2.1**  $[\theta_0, \infty)$  aralığında sürekli olan bir  $y(t)$  fonksiyonu için,

- her  $n$  doğal sayısında tek taraflı türevlerinin mevcut olduğu  $\theta_n$  noktaları dışındaki her  $t \in [\theta_0, \infty)$  noktasında  $y'(t)$  türevleri mevcut,
- her  $n$  doğal sayısı ve her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için (2.1) GPSADD'i sağlanıyor

ise bu  $y(t)$  fonksiyonu (2.1) denkleminin bir çözümüdür denir.

**Tanım 2.2** Bir diferansiyel denklemin, özdeş olarak sıfır olmayan ve sonsuz sayıda köke sahip olan çözümü *salınımlı çözüm* olarak adlandırılır. Buna karşılık, bu özelliği taşımayan çözümler *salınımsız çözüm* olarak tanımlanır. Eğer bir diferansiyel denklemin tüm çözümleri salınımlı ise söz konusu denklem *salınımlı diferansiyel denklem*, tüm çözümleri salınımsız ise *salınımsız diferansiyel denklem* olarak ifade edilir.

**Notasyon:** Bu çalışmada, (2.1) GPSADD'inin  $[\theta_n, \theta_{n+1})$  aralığındaki çözüm fonksiyonu  $y_n(t)$  ile gösterilmektedir.

**Teorem 2.1** (2.1) probleminde,  $[\theta_0, \infty)$  aralığında,  $a(t) < 0$ ,  $b(t) < 0$  ve  $y_0(\theta_0) < 0$  ise (2.1) denkleminin tüm çözümleri salınımsızdır.

**İspat:**  $y(t)$ , (2.1) GPSADD'inin bir çözümü olsun.  $y_0(\theta_0) < 0$  olarak verildiğinden  $f(y_0(\theta_0)) < 0$  olur. Her  $t \in [\theta_0, \theta_1)$  için,

$$y'_0(t) = -a(t)f(y_0(\theta_0)) + b(t)$$

denkleminde  $y'_0(t) < 0$  olup  $y_0(t)$  çözümü azalandır. Dolayısıyla  $y_0(\theta_1) = y_1(\theta_1) < y_0(\theta_0) < 0$  olur. Bu şekilde devam edildiğinde, her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için  $y_n(t) < 0$  olur. O halde, her  $t \in [\theta_0, \infty)$  için  $y(t) < 0$  olmakla birlikte  $y(t)$  salınımsızdır. ■

**Teorem 2.2** (2.1) probleminde,  $[\theta_0, \infty)$  aralığında,  $a(t) < 0$ ,  $b(t) > 0$  ve  $y_0(\theta_0) > 0$  ise (2.1) denkleminin tüm çözümleri salınımsızdır.

**İspat:** Teorem 2.1 in ispatına benzer şekilde yapılabilir. ■

**Teorem 2.3** (2.1) probleminde her  $t \in [\theta_0, \infty)$  için  $b(t) > 0$  olmak üzere,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{b(t)}{|a(t)|} = \infty \quad (2.2)$$

ise (2.1) probleminin tüm sınırlı çözümleri salınımsızdır.

**İspat:**  $y(t)$ , (2.1) denkleminin sınırlı ve salınımlı bir çözümü olsun. O halde, her  $t \in [\theta_0, \infty)$  için  $|y(t)| \leq K$  olacak şekilde bir  $K$  reel sayısı vardır. Dolayısıyla,  $f$  sürekli olduğundan,

$$|f(y(t))| \leq M$$

olacak biçimde bir  $M$  reel sayısı vardır. (2.2) koşulundan, her  $t \geq T$  ve  $t \rightarrow \infty$  için,

$$\frac{b(t)}{|a(t)|} > M \quad (2.3)$$

olacak şekilde bir  $T$  reel sayısı vardır.  $y(t)$  salınımlı olduğundan  $j \rightarrow \infty$  için  $y(u_j) = 0$  olan bir  $\{u_j\}$  dizisi vardır.  $u_j > T$  olacak şekilde  $y(t)$  nin herhangi iki ardışık sıfırı  $u_j$  ve  $u_{j+1}$  olsun. (2.1) denkleminin her iki tarafının  $u_j$  den  $u_{j+1}$  e integrali alınırsa,

$$\begin{aligned} \int_{u_j}^{u_{j+1}} y'(s) ds &= \int_{u_j}^{u_{j+1}} [b(s) - a(s)f(y(\beta(s)))] ds \\ y(\theta_{u_{j+1}}) - y(u_j) &\geq \int_{u_j}^{u_{j+1}} [b(s) - a(s)M] ds \end{aligned}$$

olur. (2.3) eşitsizliğinden,

$$0 \geq \int_{u_j}^{u_{j+1}} [b(s) - |a(s)|M] ds > 0$$

çelişkisi elde edilir. O halde  $y(t)$  salınımsızdır ■

**Teorem 2.4** (2.1) probleminde her  $t \in [\theta_0, \infty)$  için  $a(t) \geq 0$  olmak üzere,

$$\liminf_{t \rightarrow \infty} \int_{\theta_0}^t b(s) ds = -\infty \quad (2.4)$$

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \int_{\theta_0}^t b(s) ds = \infty \quad (2.5)$$

ise (2.1) denkleminin tüm çözümleri salınımlıdır.

**İspat:**  $y(t)$ , (2.1) probleminin salınımsız bir çözümü olsun.  $n > N > 0$  ve her  $t \in [\theta_n, \infty)$  için  $y(t) > 0$  olacak şekilde  $N$  tam sayısı var olsun.  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için (2.1) denkleminin her iki tarafının  $\theta_n$  den  $t$  ye integrali alınırsa,

$$y_n(t) = y_n(\theta_n) - f(y_n(\theta_n)) \int_{\theta_n}^t a(s) ds + \int_{\theta_n}^t b(s) ds \quad (2.6)$$

çözümüne ulaşılır. Bu çözümde,  $t = \theta_{n+1}$  yazılırsa,

$$y_n(\theta_{n+1}) = y_n(\theta_n) - f(y_n(\theta_n)) \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} a(s) ds + \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} b(s) ds$$

elde edilir. Bu son eşitlik (2.6) çözüm fonksiyonunda yerine yazılırsa,

$$y_n(t) = y_n(\theta_{n+1}) - f(y_n(\theta_n)) \int_{\theta_{n+1}}^t a(s) ds + \int_{\theta_{n+1}}^t b(s) ds$$

olduğu görülür. Buradan da,

$$0 < y_n(t) \leq y_n(\theta_{n+1}) + \int_{\theta_{n+1}}^t b(s)ds$$

eşitsizliğine ulaşılır. (2.4) eşitsizliğinden,

$$\liminf_{t \rightarrow \infty} \int_{\theta_0}^t b(s)ds = -\infty$$

olduğundan,

$$\liminf_{t \rightarrow \infty} y(t) < 0$$

elde edilir. Bu ise varsayım ile çelişir.  $n > N > 0$  ve her  $t \in [\theta_n, \infty)$  için  $y(t) < 0$  olması durumu da benzer şekilde gösterilir. Bu durumda, yapılan varsayımın yanlış olduğu anlaşılmakta ve dolayısıyla  $y(t)$ 'nin salınımlı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. ■

**Teorem2.5** (2.1) başlangıç değer probleminde her  $t \in [\theta_0, \infty)$  için  $a(t) \geq 0$  ve  $f(x)$  azalmayan sürekli fonksiyon olsun.  $[\theta_0, \infty)$  aralığında salınımlı bir  $g(t)$  fonksiyonunun var olduğu, bu fonksiyonun integral noktaları dışında  $g'(t) = b(t)$  koşulunu sağladığı ve ayrıca  $\lim_{t \rightarrow \infty} b(t)$  limitinin mevcut olduğu kabul edilsin.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{\theta_0}^t a(s)ds = \infty \quad (2.7)$$

ise (2.1) GPSADD'inin çözümleri  $t \rightarrow \infty$  için sifıra yakınsar veya salınımlıdır.

**İspat:**  $y(t)$ , (2.1) probleminin salınımsız bir çözümü olsun.  $x(t)$  fonksiyonu,  $x(t) = y(t) - g(t)$  olarak tanımlansın.

**1. Durum:**  $n > N_1 > 0$  ve her  $t \in [\theta_n, \infty)$  için  $y(t) > 0$  olacak şekilde  $N_1$  tam sayısı var olsun. Böylece,

$$x'(t) = -a(t)f(y(\beta(t))) \leq 0 \quad (2.8)$$

olup  $x(t)$  azalandır.

(i)  $t > \theta_{n+1}$  için  $x(t) > 0$  olsun.  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = m > 0$  vardır. Dolayısıyla,  $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = k > 0$  limiti mevcuttur.  $0 < \varepsilon < k$  için  $n > N \geq N_1$  ise  $t \in [\theta_n, \infty)$  aralığında  $y(t) > k - \varepsilon > 0$  olacak şekilde bir  $N$  sayısı vardır. (2.8) denkleminin her iki tarafının  $\theta_n$  den  $t$  ye integrali alınırsa,

$$x(t) = x(\theta_n) - \int_{\theta_n}^t f(y(\beta(s))) a(s) ds$$

bulunur. Bu eşitlikte  $t = \theta_{n+1}$  yazılırsa,

$$x(\theta_{n+1}) = x(\theta_n) - \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} f(y_n(\theta_n)) a(s) ds$$

elde edilir. Burada,

$$x(t) = x(\theta_{n+1}) - \int_{\theta_{n+1}}^t f(y(\beta(s))) a(s) ds \quad (2.9)$$

olup  $f$  fonksiyonu azalmayan olduğundan,

$$x(t) \leq x(\theta_{n+1}) - \int_{\theta_{n+1}}^t f(y_n(\theta_n)) a(s) ds$$

$$x(t) < x(\theta_{n+1}) - f(k - \varepsilon) \int_{\theta_{n+1}}^t a(s) ds$$

eşitsizliği elde edilir.  $t \rightarrow \infty$  için (2.7) koşulundan dolayı  $x(t) < 0$  olur. Bu ise (i) deki  $x(t) > 0$  kabulü ile çelişir.

(ii)  $t > \theta_{n+1}$  için  $x(t) < 0$  olsun. Tanımdan dolayı,  $x(t) = y(t) - g(t) < 0$  olur. Böylece,  $0 < y(t) < g(t)$  olup, bu durum  $g(t)$  nin salınımlı olmasıyla çelişir.

**2. Durum:**  $n > N_1 > 0$  ve her  $t \in [\theta_n, \infty)$  için  $y(t) < 0$  olacak şekilde  $N_1$  tam sayısı var olsun. O halde,

$$x'(t) = -a(t)f(y(t)) \geq 0$$

olup  $x(t)$  artandır.

(i)  $t > \theta_{n+1}$  için  $x(t) > 0$  olsun. Böylece,  $0 > y(t) > g(t)$  olup bu ise  $g(t)$  nin salınımlı olmasıyla çelişir.

(ii)  $t > \theta_{n+1}$  için  $x(t) < 0$  olsun. Bu durumda,  $x(t)$  artan olduğundan  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = m < 0$  limiti vardır. Aynı zamanda, tanımdan ve hipotezden dolayı  $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = k < 0$  limiti mevcuttur.  $0 < \varepsilon < -k$  olsun. O halde,  $n > N \geq N_1$  için  $t \in [\theta_n, \infty)$  aralığında  $k - \varepsilon < y(t) < k + \varepsilon$  olacak şekilde  $N$  sayısı vardır. (2.9) eşitliğinden,

$$x(t) = x(\theta_{n+1}) - \int_{\theta_{n+1}}^t f(y(\beta(s))) a(s) ds$$

olup  $f$  azalan ve  $xf(x) > 0$  ( $x \neq 0$ ) olduğundan,

$$x(t) \geq x(\theta_{n+1}) - \int_{\theta_{n+1}}^t f(y_n(\theta_n)) a(s) ds$$

$$x(t) > x(\theta_{n+1}) - f(k + \varepsilon) \int_{\theta_{n+1}}^t a(s) ds$$

bulunur ve  $t \rightarrow \infty$  için (2.7) koşulundan  $x(t) > 0$  olur. Bu sonuç  $x(t) < 0$  varsayımı ile çelişir. Dolayısıyla kabulümüz doğru değildir ve böylece  $y(t)$  salınımlı olur. ■

## ÖRNEKLER VE MATLAB SİMÜLASYONLARI

**Örnek 1:**  $n > 0$  tam sayısı için  $\theta_n = \frac{n}{3}$  reel sayı dizisi verilsin. Her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için  $\beta(t) = \theta_n$  olmak üzere,

$$y'(t) + \frac{t+1}{t^2+3} (y(\beta(t))) = t \cos t \quad (2.10)$$

$$y(\theta_0) = 10$$

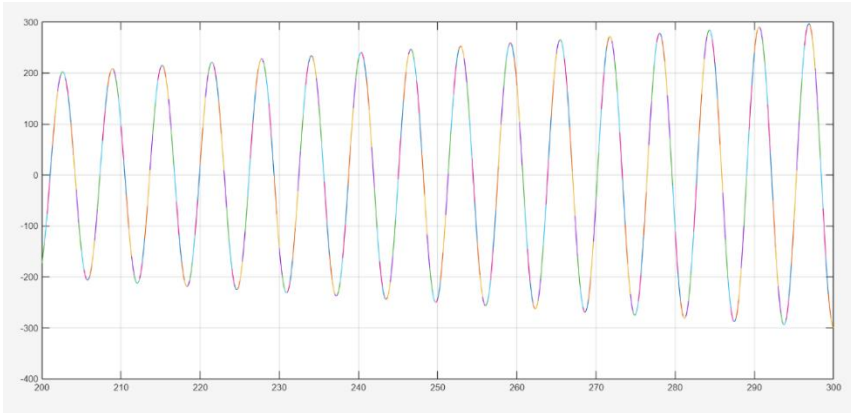
GPSADD için,

$$a(t) = \frac{t+1}{t^2+3} > 0; \quad b(t) = t \cos t; \quad f(x) = x, x f(x) > 0,$$

$$\liminf_{t \rightarrow \infty} \int_0^t b(s) ds = \liminf_{t \rightarrow \infty} \int_0^t s \cos s ds = \liminf_{t \rightarrow \infty} [t \sin t + \cos t - 1] = -\infty,$$

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \int_0^t b(s) ds = \limsup_{t \rightarrow \infty} \int_0^t s \cos s ds = \limsup_{t \rightarrow \infty} [t \sin t + \cos t - 1] = \infty$$

olduğundan Teorem 2.4 e göre (2.10) GPSADD'inin tüm çözümleri salınımlıdır. (2.10) GPSADD'inin salınımlılığını gösteren simülasyon Şekil 1 ile verilmiştir.



Şekil 1. (2.10) GPSADD'inin salınımlılığını gösteren simülasyon

**Örnek 2:**  $n > 0$  tam sayısı için  $\theta_n = \frac{n}{5}$  reel sayı dizisi verilsin. Her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için  $\beta(t) = \theta_n$  olmak üzere,

$$y'(t) + \frac{1}{t} \left( y(\beta(t)) \right) = \frac{t \cos t - \sin t}{t^2} \quad (2.11)$$

$$y(\theta_0) = 10$$

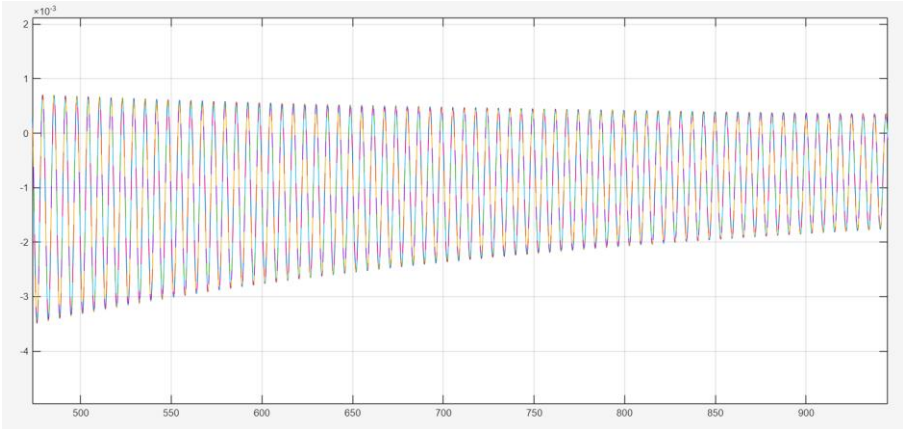
diferansiyel denkleminde,  $a(t) = \frac{1}{t}$ ,  $f(x) = x$ ,

$$b(t) = \frac{t \cos t - \sin t}{t^2}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{t \cos t - \sin t}{t^2} \right) = 0,$$

$g(t) = \frac{\sin t}{t}$ ;  $g'(t) = b(t)$  olup  $g(t)$  salınımlıdır. Aynı zamanda,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{1/5}^t \frac{1}{s} ds = \lim_{t \rightarrow \infty} \ln 5t = \infty$$

olduğundan Teorem 2.5 e göre (2.11) GPSADD'inin  $y(t)$  çözümleri salınımlıdır. (2.11) GPSADD'ine ait simülasyon grafiği Şekil 2 ile verilmiştir.



Şekil 2. (2.11) GPSADD'ine ait simülasyon grafiği

**Örnek 3:**  $n > 0$  tam sayısı için  $\theta_n = \frac{n}{5}$  reel sayı dizisi verilsin. Her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için  $\beta(t) = \theta_n$  olmak üzere,

$$y'(t) + \frac{1}{t5^t} y(\beta(t)) (2 + \sin y(\beta(t)) + \cos y(\beta(t))) = t^4 e^{-t} \quad (2.12)$$

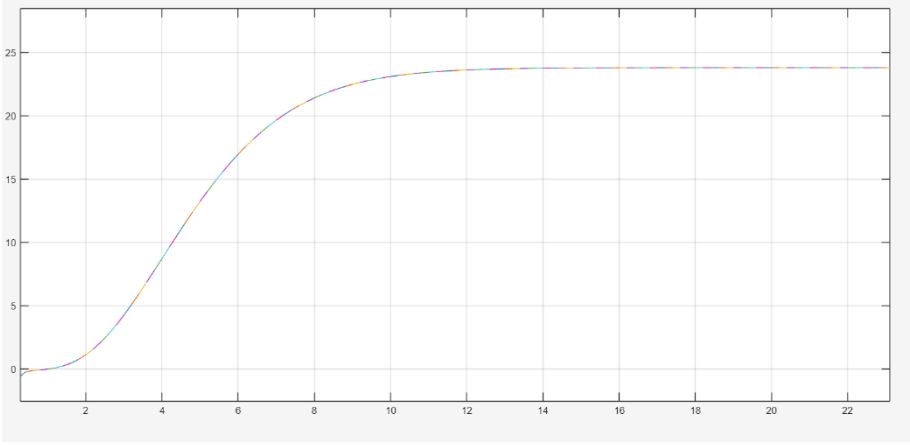
$$y(\theta_0) = -1$$

GPSADD verilsin. Burada,

$$f(x) = x(2 + \sin x + \cos x), \quad a(t) = \frac{1}{t5^t}, \quad b(t) = t^4 e^{-t},$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{b(t)}{|a(t)|} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t^4 e^{-t}}{\frac{1}{t 5^t}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{5^t t^5}{e^t} = \infty$$

olup Teorem 2.3 e göre (2.12) diferansiyel denkleminin sınırlı çözümleri salınımsızdır. (2.12) GPSADD'inin salınımsızlığını gösteren simülasyon Şekil 3 ile verilmiştir.



Şekil 3. (2.12) GPSADD'inin salınımsızlığını gösteren simülasyon grafiği

## SONUÇ

Bu çalışmada, argüman fonksiyonunun belirli bir kurala göre genelleştirilmesiyle elde edilen diferansiyel denklemler olan GPSADD'lerin birinci mertebeden,

$$y'(t) + a(t)f(y(\beta(t))) = b(t)$$

tipinin çözümlerinin salınım/salınımsızlık kriterlerini belirlemeye yönelik bazı incelemeler yapılmıştır. Ortaya konulan teorik sonuçların geçerliliğini göstermek amacıyla, çalışmaya örnekler ilave edilmiş ve bu örnekler MATLAB simülasyonları ile desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA

- Aftabizadeh, A.R., ve J. Wiener. «Oscillatory properties of first order linear functional differential equations.» *Applicable Analysis*, (Applicable Analysis) 20, no. 3-4 (1985): 165-187.
- Akhmet, M. U. «Integral manifolds of differential equations with piecewise constant argument generalized type.» *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* (Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications) 66, no. 2 (2007): 367-383.

- Akhmet, M.U. «Stability of Differential Equations with Piecewise Constant Arguments of Generalized Type.» *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* 68, no. 4 (2008): 794-803.
- Aruğaslan, Duygu, ve Leyla Güzel. «Stability of the logistic population model with generalized piecewise constant delays.» 173 (2015).
- Chiu, Kuo-Shou, ve Jyh-Cheng Jeng. «Stability of oscillatory solutions of differential equations with general piecewise constant arguments of mixed type.» (*Mathematische Nachrichten*) 288, no. 10 (2015): 1085-1097.
- Jaros, J., ve I. P. Stavroulakis. «Oscillation Tests for Delay Equations.» *Rocky Mountain Journal of Mathematics* 29, no. 1 (1999): 197-207.
- Myshkis, A.D. «Linear homogeneous differential equations of first order with deviating arguments.» *Uspehi Mat. Nauk* (*Uspehi Mat. Nauk*), 1950: 160 162.



# **Genelleştirilmiş Parçalı Sabit Argümanlı Diferansiyel Denklemlerin Salınım Davranışı**

**Güler KUTLU<sup>1</sup>**

**Duygu ARUĞASLAN ÇİNÇİN<sup>2</sup>**

- 1- Doktora öğrencisi; Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Isparta Türkiye [gulery2011@gmail.com](mailto:gulery2011@gmail.com) ORCID No: 0000-0001-9890-120X
- 2- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Matematik Bölümü Isparta Türkiye [duygugarugaskan@sdu.edu.tr](mailto:duygugarugaskan@sdu.edu.tr) ORCID No: 0000-0003-1867-0996

## ÖZET

Bazı dinamik sistemlerin mevcut durumu, geçmişteki durumlarına bağlı olabilmektedir. Bu tür sistemlerin matematiksel modellenmesinde gecikmeli diferansiyel denklemler (GDD) kullanılmaktadır. Gecikmeli diferansiyel denklemler teorisi, hem teorik hem de uygulamalı matematik alanlarında geniş bir araştırma konusu olmuş ve literatürde bu denklemlere yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Gecikme miktarının zamanın tam değeri olarak seçilmesi durumunda oluşan denklemler ise parçalı sabit argümanlı diferansiyel denklemler (PSADD) olarak isimlendirilir. PSADD'lerdeki parçalı sabit argümanın belirli bir kurala göre genelleştirilmesiyle elde edilen denklemler ise genelleştirilmiş parçalı sabit argümanlı diferansiyel denklemler (GPSADD) olarak tanımlanmaktadır. GPSADD'ler, süreksiz girdilere sahip, kesikli zamanlı ya da parça parça güncellenen veri içeren dinamik sistemlerin modellenmesinde etkin bir araç olarak kullanılmaktadır. Uygulama alanlarının çeşitliliği ve genişliği, son yıllarda GPSADD teorisine yönelik araştırmaların sayısında belirgin bir artışa yol açmıştır. Özellikle, GPSADD'lerin çözümlerinin varlık-teklik, kararlılık, salınım davranışları üzerine yapılan nitelikli çalışmalar, bu teorisinin gelişimine önemli katkılar sunmuştur.

Bu çalışmada, birinci mertebeden GPSADD tipi ele alınmış ve salınım davranışları incelenerek bazı teorik sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen teorik bulguların geçerliliğini ve uygulanabilirliğini ortaya koymak amacıyla çeşitli örnekler verilmiştir. Ayrıca, verilen örneklerin salınım davranışını görsel olarak ortaya koyan MATLAB tabanlı simülasyon grafikleri de çalışmaya eklenmiştir. Bu çalışma ile diferansiyel denklemler teorisine ve gecikmeli dinamik sistemlerin matematiksel analizine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

*Anahtar Kelimeler–Birinci mertebe diferansiyel denklemler, Salınlı çözüm, Salınlı çözüm, Genelleştirilmiş parçalı sabit argüman, Simülasyon.*

---

## GİRİŞ

Literatürde gecikmeli diferansiyel denklemlerin salınım kriterleri üzerine yapılmış olan ilk önemli çalışma Myshkis (1950) tarafından verilmiştir. Myshkis, çalışmasında;  $a(t)$  sürekli fonksiyonu ve  $c(t)$ ,  $t > c(t)$  olacak şekilde sürekli azalmayan fonksiyonu için

$$x'(t) + a(t)x(c(t)) = 0$$

şeklindeki gecikmeli diferansiyel denklemleri incelemiştir (Jaros ve Stavroulakis 1999). Parçalı sabit argüman içeren ilk modelleme Busenberg ve Cooke (1982) tarafından biyomedikal alanda yapılmıştır. Bu denklemlerdeki gecikme argümanı zamanın tam değeri olarak alınmıştır. Ayrıca; Shah ve Wiener (1983), Cooke ve Wiener (1984), Aftabizadeh ve Wiener (1988), Aftabizadeh, Wiener ve Xu (1987), Wiener (1993), Zhang ve Parhi (1989), Györi ve Ladas (1989) tarafından yapılan çalışmalarda da,  $c(t)$  zamanın tam değeri alınarak oluşturulan bir parçalı sabit fonksiyonu göstermek üzere,

$$x'(t) = f(t, x(t), x(c(t)))$$

formundaki PSADD'lerin çözümlerinin bazı özellikleri incelenmiştir. Genelleştirilmiş formda parçalı sabit argüman içeren diferansiyel denklemler, klasik argüman yaklaşımında kullanılan en büyük tamsayı fonksiyonunun daha esnek ve genel bir yapıya sahip uygun parçalı sabit fonksiyon dizileriyle değiştirilmesi sonucu elde edilen ve gecikme/ileri argüman yapısının daha geniş bir sınıfını kapsayan modeller olup, ilk olarak Akhmet (2007, 2008) tarafından ele alınmıştır. Sonraki yıllarda, Chiu ve Pinto (2010), Chiu ve Li (2019), Chiu ve Jeng (2015) çalışmaları, GPSADD teorisi üzerinde önemli çalışmalar yapmışlardır. GPSADD genel olarak,

$$x'(t) = f(t, x(t), x(\beta(t)))$$

ile ifade edilmektedir.  $\beta(t)$  parçalı fonksiyonu;  $t \in R$  ve  $i \in Z$  iken,  $t \in [\theta_i, \theta_{i+1})$  aralığında  $\beta(t) = \theta_i$  şeklinde tanımlıdır.  $\theta = \{\theta_i\}$ ,  $i \rightarrow \infty$  olduğunda  $|\theta_i| \rightarrow \infty$  davranışı gösteren, artan ve reel değerli bir dizidir. Burada, ardışık iki argüman arasındaki uzaklık argümana göre değiştiğinden sabit değildir. Bu çalışmada,  $a(t), b(t), f(t)$  sürekli reel değişkenli fonksiyonları için

$$y'(t) + a(t)y(t)f(y(\beta(t))) = b(t)$$

tipindeki GPSADD'lerin çözümlerinin salınımlılık ve salınımsızlık kriterlerini belirlemeye yönelik elde edilen bazı teorik sonuçlar yer almaktadır. Ayrıca,

$$y'(t) + a(t)(1 + y(t))f(y(\beta(t))) = 0$$

tipindeki lojistik GPSADD'nin çözümünün salınım davranışları incelenmiştir.

## ARAŞTIRMA VE BULGULAR

$n \rightarrow \infty$  iken  $|\theta_n| \rightarrow \infty$  olacak şekilde reel değerli bir  $\theta = \{\theta_n\}$  artan dizisi verilsin.  $\beta(t)$  parçalı fonksiyonu;  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  aralığında  $\beta(t) = \theta_n$  olarak tanımlansın.  $a(t), b(t), f(t)$  sürekli reel değişkenli fonksiyonlar ve  $xf(x) > 0$  ( $x \neq 0$ ) olmak üzere,

$$\begin{aligned} y'(t) + a(t)y(t)f(y(\beta(t))) &= b(t) \\ y(\theta_0) &= y_0(\theta_0) \end{aligned} \quad (2.1)$$

formundaki başlangıç değer problemi verilsin.

**Tanım 2.1** Bir  $y(t)$  fonksiyonu,

- (i)  $[\theta_0, \infty)$  aralığında sürekli,
- (ii)  $[\theta_0, \infty)$  aralığında muhtemel  $\theta_n$  değerleri dışında tek taraflı  $y'(t)$  türevlerine sahip,
- (iii) her  $n$  doğal sayısı ve her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için (2.1) GPSADD'ini sağlıyor,

ise  $y(t)$  fonksiyonuna (2.1) denkleminin bir çözümüdür denir.

**Tanım 2.2.** Bir diferansiyel denklemin aşıkâr olmayan çözümü dışında keyfi sayıda sıfıra sahip olan çözümüne *salınımlı çözüm* denir. Aksi halde çözüm fonksiyonuna *salınımsız çözüm* adı verilir. Tüm çözümleri salınımlı olan diferansiyel denkleme *salınımlı diferansiyel denklem*; tüm çözümleri salınımsız olan diferansiyel denkleme ise *salınımsız diferansiyel denklem* denilmektedir.

**Tanım 2.3** (2.1) GPSADD için  $L_n(t, s)$  fonksiyonu;

$$L_n(t, s) = e^{-f(y_n(\theta_n)) \int_t^s a(k)dk} ; \quad \theta_n \leq t, s < \theta_{n+1} \quad (2.2)$$

olarak tanımlansın. (2.2) tanımına göre  $P_n(t_1, t_2)$  fonksiyonunun özellikleri:

- $L_n(t, s) > 0$
- $L_n(t, t) = 1$
- $L_n(t, s)L_n(s, t) = 1$
- $L_n(t, s)L_n(s, u) = L_n(t, u); \quad \theta_n \leq t, s, u < \theta_{n+1},$

şeklinde dir.

**Notasyon:** Bu çalışmada, (2.1) GPSADD'inin  $[\theta_n, \theta_{n+1})$  aralığındaki çözüm fonksiyonu  $y_n(t)$  ile gösterilmektedir.  $y_n(t)$  çözüm fonksiyonu;

$$y_n(t) = y_n(\theta_n) e^{-f(y_n(\theta_n)) \int_{\theta_n}^t a(k)dk} \int_{\theta_n}^t b(s) e^{f(y_n(\theta_n)) \int_t^s a(k)dk} ds \quad (2.3)$$

olup (2.2) tanımı (2.3) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$y_n(t) = y_n(\theta_n)L_n(\theta_n, t) + \int_{\theta_n}^t b(s)L_n(s, t) ds \quad (2.4)$$

elde edilir.

**Teorem 2.1** (2.1) başlangıç değer probleminde  $b(t) = 0$  ise (2.1) denkleminin her çözümü salınımsızdır.

**İspat:** Bu durumda (2.1) aşağıda verilen,

$$y'(t) + a(t)y(t)f(y(\beta(t))) = 0$$

formunda olur. Bu denklemin her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  aralığındaki çözümü;

$$y_n(t) = y_n(\theta_n)L_n(\theta_n, \theta_{n+1})$$

olup  $y_n(t)$  çözümü salınımsızdır. O halde, her  $t \in [\theta_0, \infty)$  için  $y(t)$  salınımsızdır. ■

**Teorem 2.2** (2.1) probleminde tüm  $t \in [\theta_0, \infty)$  değerlerinde  $a(t) > 0$ ,  $b(t) < 0$  ve  $y(\theta_0) < 0$  ise (2.1) GPSADD'inin tüm çözümleri salınımsızdır.

**İspat:**  $t \in [\theta_0, \theta_1)$  için,

$$y'_0(t) = b(t) - a(t)y_0(t)f(y_0(\theta_0)) < 0$$

olup  $y(t)$  azalandır. Dolayısıyla,  $y_1(\theta_1) < 0$  olur ve benzer şekilde her  $t \in [\theta_0, \infty)$  için  $y(t)$  negatif bir fonksiyon olup bu durumda (2.1) salınımsızdır. ■

**Teorem 2.3** (2.1) probleminde her  $t \in [\theta_0, \infty)$  için  $a(t) < 0$ ,  $b(t) > 0$  ve  $y(\theta_0) > 0$  ise (2.1) GPSADD'inin tüm çözümleri salınımsızdır.

**İspat:** Teorem 2.2'ye benzer şekilde ispatlanabilir. ■

**Teorem 2.4** (2.1) başlangıç değer probleminde  $a(t) \geq 0$ ,  $b(t) > 0$  olmak üzere,

$$|x| \leq K \quad \text{ve} \quad xf(x) > 0, \quad x \neq 0, \quad (2.5)$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} b(s)ds = \infty,$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} a(s)ds = A < \infty \quad (2.6)$$

ise (2.1) denkleminin tüm sınırlı çözümleri salınımsızdır.

**İspat:**  $y(t)$ , (2.1) denkleminin sınırlı olan bir çözümü olarak kabul edilsin.  $|y(t)| \leq K$  ise  $f$  sürekli olduğundan  $|f(y(t))| \leq L$  olacak şekilde  $L > 0$  vardır.

**1.Durum:** Bir  $n > 0$  için  $y_n(\theta_n)$  pozitif ise,

$$-f(y_n(\theta_n)) \int_{\theta_n}^t a(k)dk < 0$$

olup her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  ve  $\theta_n \leq s < t$  için,  $0 < L_n(\theta_n, t) \leq L_n(s, t) \leq 1$  olduğundan (2.4) çözümünde  $y_n(t) > 0$  olur. Dolayısıyla,  $y_n(\theta_{n+1}) = y_{n+1}(\theta_{n+1}) > 0$  olacağından her  $t \in [\theta_n, \infty)$  için  $y(t) > 0$  olur. Böylece,  $y(t)$  salınımsızdır.

**2.Durum:** Bir  $n > 0$  değerinde  $y_n(\theta_n) < 0$  ise  $-L \leq f(y_n(\theta_n)) < 0$  olduğundan,

$$-f(y_n(\theta_n)) \int_{\theta_n}^t a(k)dk > 0$$

olup her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  ve  $\theta_n \leq s < t$  için  $1 \leq L_n(s, t) \leq L_n(\theta_n, t)$  olur. (2.4) çözümünde,

$$\begin{aligned} y_n(t) &= y_n(\theta_n)L_n(\theta_n, t) + \int_{\theta_n}^t b(s)L_n(s, t) ds \\ &= y_n(\theta_n)L_n(\theta_n, t) + \int_{\theta_n}^t b(s)L_n(s, \theta_n)L_n(\theta_n, t) ds \\ &= L_n(\theta_n, t) \left\{ y_n(\theta_n) + \int_{\theta_n}^t b(s)L_n(s, \theta_n) ds \right\} \end{aligned}$$

olup  $t = \theta_{n+1}$  için,

$$y_n(\theta_{n+1}) = L_n(\theta_n, \theta_{n+1}) \left\{ y_n(\theta_n) + \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} b(s)L_n(s, \theta_n) ds \right\}$$

olur.  $y(t)$  sınırlı olduğundan,

$$y_n(\theta_{n+1}) > L_n(\theta_n, \theta_{n+1}) \left\{ -K + \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} b(s)L_n(s, \theta_n) ds \right\} \quad (2.7)$$

yazılabilir. (2.6) dan  $0 < \varepsilon < A$  için  $n > N_1 \geq 0$  olduğunda,

$$0 < A - \varepsilon < \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} a(s)ds < A + \varepsilon$$

olacak şekilde bir  $N_1$  tam sayısı vardır. Ayrıca,

$$\begin{aligned} 1 &\geq L_n(s, \theta_n) = e^{f(y_n(\theta_n)) \int_{\theta_n}^s a(k)dk} \\ &> e^{-L \int_{\theta_n}^s a(k)dk} \\ &> e^{-L \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} a(k)dk} \end{aligned}$$

$$> e^{-L(A+\varepsilon)} \quad (2.8)$$

olur. (2.5) ten  $n > N_2 \geq 0$  için,

$$\int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} b(s)ds > Ke^{L(A+\varepsilon)} \quad (2.9)$$

olacak şekilde bir  $N_2$  tam sayısı vardır.  $n > N = \max\{N_1, N_2\}$  için (2.9) ve (2.8) eşitsizlikleri (2.7) de yerine yazılırsa,

$$y_n(\theta_{n+1}) > L_n(\theta_n, \theta_{n+1}) \left\{ -K + e^{-L(A+\varepsilon)} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} b(s) ds \right\} \\ > L_n(\theta_n, \theta_{n+1}) \{-K + K\}$$

olup  $y_n(\theta_{n+1}) > 0$  elde edilir. O halde,  $y_n(\theta_n) < 0$  olduğunda teoremin koşulları altında  $y_n(\theta_{n+1}) > 0$  eşitsizliğini sağlayacak şekilde pozitif bir  $n$  sayısının mevcut olduğu görülür. Bu durumda, 1.Durumdan dolayı, her  $t \in [\theta_{n+1}, \infty)$  için  $y(t) > 0$  olur. Yani  $y(t)$  salınımsızdır.

**3.Durum:** Bir  $n > 0$  için  $y_n(\theta_n) = 0$  ise,

$$y_n(t) = \int_{\theta_n}^t b(s)L_n(s, t) ds > 0$$

olur. Dolayısıyla 1. Durumdan ötürü her  $t \in (\theta_n, \infty)$  değerinde  $y(t) > 0$  olup  $y(t)$  salınımsızdır. ■

**Teorem 2.5** (2.1) başlangıç değer probleminde,  $a(t) \leq 0$ ,  $b(t) < 0$  olmak üzere,

$$|x| \leq K \quad \text{ve} \quad xf(x) > 0, \quad x \neq 0, \\ \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} b(s)ds = -\infty, \quad (2.10)$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} a(s)ds = A > -\infty \quad (2.11)$$

ise (2.1) denkleminin tüm sınırlı çözümleri salınımsızdır.

**İspat:** Teorem 2.4 te kullanılan benzer bir yaklaşımla ispat yapılabilir. ■

**Teorem 2.6** (2.1) başlangıç değer probleminde  $a(t) \geq 0$  için,

$$b(t) = y(\beta(t))a(t) \quad (2.12)$$

ise (2.1) denkleminin tüm çözümleri salınımsızdır.

**İspat:** (2.12) eşitliği (2.1) probleminde yerine yazılırsa,  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için,

$$y'_n(t) + a(t)\{y_n(t)f(y_n(\theta_n)) - y_n(\theta_n)\} = 0 \quad (2.13)$$

denklemini elde edilir. (2.12) eşitliği (2.3) çözümünde yerine yazılırsa  $y_n(t)$  çözüm fonksiyonu,

$$y_n(t) = y_n(\theta_n) \left\{ L_n(\theta_n, t) + \int_{\theta_n}^t a(s) L_n(s, t) ds \right\} \quad (2.14)$$

olarak bulunur. Burada,

$$\begin{aligned} \int_{\theta_n}^t a(s) L_n(s, t) ds &= \int_{\theta_n}^t a(s) e^{f(y_n(\theta_n)) \int_t^s a(k) dk} ds \\ &= \frac{1}{f(y_n(\theta_n))} \{1 - L_n(\theta_n, t)\} \end{aligned}$$

olduğundan bu eşitlik (2.14) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$y_n(t) = y_n(\theta_n) \left\{ L_n(\theta_n, t) + \frac{1}{f(y_n(\theta_n))} [1 - L_n(\theta_n, t)] \right\} \quad (2.15)$$

olur. Bu durumda,

**1.Durum:**  $y_n(\theta_n)$  pozitif iken  $f(y_n(\theta_n)) > 0$  olacağından  $0 < L_n(\theta_n, t) \leq 1$  olur. Dolayısıyla,  $0 \leq 1 - L_n(\theta_n, t)$  olup  $y_n(t) > 0$  olduğu görülür. O halde,  $t \in [\theta_n, \infty)$  değerlerinde  $y(t) > 0$  olacağından  $y(t)$  çözümü salınımsızdır.

**2.Durum:**  $y_n(\theta_n) < 0$  ise  $f(y_n(\theta_n)) < 0$  olduğundan  $1 \leq L_n(\theta_n, t)$  ve buradan  $1 - L_n(\theta_n, t) \leq 0$  olup  $y_n(t) < 0$  bulunur. Bu durumda,  $t \in [\theta_n, \infty)$  için  $y(t) < 0$  olduğundan  $y(t)$  çözümü salınımsızdır.

**3.Durum:**  $y_n(\theta_n) = 0$  ise,

$$y'_n(t) + a(t)y_n(t)f(0) = 0$$

olacağından  $t \in [\theta_n, \infty)$  aralığında çözüm  $y(t) = 0$  olup salınımsızdır. ■

**Teorem 2.7**  $a(t) > 0$  fonksiyonu için

$$y'(t) + (1 + y(t))f(y(\beta(t)))a(t) = 0 \quad (2.16)$$

tipindeki lojistik GPSADD denkleminde,

$$M \leq \frac{f(x)}{x} < \infty, \quad x \neq 0, \quad (2.17)$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} a(s) ds > \frac{1}{M} \quad (2.18)$$

ise (2.16) GPSADD'inin tüm çözümleri salınımlıdır.

**İspat:** Her  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için (2.16) GPSADD'inin çözümü,

$$y_n(t) = (y_n(\theta_n) + 1)P_n(\theta_n, t) - 1 \quad (2.19)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ekoloji teorisinden,  $t \geq 0$  için  $1 + y(t) > 0$  olur. (2.18) eşitsizliğinden  $0 < \varepsilon_1$  ve  $k_j > n > N > 0$  olmak üzere,

$$\int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} a(s)ds > \frac{1}{M} + \varepsilon_1 \quad (2.20)$$

olacak şekilde  $\{\theta_{k_j}\}$  dizisi vardır.

**1.Durum:** Tüm  $n > N_1 > 0$  ve  $t \in [\theta_n, \infty)$  değerleri için  $y(t) > 0$  olacak şekilde  $N_1$  doğal sayısı var olsun. Bu durumda  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için,

$$y'_n(t) = -(1 + y_n(t))f(y_n(\theta_n))a(t) \leq 0$$

olup  $y_n(t)$  çözümü azalandır.  $k_j > \max\{N, N_1\}$  için (2.16) denkleminin her iki tarafının  $\theta_{k_j}$  den  $\theta_{k_j+1}$  e kadar integrali alınırsa,

$$\begin{aligned} \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} y'(s)ds &= - \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y(s))f(y(\beta(s)))a(s)ds \\ y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) - y_{k_j}(\theta_{k_j}) &= -f(y_{k_j}(\theta_{k_j})) \left\{ \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y(s))a(s)ds \right\} \\ y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) &= y_{k_j}(\theta_{k_j}) - f(y_{k_j}(\theta_{k_j})) \left\{ \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y(s))a(s)ds \right\} \\ y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) &\leq y_{k_j}(\theta_{k_j}) - My_{k_j}(\theta_{k_j}) \left\{ \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y(s))a(s)ds \right\} \\ y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) &< y_{k_j}(\theta_{k_j}) \left\{ 1 - M \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y_{k_j}(\theta_{k_j+1}))a(s)ds \right\} \end{aligned}$$

elde edilir.  $y(t)$  pozitif olduğundan,

$$\int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} a(s)ds < \frac{1}{M(1 + y_{k_j}(\theta_{k_j+1}))} < \frac{1}{M}$$

elde edilir. Bu ise (2.18) koşulu ile çelişir.

**2.Durum:** Tüm  $n > N_2 > 0$  ve  $t \in [\theta_n, \infty)$  değerleri için  $y(t) < 0$  olacak şekilde  $N_2$  doğal sayısı var olsun.  $t \in [\theta_n, \theta_{n+1})$  için (2.1) GPSADD,

$$y'_n(t) = -(1 + y_n(t))f(y_n(\theta_n))a(t) \geq 0$$

olup  $y_n(t)$  çözümü artandır. Ekoloji teorisinden negative olmayan  $t$  değerleri için  $1 + y(t) > 0$  olduğundan  $-1 < y(t) < 0$  ve  $y(t)$  artan olduğundan üstten sınırlıdır. Bu durumda,  $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lambda \leq 0$  vardır.  $k_j \rightarrow \infty$  için

$$\lim_{k_j \rightarrow \infty} y(\theta_{k_j}) = \lambda \text{ ve}$$

$k_j > N_3 = \max\{N, N_2\}$  olmak üzere (2.16) denkleminin her iki tarafının  $\theta_{k_j}$  den  $\theta_{k_j+1}$  e kadar integrali alınırsa,

$$\begin{aligned} \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} y'(s) ds &= - \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y(s))f(y(\beta(s)))a(s) ds \\ y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) &= y_{k_j}(\theta_{k_j}) - f(y_{k_j}(\theta_{k_j})) \left\{ \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y(s))a(s) ds \right\} \\ y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) &\geq y_{k_j}(\theta_{k_j}) - M y_{k_j}(\theta_{k_j}) \left\{ \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y(s))a(s) ds \right\} \\ y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) &> y_{k_j}(\theta_{k_j}) \left\{ 1 - M \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y_{k_j}(\theta_{k_j+1}))a(s) ds \right\} \end{aligned}$$

elde edilir. Burada hipotezden dolayı,

$$M \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y_{k_j}(\theta_{k_j+1}))a(s) ds < 1$$

olmalıdır. Böylece,

$$\int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} a(s) ds < \frac{1}{M(1 + y_{k_j}(\theta_{k_j+1}))} \quad (2.21)$$

olur.

(i)  $\lambda = 0$  olsun. Böylece,  $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0$  olup (2.21) eşitsizliğinden,

$$\limsup_{k_j \rightarrow \infty} \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} a(s) ds < \limsup_{k_j \rightarrow \infty} \frac{1}{M \left( 1 + y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) \right)} = \frac{1}{M}$$

bulunur ve bu (2.18) varsayımı ile çelişir.

(ii)  $\lim_{n \rightarrow \infty} y(t) = \lambda < 0$  olsun. Böylece,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (1 + y(t)) = 1 + \lambda > 0$$

$$\lambda > -1$$

olup  $0 < \varepsilon < \min\{1 + \lambda, -\lambda\}$  olmak üzere  $n > N_4 > 0$  olduğunda  $t \geq \theta_n$  için,

$$\lambda - \varepsilon < y(t) < \varepsilon + \lambda < 0$$

sağlanacak şekilde  $N_4 > 0$  tam sayısı mevcuttur. O halde,

$$0 < 1 + \lambda - \varepsilon < 1 + y(t) < 1 + \varepsilon + \lambda$$

$$0 < -\lambda - \varepsilon < -y_n(\theta_n) < \varepsilon - \lambda$$

olup buradan,

$$0 < -(\varepsilon + \lambda)(1 + \lambda - \varepsilon) < -y(\theta_n)(1 + y(t)) < (1 + \varepsilon + \lambda)(\varepsilon - \lambda)$$

elde edilir.  $k_j > \max\{N_4, N_3\}$  olmak üzere (2.16) denkleminin her iki tarafının

$\theta_{k_j}$  den  $\theta_{k_j+1}$  e kadar integrali alınırsa,

$$\int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} y'(s) ds = - \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y(s)) f(y(\beta(s))) a(s) ds$$

$$y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) = y_{k_j}(\theta_{k_j}) - f(y_{k_j}(\theta_{k_j})) \left\{ \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y(s)) a(s) ds \right\}$$

$$y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) > y_{k_j}(\theta_{k_j}) - M \left\{ \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (1 + y_{k_j}(s)) y_{k_j}(\theta_{k_j}) a(s) ds \right\}$$

$$> y_{k_j}(\theta_{k_j}) - M \left\{ \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} (\varepsilon + \lambda)(1 + \lambda - \varepsilon) a(s) ds \right\}$$

$$> y_{k_j}(\theta_{k_j}) - M(\varepsilon + \lambda)(1 + \lambda - \varepsilon) \left\{ \int_{\theta_{k_j}}^{\theta_{k_j+1}} a(s) ds \right\}$$

eşitsizliği bulunur. (2.20) eşitsizliğinden,

$$y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) > y_{k_j}(\theta_{k_j}) - M(\varepsilon + \lambda)(1 + \lambda - \varepsilon) \left\{ \frac{1}{M} + \varepsilon_1 \right\}$$

$y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) > y_{k_j}(\theta_{k_j}) - (\varepsilon + \lambda)(1 + \lambda - \varepsilon)\{1 + M\varepsilon_1\}$   
elde edilir. Burada,  $y_{k_j}(\theta_{k_j}) < \varepsilon + \lambda < 0$  ve  $y(t)$  azalan olduğundan  $\varepsilon_1 > 0$  sayısı için  $y_{k_j}(\theta_{k_j+1}) > 0$  eşitsizliğini sağlayan bir  $k_j > \max\{N_4, N_3\} > 0$  sayısı bulunabilir. Bu ise  $y(t) < 0$  kabulü ile çelişir. O halde, Teorem 2.7 nin koşulları altında (2.16) GPSADD'inin tüm çözümleri salınımlıdır. ■

**Sonuç 1:** (2.16) lojistik GPSADD'inde  $f(x) = x$  olarak alınırsa,  

$$y'(t) + (1 + y(t))y(\beta(t))a(t) = 0 \quad (2.22)$$

denklemini için,

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} a(s)ds > 1$$

ise (2.22) denkleminin tüm çözümleri salınımlıdır.

**Sonuç 2:** (2.16) denkleminde  $a(t) = a > 0$  sabit ve  $\theta_{n+1} - \theta_n = k_n \rightarrow k$  olsun. Bu durumda,

$$y'(t) + a(1 + y(t))f(y(\beta(t))) = 0 \quad (2.23)$$

denkleminde  $k > \frac{1}{Ma}$  ise (2.16) denkleminin tüm çözümleri salınımlıdır.

## ÖRNEKLER VE SİMÜLASYON GÖSTERİMLERİ

**Örnek 1:**  $\{\theta_n\}$  artan reel değerli bir sayı dizisi olsun.  $\theta_n = \frac{3n}{4}$  olarak tanımlansın.

$$\begin{aligned} y'(t) + 2y(t)y(\beta(t))\cos^2 y(\beta(t)) &= t^2 + 1 \\ y(\theta_0) &= 1 \end{aligned} \quad (2.24)$$

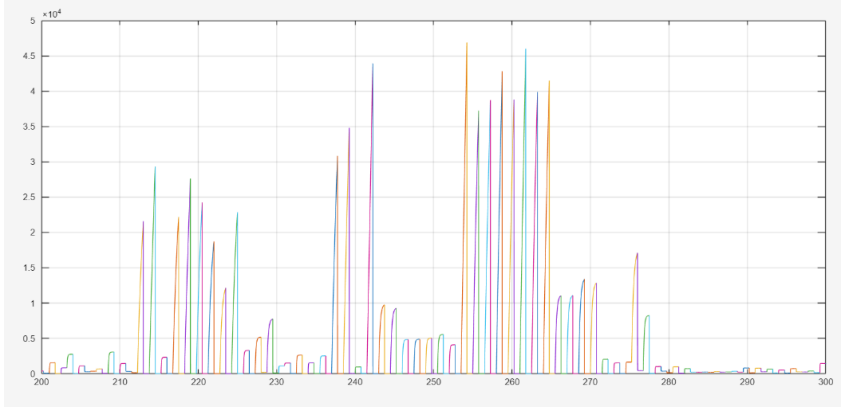
diferansiyel denkleminde,

$$f(x) = x\cos^2 x, \quad xf(x) > 0; \quad a(t) = 2; \quad b(t) = t^2 + 1,$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} a(s)ds = \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\frac{3n}{4}}^{\frac{3(n+1)}{4}} 2ds = \frac{3}{2} < \infty,$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} b(s)ds = \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\frac{3n}{4}}^{\frac{3(n+1)}{4}} (s^2 + 1)ds = \infty$$

olduğundan Teorem 2.4 e göre (2.24) denkleminin çözümleri salınımsızdır. (2.24) ün salınımsızlığı Şekil 1 ile gösterilmektedir.



Şekil 1. (2.24) GPSADD'nin salınımsızlığını gösteren simülasyon

**Örnek 2:**  $\theta_n = \frac{n}{5}$  olarak verilsin.

$$y'(t) + \frac{1}{t^2} y(t) \left( \frac{y(\beta(t))}{y^2(\beta(t)) + 1} \right) = e^t \quad (2.25)$$

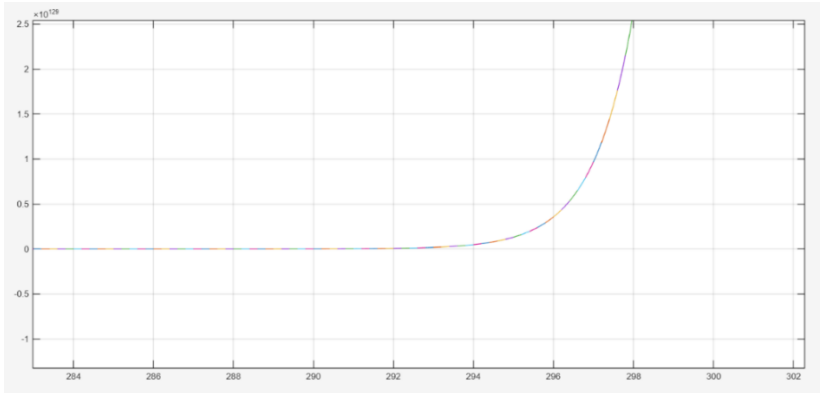
$$y(\theta_0) = 10$$

GPSADD için,  $f(x) = \frac{x}{x^2+1}$ ,  $xf(x) > 0$ ;  $a(t) = \frac{1}{t^2}$ ;  $b(t) = e^t$ ,

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} a(s) ds = \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} \frac{1}{s^2} ds = \limsup_{n \rightarrow \infty} \left[ \frac{-1}{s} \right]_{3n+4}^{3n+7} = 0,$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} b(s) ds = \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} e^s ds = \limsup_{n \rightarrow \infty} e^{3n} (e^7 - e^4) \rightarrow \infty$$

olduğundan (2.25) denklemi Teorem 2.4 e göre salınımsızdır. (2.25) GPSADD'inin salınımsızlığını gösteren simülasyon Şekil 2 ile verilmiştir.



Şekil 2. (2.24) GPSADD'inin salınımsızlığını gösteren simülasyon

**Örnek 3:**  $\theta_n = \frac{n}{5}$  olarak verilsin.

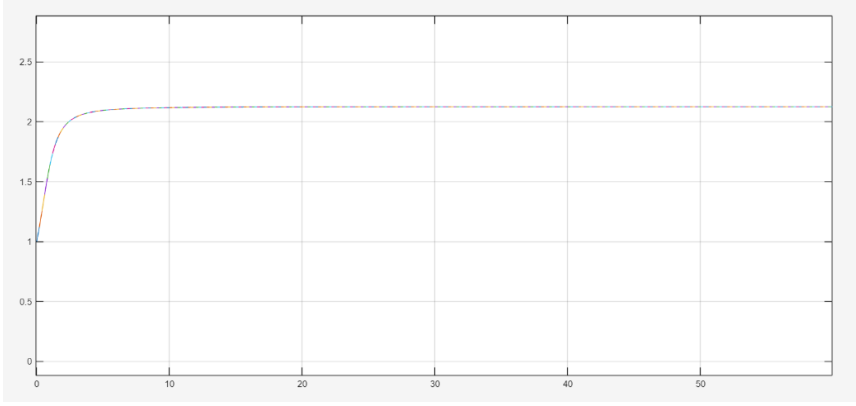
$$y'(t) + \frac{1}{t^3 + 1} y(t) y(\beta(t)) e^{-y(\beta(t))} = \frac{y(\beta(t))}{t^3 + 1} \quad (2.26)$$

$$y(\theta_0) = 1$$

diferansiyel denklemi verilsin. Burada,

$$f(x) = x e^{-x}, \quad x f(x) > 0; \quad a(t) = \frac{1}{t^3 + 1}; \quad b(t) = a(t) y(\beta(t))$$

olup (2.26) GPSADD'i Teorem 2.6 ya göre salınımsızdır. (2.26) GPSADD'nin salınımsızlığını gösteren simülasyon Şekil 3 ile verilmiştir.



Şekil 3. (2.26) GPSADD'inin salınımsızlığını gösteren simülasyon

**Örnek 4:**  $\theta_n = \frac{n}{5}$  olarak verilsin.

$$y'(t) + 7(1 + y(t))y(\beta(t))(3 + \sin y(\beta(t)) + \cos y(\beta(t))) = 0 \quad (2.27)$$

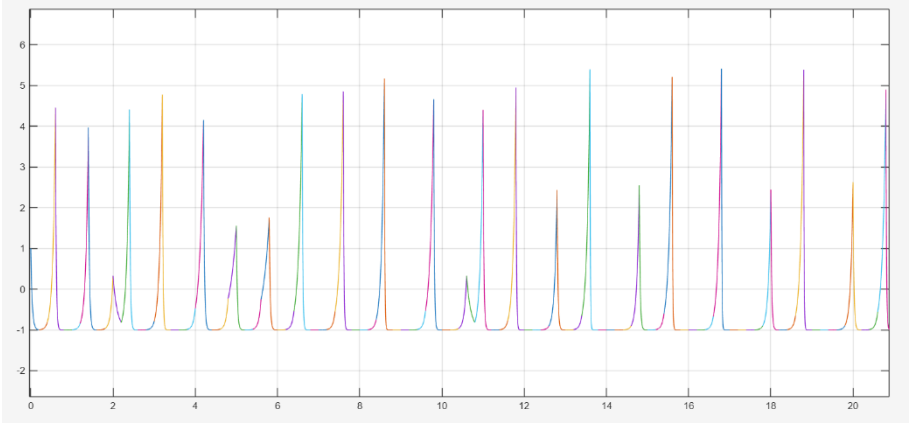
$$y(\theta_0) = 10$$

GPSADD için,  $f(x) = x(3 + \sin x + \cos x)$ ,  $x f(x) > 0$ ;  $a = 7$ ,

$$\frac{f(x)}{x} = 3 + \sin x + \cos x > 3 - \sqrt{2} = M \sim 1.59,$$

$$\theta_{n+1} - \theta_n = \frac{1}{5} = k > \frac{1}{7(3-\sqrt{2})} = \frac{1}{Ma} \text{ olup Sonuç 2 ye göre (2.26)}$$

GPSADD'i salınımlıdır. (2.27) GPSADD'inin salınımlılığını gösteren simülasyon grafiği Şekil 4 ile verilmiştir.



Şekil 4. (2.27) GPSADD'nin salınımlılığını gösteren simülasyon

**Örnek 5:**  $\theta_n = \frac{n}{5}$  olarak verilsin.

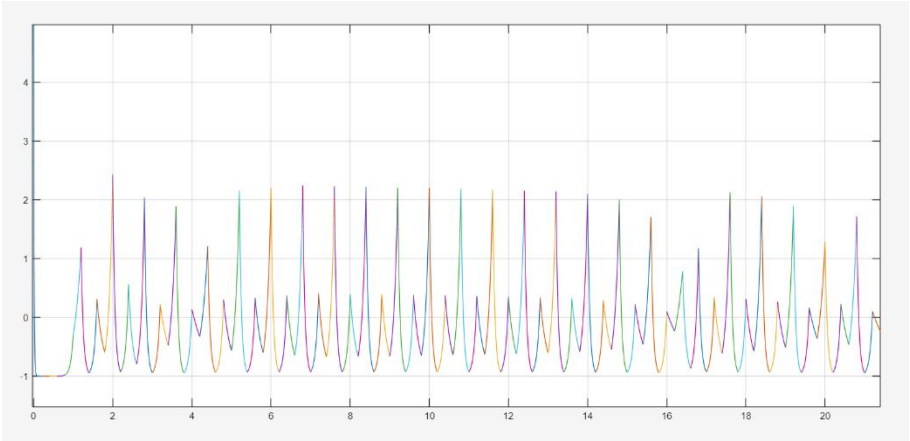
$$y'(t) + \frac{6t+7}{t+1} (1 + y(t)) y(\beta(t)) (2 + \cos y(\beta(t))) = 0 \quad (2.28)$$

$$y(\theta_0) = 5$$

GPSADD'i verilsin. Burada,  $a(t) = \frac{6t+7}{t+1}$ ;  $f(x) = x(2 + \cos x)$ ;

$$\frac{f(x)}{x} = 2 + \cos x > 1 = M; \quad \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} \frac{6s+7}{s+1} ds = \frac{6}{5} > 1$$

olup Teorem 2.7 ye göre (2.28) GPSADD'i salınımlıdır. (2.28) GPSADD'inin salınımsızlılığı Şekil 5 ile verilen simülasyonda görülmektedir



Şekil 5. (2.28) GPSADD'inin salınımsızlılığını gösteren simülasyon

## SONUÇ

Bu çalışmada, argüman fonksiyonunun belirli aralıklarda sabit kaldığı ve sistemin geçmiş zamandaki değerlerinin mevcut durumu etkilediği dinamik sistemlerin modellenmesinde kullanılan GPSADD'lerin birinci mertebeden,

$$y'(t) + a(t)y(t)f(y(\beta(t))) = b(t)$$

formunun çözümlerinin salınım/salınımsızlık kriterlerini belirlemeye yönelik incelemeler yapılarak bazı teorik sonuçlar çıkarılmıştır. Ayrıca, birinci mertebe lojistik diferansiyel denklemlerinden olan,

$$y'(t) + a(t)(1 + y(t))f(y(\beta(t))) = 0$$

tipindeki GPSADD'nin de çözümlerinin salınım davranışı incelenmiştir.

Ortaya konulan teorik sonuçların geçerliliği üzerine bazı örnekler verilmiş ve verilen örnekler görsel simülasyonlar ile desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA

- Aftabizadeh, A. R., J. Wiener, ve J.-M. Xu. «Oscillatory and periodic solutions of Delay differential Equations With Piecewise Constant Argument.» *Proceedings of the American Mathematical Society* 99, no. 4 (1987): 673-679.
- Aftabizadeh, A. R., ve J. Wiener. «Differential Equations Alternately of Retarded and Advanced Type.» *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 129, no. 1 (1988): 243-255.
- Akhmet, M. U. «Integral manifolds of differential equations with piecewise constant argument generalized type.» *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* (Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications) 66, no. 2 (2007): 367-383.
- Akhmet, M.U. «Stability of Differential Equations with Piecewise Constant Arguments of Generalized Type.» *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* 68, no. 4 (2008): 794-803.
- Busenberg, S., ve K. Cooke. «Models of Vertically Transmitted Diseases With Sequential-Continuous Dynamics.» *Nonlinear phenomena in mathematical sciences* (Academic press), 1982: 179-187.
- Chiu, Kuo-Shou , ve Tongxing Li. «Oscillatory and periodic solutions of differential equations with piecewise constant generalized mixed arguments.» (Mathematische Nachrichten) 292, no. 10 (2019): 2153-2164.
- Chiu, Kuo-Shou, ve Jyh-Cheng Jeng. «Stability of oscillatory solutions of differential equations with general piecewise constant arguments of mixed type.» (Mathematische Nachrichten) 288, no. 10 (2015): 1085-1097.

- Chiu, Kuo-Shou, ve Manuel Pinto. «Periodic solutions of differential equations with a general piecewise constant argument and applications.» *Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations*, no. 46 (2010): 1-19.
- Cooke, K. L., ve J. Wiener. «Retarded Differential Equations with Piecewise Constant Delays.» *Journal of Mathematical Analysis and Application* 99, no. 1 (1984): 265-297.
- Györi, I., ve G. Ladas. «Linearized Oscillations for Equations with Piecewise Constant Arguments.» *Differential and Integral Equations* 2, no. 2 (1989): 123-131.
- Jaros, J., ve I. P. Stavroulakis. «Oscillation Tests for Delay Equations.» *Rocky Mountain Journal of Mathematics* 29, no. 1 (1999): 197-207.
- Shah, S. M., ve J. Wiener. «Advanced Differential Equations With Piecewise Constant Argument Deviations.» *Internat. J. Math. & Math. Sci.* 6, no. 4 (1983): 671-703.
- Wiener, Joseph. *Generalized Solutions of Functional Differential Equations*. Singapore: World Scientific , 1993.
- Zhang, B.G., ve N. Parhi. «Oscillatory and Nonoscillatory Properties of First Order Differential Equations with Piecewise Constant Deviating Arguments.» *Journal of Mathematical Analysis and Applications* (JOURNAL OF MATHEMATICAL ANALYSIS AND APPLICATIONS), no. 139 (1989): 23-35.



# **İhtiyohelmintolojide Preparasyon Teknikleri**

**Mehmet Oğuz ÖZTÜRK<sup>1</sup>**

1- Prof. Dr.; Afyon Kocatepe University, Science and Literature Faculty, Department of Molecular Biology and Genetics, Afyonkarahisar, Turkey [oozturk@aku.edu.tr](mailto:oozturk@aku.edu.tr) ORCID No: 0000-0001-7263-3585

## ÖZET

Helmintlerin preparasyonuna ilişkin yöntemler, taksonomik inceleme, morfolojik analiz, moleküler çalışma, canlı gözlem ve benzeri çalışmanın türüne göre değişkenlik gösterir. Bu çalışmada helmint örneklerinin toplanması, işlenmesi, fiksasyonu, saydamlaştırma, boyanması ve mikroskopik incelemeye hazırlanmasına yönelik yaygın olarak kullanılan temel prensipler detaylı olarak anlatılmıştır. Helmintlerin bozulmadan korunması için uygun fiksatifler kullanılmalıdır. Türün yapısal özelliklerine göre Asit alkol, Nötral formalin, Carnoy solüsyonu, 70–80% etanol gibi farklı solüsyonlar tercih edilir. Mayer's hematoxylin veya Mayer's carmalum helmintler için en iyi boyalardır. Bir diğeri de Malzacher's tekniği boyamadır. Bu teknik iç organları birbirinden belirgin bir şekilde ayırtmaya yarar. Büyük helmintlerde büzülme ve katlanma eğilimi vardır. Bu durumu önlemek için fizyolojik su ortamında buzlu suda veya buzdolabında birkaç saat bekletilir. Diğer metot helmintleri oda sıcaklığında %5-10'luk etil alkolde bekletmektir. Orta büyüklükteki helmintler bir cam çubuk yardımı ile ılık suda veya seyreltik fiksatif içinde döndürülerek gevşetilir. Bunun sonucunda parazit kolayca uzar. Büyük helmintler ilgili ortama bırakılmadan önce en geniş yerinden kesilirse parazit daha rahat gevşeyecektir. Helmintlerin kistleri suni yolla patlatıldıktan sonra canlı kistler konaktan dikkatli bir şekilde alınarak fizyolojik suya bırakılır. Her bir kist, kist çeperinden kurtarılır. Üzeri kistli olan numuneler tuzlu su solüsyonuna da bırakılır. Örnekler genellikle burada 20 saniye içinde hareketlenme gösterirler. Daha sonra küçük helmintlere uygulanan yöntemler takip edilir. Helmintler her zaman daimi preperat haline getirilmezler. Küçük örnekler gliserol-jel ile preparasyona tabi tutulur. Büyük numuneler gliserolde muhafaza edilir, çalışma zamanı ise lam üzerine bir miktar gliserol damlatılarak incelenir.

*Anahtar Kelimeler –İhtiyohelminтологи, Konak, Parazit, Pisces, Preparasyon*

---

## GİRİŞ

Sucul ekosistem üyelerinden balıklarda parazit yaşam gösteren helmintler, trematodlar, sestodlar, nematodlar ve akantosefalalar olmak üzere dört ana gruba ayrılır. Trematodlar olgun ve metaserkarya evresinde konaklarının deri, solungaç ve iç organlarda yerleşerek patoloji oluşturur. Sestodlar çoğunlukla balıkların bağırsak lümeninde yaşayan erişkin evreleri ile özgünlük gösterir. Nematodlar konakların bağırsak lümeni, vücut boşluğu ve kas dokularında parazitlenme yapar. Akantosefalalar da benzer şekilde genellikle bağırsakta bulunurlar (Roberts vd. 2024).

İhtiyohelminтологи çalışmalarında helmintlerinin doğru tanımlanması anatomik ve morfolojik yapıların doğru olarak gözlenmesine bağlı

olduğundan uygun yöntemlerle uygulanan preparasyon teknikleri helmint tanımlamasının esasını teşkil eder. Trematod, sestod, nematod ve akantosefal taksonlarına ait ihtiyohelminthlerin tanımlanması sürecinde fiksasyon, şaydamlaştırma, boyama ve daimi preparat haline getirme işlemleri önem arz eder. Zamanında ve doğru uygulama ile etil alkol, sıcak formalin ve AFA fiksatifleri helmitlerin bozulmasını önleyen fiksatiflerdir. Hematoksilin, Giemsa, –Karmalaun gibi boyaların türlere özgü anatomik ayrıntıları belirginleştirmesi, tanıyı önemli ölçüde kolaylaştırır. Ayrıca nematod ve akantosefal örneklerinde laktifenol veya gliserin-jelatinle şeffaflaştırma, kutikula, proboskis kancaları ve genital yapılar gibi ayırt edici karakterlerin net görünmesini sağlar. Bu nedenle uygun preparasyon prosedürü hem morfolometrik analizlerin güvenilirliği hem de taksonomik doğruluk açısından vazgeçilmezdir (Janovy ve Esch 2016, Woo ve Buchmann 2012).

Bu çalışmanın amacı, balık helmintlerinin doğru ve güvenilir biçimde tanımlanabilmesi için uygulanan yöntemlerin açıklanması ve bu tekniklerin anatomik-morfolojik özelliklerin belirgin şekilde ortaya çıkmasına katkı yapmaktır. Çalışmada, helmint taksonlarındaki örneklerin fiksasyon, şaydamlaştırma, boyama ve daimi preparat haline getirme metotları ele alınarak trematod, sestod, nematod ve akantosefal gruplarında tür düzeyinde ayırt ediciliği artıran yöntemler belirlenmiştir. Böylece helmit örneklerinin ait olduğu taksonomik doğruluğu ortaya çıkarmanın yanısıra helmintolojik çalışmalarda tekrarlanabilir yöntemler oluşturacak uygun bir preparasyon metodolojisi hedeflenmiştir.

### **Monegenean Helmintlerin Preparasyon Teknikleri**

Monogenea'lar deniz ve tatlı su balıklarının solungaç ve kloak boşluklarında, deri ve solungaçlarında, ağız içinde, amfibilerin üriner sistemlerinde ve çok seyrek olarak reptillerde bulunur.

### **Monogenlerin Toplanması, Gevşetilmesi, Kurban Edilmesi ve Fiksasyonu**

Küçük balıklar, amfibiler, yüzgeçler veya solungaçlar ve solungaçların her biri diğerinden ayrılmalıdır ve 1:4000 formol içine konulmalıdır. Ya da monogenlerin gevşek ve rahat düz konumlu olmaları ve çoğunlukla parazitlere sıkıca yapışan mukusun oluşumunu önlemek için, balığın tümü yada solungaçları 6–24 saat dondurulur. Daha sonra ağız kapaklı küçük şişe veya kavanoz içindeki balık ya da solungaçlar 1 dakika hızlı bir şekilde çalkalanır. Veya izole edilen monogenler, solungaçlar, balığın veya amfibinin tamamı 1/3 oranında tuzlu suya veya deniz suyuna yerleştirilir. Kapaklı kavanozda birkaç dakika boyunca hızlıca çalkalanır. Daha sonra 250 ml suya 1 gram chloretan karışım hazırlanarak tekrar birkaç dakika hızlı bir biçimde çalkalanır.

Yukarıdaki yöntem takip edildikten sonra, karışım yayvan bir kap içine boşaltılır, monogenlerin dibe çökmesi için birkaç dakika beklenir. Daha

sonra sıvının üzerinde yüzen yabancı partiküller alınır. Geri kalan inceleme sedimenti bir petri kutusuna dökülür ve disseksiyon mikroskobu altında helmint arama yapılır. Bulunan monogenler bir pipet ile alınıp AFA çözeltisi içine bırakılır.

### **Depolama, Saydamlaştırma ve Preparasyon**

Monogenler küçük helmintler oldukları için, bir veya iki saat içinde fiksatifte tutulduktan sonra %70'lik etil alkol içine alınabilir. Monogenealar gliserol-jel ortamında genellikle boyanmadan incelenirler. Preparasyon için Gerekli malzemeler: 45 °C sıcaklıkta su banyosu, yapıştırıcı aplikatör gliserin jeli, lam, 18 mm veya 22mm lamel, Kanada balsamı.

Jel eriyinceye kadar gliserol-jel şişesini sıcak su banyosuna yerleştirilir. Jel aşırı ısıtılırsa katılaşamayan kolloide dönüşür ve jel harap olur. Lam üzerine bir damla gliserin jel konur, numunenin pozisyonu ayarlanır ve örtücü lamel ile kapatılır. Preparasyon soğumaya ve katılaşmaya bırakılır, lamel kenarındaki fazla jel kazınır. Sıcak bir plak üzerinde ısıtılan lam, lamelin kalkmasına veya numunenin rotasyonuna imkân sağlar, fakat küçük monogenler bu süreçte kolay kırılabilir, bu nedenle dikkatli olunmalıdır. Bu aşamada dikkat edilecek birkaç önemli kurallar da şunlardır. Sudan ya da % 70 lik alkolden nakledilen numuneler gliserol yada diğer sıvı ortamda inceleneceği zaman absölü alkole alınmamalıdır. Çok yüksek osmotik basınca sahip gliserollü ortam, fiske edilmiş numunelerde bile çekme ve büzülmelere neden olabilir. Bu nedenle nazik kırılğan objeler gliserolün orta dilitasyonlu ortamından geçirilmelidir. Numune eğer gliserol-jelde incelenirse soğuk ve karanlık yerde tutulmamalıdır, çünkü gliserol-jel sıvılaşabilir ve lamdan akabilir.

Monogenean helmintlerin daimi preparasyonu için aşağıdaki teknikler kullanılır: Isıtılmış bir plakanın üzerine geniş bir örtü lameli yavaşça sürülerek yerleştirilir. Örtü lamelinin ortasına bir damla erimiş jel damlatılır ve jelin ortasına numune bırakılır. Küçük lamel preparasyon için üste konur. Parçaların soğuyarak birleşmesi sağlanır ve bir gece boyunca oda sıcaklığında jel katılaşmaya bırakılır. Lamel kenarındaki fazla jel kazınır. Bir lamın merkezine bir damla balsam konur. Çift lamelli asamble çevrilerek büyük lamel üste getirilir ve balsam damlası üzerine bırakılır. Balsam yavaşça geniş lamele doğru yayılıp, materyali etkili şekilde daimi olarak kapatmasına izin verilir. Preparatlar birkaç hafta oda sıcaklığında kurutulmalıdır.

### **Digenean Helmintlerin Preparasyon Teknikleri**

Digeneaların gelişim safhaları olan sporokist, redi ve serkaria evreleri molluskalarda görülür. Metaserkaria, birçok vertabrata ve invertabralalarda yaygındır. 1-3 haftalık periyottan sonra yetişkin formuna gelen olgun digenealar birçok organlara bulaşabilmelerine rağmen en yaygın şekilde balıkların ve vertabratların bağırsaklarında bulunurlar.

## **Olgun Digeneaların Toplanması, Kurban Edilmesi ve Fiksasyonu**

Genelde digenealar çok hassastır. Hemen sabit bir duruş alır ve daha sonra yumuşamayı önleyici hal alırlar. İyi bir sonuç için, onları canlıyken sabit hale getirmek gerekir. Dahili yapıda yumurtayla dolu digeneaları tanımlamak güç olabilir. Bunun için söz konusu canlılar birkaç dakika saf su içine konularak bir miktar yumurtanın dışarı çıkması sağlanabilir. Eğer 15 dakika içinde bir miktar yumurtayı çıkarmazlarsa damla damla Glacial Asetik Asit eklemek gerekir. Büyük digenealar buzlu suda veya soğutucuda soğutularak ayrıştırılır. Bu grup için en yaygın olarak kullanılan fiksatif AFA (30 ml Formalin, 250 ml Etil Alkol-%95, 20 ml Asetik Asit, 200 ml saf su) dır.

Fiksasyon için Yöntem: Örnekler fırça veya pipet yardımıyla alınıp fizyolojik su damlatılan lamın üzerine taşınır. Materyali dorsovental yönde tutup üzerine lamel kapatılır. Fizyolojik suyu kurutma kağıdı ile bir taraftan çekerken diğer taraftan fiksasyon sıvısı ilave edilir. Materyalin esneme derecesine göre basınç uygulanarak yassılaştırma işlemi yapılabilir. Yassılaştırma işlemi iç organların doğal şeklini bozduğu için yapılan ölçüm ve incelemeler gerçek sonuçları vermeyebilir. Bu nedenle materyal-metotta yassılaştırma işleminin yapılıp yapılmadığı mutlaka belirtilmelidir. Yassılaştırma işleminde 3 mm'den küçük örnekler için kağıt kiskacından yapılan basınç aleti uygulanabilir. Fiksatif süresi normalde 24 saattir. Bazı araştırmacılar ise örneklerle basınç uygulamadan kaynar olmayan sıcak su ile fikse etmektedir. Bunun için materyal, fizyolojik suyun içinde tutulur ve üzerine sıcak su eklenir, 1-2 saniye sonra soğuk fiksatife nakledilir. Digenea örneklerini kurban etmek ve gevşetmek için 50 santigrat derece sıcaklıktaki AFA kullanılabilir. Daha sonra soğuk %70 alkolde stoklanır.

## **Kist İçindeki Larval Digenealarda Fiksasyon İşlemi**

Digenea kistleri disseksiyon iğnesi ile yırtılıp patlatılır veya metaserkaria yada progenik ergin bireyin kisti, kist eritici kimyasallara maruz bırakılır. Bunun için kist %0.6 NaCl çözeltisi içine atılır ve oda sıcaklığında larva serbest kalıncaya kadar bekletilir. Kisti eritmek için bir diğer metot şudur: Kist, eritici solüsyon (10 kısım HCL-%0.3, 4 kısım Pepsin-%0.5) içine atılıp 30 dakika bekletilir. Daha sonra kist fizyolojik suda yıkanır. İçinde %0.5 Tripsin olan 7.8 pH değerindeki %0.85 lik NaCl ( $K_2HPO_4$ ) solüsyonunda 10 dakika tutulur. 1:20 000 oranında Streptomisin ilave edilen fizyolojik suda yıkanır.

## **Depolama ve Boyama**

Toplama numarası verilen materyal %70 etil alkol içinde muhafaza edilir. Mayer's hematoxylin veya Mayer's carmalum digenea'lar için en iyi boyadır. Bir diğeri de Malzacher's tekniğidir. Bu teknik iç organları birbirinden belirgin bir şekilde ayırtmaya yarar.

## **Sestod Helmintlerin Preparasyon Teknikleri**

Olgun sestodlar birçok vertebratların bağırsağında yaygın olarak bulunur. Proserkoid larvaları normalde crustacea'ların hemosolünde bulunur. Pleroserkoid larvaları balık ve yılanların kas dokusu, sölom, karaciğer ve benzeri organlarında yaygındır. Sistiserkoid larvaları genellikle crustacea, insekta, oligoket ve diğer invertebratlar ile nadir olarak vertebratların hemosöllerinde ve çeşitli organlarında yer alır.

## **Örnek Toplama ve Ayırıştırma**

Bazı larva türleri direkt olarak insana bulaşabildiği için, sestod larvaları çalışılırken dikkatli olunmalıdır. Bu yassı solucanların skolekslerini konaktan ayırırken de dikkatli olunmalıdır. Bunun için skoleks gömülü olduğu mukoza içinden kör bir skapel ile didiklenerek çıkarılır. Ya da skoleks gömülü bağırsak parçası kesilerek içinde fizyoloji su bulan ortama bırakılır ve soğutucuda veya oda sıcaklığında serbest kalıncaya kadar bekletilir.

Sestodlarda büzülme ve katlanma eğilimi vardır. Bu durumu önlemek için fizyoloji su ortamındaki sestodlar buzlu suda veya buzdolabında birkaç saat bekletilir. Diğer metot ise parazitleri oda sıcaklığında %5-10'luk etil alkolde bekletmektir.

Orta büyüklükteki sestodlar bir cam çubuk yardımı ile ılık suda veya seyreltik fiksatif içinde döndürülerek gevşetilir. Bunun sonucunda parazit kolayca uzayacaktır. Büyük sestodlar ilgili ortama bırakılmadan önce en geniş yerinden kesilirse parazit daha rahat gevşeyecektir.

## **Kurban Etmek ve Fiksasyon**

Yaygın fiksatifler AFA ve Bouin's çözeltileridir. Sestodlar gevşek hale getirildikten sonra şu işlemler yapılır: Küçük sestodlar, digenea grubu parazitlere benzer bir muamele yapılabilir. Bu süreçte skoleks ve strobila gövde ile birlikte dikkatlice alınmalıdır.

30 cm den büyük orta büyüklükteki sestodlar, fizyolojik su ortamlı cam kap içine bir lam konulur ve üzerine parazit uzatılır. Parazitin üzeri bir lamelle kapatılıp, lamın kenarından bir pipet yardımı ile fiksatif damlatılır. Bunun amacı yassı numuneler elde etmektir. Bu yüzden lamaların yüzmemesine dikkat edilmelidir. Numunelerin kurumasına izin verilmeden bu şekilde 35-40 dakika bekletilir. Daha sonra lamel alınıp, strobila 3-4 cm uzunluğunda kesilir ve fiksatifli bir petri kabına nakledilir.

Büyük numuneler, bir beher yada şişe etrafına sarılır, bu süreçte strobilanın üst üste gelmediğinden emin olunmalıdır. Sıcak fiksatif hızlıca numune üzerine dökülür. Daha sonra 3-4 cm uzunluğunda kesilen parçalar, içinde fiksatif olan bir petride birkaç saat veya bir gece bekletilir.

Isıtılan AFA dan çıkan alkol buharı kuvvetli bir yanıcıdır. Orta büyüklükteki sestodlar kaynama derecesinde olmayan (yaklaşık 75°C) sıcak su içine atılarak da kurban edilebilirler. Bunu takiben AFA veya Bouin's fiksatifleri ile fiksasyona tabi tutulurlar. Alternatif olarak, uzun bir lam üzerine

nemlendirilmiş kurutma kağıdı yayılır. Yumuşak bir fırça vasıtasıyla uzatılan sestodların üzerine ikinci bir lam örtülür. Lam tabakasının kenarlarından fiksatif dökülerek fiksasyon gerçekleştirilir. Örnekler daha sonra AFA ortamına alınır.

Larva safhasındaki sestodlara digenealar için uygulanan yöntem takip edilir. Sestodların kistleri suni yolla patlatıldıktan sonra canlı kistler konaktan dikkatli bir şekilde alınarak fizyolojik suya bırakılır. Her bir sistiserkus, kist çeperinden kurtarılır. Üzeri kistli olan numuneler tuzlu su solüsyonuna da bırakılabilir. Örnekler genellikle burada 20 saniye içinde hareketlenme gösterirler. Daha sonra küçük digenealara uygulanan prosedür takip edilir. Ayrıca, sestodları toplama ve preparasyon aşamasında acele edilmemelidir. Konağı sindirim borusu ve muhtevası %10 formolde muhafaza edilmelidir.

### **Depolama, Boyama ve Kapama**

Örnekler, içinde %70 alkol bulunan şişelere konulur. Sestodlara genel boyama prosedürü uygulanır. Boya olarak Mayer's carmalum ve Semichon's aceto-carmin gibi karmin boyaları sestodlar için kullanılan uygun boyalardır. Bir diğer boyama metodu Malzacher's tekniği olup, sestodların çeşitli organlarının birbirinden belirgin bir şekilde ayrıtılmasında kullanılır.

Bir lamin sağ tarafının 2/3 lük kısmına viskos balsam sürülür. Sestodlar lama paralel sıralar halinde bırakılır. Balsam sestod parçaları boyunca dökülür. Xylol ile yıkanan örtü lamelinin bir ucu kurutma kâğıdına dokundurularak fazla xylol uzaklaştırılır. Bunu takiben lamin sağ köşesine 45 °C açıyla yaklaştırılan lamel ile yavaşça laminin üzeri örtülür. Burada dikkat edilecek bir diğer husus, lam üzerine dökülen balsamın sestod parçaları ile lam-lamel arasını dolduracak kadar yeterli olmalıdır. Eğer sestod numuneleri çok kalın ise ince uzun küçük lam parçaları laminin kenarlarına veya sestod parçaları arasına örtü lamelini desteklemesi amacıyla yerleştirilir.

Sestodların kapatılması aşamasında, numune üzerindeki örtü lameli ve balsam kuruyuncaya kadar bazen sıkıştırma uygulaması gerekebilir. Bunun için kağıt atacısı kullanılabilir. Bu aşamada söz konusu kısıkların materyale zarar vermemesine dikkat edilmelidir.

### **Sestod Kancalarının Tanımlanması**

Kanca tanımlaması için en uygun kapama ortamı Berlese's ortamıdır. Bu solüsyon dokuları şeffaflaştırır. Skoleksin kapatılmasında veya preparasyonunda da Berlese's ortamı kullanılabilir, veya çift örtü lamel tekniği uygulanabilir.

### **Acantocephala Helmintlerin Preparasyon Teknikleri**

Ergin Acantocephala helmintleri vertebratların bağırsaklarında bulunurlar. Proboscis denen kancalı hortum istemli olarak çeperi içine gömülebilir. Acantocephallerin tanımlanmasında proboscis önemli yer tutar. Bu nedenle proboscis preparasyonda tamamen genişletilerek açılmalıdır. Kistik acantocephallerin preparasyonu olgun bireylerinkiyle aynıdır. Larval digen preparasyonunda digenealara uygulanan yöntem kullanılır.

## **Toplama, Kurban Etmek ve Hortumun Genleştilmesi**

Konaktan akantoccephalleri toplama sürecinde çok dikkatli olunmalıdır. Bu yüzden proboscis kancalarının deforme olmamasına dikkat edilmelidir. Olgun bireyleri toplamak için en güvenli prosedür, proboscisin gömülü olduğu bağırsak duvarının küçük kare şeklinde kesilmesi, daha sonra konak dokusunun diseksiyon iğnesi ile yardımıyla yırtılarak proboscisin serbest kalmasını sağlamaktır. Bu süreçte canlı olan parazitin hasar görmemesine dikkat edilmelidir.

Parazitler oda sıcaklığındaki veya soğuk musluk ya da distile suda ölünceye kadar bekletilir. Bunun için 48 saatten daha fazla bir süreye gereksinim duyulabilir. Büyük helmintler buzdolabına konulmalı ve belirli aralıklarla morfolojik durumu mikroskopuyla takip edilmelidir. Bu süreçte su parazitin içine osmozla girmesi sonucu artan iç basınçla proboscis dışarı çıkacaktır.

## **Fiksasyon ve Muhafaza**

Acantoccephaller stoklama için etil alkolle nakledilmeden önce yaklaşık 48 saat fiksatifte (AFA) bekletilmelidir. Fiksatif değişimine olanak sağlamak için vücudun orta bölümünden ve proboscis'in kaide kısmından böcek iğnesiyle birkaç delik açılmalıdır. Muhafaza için % 70 etil alkol ortamında tutulmalıdır.

## **Boyama ve Saydamlaştırma**

Küçük numuneler Mayer's hematoxylen veya Mayer's carmalum ile boyanmalıdır. Macracanthorhynchus sp gibi büyük örnekler boyanmaz ve lam üzerine konulup preparatı yapılamaz. Bunlar temizlendikten sonra gliserolde muhafaza edilmelidir.

Örnekleri saydamlaştırmak için aşağıdaki prosedür takip edilir. Önce petri kabına yeterli miktarda saydamlaştırma ajanı doldurulur. Daha sonra yeterli miktarda absolu alkol bir pipet yardımı ile dikkatlice ilave edilir. Bu ortama numuneler bırakılır. Örnekler önce iki sıvının ortak yüzeyi arasında yüzeceklerdir. Derece derece sıvıdaki karışım arttıkça örnekler alt tabakaya doğru batır. Numuneler tamamen dibe çöktüğü zaman alkol pipetle çekilir. Absolu alkolden xylene götürülürken numunelerin kırılmaması için dikkatli olunmalıdır. Daha sonra örnekler daimi preparat yapılmadan önce yeni bir saydamlaştırma ajanına alınmalıdır.

## **Nematoda Helmintlerin Preparasyon Teknikleri**

Nematoda, helmint taksonları içinde en büyük şube özelliğine sahiptir. Parazit nematodlar birçok konağın organ sistemlerinde ya da dokularında kist halinde veya serbest olarak bulunabilir. Dairesel kasların yokluğu bu helmintlere karakteristik kamçılama hareketini verir. Formalin içine atıldığı zaman parazitin halka şeklinde büzüldüğü gözlenir.

## **Toplama ve Gevşetmek**

Nematodları konaktan toplarken numunelerin ergin ya da juvenil olup olmadıklarını anlamak oldukça zordur. Fakat her ikisi içinde benzer yöntemler uygulanır. Nematodlar organların lümenlerinde çoğunlukla serbest olarak

bulunurlar ve buradan pipet ya da pens yardımıyla kolaylıkla toplanabilir.

Dokulardaki parazitler ise didiklenerek dışarı çıkarılır ya da doğal kistik konumunda fikse edilip seri kesitler alınarak incelenir. Kandaki mikrofilarialar kalın kan yayma tekniği ile hazırlanan preperatlardan tanımlanır. Bunlara kan protozoanlarına benzer yöntemler uygulanabilir.

Pek çok nematod nadiren gevşer. Gevşek halka şeklinde kıvrık olan parazitler %0,05 seyreltik Glasial Asetik Asitli ılık su içerisinde döndürülerek uzatılabilir. Küçük nematodlar ise üzerinde tuzlu su veya musluk suyu olan bir lamın ispiroto alevi üzerinde tutularak ısıtılması sonucu gevşetilebilir.

### **Kurban Etmek ve Fiksasyon**

Güzel bir çalışma örneği elde etmek için nematodlar mümkün olduğunca düzgün bir şekil alacak şekilde kurban edilmelidir. Bunu için kaynamaya yakın bir %70 etil alkol veya Looss's sıvısı kullanılır. Nematodları kurban etmek ve fiksasyon işlemi için bir diğer basit alternatif metot ise soğuk asetik asit kullanmaktır. Nematodların katikülü geçirgen değildir. Eğer nematodlar histolojik çalışmalar için kullanılacak ise anterior ve posterior kısımları kesildikten sonra fiksasyon sıvısında bekletilmelidir.

### **Saydamlaştırma**

Nematodlar 1/1 oranında %70 etil alkol / gliserol karışımı içerisine yerleştirilir. Ortamdaki gliserol oranı etil alkol buharlaştıkça derece derece artacaktır. Bu solüsyondaki gliserolün yüzdesi arttıkça örnekler yavaş yavaş saydamlaşacaktır.

Nematodlar fenol-alkolde de hızlı bir şekilde saydamlaşır. Bunun için bir kısım absolu alkol ve 4 kısım erimiş fenol kristali kullanılır. Bu solüsyon örnekleri hızlı şeffaflaştırmada kullanılır. Özellikle spikül gibi kutikül özellikli yapıların incelenmesinde yararlıdır. Solüsyon düşük sıcaklıkta kristalize olur, fakat bu durum ortama %5 kadar gliserol eklenerek önlenabilir. Depolama öncesi örneklerdeki fenölü uzaklaştırmak için %70 alkolle yıkanmalıdır.

Nematodları saydamlaştırmak için fenol alkol kullanmanın 3 önemli dezavantajı vardır: Solüsyon eğer ışığa maruz kalırsa kararır. Bu yüzden solüsyon kahverengi şişelerde depolanmalıdır. Geçici preperat yapılan materyaller çalışma zamanına kadar karanlık ortamı kutularda saklanmalıdır. Saydamlaştırma işlemi yapıldığı için bazı dokular hasara uğrayabilir. Örneğin bazı nematodların bağırsak hücreleri ve kutikülalarında şişme meydana gelebilir. Fenol alkolde saydamlaştırılan nematodlar boyama ve kesit için uygun değildir. Fenol alkol, güneş ışığı ile karama meydana geldiği için, laboratuvar çalışanı içinde hoş olmayan bir ortamdır. Hemen yıkanmadığı zaman deride yanma meydana getirir.

### **Boyama ve Depolama**

Örnekler saydamlaştıktan sonra etil alkol-gliserol karışımı içerisinde saklanabilir. Alkol depolanan örneklerde bakteri ve mantarların gelişmesini önler. Genellikle nematodlar boyanmaz fakat belirli yapıları için birkaç boyama metodu

vardır. Küçük nematodlar, canlı halde iken bulundukları ortamın içine nötral kırmızı gibi vital boyalar bırakılabilir.

Giemsa boyası ilave edilmiş PVA-Laktofenol, preperasyonun optik özelliğini artırır, nematodların iç yapısına bir renk verir. Çözeltiye atılacak boyanın miktarı, araştıracının tecrübesine göre kendisi tarafından ayarlanmalıdır. Bu boya ile spikül ve gubernakulum boyanır.

### **Daimi Preparasyon**

Nematodlar genellikle daimi preperat haline getirilmezler. Küçük örnekler gliserol-jel ile kapatılırlar. Büyük numuneler gliserolde muhafaza edilir, çalışma zamanı ise lam üzerine bir miktar gliserol damlatılarak incelenir. Nematodlardaki taksonomik çalışmalar için önemli olan sefalik yapıları incelemek için, canlının anterior kısmı kesilir, ağız açıklığı yukarı gelecek şekilde düzenleme yapılır ve örtü lameli ile kapatılır. Preparatlar doğrudan güneş ışığı almayan ortamda muhafaza edilir.

### **SONUÇ**

Bu çalışmada, balık helmintlerinin anatomik ve morfolojik yapılarına göre doğru tanımlanması için uygulanan preparasyon yöntemleri ortaya çıkarılmıştır. Helmintler için fiksatif maddelerin belirlenmesi, saydamlaştırma sürelerinin helmintlerin tür çeşitliliğine göre ayarlanması, boyama ve daimi preparasyon metotlarının tanımlanmış belirli bir adımlarla uygulanması, hem örneklerin yapılarının bozulmadan korunmasını hem de mikroskopik ayrıntıların net biçimde ortaya çıkmasına olanak sağladığı vurgulanmıştır. Bu yöntemlerin özellikle küçük boyutlu ve morfolojik ve anatomik olarak benzer türlerin ayırt edilmesinde güvenilir ve etkili bir üstünlük sağladığı belirtilmiştir.

### **REFERANSLAR**

- Janovy Jr, J., & Esch, G. W. (Eds.). (2016). A Century of Parasitology: Discoveries, Ideas and Lessons Learned by Scientists Who Published in The Journal of Parasitology, 1914-2014.
- Roberts, L. S., Janovy Jr, J. J., Nadler, S. A., Radev, V., & Gardner, S. L. (2024). Concepts in Animal Parasitology, Chapter 56: Strongyloidea and Trichostrongyloidea (Superfamilies): Bursate Nematodes.
- Woo, P. T., & Buchmann, K. (Eds.). (2012). Fish parasites: pathobiology and protection. Cabi Publishers.



# **Türkiye Florasında Ciğerotları(Marchantiophyta): Ekolojik Adaptasyonlar, Biyoçeşitlilik ve Biyoteknolojik Potansiyel**

**Özcan ŞİMŞEK<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dr.Öğr.Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniv. Yenice MYO, Ormancılık Bölümü.  
ozcansimsek@comu.edu.tr ORCID No:: 0000-0002-3210-7641

## ÖZET

Bu derleme çalışması, kara bitkilerinin evrimsel öncüleri olan ciğerotlarının (Marchantiophyta) Türkiye florasındaki ekolojik nişlerini, adaptasyon mekanizmalarını ve biyoteknolojik potansiyellerini bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Çalışmada; türlerin su, ışık ve substrat (epifitik, epilitik, vb.) tercihlerine dayalı habitat ekolojisi ve Mägdefrau sınıflandırmasına göre sergiledikleri yaşam formları, Türkiye’den güncel floristik veriler ışığında incelenmiştir. Ciğerotlarının poikilohidrik yapıları ve kuruma toleransı (desiccation tolerance) gibi fizyolojik stratejileri, iklimsel streslere karşı geliştirdikleri temel savunma mekanizmaları olarak detaylandırılmıştır. Ayrıca, kütikula yoksunluğu ve yüksek absorpsiyon kapasiteleri sayesinde hava ve su kirliliğinin izlenmesindeki "biyoindikatör" rolleri ile ağır metal birikimi (biyoakümülyasyon) özellikleri tartışılmıştır. Makale, ciğerotlarına özgü yağ cisimciklerinde (*oil bodies*) sentezlenen terpenoid ve aromatik bileşiklerin antimikrobiyal ve yara iyileştirici etkilerine dikkat çekerek, bu grubun farmasötik ve biyoteknolojik değerini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, Türkiye’nin zengin briyofit çeşitliliğinin sürdürülebilirliği için "Önemli Briyofit Alanları"nın (IBrA) belirlenmesi ve koruma biyolojisi çalışmalarının artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

*Anahtar Kelimeler – Marchantiophyta, Ekofizyoloji, Biyoindikatör, Sekonder Metabolitler, Ciğerotları*

---

## GİRİŞ

Karasal bitkilerin (Embryophyta) evrimsel tarihindeki en önemli dönüm noktalarından biri, sudan karaya geçiş sürecidir. Bu radikal geçişin öncüleri, günümüzde briyofitler olarak bilinen ve Kara yosunları (Bryophyta), Ciğerotları (Marchantiophyta) ile Boynuzotlarından (Anthocerotophyta) oluşan gruptur (Şimşek vd., 2016). Briyofitler, karasal ekosistemlerin şekillenmesinde kilit rol oynamış "bitkiler aleminin amfibileri" olarak nitelendirilebilir. Su içeriklerini aktif mekanizmalarla düzenleyemedikleri için "poikilohidrik" bir yapı sergilerler; metabolik aktiviteleri ve dolayısıyla habitat tercihleri, çevresel nem ve gölge gibi mikroklimatik koşulların sıkı kontrolü altındadır (Glime, 2017).

Briyofitler içinde, ciğerotları (Marchantiophyta) karasal bitkilerin en eski ve en bazal gruplarından biri olarak kabul edilir (Vanderpoorten &

Goffinet, 2009). Türkiye de dahil olmak üzere dünyanın birçok bölgesinde floristik araştırmaların odağında yer alan bu grup, önemli bir biyolojik çeşitlilik bileşenidir (Özenoğlu Kiremit vd., 2019; Sarıtaş & Gökler, 2023). Ciğerotlarını, daha sonra evrimleşen damarlı bitkilerden (Tracheophyta) ayıran temel özellik, haploit (n) kromozomlu ve fotosentetik gametofit evrenin baskın ve uzun ömürlü olmasıdır. Diploid (2n) sporofit ise kısa ömürlü olup tamamen gametofite bağımlıdır (Glime, 2017). Bu yaşam döngüsü, suya bağımlı üreme stratejisiyle birleştiğinde, türlerin dağılımını nemli mikrohabitatlarla sınırlayan temel bir faktördür (Vanderpoorten & Goffinet, 2009).

Ciğerotlarının ekolojisini ve dağılımını anlamak, onların anatomik ve fizyolojik kısıtlarını bilmeyi gerektirir. Kök, iletim demeti ve stoma gibi karmaşık yapılardan yoksun olmaları, su ve besin alımını doğrudan tallus veya yaprak yüzeyi üzerinden gerçekleştirmelerine neden olur; bu durum onları substratın fiziksel ve kimyasal özelliklerine (örn. doku, pH, nem tutma kapasitesi) karşı son derece hassas kılar (Glime, 2017; Şimşek, 2024). Ayrıca, hücrelerinde bulunan ve sekonder metabolitler içeren yağ cisimcikleri (oil bodies), bu grubu diğer briyofitlerden ayıran sinapomorfik bir özelliktir ve kimyasal savunmada rol oynar (Asakawa vd., 2013).

Sonuç olarak, ciğerotlarının habitat ve substrat seçimleri; su mevcudiyeti, ışık, sıcaklık ve özellikle substratın yapısı ile yakından ilişkilidir. Üremenin suya bağımlılığı, türleri genellikle nemli ve gölgeli alanlara yönlendirse de, farklı ekolojik koşullara adapte olmuş türler kurak ortamlardan sucul alanlara kadar geniş bir yelpazede görülebilmektedir (Şimşek, 2024; Uygur vd., 2022b). Türkiye, sahip olduğu farklı iklim kuşakları, topoğrafik yapısı ve jeolojik çeşitliliği ile ciğerotları için zengin bir habitat mozaïği sunmaktadır. Üç farklı fitocoğrafik bölgenin (Avrupa-Sibirya, Akdeniz, İran-Turan) kesişim noktasında bulunan Türkiye, bu iklimsel çeşitliliği ve buzul dönemlerinde sığınak (refugia) görevi görmesi nedeniyle, Güneybatı Asya ve Akdeniz Havzası briyofit çeşitliliği için kritik bir öneme sahiptir (Kürschner & Frey, 2020).

Son yıllarda Türkiye'de briyofit florasının belirlenmesine yönelik çalışmalar önemli bir artış göstermiş ve araştırmalar ülkenin farklı coğrafi bölgelerine yayılarak büyük bir ivme kazanmıştır. Erdağ ve Kürschner (2017) tarafından ortaya konan güncel kontrol listesinin ardından; Karadeniz ve Marmara bölgelerinin nemli orman, longoz ve kıyı ekosistemleri (Arslan vd., 2021; Çalışkan vd., 2019; Sarıoğlu & Keçeli, 2018; Şimşek & Ünal, 2022; Uslu & Keçeli, 2019; Uyar vd., 2020), Ege ve Akdeniz'in dağlık ve ormanlık alanları (Aslan vd., 2024; Çatak & Kırmacı, 2020; Kara & Taşpınar, 2022; Sarıtaş & Gökler, 2023; Uygur vd., 2022a) ile Anadolu'nun iç ve geçiş bölgelerindeki (Abuduruslu & Erol, 2020; Gökler vd., 2022; Özenoğlu Kiremit vd., 2019; Uyar vd., 2022) ciğerotu çeşitliliği detaylı floristik

çalışmalarla belgelenmiştir. Bu floristik zenginlik verileri, aynı zamanda türlerin biyokimyasal özellikleri, ekolojik adaptasyonları ve biyoindikatör potansiyelleri üzerine yapılan güncel araştırmalara da sağlam bir zemin oluşturmaktadır (Bingöl vd., 2018; Şimşek, 2023; Şimşek vd., 2016; Tosun vd., 2016).

Bu bölümün temel amacı; okuyucuya ciğerotlarının evrimsel ve ekofizyolojik özelliklerini tanıtmak, Türkiye'deki güncel biyoçeşitlilik verilerini habitat ve substrat ilişkileri bağlamında sentezlemek ve bu canlıların biyoindikatörlükten biyoteknolojiye uzanan potansiyel kullanım alanlarını bütüncül bir bakış açısıyla sunmaktır.

## **HABİTAT EKOLOJİSİ VE ÇEVRESEL DEĞİŞKENLER**

Ciğerotlarının dağılımı, morfolojik ve fizyolojik kısıtları nedeniyle abiyotik çevresel faktörlere sıkı sıkıya bağlıdır. Bu faktörler içinde su mevcudiyeti, ışık ve substrat kimyası, tür kompozisyonunu belirleyen en kritik değişkenlerdir.

### **Ekofizyolojik Temeller: Su, Işık ve Kuraklık Toleransı**

Ciğerotları, poikilohidrik organizmalar olarak iç su dengelerini aktif bir şekilde düzenleyemezler; hücrel su içerikleri ortamın bağıl nemi ile doğrudan denge halindedir (Glime, 2017). Su kaybı durumunda metabolizmalarını askıya alabilir (kuruma toleransı - *desiccation tolerance*) ve suya yeniden kavuştuklarında hızla toparlanabilirler. Bu yetenek, özellikle epifitik ve epilitik türlerin geçici kurak dönemlerde hayatta kalmasını sağlayan temel bir adaptasyondur (Proctor vd., 2007; Glime, 2017). Ancak, bu tolerans tüm türlerde aynı düzeyde değildir; geniş talluslu formlar kuraklığa karşı daha hassasken, su tutmaya yönelik özelleşmiş yapılara (lobül, su keseleri) sahip yapraklı türler daha dirençlidir.

Su stresi, ışık faktörü ile doğrudan etkileşir. Kuru dokular, yüksek ışık altında fotosentetik sistemde hasara (fotoinhibisyon) yol açabilir. Bu nedenle ciğerotları, su kaybını ve oksidatif stresi minimize etmek için genellikle doğrudan güneş ışığından kaçınan "sciofit" (gölge seven) bir strateji benimser (Glime, 2017). Sonuç olarak, bir türün habitat içindeki konumu, su ve ışık arasındaki bu hassas dengenin bir yansımasıdır.

### **Türkiye Florasından Örneklerle Habitat Tercihleri**

Türkiye'de son yıllarda yapılan floristik ve ekolojik çalışmalar, yukarıdaki küresel ekofizyolojik prensiplerin yerel ölçekte nasıl tezahür ettiğini somut verilerle göstermektedir.

- **Nem İsteği:** Türkiye'deki ciğerotu topluluklarında nemli koşulları seven mezofitik ve higrofitik karakterin baskın olduğu görülür. Örneğin, yüksek nem ve yağış rejimiyle karakterize edilen Artvin Kamilet Vadisi'nde tespit edilen taksonların %53'ü mezofit, %35'i higrofit olarak sınıflandırılmış; kserofitik (kurakçıl) türlerin oranı ise oldukça düşük kalmıştır (Alataş vd., 2018). Benzer şekilde Sakarya bölgesinde de nemli habitat geçişlerinde higrofit ve mezofit türlerin hakimiyeti bildirilmiştir (Uyar vd., 2020). Bu veriler, Türkiye'deki ciğerotlarının genel olarak kuraklık stresinden kaçınma eğiliminde olduğunu desteklemektedir.
- **Işık İsteği:** Gölge toleransı stratejisi, Türkiye orman ekosistemlerindeki dağılım desenlerine de güçlü bir şekilde yansımaktadır. Trabzon Altındere Vadisi'ndeki epifitik türlerin %80'inin, Kamilet Vadisi'ndekilerin ise %82'sinin sciöfit karakterde olduğu belirlenmiştir (Batan vd., 2021; Alataş vd., 2018). Ağaç gövdelerinin kuzey bakıları, derin vadi tabanları ve kaya dipleri gibi doğrudan güneş radyasyonundan korunaklı mikrohabitatlar, ciğerotları için ideal sığınaklar oluşturur.
- **Substrat Asiditesi (pH):** İnce hücre duvarları ve doğrudan absorpsiyon yetenekleri nedeniyle ciğerotları, substrat pH'ına karşı oldukça duyarlıdır. Türkiye'de yapılan çalışmalar, türlerin genellikle asidik ila nötr (subnötrofit ve asidofit) karakterli ortamlarda yoğunlaştığını göstermektedir. Taşeli Platosu'nda yapılan kapsamlı çalışmada, briyofitlerin %54,63'ü subnötrofit, %25,99'u asidofit olarak kaydedilmiştir (Uygur vd., 2022b). Özellikle iğne yapraklı ağaçların asidik kabukları (kortikol habitat) veya volkanik kayalar, bazifit (kireç seven) türlere kıyasla daha zengin bir ciğerotu çeşitliliği barındırabilmektedir (Batan vd., 2021; Ezer, 2017).

Bu bölgesel veriler, ciğerotlarının Türkiye'nin farklı coğrafyalarında, temel ekolojik gereksinimlerine uygun olarak nasıl özelleşmiş mikrohabitatları seçtiğini açıkça ortaya koymaktadır.

## SUBSTRAT ÖZELLİKLERİNE GÖRE DAĞILIM

Ciğerotlarının dağılımı, makroiklimden ziyade doğrudan temas halinde oldukları yüzeyin yani substratın fiziksel ve kimyasal özellikleri tarafından belirlenir (Şimşek, 2024). Kök sisteminden yoksun olan bu bitkiler için substrat, sadece bir tutunma yüzeyi değil, aynı zamanda nem, pH ve mineral içeriği ile tür seçiciliğinde etkili olan kritik bir ekolojik filtredir.

Türkiye florası incelendiğinde, türlerin başlıca dört substrat tipinde yoğunlaştığı görülür: ağaç kabukları (epifitik), toprak (epigeik), kayalar (epilitik) ve sucul ortamlar (akuatik) (Ezer, 2017; Gökler vd., 2022; Uyar vd., 2020).

### **Epifitik Ciğerotları (Kortikol Türler)**

Epifitik ciğerotları, canlı ağaç ve çalılarının gövdeleri ile dallarında yaşar, ancak konukçu bitkiden besin almadıkları için parazitik değildirler. Orman ekosistemlerinde mikrohabitat çeşitliliğinin ve biyokütleinin önemli bir bileşenidirler. Ağaç kabuğunun yapısı (pürüzlülük), pH'ı, su tutma kapasitesi ve ağacın yaşı, üzerinde gelişen ciğerotu tür kompozisyonunu doğrudan etkiler (Glime, 2017). Bu türler, gövde üzerinde atmosferik nemi ve yağmur sularını tutarak bir "sünger etkisi" yaratır ve orman içi ikliminin düzenlenmesine katkıda bulunur.

*Türkiye Florasından Örnekler ve Ekolojik Eğilimler:* Türkiye ormanlarında epifitik ciğerotların dağılımı, forofit (üzerinde yaşadıkları bitki) türüne, kabuk özelliklerine ve bölgenin nem rejimine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yapılan çalışmalar, hem yapraklı (folyoz) hem de talluslu ciğerotların epifitik yaşama uyum sağladığını göstermektedir. Örneğin, Karadeniz ve Akdeniz bölgelerindeki meşe (*Quercus* spp.) ve kayın (*Fagus* spp.) ormanlarında *Frullania dilatata* ve *Radula complanata* gibi türler yaygın olarak epifitik kaydedilmiştir (Alataş vd., 2018; Batan vd., 2021; Çatak & Kırmacı, 2020). Nemli karışık ormanlarda ise *Porella platyphylla* gibi daha geniş yapılı türler gözlemlenir (Ezer, 2017). Özellikle nemli vadi tabanlarındaki ağaç gövdelerinin alt kısımları ve kuzey bakırları, *Lophocolea heterophylla* ve *Metzgeria furcata* gibi neme daha bağımlı türler için uygun mikrohabitatlar oluşturur (Keçeli vd., 2019; Sarıoğlu & Keçeli, 2018). Bu türlerin varlığı, olgun ve nemli orman ekosistemlerinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

### **Epigeik Ciğerotları (Terikol Türler)**

Epigeik ciğerotları, yaşam döngülerini doğrudan toprak üzerinde sürdürürler. Rizoidleri ile substrata tutunarak karasal ekosistemlerin zemin florasında önemli işlevler üstlenirler. Bu grup, özellikle açık alanlarda, çıplak toprak yüzeylerinin organik madde ile örtülmesini ve humus oluşumunu başlatarak süksesyonu (ekolojik sıralı değişim) hızlandıran "kolaylaştırıcı" bir rol oynar (Glime, 2017). Toprağı örterek erozyonu engeller ve su tutma kapasitesini artırır.

*Türkiye Florasından Örnekler ve Ekolojik Eğilimler:* Türkiye'nin farklı iklim kuşaklarında, epigeik ciğerotların dağılımı toprak yapısı, nem ve insan etkisi gibi faktörlere göre şekillenir. Kurak ve yarı kurak bozkır (step) açıklıklarında ve maki alanlarında, kısa ömürlü ve kurağa dayanıklı öncü

türler yaygındır. Örneğin, *Riccia* cinsine ait bazı türler (örn. *Riccia sorocarpa*) bu tür habitatlarda kaydedilmiştir (Keçeli vd., 2019; Özenoğlu Kiremit vd., 2019). İnsan etkisinin yoğun olduğu bozulmuş alanlarda, tarım sahalarında veya orman yangını sonrası açılan alanlarda ise *Marchantia polymorpha* ve *Lunularia cruciata* gibi nitrofilik (azot sever) ve rekabetçi türler hızla yayılarak geniş örtüler oluşturabilir (Ezer, 2017). Nemli orman tabanları ve dere kenarlarında ise *Conocephalum conicum* ve *Pellia epiphylla* gibi higrofitik türler görülür (Uslu & Keçeli, 2019; Uyar vd., 2020). Bu türler, orman tabanındaki nemi muhafaza etmede önemli bir işlev görür.

### **Epilitik Ciğerotları (Saksikol Türler)**

Epilitik ciğerotları, doğrudan kaya yüzeyleri üzerinde yaşarlar ve toprak oluşumunun (pedogeneze) başlatılmasında likenlerle birlikte birincil süksesyonda görev alan öncül organizmalardır (Vanderpoorten & Goffinet, 2009). Kaya yüzeyini fiziksel ve kimyasal olarak ayrıştırarak, daha sonraki bitki türlerinin yerleşebileceği ince bir organik tabakanın (proto-toprak) oluşumuna katkıda bulunurlar.

*Türkiye Florasından Örnekler ve Ekolojik Eğilimler:* Türkiye'deki epilitik ciğerotlarının dağılımı, ana kayanın kimyasal yapısına (pH) ve su rejimine göre belirgin farklılıklar gösterir. Kireçtaşı (kalker) ve mermer gibi bazik kayalar üzerinde, yüksek pH'a toleranslı kalsifil türler gelişir. *Reboulia hemisphaerica* ve *Targionia hypophylla* bu tür habitatların karakteristik örnekleridir (Ezer, 2017; Özenoğlu Kiremit vd., 2019). Buna karşılık, granit ve bazalt gibi asidik kayalar üzerinde ise asidofil/silisifil türler hakimdir. Yüksek dağlık alanlardaki sert kayalarda *Marsupella* ve *Gymnomitrium* cinslerine ait türler sıkı yastıklar oluşturur (Kürschner & Frey, 2020). Üçüncü bir grup olarak, şelale kenarları veya sürekli nemli kayalarda yaşayan higro-epilitik türler bulunur. *Conocephalum conicum* bu tür nemli kayalarda yaygın olarak gözlemlenir (Uygur vd., 2022a).

### **Akuatik Ciğerotları (Hidrofitik Türler)**

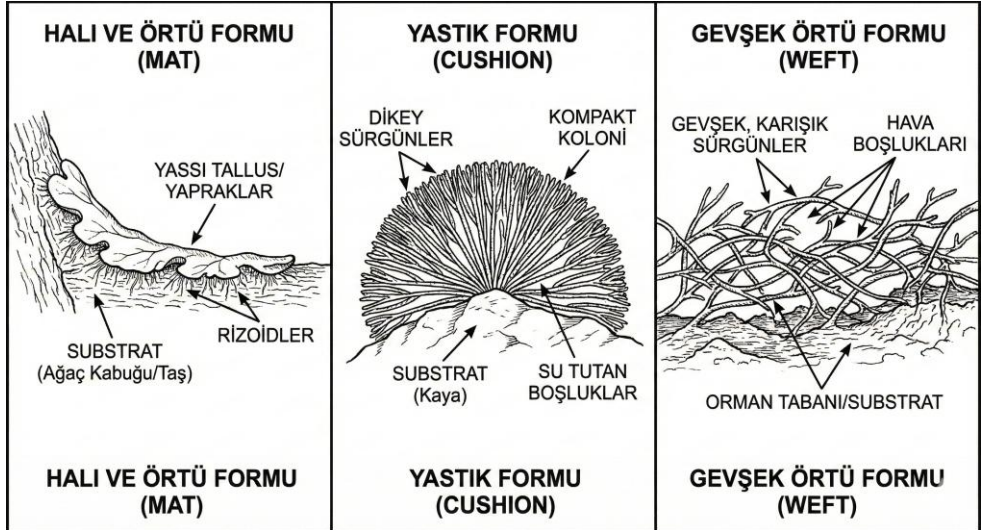
Akuatik ciğerotları, yaşam döngülerinin tamamını veya önemli bir kısmını su içinde (submers), su yüzeyinde (natant) veya su seviyesinin değişken olduğu bataklık zonlarında sürdüren özelleşmiş bir gruptur (Glime, 2017). İnce kütikulları veya kütikulasız yapıları sayesinde su ve gaz alışverişini doğrudan yüzeylerinden yaparlar.

*Türkiye Florasından Örnekler ve Ekolojik Eğilimler:* Türkiye'nin sulak alan ekosistemlerindeki ciğerotu çeşitliliği, suyun hareketliliğine ve kalitesine bağlıdır. Durgun su kütlelerinde (göletler, hendekler) *Riccia fluitans* gibi serbest yüzen (pleustofitik) türler görülebilir (Ezer, 2017). Hızlı akan,

temiz ve soğuk dağ dereleri ise, taşlara sıkıca tutunan reofilik türlere ev sahipliği yapar. *Scapania undulata* bu tür temiz su habitatlarının karakteristik bir türü olup, aynı zamanda su kalitesinin biyolojik bir göstergesi (biyoindikatör) olarak kabul edilir (Kürschner & Frey, 2020; Şimşek & Selvi, 2023). Bataklıklar, kaynak çıkışları ve nehir kıyılarındaki geçiş zonlarında ise *Pellia endiviifolia* ve *Aneura pinguis* gibi hem su içinde hem de dışında gelişebilen helofitik/amfibik türler yaygındır (Uslu & Keçeli, 2019).

## CİĞEROTLARINDA YAŞAM FORMLARI VE KOLONİ MİMARİSİ

Ciğerotlarının habitat tercihleri ve çevresel strese karşı stratejileri, büyük ölçüde sergiledikleri "yaşam formları" (*life forms*) ve oluşturdukları koloni yapıları ile şekillenir. Briyofit ekolojisinde temel kabul edilen Mägdefrau sınıflandırmasına göre yaşam formları (Şekil 1), benzer çevresel koşullara karşı geliştirilmiş morfolojik adaptasyonları ifade eder (Bates, 1998; Mägdefrau, 1982). İletim demetlerinden yoksun olan ciğerotları, su dengesini büyük ölçüde "ektohidrik" (dışsal) yolla sağlar; bu nedenle oluşturdukları koloni mimarisi, suyun tutulması ve buharlaşmanın azaltılmasında hayati öneme sahiptir (Glime, 2017). Koloninin bütünü, bitki yüzeyi ile atmosfer arasında nemli bir mikro-klima yaratan durgun bir hava katmanı (sınır tabaka) oluşturarak su kaybını minimize eder (Bates, 1998).



Şekil 1 Mägdefrau sınıflandırmasına göre ciğerotlarında (Marchantiophyta) görülen temel yaşam formları ve koloni mimarileri

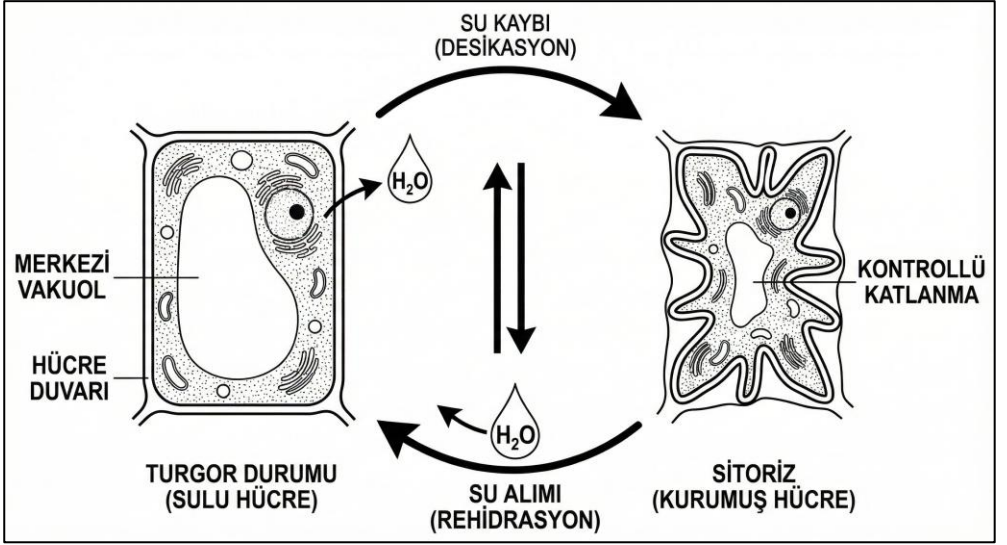
Türkiye florasındaki ciğerotları incelendiğinde, habitatın nem rejimi ve substrat özelliklerine göre başlıca şu yaşam formları ayırt edilebilir:

- **Yıllık ve Kısa Ömürlü Öncüler (Annuals/Short-lived Shuttle):** Bu form, kurak ve yarı kurak bölgelerin açık alanlarında, yaşam döngüsünü uygun nemli dönemlerde hızla tamamlayan türleri kapsar. Kuraklık stresinden "kaçınma" stratejisi üzerine kuruludur (Glime, 2017). Türkiye'nin step ve maki ekosistemlerinde, örneğin Melendiz Dağı gibi volkanik ve yarı kurak alanlarda *Riccia* L. cinsine ait türler bu gruba tipik birer örnektir (Özenoğlu Kiremit vd., 2019).
- **Halı ve Örtü Formları (Mats):** Ciğerotlarında en yaygın görülen yaşam formudur. Substrata paralel yatay büyüme gösterir ve geniş yüzeyleri kaplar. Bu yapı, suyun kapilarite yoluyla yayılmasını ve tutulmasını kolaylaştırır (Bates, 1998). Nemli orman tabanlarında ve dere kenarlarında *Conocephalum conicum* (L.) Dumort. ve *Pellia epiphylla* (L.) Corda gibi talluslu türler "Talluslu Halı" oluştururken (Uslu & Keçeli, 2019); ağaç gövdelerinde ve kayalarda *Frullania dilatata* (L.) Dumort. ve *Radula complanata* (L.) Dumort. gibi yapraklı türler "Pürüzsüz Halı" (*Smooth Mat*) formunu sergiler (Alataş vd., 2018; Batan vd., 2021).
- **Yastık ve Çim Formları (Cushions and Turfs):** Sürgünlerin dikey yönde sıkı bir şekilde bir araya geldiği kompakt kolonilerdir. Bu form, yüksek irtifa veya maruz kalan zorlu koşullara (rüzgar, aşırı ışık) bir adaptasyon olarak görülür (Glime, 2017). Türkiye'nin yüksek dağlık alanlarındaki silisli kayalar üzerinde *Marsupella* Dumort. ve *Gymnomitrium* Corda cinslerine ait türler sıkı yastıklar oluşturarak ekstrem koşullara direnç gösterir (Kürschner & Frey, 2020).
- **Gevşek Dokulu Örtüler (Wefts):** Sürgünlerin gevşek bir şekilde birbirine dolandığı, substrattan hafifçe yükselen formlardır. Genellikle nem sorununun olmadığı, gölgeli ve çok nemli orman altı habitatlarında görülür (Bates, 1998). İğneada Longoz Ormanları gibi yüksek neme sahip habitatlarda, *Lophocolea* (Dumort.) Dumort. ve *Metzgeria* Raddi cinslerine ait bazı türlerin bu formu sergilediği rapor edilmiştir (Uslu & Keçeli, 2019).

Sonuç olarak, ciğerotlarının sergilediği bu yaşam formları, suyun elde edilmesi ve korunmasına yönelik evrimsel çözümlerdir. Türlerin morfolojik stratejilerinin ve koloni yapılarının analizi, sadece taksonomik teşhis için değil, aynı zamanda onların ekolojik nişlerini anlamak açısından da büyük önem taşır (Bates, 1998; Vanderpoorten & Goffinet, 2009).

## EKOLOJİK ADAPTASYONLAR: KURUMA TOLERANSI VE SU İLİŞKİLERİ

Ciğerotlarının karasal yaşamdaki ekolojik başarısının temelinde, poikilohidri olarak bilinen ve iç su dengesini çevre nemiyile doğrudan senkronize eden su stratejisi yatar. Vasküler bitkilerin aksine, kalın kütikula, stoma ve gelişmiş kök sistemleri gibi aktif su düzenleme mekanizmalarından yoksundurlar (Glime, 2017). Bu stratejinin en kritik bileşeni, protoplazmanın aşırı su kaybına rağmen canlılığını koruyabilmesi ve rehidrasyon sonrası metabolik aktivitelerini hızla yeniden başlatabilmesi anlamına gelen ve Şekil 2’de gösterilen "Kuruma Toleransı"dır (*Desiccation Tolerance* - DT) (Proctor vd., 2007).



Şekil 2 Ciğerotu hücresinde kuruma toleransı (Desiccation Tolerance) ve sitoriz (Cytorrhysis) mekanizmasının şematik gösterimi

Bu tolerans, morfolojik, hücresel ve koloni düzeyindeki bir dizi adaptasyonla desteklenir. Morfolojik düzeyde, bazı türler kuruma sırasında yüzey alanını küçülterek su kaybını azaltan hareketler sergiler. Örneğin, Türkiye'nin kurak volkanik habitatlarında da kaydedilen *Targionia hypophylla* L. türünde tallus kenarlarını içe kıvrırma davranışı tipiktir (Özenoğlu Kiremit vd., 2019). Su tutma kapasitesini artıran özelleşmiş yapılar da nemin korunmasına yardımcı olur; nitekim *Frullania dilatata* (L.) Dumort. türünde yaprakların "su kesesi" (lobül) formuna dönüşmesi, bu türün epifitik ortamdaki başarısının anahtarlarıdır (Alataş vd., 2018). Hücresel ve fizyolojik düzeyde ise, kuruma ve yeniden ıslanma döngülerinin neden olduğu oksidatif

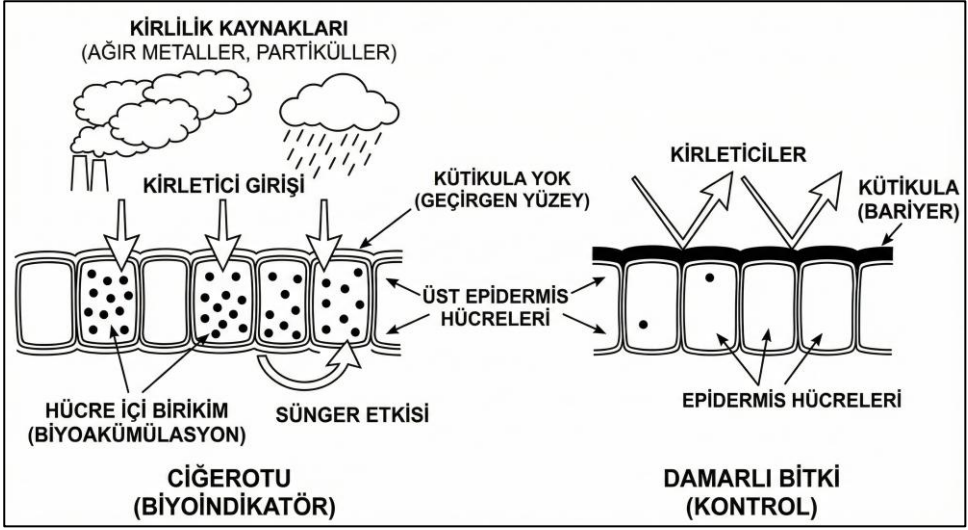
stresi sınırlamak için koruyucu mekanizmalar devreye girer. Türkiye popülasyonları üzerinde yapılan güncel bir çalışmada, *Frullania dilatata* (L.) Dumort. ekstraktlarının yüksek antioksidan aktiviteye sahip olduğu belirlenmiş; bu durum türün kuraklık stresine karşı geliştirdiği kimyasal savunmayı fizyolojik olarak kanıtlamıştır (Şimşek vd., 2023).

Adaptasyonlar yalnızca bireysel bitki düzeyinde değil, koloni yapısı ve yaşam formu düzeyinde de gerçekleşir. Ciğerotları genellikle sıkı yastıklar (*cushion*), halılar (*mat*) veya kümeler (*turf*) oluşturarak büyür. Bu kompakt yapı, koloni içindeki hava hareketini ve buharlaşma yüzeyini azaltarak, bitkiler arasındaki kılcal boşluklardan suyun taşındığı "ektohidrik" sistemin verimliliğini artırır (Bates, 1998; Glime, 2017). Böylece koloninin iç kısmı nemli bir mikrohabitat haline gelir. Türkiye orman ekosistemlerinde yaygın olan bu sıkı koloni yapıları, özellikle epifitik türlerin kurak periyotlarda suyu muhafaza etmesinde hayati bir rol oynar (Batan vd., 2021).

Sonuç olarak, kuruma toleransı ve su ilişkilerine dair bu çok katmanlı adaptasyonlar, ciğerotlarının su mevcudiyetinin dalgalandığı geniş bir habitat yelpazesinde – nemli ormanlardan kayalık dağ zirvelerine ve hatta geçici kurak alanlara kadar – hayatta kalmasını ve başarılı olmasını mümkün kılan temel fizyolojik zemini oluşturur.

## **CİĞEROTLARININ BİYOİNDİKATÖR POTANSİYELİ VE AĞIR METAL BİRİKİMİ**

Ciğerotları, çevre kirliliğinin izlenmesinde ve ekosistem sağlığının değerlendirilmesinde etkili "biyoindikatör" ve "biyomonitör" organizmalar arasında yer alır. Kök sistemleri ve gelişmiş bir kütikula tabakasından yoksun olmaları, suyu ve mineral maddeleri doğrudan tüm yüzeyleriyle atmosferden veya su kolonundan almalarına neden olur (Glime, 2017). Bu anatomik özellik, yüksek katyon değişim kapasitesi (CEC) ile birleştiğinde, kirleticilerin – özellikle ağır metallerin – dokularda birikmesine (biyokonsantrasyon) olanak tanır (Şekil 3). Biyomonitöring çalışmalarında ciğerotları, hassas türlerin kaybıyla kirliliği gösteren "reaksiyon indikatörleri" ve kirleticileri bünyesinde biriktiren "akümülayon indikatörleri" olarak değerlendirilir (Markert vd., 2003; Şimşek & Selvi, 2023).



Şekil 3 Ciğerotlarında biyoindikatör potansiyeli ve biyoakümülyasyon mekanizmasının şematik gösterimi

**Hava ve Toprak Kirliliğinin İzlenmesi:** Hava kirliliğinin, özellikle ağır metallerin izlenmesinde epifitik ciğerotları kritik bir role sahiptir. Besin ihtiyaçlarını büyük ölçüde atmosferik çökeltilerden karşıladıkları için, hava kalitesindeki değişimleri tohumlu bitkilere göre daha duyarlı bir şekilde yansıtırlar. Türkiye’de yapılan araştırmalar, *Frullania dilatata* (L.) Dumort. ve *Radula complanata* (L.) Dumort. gibi geniş yayılışlı epifitik türlerin, kentsel kirlilik izleme çalışmalarında model organizma olarak değerlendirilebileceğine işaret etmektedir (Bingöl vd., 2018; Şimşek & Selvi, 2023). Özellikle *Frullania dilatata* (L.) Dumort. üzerinde yapılan güncel analizler, bu türün çevresel strese karşı yüksek antioksidan aktivite gösterdiğini kanıtlamış, bu da bitkinin kirlilik baskısına karşı verdiği fizyolojik yanıtın ölçülebilir olduğunu ortaya koymuştur (Şimşek vd., 2023). Benzer şekilde, kentsel ve endüstriyel alanlardaki toprak kirliliğinin izlenmesinde *Marchantia polymorpha* L. ve *Lunularia cruciata* (L.) Dumort. ex Lindb. gibi toleransı yüksek türlerin, ağır metalleri biriktiren güçlü akümülatörler olduğu bildirilmiştir (Bingöl vd., 2018; Ezer, 2017).

**Sucul Ekosistemlerde Su Kalitesi İzleme:** Sucul ciğerotları, su kalitesinin izlenmesinde geleneksel kimyasal analizlere göre önemli bir avantaj sunar: kirleticileri bünyelerinde biriktirerek zamanla kümülatif bir kayıt oluştururlar (Şimşek & Selvi, 2023). Örneğin, *Scapania undulata* (L.) Dumort. temiz dağ sularının karakteristik bir türü ve biyoindikatörü olarak kabul edilirken, *Riccia fluitans* L. gibi türler durgun ve besince zengin (ötrofik) suları tercih eder (Kürschner & Frey, 2020). Bu türlerin dokularındaki kirleticili konsantrasyonlarının analizi, su kaynağındaki kirlilik yükünün

değerlendirilmesinde düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir yöntem olarak görülmektedir.

Sonuç olarak, ciğerotlarının basit anatomisi ve yüksek biyoakümülyasyon kapasitesi, onları hem karasal hem de sucul ekosistemlerde çevresel stresin izlenmesi için değerli biyolojik araçlar haline getirmektedir. Türkiye'de bu alanda yapılan güncel çalışmaların (Bingöl vd., 2018; Şimşek & Selvi, 2023; Şimşek vd., 2023) sayısının artması, biyoçeşitlilik üzerindeki kirlilik baskısının anlaşılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

## **KORUMA BİYOLOJİSİ VE TEHDİT ALTINDAKİ CİĞEROTLARI**

Ciğerotları, ekosistemlerdeki kritik işlevlerine rağmen, dar habitat tercihleri ve poikilohidrik yapıları nedeniyle çevresel değişimlere karşı son derece hassastır. Bu hassasiyet, onları iklim değişikliği ve habitat bozulması karşısında vasküler bitkilere kıyasla daha savunmasız kılar (Glime, 2017). Uluslararası Doğa Koruma Birliği (IUCN) tarafından hazırlanan Avrupa ölçekli değerlendirme, briyofitlerin (ciğerotları, karayosunları ve boynuzotları) önemli bir bölümünün nesli tükenme tehdidi altında olduğunu ortaya koymuştur (Hodgetts vd., 2019). Bu küresel durum, Türkiye briyofit biyoçeşitliliği için de dikkate alınması gereken bir çerçeve sunmaktadır.

### **Kritik Habitatlar ve Tehditler**

Türkiye'de yapılan floristik çalışmalar, ülkenin ciğerotu çeşitliliği açısından zengin ancak korunması gereken hassas habitatlara sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle nemli karışık ormanlar, uzak vadi tabanları, longoz (subasar) ormanları ve yüksek dağlık alanlar, birçok ciğerotu türü için hayati yaşam alanlarıdır (Keçeli vd., 2019; Sarioğlu & Keçeli, 2018; Uslu & Keçeli, 2019; Uyar vd., 2022). Bu habitatlarda, Türkiye florası için nadir veya lokal yayılışlı olduğu düşünülen türler kaydedilmiştir. Ancak, bu özgün mikrohabitatlar; ormansızlaşma, arazi kullanım değişikliği ve iklim değişikliği gibi küresel tehditlerin yanı sıra, lokal olarak sulak alan kurutulması ve altyapı projeleri gibi baskılara maruz kalabilmektedir (Hodgetts vd., 2019).

### **Kirlilik Baskısı ve Fizyolojik Yanıtlar**

Ciğerotlarını etkileyen bir diğer kritik tehdit, sucul ve karasal ekosistemlerdeki kimyasal kirliliktir. Ciğerotlarının yüksek biyoakümülyasyon kapasitesi, onları kirlilik izleme için değerli kılarsa da, aynı zamanda kirleticilere karşı aşırı duyarlı olmalarına neden olur (Bingöl vd., 2018; Glime, 2017). Özellikle ağır metaller gibi toksik kirleticiler, bu bitkilerde uzun vadeli fizyolojik strese yol açabilir. Nitekim, *Frullania dilatata* (L.) Dumort. üzerinde yapılan biyokimyasal analizlerde, çevresel stres altındaki bitkilerin

yüksek antioksidan aktivite gösterdiği belirlenmiştir; bu durum, kirliliğin popülasyonlar üzerinde yarattığı "oksidatif stresin" somut bir fizyolojik kanıtıdır (Şimşek vd., 2023). Ayrıca, *Scapania undulata* (L.) Dumort. gibi temiz su göstergesi türlerin varlığı veya yokluğu, su kalitesindeki bozulmanın doğrudan bir erken uyarı sistemi olarak değerlendirilmektedir (Şimşek & Selvi, 2023).

### Koruma Stratejileri

Sonuç olarak, Türkiye'deki ciğerotu çeşitliliğinin sürdürülebilirliği, bu organizmaların yaşam alanlarının ve bağlı oldukları ekolojik süreçlerin (su döngüsü, nem rejimi) korunmasına bağlıdır. Hodgetts vd. (2019) tarafından Avrupa genelinde önerilen "Önemli Briyofit Alanları" (*Important Bryophyte Areas* - IBrA) gibi kavramların, Türkiye'deki zengin floristik verilerle (Ezer, 2017; Keçeli vd., 2019; Uyar vd., 2022) desteklenerek uygulanması, koruma çabaları için yol gösterici olabilir. Bu minyatür ormanların geleceği, onlara yönelik artan bilimsel farkındalık ve kanıta dayalı koruma politikalarının geliştirilmesi ile güvence altına alınabilir.

## ÜREME BİYOLOJİSİ VE YAYILMA STRATEJİLERİ

Ciğerotlarının yaşam döngüsü, karasal bitkilerin evrimindeki ilkel basamakları yansıtan "heteromorfik döl almaşı" (metagenez) ile karakterizedir. Bu grupta, haploit (n) kromozomlu ve fotosentetik gametofit evre baskın ve uzun ömürlüdür. Diploid (2n) sporofit evre ise kısa ömürlü olup beslenme açısından tamamen gametofite bağımlıdır (Vanderpoorten & Goffinet, 2009). Üreme, eşeyli (seksüel) ve eşeysiz (aseksüel/vegetatif) olmak üzere iki ana strateji üzerinden gerçekleşir. Ekolojik başarıları, bu iki mekanizma arasındaki dengeli geçiş ve çevresel koşullara göre şekillenen esnekliğe bağlıdır (Glime, 2017).

### Eşeysiz (Vejetatif) Üreme

Bu strateji, kısa mesafeli yayılma ve hızlı kolonizasyon için büyük avantaj sağlar. Özelleşmiş üreme yapıları olan gemmalar (tomurcuklar) veya basit tallus/yaprak fragmentasyonu yaygın olarak görülür. Örneğin, yaygın ve kozmopolit bir tür olan *Marchantia polymorpha* L., tallus üzerinde kadeh şeklinde yapılar (*gemma cup*) oluşturarak, *Lunularia cruciata* (L.) Dumort. ex Lindb. ise yarım ay şeklindeki yapılarla özellikle insan etkisi altındaki alanlarda hızla yayılır (Glime, 2017). Yapraklı ciğerotlarında ise kuruyan parçaların rüzgar veya hayvanlarla taşınması (fragmentasyon), popülasyon yoğunluğunu artıran etkili bir yoldur (Bates, 1998).

## Eşeyli Üreme ve Yayılma

Eşeyli üreme, suyun varlığını zorunlu kılar; çünkü sperm hücresinin (anterozoid) yumurtaya (oosfer) ulaşabilmesi için sıvı bir su filmi gereklidir. Bu nedenle eşeyli üreme genellikle yağışlı dönemlerle senkronizedir. Döllenme sonucu oluşan sporofitin en karakteristik yapılarından biri, spor kesesi (kapsül) içindeki "elater" adı verilen higroskopik hücrelerdir. Bu hücreler, kapsül olgunlaşıp çatladığında, nem değişimine tepki vererek ani hareketler yapar ve sporların topaklanmasını engelleyerek rüzgarla daha uzak mesafelere dağılmasını sağlar (Vanderpoorten & Goffinet, 2009). Türkiye florasında, özellikle *Pellia* Raddi cinsine ait türlerde sporofitlerin şeffaf bir sap (seta) üzerinde hızla yükselerek sporlarını bahar aylarında dağıttığı gözlemlenmektedir (Uslu & Keçeli, 2019).

## Cinsiyet Dağılımı ve Koruma Açısından Önemi

Ciğerotlarında cinsiyet dağılımı "monoik" (erkek ve dişi organ aynı bireyde) veya "dioik" (erkek ve dişi organ ayrı bireylerde) olabilir. Araştırmalar, türlerin önemli bir kısmının dioik olduğunu göstermektedir (Bisang & Hedenäs, 2005). Bu durum, döllenme başarısını sınırlar; çünkü erkek ve dişi bireylerin birbirine çok yakın olması gerekir. Habitat parçalanması veya popülasyon küçülmesi yaşayan nadir türlerde, cinsiyetlerden birinin ortamdaki kaybolması, eşeyli üremeyi ve genetik çeşitliliği durma noktasına getirebilir (Hodgetts vd., 2019). Ancak Türkiye florasındaki yaygın dioik türlerden *Conocephalum conicum* (L.) Dumort., uygun nemli habitatlarda (örneğin longoz ormanları) geniş koloniler kurarak erkek ve dişi bireylerin buluşma şansını artırır ve bolca sporofit üretebilir (Sarioğlu & Keçeli, 2018).

Sonuç olarak, ciğerotlarının üreme biyolojisi, karasal yaşama geçişin ilk evrelerine özgü kısıtlamaları ve bu kısıtlamalara karşı geliştirdikleri esnek stratejileri bir arada barındırır. Bu stratejilerin anlaşılması, popülasyon dinamiğini ve türlerin hassasiyet nedenlerini kavramak açısından hayati öneme sahiptir.

## YAĞ CİSİMCİKLERİ (OIL BODIES) VE SEKONDER METABOLİTLER

Ciğerotlarını (Marchantiophyta) diğer briyofit gruplarından ayıran en karakteristik ve sinapomorfik özellik, hücrelerinde bulunan özelleşmiş organeller olan "yağ cisimcikleri"dir (oil bodies). Tek bir zarla çevrili olan bu yapılar, terpenoidler ve lipofilik aromatik bileşikler bakımından zengin uçucu yağlar içerir (Asakawa vd., 2013). Yağ cisimciklerinin morfolojisi (sayısı,

şekli, büyüklüğü), taksonomik teşhiste hayati öneme sahiptir; çünkü bu özellikler genellikle cins veya türe özgüdür. Örneğin, *Frullania* Raddi cinsinde hücre içinde çok sayıda ve küçük granüllü cisimcikler görülürken, *Radula* Dumort. cinsinde hücreyi kaplayan tek ve büyük bir cisimcik tipiktir (Ludwiczuk & Asakawa, 2019).

### **Ekolojik ve Kimyasal Savunma İşlevi**

Bu organellerde sentezlenen zengin sekonder metabolit çeşitliliği, ciğerotlarına güçlü bir kimyasal savunma kalkanı sağlar. Üretilen terpenoid ve diğer bileşikler, acı tatları veya toksik özellikleri nedeniyle bitkiyi otçul böcekler, salyangozlar ve patojenik mikroorganizmalara karşı korur (Glime, 2017). Bu kimyasal savunma, özellikle nemli ve rekabetin yüksek olduğu habitatlarda, ciğerotlarının hayatta kalmasında kritik bir rol oynar. Ayrıca, bazı bileşiklerin çevrelerindeki diğer bitkilerin gelişimini baskılayan allelopatik etkiler de gösterebildiği bildirilmektedir (Asakawa vd., 2013).

### **Biyolojik Aktivite ve Farmakolojik Potansiyel**

Ciğerotlarının bu kimyasal zenginliği, onları doğal ürün araştırmaları ve farmakognozi için ilgi çekici kılmaktadır. Türkiye florasından toplanan ciğerotları üzerinde yapılan çalışmalar, bu potansiyelin tıbbi boyutlarını ortaya koymaktadır. Örneğin, epifitik bir tür olan *Frullania dilatata* (L.) Dumort.'dan elde edilen metanol ve etanol ekstraktlarının, yüksek antioksidan kapasiteye sahip olduğu ve belirli bakterilere karşı antimikrobiyal aktivite gösterdiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Türkiye'de yetişen *Reboulia hemisphaerica* (L.) Raddi, *Plagiochasma rupestre* (J.R.Forst. & G.Forst.) Steph. ve *Targionia hypophylla* L. türlerinin yara iyileştirici etkileri (fibroblast göçünü artırıcı etki) olduğu laboratuvar çalışmalarıyla rapor edilmiştir (Tosun vd., 2016). Bu bulgular, bu türlerin geleneksel tıptaki kullanımını bilimsel verilerle destekler niteliktedir.

Sonuç olarak, yağ cisimcikleri ciğerotları için sadece taksonomik bir belirteç değil, aynı zamanda onların ekolojik başarısını ve insanlık için biyokimyasal potansiyelini şekillendiren dinamik kimyasal fabrikalardır. Türkiye'nin zengin ciğerotu çeşitliliği, henüz keşfedilmemiş birçok biyoaktif bileşik için önemli bir kaynak potansiyeli taşımaktadır (Asakawa vd., 2013).

## **EKONOMİK ÖNEM VE ETNOBOTANİK KULLANIM**

Briyofitlerin insan kültürlerindeki yeri ve kullanımlarını inceleyen disiplinler arası alan "etnobriyoloji" olarak adlandırılır (Harris, 2008). Ciğerotları, küçük boyutları nedeniyle genellikle göz ardı edilseler de, özellikle "İmza Doktrini" (*Doctrine of Signatures*) adı verilen tarihsel bir felsefe çerçevesinde dikkat çekmişlerdir. Bu doktrine göre, bir bitkinin

görünümü insan vücudundaki bir organa benziyorsa, o organın hastalıklarını iyileştirmek için kullanılırdı (Harris, 2008). Talluslu ciğerotlarının, özellikle *Marchantia* L. türlerinin loblu yapısının insan karaciğerine benzemesi, bu bitkilerin "ciğerotu" olarak adlandırılmasına ve geleneksel olarak karaciğer rahatsızlıklarının tedavisinde kullanılmasına yol açmıştır (Harris, 2008; Şimşek, 2023).

### **Geleneksel ve Modern Tıbbi Kullanımlar**

Dünyanın farklı bölgelerinde ciğerotları çeşitli rahatsızlıklar için geleneksel tıpta kullanılmaktadır. En yaygın türlerden biri olan *Marchantia polymorpha* L., Çin tıbbında harici olarak yara, yanık ve egzama tedavisinde değerlendirilir (Chandra vd., 2017). Benzer şekilde *Conocephalum conicum* (L.) Dumort. da antimikrobiyal özellikleri nedeniyle deri enfeksiyonlarında kullanım bulmuştur (Şimşek, 2023).

Türkiye'de yapılan bilimsel çalışmalar da bu geleneksel kullanımları destekler niteliktedir. Örneğin, *Reboulia hemisphaerica* (L.) Raddi, *Plagiochasma rupestre* (J.R.Forst. & G.Forst.) Steph. ve *Targionia hypophylla* L. türlerinin yara iyileştirici etkileri (fibroblast aktivitesi üzerinde) deneysel olarak gösterilmiştir (Tosun vd., 2016). Ayrıca, Peru halk tıbbında kullanılan *Lunularia cruciata* (L.) Dumort. ex Lindb. türünün antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri modern araştırmalarla ortaya konmaktadır (Motti vd., 2023).

### **Bahçecilik, Akvaryumculuk ve Bilimsel Değer**

Ciğerotlarının ekonomik önemi tıbbi kullanımla sınırlı değildir. Sucul ve yarı sucul türler, akvaryum hobisinde (*aquascaping*) dekoratif ve işlevsel amaçlarla yaygın olarak kullanılır. *Riccia fluitans* L. gibi türler, su yüzeyini kaplayarak veya taşlara tutturularak estetik bir görünüm sağlarken, aynı zamanda su kalitesine olumlu katkıda bulunur (Glime, 2017). Karasal türler ise yüksek nem tutma kapasiteleri sayesinde teraryum ve vivaryum tasarımlarında canlı zemin malzemesi olarak tercih edilir (Glime, 2017).

Ancak, *Marchantia polymorpha* L. ve *Lunularia cruciata* (L.) Dumort. ex Lindb. gibi bazı türler, seralarda ve fidanlıklarda saksı yüzeylerini hızla kaplayarak su geçişini engelledikleri için istenmeyen "yabani otlar" olarak ekonomik zarara da yol açabilirler (Glime, 2017; Şimşek, 2023). Bilimsel araştırmalarda ise, özellikle *Marchantia polymorpha* L., basit genom yapısı ve haploid baskın yaşam döngüsü nedeniyle bitki genetiği, evrim ve sentetik biyoloji çalışmalarında önemli bir model organizma haline gelmiştir (Asakawa vd., 2013; Şimşek, 2023).

Sonuç olarak, ciğerotları yalnızca geleneksel şifa kaynakları olarak değil, aynı zamanda modern hobilerde, tarımda ve ileri biyoteknolojik

araştırmalarda da çok yönlü bir ekonomik ve bilimsel değere sahiptir (Asakawa vd., 2013; şimşek, 2023).

## SONUÇ VE GELECEK ALIşMALAR

Bu çalışmada, ciğerotlarının (Marchantiophyta) Türkiye florasındaki ekolojik nişleri, adaptasyon stratejileri ve insanlık için çok yönlü değerleri, güncel floristik ve bilimsel araştırmalar ışığında derlenmiştir. Eldeki veriler, ciğerotlarının karasal ekosistemlerde pasif bir örtü elemanı olmaktan ziyade; su ve besin döngüsünün düzenleyicisi, erozyon kontrolünün öncüsü, evre kirliliğinin hassas göstergesi ve potansiyel biyoaktif bileşik kaynağı olarak aktif "ekosistem mühendisleri" olduklarını göstermektedir (Glime, 2017; Vanderpoorten & Goffinet, 2009).

Türkiye, sahip olduğu farklı iklim kuşakları, topoğrafya ve jeolojik yapı sayesinde ciğerotları için zengin bir habitat mozaiği sunmaktadır. Yapılan floristik çalışmalar, türlerin dağılımının su mevcudiyeti, ışık ve özellikle substratın fiziko-kimyasal özellikleri (pH, doku, nem tutma kapasitesi) ile sıkı bir kontrol altında olduğunu ortaya koymuştur (Ezer, 2017; şimşek, 2024). Poikilohidrik yapıları ve kuruma toleransı gibi temel adaptasyonlar, onları aynı zamanda iklim değişikliği ve habitat bozulması gibi küresel tehditlere karşı da hassas kılmaktadır. Uluslararası Doğa Koruma Birliği (IUCN) tarafından Avrupa leğinde belirlenen tehdit statüleri, bu hassasiyetin küresel bir gerçeklik olduğunu doğrulamaktadır (Hodgetts vd., 2019).

Türkiye'de son yıllarda floristik envanter çalışmaları önemli ilerleme kaydetmiş, tür listeleri büyük ölçüde tamamlanmıştır (Keçeli vd., 2019; Uyar vd., 2022). Ancak, bu biyolojik zenginliğin sürdürülebilirliğini sağlamak ve potansiyelini ortaya çıkarmak için öncelikli olarak şu alanlarda araştırmaların yoğunlaştırılması önerilmektedir:

- **Koruma Odaklı Araştırmalar:** Nadir ve lokal türlerin popülasyon genetiği ve hayat tarihi stratejilerinin incelenmesi, etkili koruma planları geliştirmenin temelini oluşturacaktır. Hodgetts vd. (2019) tarafından vurgulanan "nemli Briyofit Alanları" (*Important Bryophyte Areas* - IBRA) gibi koruma öncelikli alanların Türkiye verileriyle belirlenmesi acil bir ihtiyaçtır.
- **İzleme ve Uygulamalı Ekoloji:** Ciğerotlarının biyoindikatör özelliklerinin, hava, toprak ve su kirliliğinin izlenmesi için standart, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir ulusal izleme ağına dönüştürülmesi büyük önem taşımaktadır (şimşek & Selvi, 2023). Özellikle sucul ekosistemlerde ağır metal birikimi üzerine yapılan

çalışmalar, bu bitkilerin kirlilik takibindeki güvenilirliğini kanıtlamaktadır.

- **Biyoteknolojik Potansiyelin Araştırılması:** Ciğerotlarının sekonder metabolit çeşitliliği ve biyolojik aktiviteleri üzerine yapılan öncü çalışmalar, bu grubun farmasötik ve biyoteknolojik açıdan ne derece değerli bir kaynak olabileceğine işaret etmektedir. *Frullania dilatata* (L.) Dumort. ve *Reboulia hemisphaerica* (L.) Raddi gibi türlerde tespit edilen antimikrobiyal ve yara iyileştirici etkiler (Şimşek vd., 2023; Tosun vd., 2016), bu potansiyelin somut kanıtlarıdır. Bu kaynakların sürdürülebilir şekilde değerlendirilebilmesi için doku kültürü gibi alternatif üretim yöntemlerine yönelik araştırmalar teşvik edilmelidir.

Sonuç olarak, ciğerotları üzerine yapılacak gelecek çalışmaların, sadece taksonomik kayıtların ötesine geçerek, ekofizyolojik, genetik, ekolojik ve biyoteknolojik yaklaşımları entegre eden disiplinler arası bir karakter taşıması gerekmektedir. Bu minyatür ancak vazgeçilmez canlıların geleceği, onların ekosistemdeki rollerinin tam olarak anlaşılmasına ve bu anlayışa dayalı proaktif koruma politikalarının geliştirilmesine bağlıdır.

## KAYNAKLAR

- Abudurusuli, A., & Erol, O. (2020). Batı Tanrı Dağlarının Ciğerotu Florasına Katkıları. *Anatolian Bryology*, 6(1), 8-18. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.657601>
- Alataş, M., Batan, N., & Ezer, T. (2018). Kamilet Vadisi (Artvin, Türkiye) ve Çevresindeki Epifitik Briyofitlerin Hayat Formları, Yaşam stratejileri ve Ekolojik özellikleri. *Anatolian Bryology*, 4(1), 8-16. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.373337>
- Arslan, A., Unan, A. D., & Ören, M. (2021). Bryodiversity of Eflani District of Karabük Province. *Anatolian Bryology*, 7(2), 146-155. <https://doi.org/10.26672.anatolianbryology.997424>
- Asakawa, Y., Ludwiczuk, A., & Nagashima, F. (2013). *Chemical constituents of bryophytes: Bio-and chemical diversity, biological activity, and chemosystematics*. Springer Science & Business Media.
- Aslan, G., Kırmacı, M., Özeneoğlu, H., & Çatak, U. (2024). The bryophyte flora of Aydın Mountain. *Biological Diversity and Conservation*, 17(1), 49-62. <https://doi.org/10.46309/biodicon.2024.1347381>

- Batan, N., Alataş, M., Ezer, T., & Erata, H. (2021). Altındere Vadisi (Maçka, Trabzon) Briyofit Florasına Epifitik Katkılar. *Anatolian Bryology*, 7(1), 8-16. <https://doi.org/10.26672.anatolianbryology.811769>
- Bates, J. W. (1998). Is 'life-form' a useful concept in bryophyte ecology?. *Oikos*, 82(3), 223-237.
- Bingöl, M., Doğan, M., & Kök, M. (2018). Ağır Metal Kirliliğinin İzlenmesinde Biyomonitör Olarak Karayosunları ve Ciğerotları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 12-20.
- Bisang, I., & Hedenäs, L. (2005). Sex ratio patterns in dioicous bryophytes re-visited. *Journal of Bryology*, 27(3), 207-219.
- Chandra, S., Chandra, D., Barh, A., Pandey, R. K., & Sharma, I. P. (2017). Bryophytes: Hoard of remedies, an ethno-medicinal review. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 7(1), 94-98.
- Çalışkan, S., Ören, M., & Ursavaş, S. (2019). Bafra İlçesi'nin (Samsun) Briyofit Florası. *Anatolian Bryology*, 5(2), 74-84. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.543040>
- Çatak, U., & Kırmacı, M. (2020). Epiphytic Bryophyte Flora of Liquidambar orientalis Forests. *Anatolian Bryology*, 6(2), 70-77. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.715769>
- Erdağ, A., & Kürschner, H. (2017). *Türkiye Bitkileri Listesi (Karayosunları)*. İstanbul: Ali Nihat Gökyiğit Vakfı Yayınları.
- Ezer, T. (2017). Türkiye'nin Bazı Epifitik ve Epilitik Ciğerotlarının Ekolojik Özellikleri. *Anatolian Bryology*, 3(1), 1-10.
- Glime, J. M. (2017). *Bryophyte Ecology*. Michigan Technological University and the International Association of Bryologists. <http://digitalcommons.mtu.edu/bryophyte-ecology/>
- Gökler, İ., Yücel, K. M., & Sarıtaş, S. (2022). Sultan Dağları'nın Ciğerotu (Marchantiophyta) Florası. *Anatolian Bryology*, 8(2), 66-72. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.1125051>
- Harris, E. S. (2008). Ethnobryology: traditional uses and folk classification of bryophytes. *The Bryologist*, 111(2), 169-217.
- Hodgetts, N., Cáliz, M., Englefield, E., Fettes, N., García Criado, M., Patin, L., ... & Żarnowiec, J. (2019). *A miniature world in decline: European Red List of Mosses, Liverworts and Hornworts*. Brussels, Belgium: IUCN.
- Kara, R., & Taşpınar, H. (2022). Türkiye İçin Yeni Bir Epifitik Briyofit Birliği: Orthotrichetum pumili (Jäggli 1934) von Hübschmann 1986. *Anatolian Bryology*, 8(1), 50-56. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.1071382>
- Keçeli, T., Uyar, G., & Ören, M. (2019). Contributions to the liverwort flora of Turkey: new records of *Riccia* L. (Ricciaceae) and a new record of

*Fossombronia* Raddi (Fossombroniaceae). *Turkish Journal of Botany*, 43(1), 55-68.

Kürschner, H., & Frey, W. (2020). *Liverworts, Mosses and Hornworts of Southwest Asia (Marchantiophyta, Bryophyta, Anthocerotophyta)*. (Nova Hedwigia Beiheft 149). Stuttgart: Borntraeger Science Publishers.

Ludwiczuk, A., & Asakawa, Y. (2019). Terpenoids and aromatic compounds from bryophytes. In *Natural Products from Plants* (pp. 123-166). CRC Press.

Mägdefrau, K. (1982). Life-forms of bryophytes. In A. J. E. Smith (Ed.), *Bryophyte Ecology* (pp. 45-58). Chapman and Hall.

Markert, B. A., Breure, A. M., & Zechmeister, H. G. (Eds.). (2003). *Bioindicators and biomonitoring: principles, concepts and applications*. Elsevier.

Motti, R., Palma, A. D., & de Falco, B. (2023). Bryophytes Used in Folk Medicine: An Ethnobotanical Overview. *Horticulturae*, 9(2), 137.

Özenoğlu Kiremit, H., Kiremit, F., & Keçeli, T. (2019). The Bryophyte Flora of Melendiz Mountain (Niğde/Turkey). *Biological Diversity and Conservation*, 12(1), 1-12.

Proctor, M. C., Oliver, M. J., Wood, A. J., Alpert, P., Stark, L. R., Cleavitt, N. L., & Mishler, B. D. (2007). Desiccation-tolerance in bryophytes: a review. *The Bryologist*, 110(4), 595-621.

Sarioğlu, S., & Keçeli, T. (2018). Acarlar Gölü Longoz Ormanı (Sakarya) Ciğerotu (Marchantiophyta) Florasına Katkılar. *Anatolian Bryology*, 4(2), 107-121. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.460427>

Sarıtaş, S., & Gökler, İ. (2023). İzmir İli Ciğerotu (Marchantiophyta=Hepaticae) Florasına Katkılar (Türkiye). *Anatolian Bryology*, 9(2), 70-74. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.1365645>

Şimşek, Ö. (2023). Ciğerotları, Etnobriyoloji ve Türkiye’de Bulunan Bazı Ciğerotlarının Etnobriyolojik Özellikleri. İçinde Y. E. Öztürk (Ed.), *Matematik ve Fen Bilimleri Üzerine Araştırmalar* (ss. 153-169). Özgür Yayınları.

Şimşek, Ö. (2024). Substrate Preferences of Liverworts (Marchantiophyta) in Yenice District, Çanakkale. A. Özdemir (Ed.), *Pioneer and Innovative Studies In Natural Science and Mathematics* içinde (s. 242-262). All Sciences Academy.

Şimşek, Ö., & Selvi, K. (2023). Briyofitlerin Sucul Ekosistemlerde Biyomonitör Olarak Kullanımları. *AS-Proceedings*, 1(2), 341-344.

Şimşek, Ö., & Ünal, Y. (2022). Kasatura Körfezi Tabiatı Koruma Alanı Ciğerotları (Marchantiophyta) Florası. *Anatolian Bryology*, 8(2), 123-130. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.1196492>

Şimşek, Ö., Canlı, K., & Gürsu, G. (2016). Bryophyte in the Beginning of Terrestrial Life. *Anatolian Bryology*, 2(1-2), 70-74.

- Şimşek, Ö., Canlı, K., Benek, A., Turu, D., & Altuner, E. M. (2023). Biochemical, Antioxidant Properties and Antimicrobial Activity of Epiphytic Leafy Liverwort *Frullania dilatata* (L.) Dumort. *Plants*, 12(9), 1877.
- Tosun, A., Süntar, İ., Keleş, H., Özenoğlu-Kiremit, H., Asakawa, Y., & Küpeli-Akkol, E. (2016). Wound healing potential of selected liverworts growing in Turkey. *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences*, 13(3), 285-291.
- Uslu, M., & Keçeli, T. (2019). İğneada Longoz Ormanları Milli Parkı (Demirköy-Kırklareli) Ciğerotları (Marchantiophyta) Florası. *Anatolian Bryology*, 5(2), 114-129. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.627576>
- Uyar, G., Ören, M., & Alataş, M. (2020). The bryophyte flora of Akyazı, Arifiye, Geyve, Karapürçek districts (Sakarya, Turkey). *Biological Diversity and Conservation*, 13(1), 27-43. <https://doi.org/10.46309/biodicon.2020.731878>
- Uyar, G., Ören, M., & Alataş, M. (2022). Işık Dağı (Ankara-Çankırı) Briyofit Florası. *Anatolian Bryology*, 8(1), 11-29. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.1050882>
- Uygur, A., Ezer, T., & Alataş, M. (2022a). Toros Dağları Briyofit Florasına Katkıları. *Anatolian Bryology*, 8(2), 96-105. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.1160373>
- Uygur, A., Ezer, T., Karaman, S., & Alataş, M. (2022b). The Bryophyte flora of Taşeli Plateau (Antalya-Karaman-Mersin/Turkey). *Acta Biologica Turcica*, 35(4), D8:1-14.
- Vanderpoorten, A., & Goffinet, B. (2009). *Introduction to Bryophytes*. Cambridge University Press.



# **Güncel Bulguların Işığında Ciğerotlarının (Marchantiophyta) Evrimsel Biyocoğrafyası**

**Özcan ŞİMŞEK<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dr.Öğr.Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniv. Yenice MYO, Ormancılık Bölümü.  
ozcansimsek@comu.edu.tr ORCID No.: 0000-0002-3210-7641

---

## ÖZET

Bu çalışma, ciğerotlarının (Marchantiophyta) küresel biyocoğrafik desenlerini; derin filogenetik yapı, ekohidrolojik belirleyiciler ve mikroklimatik adaptasyonlar çerçevesinde bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Yaklaşık 470–500 milyon yıllık evrimsel geçmişe sahip bu poikilohidrik bitki grubu, güncel dağılımını yalnızca mevcut iklim koşullarına değil, güçlü niş konservatizmi ve tarihsel süreçlere de borçludur. Tür düzeyinde klasik negatif Enlemsel Çeşitlilik Gradyanı (LDG) sergilenmesine karşın, filogenetik derinlik arttıkça bu desenin tersine dönmesi, ciğerotlarının tropikal değil, ılıman ve serin kuşaklarda kökenlendiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, “soğuk köken” ve Ilıman Niş Konservatizmi (TeNC) modellerini desteklemekte, tropik bölgeleri ise ikincil kolonizasyon ve hızlanmış çeşitlenme alanları olarak konumlandırmaktadır.

Küresel analizler, ciğerotu çeşitliliğini belirlemede yağış ve nemle ilişkili değişkenlerin sıcaklıktan yaklaşık 4,7 kat daha etkili olduğunu göstermektedir. “Briyofit paradoksu” kapsamında kuraklığa tolerans ve kaçınma stratejilerinin birlikteliği, bu grubun mikrohabitatlara bağımlı fakat ekohidrolojik açıdan son derece işlevsel olmasını sağlamaktadır. Dağlık alanlar, düşük rakımlarda çeşitlenme “beşikleri”, orta rakımlarda ise antik soyların korunduğu evrimsel “müzeler” olarak çift işlevli sistemler sunmaktadır.

Türkiye; Karadeniz dağları, Trakya longozları ve Kaz Dağları gibi alanlarıyla, bu küresel modellerin test edilebileceği önemli bir biyocoğrafik laboratuvarıdır. Çalışma, gelecekte filogenetik ve fonksiyonel çeşitliliği entegre eden, omik yaklaşımlarla desteklenen araştırmaların ve koruma stratejilerinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

*Anahtar Kelimeler – Ciğerotları, Marchantiophyta, Evrimsel Biyocoğrafya, Ilıman Niş Konservatizmi (TeNC), Poikilohidri, Filogenetik Endemizm, LDG İnversiyonu, Türkiye.*

---

## GİRİŞ

Ciğerotları (Marchantiophyta), yaklaşık 470-500 milyon yıl önce (Ma) Kambriyen/Ordovisyen geçişinde ortaya çıkan ve yaşayan en eski kara bitkisi soylarından birini temsil eden vasküler olmayan bitkilerdir (Qian, 2025; Şimşek ve ark., 2016). Tohumuz ve gerçek iletim dokusundan yoksun olan bu organizmalar, su dengesini aktif olarak düzenleyemeyen poikilohidrik

doğaları nedeniyle çevresel neme ve su mevcudiyetine son derece bağımlıdır (Zhalov ve ark., 2025). Bu hassas fizyolojik yapıları, ciğerotlarını ekosistem sağlığı ve iklimsel değişimlerin mikro ölçekte izlenmesi açısından kritik ekohidrolojik göstergeler haline getirmektedir (Zhalov ve ark., 2025).

Küresel ölçekte ciğerotları, tür zenginliğinin ekvatoran kutuplara doğru azaldığı belirgin bir Enlemsel Çeşitlilik Gradyanı (LDG) sergiler (Wang ve ark., 2025b). Ancak ciğerotlarının taksonomik çeşitlilik desenleri filogenetik derinliğe göre radikal bir değişim gösterebilirler. Ciğerotlarında tür düzeyinde tropiklerde yoğunlaşan çeşitlilik, yaklaşık 200 milyon yıl öncesine dayanan derin filogenetik seviyelerde ve bazal soylarda (örneğin Haplomitriopsida) ekstra-tropikal bölgelerde yoğunlaşarak LDG deseninin tersine dönmesine neden olabilmektedir (Wang ve ark., 2025a). Özellikle Kolombiya And Dağları gibi bölgeler ve tropikal ormanlar, yüksek topografik heterojenlik sayesinde hem yüksek tür zenginliği hem de dar yayılışlı endemik türler için kritik "sıcak noktalar" (hotspots) oluşturmaktadır (Lombo-Sanchez ve ark., 2024; Wang ve ark., 2025b).

Ciğerotlarının dağılımını şekillendiren faktörler incelendiğinde, güncel iklim koşullarının Kuvaterner dönemi iklim değişimlerine kıyasla tür zenginliği ve endemizm üzerinde daha baskın bir etkiye sahip olduğu görülmektedir (Qian & Qian, 2025). Suyu olan mutlak bağımlılıkları nedeniyle yağışla ilişkili değişkenler, tür zenginliğini belirlemede sıcaklığa oranla yaklaşık 4,7 kat daha güçlü bir etmendir (Wang ve ark., 2025b). Çin genelinde yapılan çalışmalar, çevresel enerji (AET) ve habitat heterojenliğinin bryofit zenginliğinin temel faktörleri olduğunu, bununla birlikte nemli bölgelerde çevresel faktörlerin açıklayıcı gücünün kurak bölgelere göre daha yüksek olduğunu göstermektedir (Song ve ark., 2021).

Evrimsel biyocoğrafya perspektifinden ciğerotları, yaygın "tropikal niş konservatizmi" (TNC) hipotezinden ziyade, antik soyların soğuk ve nemli habitatlara olan kökensel tercihinin yansıtan "ılıman niş konservatizmi" modeline daha yakın bir yapı sergiler (Qian ve ark., 2024a). Nitekim Kuzey Amerika'da filogenetik çeşitliliğin ılıman kuşakta (30°–40°N) zirve yapması bu bulguyu desteklemektedir (Qian ve ark., 2024b). Ancak Himalaya ve Çin gibi bölgelerde yapılan daha yerel analizler, artan yükseklik ve azalan sıcaklıkla birlikte filogenetik kümelenmenin arttığını göstererek TNC hipotezinin bölgesel ölçekte hala geçerli olabileceğine işaret etmektedir (Qian, 2025; Qian ve ark., 2024a). Bu adaptasyon süreci, mikromorfolojik düzeydeki papilla yapıları ve özel kütiküler dokular gibi su yönetimini optimize eden stratejilerle desteklenmekte; bu durum bitkilerin hem tropikal dağlarda hem de Özbekistan'da olduğu gibi kurak bölgelerdeki riparian mikrohabitatlarda hayatta kalmasını sağlamaktadır (Zhalov ve ark., 2025; Maul ve ark., 2025).

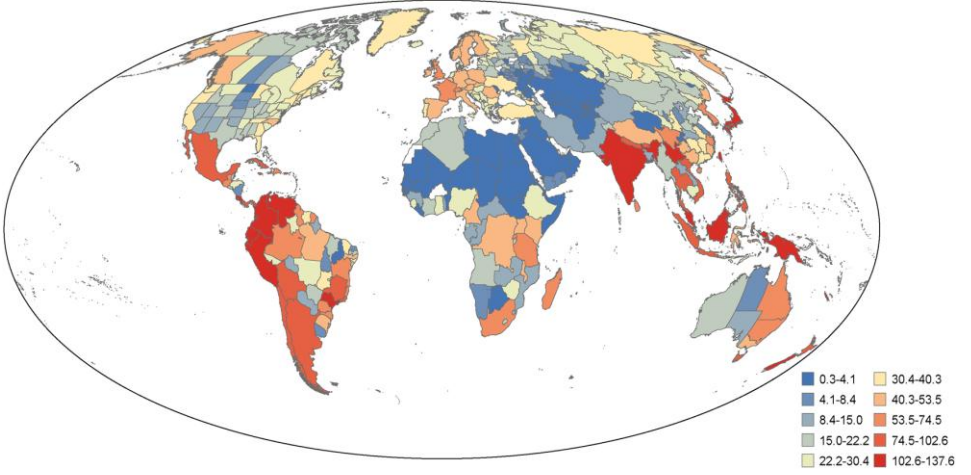
Bu çalışmanın amacı, ciğerotlarının dünya genelindeki taksonomik ve filogenetik çeşitlilik desenlerini güncel verilerle sentezlemek, bu desenlerin arkasındaki ekolojik ve tarihsel etmenleri belirlemek ve bu antik grubun değişen küresel iklim koşullarına karşı geliştirdiği mikroklimatik adaptasyon stratejilerini değerlendirmektir.

## KÜRESEL DAĞILIM DESENLERİ

Ciğerotlarının yerel ölçekte veya ülkeler ölçeğinde dağılımlarını inceleyen çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmeye devam ederken (Alataş ve ark., 2023; Natcheva & Gospodinov, 2024; Bakalin ve ark., 2025; Çatak ve ark., 2025; Konstantinova ve ark., 2025; Yücel ve ark., 2025), bu çalışmaların küresel ölçekte derlenip ortaya konması daha zor ve zaman aralığı gerektiren çalışmalardır (Söderström ve ark., 2016; Hodgetts ve ark., 2023). Ciğerotları (Marchantiophyta), kutup bölgelerinden tropikal yağmur ormanlarına kadar hemen hemen her biyomda yayılım gösteren geniş bir coğrafi dağılıma sahiptir. Bu dağılım desenleri, yalnızca güncel iklimsel koşulların değil, aynı zamanda yaklaşık 500 milyon yıla yayılan evrimsel süreçlerin ve derin filogenetik geçmişin bir yansımasıdır (Qian & Qian, 2025; Wang ve ark., 2025a).

### Enlemsel Çeşitlilik Gradyanı (LDG) ve Taksonomik Zenginlik

Küresel ölçekte ciğerotları, tür zenginliğinin ekvatorlardan kutuplara doğru azaldığı belirgin bir Enlemsel Çeşitlilik Gradyanı (LDG) sergiler (Wang ve ark., 2025b). Ancak bu desen, vasküler bitkilerinkinden farklılık gösterir; ciğerotu zenginliği üzerindeki iklimsel etkiler incelendiğinde, yağışla ilişkili değişkenlerin (yıllık yağış ve en kurak ayın yağışı) tür zenginliğini belirlemede sıcaklık değişkenlerine göre 4,7 kat daha güçlü bir açıklayıcı olduğu saptanmıştır (Wang ve ark., 2025b). Afrika kıtasında gözlemlenen nispeten zayıf LDG deseni, bu bölgenin Kuvaterner döneminde maruz kaldığı şiddetli kuraklıklar ve buna bağlı habitat kayıplarıyla açıklanmaktadır (Qian & Qian, 2025). Tür düzeyindeki tropikal yoğunlaşmaya rağmen, ciğerotlarının en eski (bazal) soyları (örneğin Haplomitriopsida) klasik LDG desenine uymaz; bu antik soyların çeşitlilik merkezleri tropiklerden ziyade Yeni Zelanda ve Japonya gibi ılıman bölgelerde yoğunlaşmıştır (Wang ve ark., 2025b).



Şekil 1 Ciğerotlarının alan düzeltmeli tür zenginliğinin coğrafi dağılımı.(Wang ve ark., 2025b)

### Filogenetik Çeşitlilik ve Desenlerin Tersine Dönmesi

Filogenetik düzeyde yapılan dekonstrüktif analizler, ciğerotlarının dağılım desenlerinin evrimsel derinlik arttıkça radikal bir değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Tür düzeyinde çeşitlilik tropiklerde zirve yaparken, yaklaşık 200 milyon yıl (Ma) ve öncesine dayanan derin filogenetik seviyelerde enlemsel gradyan tersine dönmektedir (Wang ve ark., 2025a). Bu analizler, ciğerotu soylarının çoğunun (extant lineages) aslında ekstra-tropikal (ılıman ve soğuk) bölgelerde ortaya çıktığını ve tropikal bölgeleri daha sonra kolonize ettiğini göstermektedir (Wang ve ark., 2025a). Bu "soğuk köken" (cool origin) hipotezi, ciğerotlarını tropikal kökenli olan angiospermilerden ayıran en temel biyocoğrafik özelliktir (Maul ve ark., 2025).

### Küresel Endemizm Merkezleri: Paleo ve Neo-endemizm

Küresel ölçekte ciğerotları için tanımlanan 38 stratejik endemizm merkezi, türlerin hem tarihsel korunma (persistence) hem de yeni çeşitlenme (speciation) süreçlerini yansıtmaktadır (Qian & Qian, 2025).

- **Paleo-endemizm Merkezleri:** Antik ve evrimsel olarak izole soyların sığınağı olan bu bölgeler; Güney Güney Amerika, Yeni Zelanda ve Tropikal Asya'da (örneğin Malezya takımadaları) yoğunlaşmıştır. Bu bölgeler yüksek "Göreceli Filogenetik Endemizm" (RPE) değerleri ile karakterize edilir (Qian & Qian, 2025).
- **Neo-endemizm Merkezleri:** Yakın zamanda çeşitlenmiş türlerin yoğunlaştığı alanlar olup, özellikle Güney Afrika ve kuzey Güney

Amerika'da (And Dağları) belirgindir. Örneğin Kolombiya'da yapılan çalışmalar, ülkede kaydedilen ciğerotu türlerinin yaklaşık %30'unun (359 tür) endemik olduğunu ve bu endemizmin %87,2'sinin And bölgesinde kümелendiğini göstermiştir (Lombo-Sanchez ve ark., 2024).

- Karışık (Mixed) Endemizm Merkezleri: Meksika'dan And Dağları'na uzanan hat ve Hindistan-Malesia hattı, hem paleo hem de neo-endemik soyları barındıran küresel biyoçeşitlilik depolarıdır (Qian & Qian, 2025).

## EKOLOJİK VE ÇEVRESEL FAKTÖRLER

Ciğerotlarının küresel çeşitlilik ve endemizm desenleri; güncel iklim koşulları, tarihsel iklimsel kararlılık ve topografik heterojenlik gibi çok boyutlu faktörlerin karmaşık bir etkileşimi ile şekillenmektedir. Bu faktörlerin göreceli önemi, incelenen biyolojik ölçüte (tür zenginliği, endemizm veya filogenetik yapı) ve coğrafi ölçeğe göre önemli varyasyonlar sergilemektedir (Wang ve ark., 2025a; Qian & Qian, 2025).

### İklimsel Etmenler

Ciğerotları için su mevcudiyeti en kritik sınırlayıcı faktördür. Epidermal tabakalardan ve stomatal kontrol mekanizmalarından yoksun olan bu bitkiler, su kaybını aktif olarak düzenleyemeyen poikilohidrik organizmalardır (Zhalov ve ark., 2025). Küresel ölçekte yapılan makroekolojik analizler, yağışla ilişkili değişkenlerin (yıllık ortalama yağış ve en kurak ayın yağışı), ciğerotu tür zenginliğini belirlemede sıcaklık değişkenlerine göre 4,7 kat daha güçlü bir açıklayıcı güce sahip olduğunu ortaya koymuştur (Wang ve ark., 2025b). Benzer şekilde, filogenetik endemizm (PE) üzerindeki en güçlü iklimsel etmen yıllık yağış değişkenliğidir (Qian & Qian, 2025). Ancak, filogenetik yapı ve topluluk kompozisyonu söz konusu olduğunda, sıcaklık değerlerinin merkezi bir rol oynadığı görülmektedir. Nitekim, net çeşitlenme oranları (diversification rates) sıcaklıkla doğrusal olarak artarken, yüksek enlemlerdeki ve irtifalardaki düşük sıcaklıklar, toplulukların filogenetik olarak kümelenmesine (clustering) neden olan sert bir çevresel filtre işlevi görür (Maul ve ark., 2025; Qian, 2025).

Ciğerotlarının çeşitliliği üzerinde iklim ekstremlerinin (en soğuk ayın sıcaklığı veya en kurak ayın yağışı), iklim mevsimselliğine göre çok daha belirleyici bir etkisi vardır (Wang ve ark., 2025b). Mevsimsellik, türlerin fizyolojik olarak uyum sağlayabildiği öngörülebilir bir desen sunarken; ekstremler, bitkilerin hayatta kalma sınırlarını belirleyen kritik eşiklerdir.

Örneğin, vasküler bitkiler için kısıtlayıcı olan don olayları, ciğerotları için farklı bir dinamik yaratır; poikilohidrik doğaları sayesinde doku dehidrasyonu ile don hasarından kaçınabilen ciğerotu soyları, soğuk ılıman bölgelerde angiospermilere oranla daha yüksek bir nispi çeşitlilik sergileyebilmektedir (Qian ve ark., 2024b). Bununla birlikte, kuraklık ekstreleri ciğerotları için çok daha yıkıcıdır; bu nedenle bu bitkiler kurak bölgelerde yalnızca sürekli nem sağlayan riparian (dere kenarı) mikrohabitatlara ve jipsli topraklar gibi su tutma kapasitesi yüksek substratlara sıkışmış durumdadır (Zhalov ve ark., 2025).

### **Topografik Heterojenlik ve Rakım Etkisi**

Dağlık alanlar, ciğerotları için hem çeşitlilik "beşikleri" hem de "müzeleri" olarak işlev görür. Küresel ölçekte elevasyonel aralık (yükseklik farkı), tür zenginliği ile en güçlü pozitif korelasyona sahip coğrafi belirleyicidir (Wang ve ark., 2025b). Dağlar, yüksek topografik heterojenlik sağlayarak farklı ekolojik nişlerin bir arada bulunmasına olanak tanırken, izolasyon yoluyla neo-endemizm süreçlerini tetikler. Kolombiya And Dağları'nda endemizmin %87 gibi yüksek bir oranda bu bölgede yoğunlaşması, dağların "beşik" rolünü doğrulamaktadır (Lombo-Sanchez ve ark., 2024). Aynı zamanda, ortalama cins yaşının (AgeElev) tür zenginliğinin zirve yaptığı orta rakımlardaki serin-nemli habitatlarda en yüksek değerine ulaşması, bu bölgelerin antik soyları koruyan birer "müze" olduğunu kanıtlamaktadır (Maul ve ark., 2025).

### **Tarihsel Süreçler ve Kuvaterner İklim Değişimleri**

Ciğerotlarının bugünkü dağılım desenleri üzerinde güncel iklim koşulları, Kuvaterner dönemi iklim değişim hızına kıyasla çok daha baskın bir etkiye sahiptir. Yapılan analizler, filogenetik endemizmdeki (PE) varyansın %17,7'sinin güncel iklimle, sadece %2,2'sinin ise Kuvaterner iklim değişimleri ile açıklandığını göstermektedir (Qian & Qian, 2025). Bu durum, ciğerotlarının rüzgarla taşınan sporları sayesinde sahip oldukları yüksek uzun mesafe yayılma kapasitesine bağlanmaktadır. Bu yetenek, türlerin iklimsel değişimlere vasküler bitkilerden daha hızlı yanıt vererek dağılımlarını güncel koşullarla dengelemelerine olanak tanır (Wang ve ark., 2025a; Qian & Qian, 2025). Buna rağmen, Çin'deki bryofit zenginliği üzerinde tarihsel çevresel faktörlerin ve habitata özgü heterojenliğin etkisi, özellikle nemli bölgelerde hala belirgin bir açıklayıcı güç sunmaktadır (Song ve ark., 2021).

## EVİRİMSSEL DİNAMİKLER VE FİLOGENETİK YAPI

Ciğerotlarının evrimsel geçmişi, yaklaşık 500 milyon yıl önce (Ma) Kambriyen/Ordovisyen geçişinde, yerkürenin "sera" (greenhouse) döneminde ortaya çıkan kökenleriyle modern kara bitkisi çeşitliliğinin temel taşı oluşturur (Qian, 2025; Wang ve ark., 2025b). Bu antik bitki grubunun günümüzdeki küresel dağılım desenleri; türlerin atasal ekolojik nişlerini koruma eğilimi (niş konservatizmi), filogenetik seviyeye göre değişen enlemsel gradyanlar ve farklı jeolojik dönemlerdeki çeşitlenme stratejileriyle şekillenmiş karmaşık bir yapıdır.

### Niş Konservatizmi Hipotezleri: Tropikal ve Ilıman Köken Tartışmaları

Ciğerotlarının filogenetik yapısını açıklamada iki temel hipotez rekabet halindedir. Geleneksel "Tropikal Niş Konservatizmi" (TNC) hipotezi, çoğu organizmanın sıcak ve nemli tropiklerde ortaya çıktığını ve soğuk/kurak iklimlere adaptasyonun evrimsel olarak zor olduğunu savunur. Nitekim Himalaya ve Çin'de yapılan bölgesel analizler, artan yükseklik ve azalan sıcaklıkla birlikte filogenetik dağılımın azaldığını ve türlerin birbirine daha yakın akraba olduğu "filogenetik kümelenme" (clustering) sergilediğini göstererek TNC hipotezini desteklemektedir (Qian, 2025; Qian ve ark., 2024a).

Ancak küresel ölçekli ve derin zaman analizleri, ciğerotlarının angiospermilerin aksine "Ilıman Niş Konservatizmi" (TeNC) modeline daha yakın bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Filogenetik analizler, ciğerotlarının en eski (bazal) soylarının (örneğin Haplomitriopsida) çeşitlilik merkezlerinin tropiklerde değil, Yeni Zelanda ve Japonya gibi ekstra-tropikal (ılıman) bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir (Wang ve ark., 2025a). Kuzey Amerika genelinde yapılan çalışmalar da filogenetik çeşitliliğin tropiklerden ziyade 30°–40°N ılıman enlemleri arasında zirve yapmasıyla bu "soğuk köken" (cool origin) hipotezini doğrulamaktadır (Qian ve ark., 2024b; Maul ve ark., 2025).

### Filogenetik Seviyeye Göre LDG Desenin Tersine Dönüşü

Ciğerotlarının enlemsel çeşitlilik gradyanı (LDG), incelenen filogenetik derinliğe göre radikal bir değişim göstermektedir. Tür düzeyinde bakıldığında, ciğerotları ekvatorda zirve yapan klasik bir negatif LDG sergilese de, dekonstrüktif filogenetik analizler bu desenin yaklaşık 100-200 milyon yıl öncesine dayanan derin seviyelerde tersine döndüğünü kanıtlamaktadır (Wang ve ark., 2025b). Özellikle 200 milyon yıl öncesindeki antik soyların çeşitliliği yüksek enlemlerde artış göstererek "pozitif bir LDG" oluşturur. Bu "tersine dönmüş gradyan", ciğerotlarının evrimsel tarihinin

büyük bölümünde ekstra-tropikal koşulların atasal niş alanı olarak kaldığını, modern tropikal zenginliğin ise evrimsel olarak daha yakın dönemlerde gerçekleşen ikincil bir kolonizasyon süreci olduğunu ortaya koymaktadır (Wang ve ark., 2025b).

### **Çeşitlenme Oranları ve Soy Yaşı: Müze ve Beşik Dinamiği**

Ciğerotlarının çeşitlenme dinamikleri çevresel sıcaklıkla doğrudan ve pozitif bir korelasyon sergiler. Net çeşitlenme oranları (DivElev), yıllık ortalama sıcaklığın artışıyla doğrusal olarak yükselerek düşük rakımlı tropikal bölgelerde zirveye ulaşmaktadır (Maul ve ark., 2025). Bu durumun temel belirleyicisi, özellikle Kretase döneminde angiosperm ormanlarının gelişimiyle eş zamanlı olarak hızla çeşitlenen epifitik soylardır.

Buna karşılık, evrimsel tarihin korunumu açısından kritik olan "ortalama cins yaşı" (AgeElev), tür zenginliğinin de zirve yaptığı orta rakımlardaki (1000-3000 m) serin ve nemli habitatlarda en yüksek değerine ulaşmaktadır (Maul ve ark., 2025; Wang ve ark., 2025a). Bu bulgu, dağların orta kuşaklarının antik soyların soylarını devam ettirebildiği "müzeler", yüksek ve sıcak bölgelerin ise yeni türlerin hızla oluştuğu "beşikler" olarak işlev gördüğünü kanıtlamaktadır.

### **Epifitizmin Evrimsel Rolü**

Ciğerotlarında epifitik türler bilhassa orman ekosistemlerinde yaygındır ve epifitik ciğerotlarının tür çeşitliliği de oldukça yüksektir (Şimşek, 2024c). Ciğerotlarında epifitizm, özellikle Porellales takımında (örneğin Lejeuneaceae ve Jubulaceae familyaları) çeşitlenme oranlarını önemli şekilde artıran kritik bir evrimsel inovasyondur. Epifitik soylar, angiospermilerin sağladığı yeni ve dikey habitatları hızla işgal ederek yüksek çeşitlenme hızları yakalamışlardır (Maul ve ark., 2025). Epifitik ciğerotlarının çeşitlenmesi sıcaklığa yüksek derecede bağımlıyken; epifitik olmayan (terrestrik/yerde yaşayan) soylar, mikrohabitat parametrelerine (nem, substrat) daha bağımlıdır ve küresel sıcaklık gradyanlarıyla daha zayıf bir ilişki sergilerler (Maul ve ark., 2025). Bu ayrım, ciğerotlarının modern biyoçeşitlilik merkezlerindeki baskın varlığının arkasındaki temel mekanizmadır.

### **Çevresel Filtreleme ve Filogenetik Kümelenme**

Makro-iklimsel faktörler, toplulukların filogenetik yapısını şekillendiren sert filtreler olarak işlev görürler. Çin ve Kuzey Amerika'da yapılan analizler, özellikle en soğuk ayın sıcaklığı ve yıllık yağış değişkenliğinin filogenetik kümelenmenin (NRI/NTI endeksleri) en güçlü belirleyicileri olduğunu göstermiştir (Qian ve ark., 2024a; Qian ve ark., 2024b). Düşük sıcaklıklar ve yüksek mevsimsellik, yalnızca belirli fizyolojik adaptasyonlara (donma direnci, dehidrasyon toleransı) sahip evrimsel olarak

yakın akraba soyların bu bölgelerde hayatta kalmasına izin vermektedir. Bu durum, ciğerotlarının küresel ölçekteki topluluk kompozisyonunun hem tarihsel niş kısıtlamaları hem de güncel iklimsel filtreler tarafından ortaklaşa yönetildiğini doğrulamaktadır (Qian, 2025).

## **MİKROKLİMATİK ADAPTASYONLAR, BÜYÜME FORMLARI VE EKOHİDROLOJİK STRATEJİLER**

Ciğerotları (Marchantiophyta), vasküler olmayan bitkiler arasında su dengesini aktif olarak düzenleyemeyen poikilohidrik doğaları nedeniyle ekohidrolojik süreçlerin en hassas biyolojik modellerinden biri olarak kabul edilmektedir. Gerçek kök, gövde ve ligninleşmiş iletim dokularından yoksun olmaları; metabolik faaliyetlerini doğrudan ortam nemine, sis yoğunluğuna ve mikroklimatik çökelmelere bağımlı hâle getirmiştir (Zhalov ve ark., 2025; Wang ve ark., 2025a). Bu fizyolojik kısıtlılık, ilk bakışta ciğerotlarını kuraklık stresine karşı savunmasız gibi gösterse de, Proctor (2000) tarafından “Briyofit Paradoksu” olarak tanımlanan strateji sayesinde bu grup, hem kuraklığa tolerans (desikasyon direnci) hem de kuraklıktan kaçınma mekanizmalarını birlikte kullanarak evrimsel bir avantaj elde etmiştir.

Vasküler bitkilerin aksine ciğerotları, gelişmiş kütiküler tabakalara ve işlevsel stomalara sahip değildir; su içerikleri çevreyle pasif bir denge hâlinindedir. Bu poikilohidrik yaşam stratejisi, özellikle ekstrem iklim koşullarında belirleyici bir çevresel filtre işlevi görmektedir. Qian ve ark. (2024b), poikilohidrik ciğerotlarının don riski taşıyan dönemlerde dokularını hızla dehidre ederek hücre içi buz kristali oluşumunu engellediğini ve böylece don hasarından kaçınabildiğini ortaya koymuştur. Bu mekanizma, ciğerotlarının angiospermlere kıyasla soğuk ılıman bölgelerde neden daha yüksek bir nispi filogenetik çeşitlilik sergilediğini açıklayan temel süreçlerden biridir (Qian ve ark., 2024b).

### **Mikromorfolojik Adaptasyonlar ve Su Yönetimi**

Ciğerotlarının mikroskobik düzeydeki yapısal özellikleri, suyun tutulması, gaz değişimi ve dehidrasyon hızı üzerinde doğrudan belirleyici rol oynar. Yaprak veya tallus yüzeyinde bulunan papilla çıkıntıları, sınır tabakasını kalınlaştırarak buharlaşmayı yavaşlatmakta ve su damlacıklarının yüzeyde tutunmasını sağlamaktadır (Zhalov ve ark., 2025). Örneğin *Riccia papillosa*’da gözlemlenen yoğun ve silindirik papilla yapıları, yüzey alanını artırarak nem tutma kapasitesini maksimize etmektedir (Zhalov ve ark., 2025).

Buna ek olarak, epidermal hücre duvarlarındaki düzensizlikler ve poligonal hücre formları, suyun kapiler yollarla doku içinde hareketini

kolaylaştırarak hidrasyon süresini uzatır. *Calypogeia arguta*'da görülen düzensiz epidermal hücreler ve küçük papilla yapıları, nemli ve jipsli topraklarda su dengesinin korunmasına katkı sağlamaktadır (Zhalov ve ark., 2025). Bazı türlerdeki kütiküler deformasyonlar, pürüzlü tallus yüzeyleri ve kenar tüyleri (trichomes) ise suyun yüzeyde damlacıklar hâlinde asılı kalmasını sağlayarak fotosentetik aktivite için gerekli hidrasyon süresini uzatır; bu durum *Metzgeria conjugata* gibi türlerde belirgin şekilde gözlenmektedir (Zhalov ve ark., 2025). Ayrıca ciğerotlarının sentezlediği çeşitli sekonder metabolitler, kuraklık stresine karşı ek bir savunma önlemi oluşturabilmektedir (Benek ve ark., 2025).

### **Büyüme Formları ve Su Tutma Kapasitesi**

Mikromorfolojik adaptasyonların yanı sıra, makroskobik büyüme formları da ciğerotlarının su ekonomisinde kritik öneme sahiptir. Selvi ve Şimşek (2025) tarafından belirtildiği üzere, ciğerotları ve diğer briyofitler oluşturdukları yastık (yoğun kümelenmiş) veya halı (yayılıcı örtü) formları sayesinde su tutma kapasitelerini (WHC) kuru ağırlıklarının %300 ila %700'üne kadar çıkarabilmektedir. Yoğun kümelenme gösteren formlar iç kapilariteyi artırarak suyun buharlaşmasını sınırlandırırken; yayılıcı formlar geniş yüzey alanları sayesinde atmosferik nem ve yağıştan maksimum düzeyde yararlanmaktadır.

### **Ekohidrolojik Gösterge Rolü ve Habitat Kararlılığı**

Bu mikromorfolojik ve makromorfolojik adaptasyonların bileşkesi, ciğerotlarını ekosistem ölçeğinde nem rejimini düzenleyen etkili “mikro-tamponlar” hâline getirmektedir. Glime (2024), briyofit matlarının toprak nemindeki ani dalgalanmaları azaltarak mikrohabitat istikrarını artırdığını vurgulamaktadır. Küresel ölçekte yapılan analizlerde, ciğerotu tür zenginliğinin belirlenmesinde yağış değişkenlerinin (yıllık yağış ve en kurak ayın yağışı) sıcaklıktan 4,7 kat daha etkili olması, bu grubun belirgin biçimde “su odaklı” ektohidrik doğasını ortaya koymaktadır (Wang ve ark., 2025b).

Riparian habitatlar, ciğerotlarının hem taksonomik zenginlik hem de dar yayılışlı endemizm açısından en yoğun bulunduğu alanlardır (Lombo-Sanchez ve ark., 2024). Bu habitatlarda ciğerotu toplulukları, hedef odaklı hücrel deformasyonlar ve hızlı hidrasyon–dehidrasyon döngüleri yoluyla mikroklimatik nem dengesini düzenlemekte; erken süksesyon evrelerinde toprakta su tutma kapasitesi ve organik madde birikimini artırarak daha karmaşık vasküler bitki topluluklarının yerleşmesi için uygun bir ekohidrolojik zemin hazırlamaktadır (Zhalov ve ark., 2025). Bu süreç, tarihsel iklimsel kararlılığın yüksek olduğu bölgelerde antik soyların neden daha yoğun birikim gösterdiğini de açıklamaktadır (Qian & Qian, 2025; Maul ve ark., 2025).

## **TÜRKİYE’NİN CİĞEROTLARI AÇISINDAN BÖLGESEL VE KÜRESEL ÖNEMİ**

Küresel desenleri ve belirleyicileri tartıştıktan sonra, bu bölümde bu çerçeveyi somut bir bölgesel ölçekte değerlendirmek ve Avrasya’nın önemli bir biyocoğrafik kavşağı olan Türkiye’nin ciğerotu çeşitliliğinin küresel modellerle olan uyumunu ve özgünlüğünü vurgulamak amaçlanmıştır. Türkiye, coğrafi konumu, topoğrafik çeşitliliği ve farklı iklim rejimlerinin kısa mesafelerde kesişmesi nedeniyle ciğerotları (Marchantiophyta) açısından yalnızca bölgesel değil, aynı zamanda küresel ölçekte de dikkate değer bir öneme sahiptir. Anadolu, Avrupa-Sibirya, Akdeniz ve İran-Turan fitocoğrafik bölgelerinin etkileşimiyle şekillenmiş olup, bu durum Türkiye’yi farklı evrimsel kökenlere sahip ciğerotu soylarının bir arada bulunduğu karmaşık bir geçiş zonu ve potansiyel bir filogenetik müze haline getirmektedir (Çetin, 1999; Keçeli, 2004; Yücel ve ark., 2025).

Batı ve Doğu Karadeniz dağları, yıl boyu yüksek nem rejimi, orografik yağışlar ve derin vadiler sayesinde, ciğerotları için ideal mikroklimatik sığınaklar sunmaktadır. Bolu Dağları, Küre Dağları, Ilgaz Dağları, Yenice Ormanları ve Karçal Dağları gibi alanlardaki floristik çalışmalar, epifitik ve nem bağımlı ciğerotu topluluklarının yüksek tür zenginliği sergilediğini ortaya koymuştur (Şimşek & Çetin, 2016; Uyar ve ark., 2007; Ören ve ark., 2012; Şimşek ve ark., 2011; Batan ve ark., 2024; Ören & Ursavaş, 2020). Bu alanlar, küresel ölçekte tanımlanan ve yüksek ortalama soy yaşı (cins yaşı) ile karakterize edilen "serin-nemli filogenetik müze habitatları" (Maul ve ark., 2025; Wang ve ark., 2025a) ile büyük benzerlikler göstermekte, antik soyların uzun dönemli sürekliliğini destekleyen refüjiyal alanlar olarak değerlendirilebilmektedir. Bu hipotezin test edilmesi, bölgeye özgü filogenetik endemizm analizleri gibi ileri yöntemlerin uygulanmasını gerektirmektedir.

Trakya ve kuzeybatı Anadolu, Balkanlar ile Anadolu arasında bir biyocoğrafik köprü işlevi görmektedir. İğneada Longoz Ormanları ve Kocaçay Deltası gibi sulak alan ekosistemlerindeki çalışmalar, nemli düşük rakımlı habitatların ciğerotları için önemli çeşitlilik merkezleri olduğunu göstermiştir (Keçeli & Ursavaş, 2019; Uslu & Keçeli, 2019). Bu bölgeler, Avrupa kökenli ılıman adaptasyonlu taksonların Anadolu’ya girişinde kritik bir rol oynamış ve günümüzde de filogenetik açıdan heterojen toplulukların oluşmasına olanak tanımıştır. Bu durum, küresel çeşitlilik modellerinde vurgulanan tarihsel dağılım yollarının ve biyocoğrafik bariyerlerin (Qian & Qian, 2025), bölgesel ölçekteki topluluk yapısını nasıl şekillendirebileceğine iyi bir örnektir.

Batı ve Orta Anadolu'da yer alan Uludağ, Sultan Dağları, Bozdağlar, Kadınçayırı Tabiat Parkı ve Gürgenli Dağı gibi alanlardaki araştırmalar, daha sınırlı makroiklimsel nem koşullarına rağmen, topoğrafik heterojenliğin ve lokal mikrohabitatların (kaya yarıkları, kaynak başları, nemli vadiler) ciğerotu çeşitliliğini sürdürmedeki kritik rolünü ortaya koymaktadır (Çetin, 1999; Sanalp & Keçeli, 2018; Dikmen & Keçeli, 2017; Gökler ve ark., 2022; Yücel ve ark., 2024). Bu bulgu, ciğerotu dağılımının küresel ölçekte yağışa mutlak bağımlılığı (Wang ve ark., 2025a) ile uyumlu olmakla birlikte, elverişsiz makrokoşullarda bile topoğrafyanın sağladığı mikroiklim çeşitliliğinin türlerin varlığını nasıl devam ettirebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

Kaz Dağları (Mount Ida) ve çevresi, Ege ve Marmara bölgeleri arasındaki konumu ve yüksek nemli kuzey yamaçlarıyla, Türkiye ciğerotu florası açısından özel bir konuma sahiptir. Bu alandaki güncel çalışmalar, hem tür zenginliği hem de substrat ve habitat çeşitliliği açısından Kaz Dağları'nın önemli bir bölgesel merkez olduğunu göstermektedir (Şimşek, 2024a; Şimşek, 2024b). Bu alanlar, yüksek endemizm potansiyeli taşıyan ve koruma önceliği bulunan "karma (mixed) endemizm merkezleri" (Qian & Qian, 2025) ile benzerlik göstermektedir.

Türkiye genelindeki floristik çalışmalar, büyük ölçüde taksonomik envanter düzeyinde kalmış, filogenetik çeşitlilik, filogenetik endemizm ve niş konservatizmi temelli makroekolojik analizler henüz yeterince geliştirilmemiştir (Keçeli, 2004; Şimşek, 2024a). Bu bağlamda Türkiye, küresel ölçekte öne sürülen "ılıman niş konservatizmi" (Qian ve ark., 2024b) ve "soğuk köken" (Wang ve ark., 2025b) hipotezlerinin, farklı fitocoğrafik bölgelerin kesişiminde ve çeşitli topoğrafyalarda test edilebileceği doğal bir laboratuvar niteliğindedir.

Sonuç olarak, Türkiye sahip olduğu eşsiz biyocoğrafik konum ve habitat mozaïği sayesinde, ciğerotları açısından yalnızca bir geçiş zonu değil; aynı zamanda küresel modellerde tanımlanan antik soyların korunabildiği potansiyel filogenetik müzeleri, biyocoğrafik köprü dinamiklerini ve mikrohabitat çeşitliliğinin hayati önemini bir arada barındıran özgün ve yüksek öncelikli bir araştırma alanıdır.

## SENTEZ VE KÜRESEL BİYOCOĞRAFİK ÇIKARIMLAR

Bu çalışma, ciğerotlarının (Marchantiophyta) küresel biyocoğrafik desenlerini; derin filogenetik yapı, mikroklimatik adaptasyonlar ve ekohidrolojik belirleyiciler ekseninde bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmiştir. Ortaya çıkan bulgular, bu antik bitki grubunun güncel dağılımının yalnızca mevcut iklim koşullarının bir yansıması olmadığını; yaklaşık 500 milyon yıla yayılan evrimsel mirasın, poikilohidrik yaşam

stratejisinin ve güçlü niş konservatizminin modern biyoçeşitlilik desenlerini belirleyici biçimde şekillendirdiğini ortaya koymaktadır (Qian & Qian, 2025; Wang ve ark., 2025a).

### **Enlemsel Çeşitlilik Gradyanının (LDG) Çözülmesi ve “Soğuk Köken” Hipotezi**

Tür düzeyinde değerlendirildiğinde, ciğerotlarının klasik negatif Enlemsel Çeşitlilik Gradyanı (LDG) sergilemesi, vasküler bitkilerle yüzeysel bir benzerlik izlenimi yaratmaktadır. Ancak filogenetik derinlik arttıkça bu desenin tersine dönmesi, LDG’nin evrimsel açıdan yanıltıcı olabileceğini göstermektedir. Wang ve ark. (2025b), yaklaşık 100–200 milyon yıl öncesine uzanan soy düzeylerinde tür zenginliğinin tropiklerde değil, ekstra-tropikal ve serin kuşaklarda yoğunlaştığını ortaya koymuştur.

Bu bulgu, ciğerotlarının angiospermiler için yaygın olarak kabul edilen “tropikal köken” paradigmasından belirgin biçimde ayrıldığını ve “soğuk köken” ya da daha geniş çerçevede Ilıman Niş Konservatizmi (Temperate Niche Conservatism; TeNC) modeline daha iyi uyduğunu göstermektedir (Maul ve ark., 2025; Qian ve ark., 2024b). Bu bağlamda, günümüz tropikal biyoçeşitlilik merkezleri, ciğerotları için evrimsel beşikler olmaktan ziyade, ikincil kolonizasyon ve hızlanmış çeşitlenmenin gerçekleştiği alanlar olarak değerlendirilmelidir.

### **Briyofit Paradoksu ve Su Odaklı Biyocoğrafyanın Makroekolojik Sonuçları**

Bu çalışmanın en güçlü sentezlerinden biri, mikro ölçekteki fizyolojik özelliklerin makro ölçekteki biyocoğrafik desenleri nasıl belirlediğini ortaya koymasındır. Proctor (2000) tarafından tanımlanan “Briyofit Paradoksu”—kuraklık toleransı (desikasyon direnci) ile kuraklıktan kaçınma stratejilerinin eşzamanlı varlığı—ciğerotlarının küresel dağılımını sıcaklıktan ziyade su mevcudiyetine bağımlı hale getirmiştir.

Küresel analizlerde yağış ve nemle ilişkili değişkenlerin tür zenginliğini sıcaklığa göre yaklaşık 4,7 kat daha güçlü açıklaması, bu grubun belirgin biçimde “su odaklı” ektohidrik doğasını teyit etmektedir (Wang ve ark., 2025b). Selvi ve Şimşek (2025) tarafından vurgulanan büyüme formları (yastık, halı vb.) ve bu formların sağladığı yüksek su tutma kapasitesi (%300–700 WHC), ciğerotlarının yalnızca hayatta kalmasını değil, aynı zamanda mikrohabitatların hidrolojik dengesini düzenlemesini de mümkün kılmaktadır.

Bu çerçevede iklim değişikliği bağlamında temel tehdit, küresel sıcaklık artışından ziyade, hidrolojik döngüdeki bozulmalar, yağış rejimindeki düzensizlikler ve kuraklık ekstreleridir. Bu süreçler, ciğerotlarını giderek daha sınırlı mikrohabitatlara (riparian zonlar, sisli yamaçlar, nemli kaya yüzeyleri)

sıkıştırmakta ve filogenetik olarak izole paleo-endemik soyların yok olma riskini artırmaktadır (Zhalov ve ark., 2025).

### **Dağlık Alanlar: Evrimsel Beşik, Müze ve Mikroklimatik Tamponlar**

Dağlık alanlar, ciğerotları için biyocoğrafik açıdan çift işlevli sistemlerdir. Düşük rakımlı ve sıcak tropikal bölgeler, yeni türlerin hızla ortaya çıktığı çeşitlenme “beşikleri” olarak öne çıkarken; orta rakımlı, serin ve nemli kuşaklar, antik soyların uzun süre korunabildiği evrimsel “müzeler” işlevi görmektedir (Maul ve ark., 2025; Wang ve ark., 2025a).

Bu mekânsal ayrışma, yalnızca tür zenginliğine odaklanan koruma yaklaşımlarının yetersiz kalacağını göstermektedir. Glime (2024)’ın belirttiği gibi, briyofit matlarının mikro-tamponlama kapasitesi, bu müze alanlarında mikroklimatik istikrarın sürdürülmesinde temel rol oynamaktadır. Dolayısıyla filogenetik endemizmin yoğunlaştığı orta rakımlı ve mikroklimatik olarak kararlı alanlar, küresel ölçekte öncelikli koruma birimleri olarak ele alınmalıdır (Qian & Qian, 2025).

### **Epifitizm, Mikroklimatik Adaptasyonlar ve Evrimsel Dayanıklılık**

Epifitik yaşam biçimi, özellikle Porellales içinde güçlü bir çeşitlenme tetikleyicisi olarak ortaya çıkmaktadır. Angiosperm ormanlarının sağladığı dikey habitatların hızlı kolonizasyonu, epifitik soyların sıcaklığa duyarlı fakat yüksek çeşitlenme hızlarına ulaşmasını sağlamıştır (Maul ve ark., 2025). Buna karşılık, terestrik ve paleo-endemik soyların mikrohabitat koşullarına yüksek bağımlılığı, bu grupları iklim değişikliğine karşı daha kırılgan hale getirmektedir.

Papilla yapıları, epidermal hücre deformasyonları, kütiküler dokular ve poikilohidrik fizyoloji, ciğerotlarının ekstrem koşullarda hayatta kalmasını sağlayan temel mekanizmalar olup, aynı zamanda bu grubu ekohidrolojik süreçlerin izlenmesinde güçlü biyolojik göstergeler (biyoindikatörler) haline getirmektedir (Zhalov ve ark., 2025).

### **Türkiye Perspektifi: Küresel Modeller İçin Doğal Bir Test Alanı**

Türkiye, farklı fitocoğrafik bölgelerin kesişiminde yer alması ve yüksek topoğrafik heterojenliği sayesinde, bu çalışmada tartışılan küresel biyocoğrafik modellerin sınanabileceği istisnai bir doğal laboratuvar sunmaktadır. Karadeniz dağ kuşağı, Trakya longozları ve Kaz Dağları gibi alanlar, yalnızca geçiş zonları değil; aynı zamanda potansiyel filogenetik müze ve sığınak alanları olarak öne çıkmaktadır (Keçeli, 2004; Şimşek, 2024a; Yücel ve ark., 2025).

Bununla birlikte, Türkiye’deki mevcut çalışmaların büyük ölçüde taksonomik envanter düzeyinde kalması, filogenetik endemizm ve niş

konservatizmi temelli analizlerin sınırlı olmasına neden olmaktadır. Filogenetik ve fonksiyonel çeşitliliği entegre eden makroekolojik çalışmalar, “soğuk köken” ve Ilıman Niş Konservatizmi modellerinin küresel ölçekte test edilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

### **Sonuç ve Gelecek Perspektifi: Taksonomiden Fonksiyonel Genomiğe**

Sonuç olarak bu çalışma, ciğerotlarının biyocoğrafyasının yalnızca güncel iklim değişkenleriyle değil; derin evrimsel miras, mikroklimatik süreçler ve ekohidrolojik hassasiyetlerle birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Tür zenginliği, filogenetik yapı ve suya bağımlı fizyoloji arasındaki güçlü bağ, koruma önceliklerinin yeniden tanımlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Gelecekteki araştırmaların, filogenetik endemizm odaklı koruma yaklaşımlarını; mikroklimatik stabilite, büyüme formları ve stres toleransını kapsayan fonksiyonel özelliklerle birleştirmesi gerekmektedir. Türkiye gibi biyocoğrafik kavşaklarda, Selvi ve Şimşek (2025) tarafından önerildiği üzere, transkriptomik ve proteomik gibi “omik” yaklaşımların kullanılması, bu antik ve hassas bitki grubunun değişen iklim koşulları altında nasıl varlığını sürdürebileceğini anlamanın anahtarını sunacaktır.

### **KAYNAKLAR**

- Alataş, M., Ezer, T., Erata, H., Batan, N., & Ursavaş, S. (2023). The Epiphytic Bryophyte Vegetation of *Buxus sempervirens* L. Forests in the Fırtına Valley (Rize, Turkey). *Cryptogamie, Bryologie*, 44(5), 123-132.
- Bakalin, V. A., Choi, S. S., Hwang, I. C., Moon, M. O., & Klimova, K. G. (2025). The Updated Assessment of the Liverwort Flora of Laos, the Least-Studied Higher Plants Group in Indochina. *Plants*, 14(24), 3832.
- Batan, N., Erata, H., Alataş, M., Ezer, T., Özcan, O., & Taşci, N. (2024). Karçal Dağları Briyofit Florası (Artvin, Türkiye). *Anatolian Bryology*, 10(2), 120-151.
- Benek, A., Turu, D., Bozyel, M. E., Simsek, Ö., & Canlı, K. (2025). The Secondary Metabolites of Bryophytes and Their Therapeutic Applications. *Secondary Metabolites and Their Applications in Various Diseases*, 557-588.
- Çatak, U., Aslan, G., Karabacak, E., Özenoğlu, H., & Kırmacı, M. (2025). The Bryophyte flora of Lapseki (Çanakkale) mountains. *Acta Biologica Turcica*, 38(4), 20250404-16p.
- Çetin, B. (1999). The liverworts (Hepaticae) of Uludağ National Park (Bursa). *Turkish Journal of Botany*, 23(4), 277-280.

- Dikmen, F., & Keçeli, T. (2017). Contributions to the Liverwort Flora (Marchantiophyta) of Gürgenli Mountain (Bayramören/Çankırı). *Anatolian Bryology*, 3(2), 48-57. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.315531>
- Glime, J. M. (2024). Roles of bryophytes in forest sustainability: Positive or negative? *Sustainability*, 16(6), 2359.
- Gökler, İ., Yücel, K. M., & Sarıtaş, S. (2022). Sultan Dağları'nın Ciğerotu (Marchantiophyta) Florası. *Anatolian Bryology*, 8(2), 66-72.
- Hodgetts, N., Cáliz, M., Englefield, E., Fettes, N., Criado, M. G., Patin, L., ... & Żarnowiec, J. (2023). A miniature world in decline: European Red List of Mosses, Liverworts and Hornworts. International Union for Conservation of Nature.
- Keçeli, T. (2004). Batı Karadeniz Bölgesi (Bolu-Zonguldak-Bartın-Kastamonu) Ciğerotları (Hepaticae) Florası. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara.
- Keçeli, T., & Ursavaş, S. (2019). Contributions to the Liverwort and Hornwort (Marchantiophyta and Anthocerotophyta) Flora of Kocaçay Delta (Karacabey-Bursa) Floodplain Forest. *Anatolian Bryology*, 5, 45–55. doi: 10.26672/anatolianbryology.528831
- Konstantinova, N. A., Borovichev, E. A., & Vilnet, A. A. (2025). The Liverworts of the Murmansk Region (North-West Russia): Providing an Annotated Checklist as a Basis for the Monitoring and Further Study of Liverwort Flora. *Plants*, 14(11), 1590.
- Lombo-Sanchez, Y. J., Suarez-Contento, K. Y., Silva, M. P. P., & Pôrto, K. C. (2024). An assessment of liverwort richness, endemism and conservation in a megadiverse country - Colombia. *Biodiversity and Conservation*, 33(12), 3781–3797. <https://doi.org/10.1007/s10531-024-02926-6>
- Maul, K., Gradstein, S. R., Quandt, D., & Kessler, M. (2025). Temperature dependence of liverwort diversification reveals a cool origin and hot hotspots. *Scientific Reports*, 15, Article 3225. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87206-1>
- Natcheva, R., & Gospodinov, G. (2024). A supplement to the checklist of the liverwort flora of Bulgaria. *Phytologia Balcanica*, 30(3), 283-288.
- Ören, M., & Ursavaş, S. (2020). Doğu Küre Dağları Briyofit Florası. *Anatolian Bryology*, 6(2), 78-96.
- Ören, M., Uyar, G., & Keceli, T. (2012). The bryophyte flora of the western part of the Küre Mountains (Bartın, Kastamonu), Turkey. *Turkish journal of botany*, 36(5), 538-557.
- Proctor, M. C. F. (2000). The bryophyte paradox: Tolerance of desiccation, evasion of drought. *Plant Ecology*, 151(1), 41–49.

- Qian, H. (2025). Geographic patterns and climatic drivers of phylogenetic structure of liverworts along a long elevational gradient in the central Himalaya. *Journal of Systematics and Evolution*, 63(1), 71–83. <https://doi.org/10.1111/jse.13129>
- Qian, H., & Qian, S. (2025). Global patterns of taxonomic and phylogenetic endemism in liverwort assemblages. *Plant Diversity*, 47(2), 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2024.08.005>
- Qian, H., Qian, S., Kessler, M., & Wang, J. (2024a). Latitudinal patterns and macroclimatic drivers of phylogenetic structure in regional liverwort assemblages in North America. *Journal of Biogeography*, 51(12), 2320–2331. <https://doi.org/10.1111/jbi.15002>
- Qian, H., Vanderpoorten, A., Dai, Z., Kessler, M., Kasprzyk, T., & Wang, J. (2024b). Spatial patterns and climatic drivers of phylogenetic structure of regional liverwort assemblages in China. *Annals of Botany*, 134(3), 427–435. <https://doi.org/10.1093/aob/mcae080>
- Sanalp, G. T., & Keçeli, T. (2018). Kadınçayırı Tabiat Parkı (Ilgaz-Çankırı) ve Çevresinin Ciğerotları (Marchantiophyta) Florasına Katkıları. *Anatolian Bryology*, 4(1), 36–45.
- Selvi, K., & Şimşek, Ö. (2025). Briyofitlerde Su Stresi ve Adaptasyon Mekanizmaları. *Anatolian Bryology*, 11(2), 190–200. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.1822753>
- Song, X., Fang, W., Chi, X., Shao, X., & Wang, Q. (2021). Geographic pattern of bryophyte species richness in China: The influence of environment and evolutionary history. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, Article 680318. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.680318>
- Söderström, L., Hagborg, A., Von Konrat, M., Bartholomew-Began, S., Bell, D., Briscoe, L., ... & Zhu, R. L. (2016). World checklist of hornworts and liverworts. *PhytoKeys*, (59), 1.
- Şimşek, Ö., & Çetin, B., (2016). Bolu Dağları Ciğerotları (Marchantiophyta) Florası. *Anatolian Bryology* , vol.2, 56-69.
- Şimşek, Ö., (2024a). Kaz Dağları ve Yakın Çevresinin Ciğerotları (Marchantiophyta) Biyoçeşitliliği. *Doğa Bilimleri Ve Matematikte Öncü Ve Yenilikçi Çalışmalar* (pp.154), Konya: All Sciences Academy.
- Şimşek, Ö., (2024b). Liverwort (Marchantiophyta) and Hornwort (Anthocerotophyta) Flora of Yenice District (Çanakkale): New Floristic Findings from the Northern Part of Mount Ida (Kaz Dağı). *Anatolian Bryology* , vol.10, no.2, 95-109
- Şimşek, Ö., (2024c). Substrate Preferences of Liverworts (Marchantiophyta) in Yenice District. *Pioneer And Innovative Studies In Natural Science And Mathematics* (pp.242-262), Konya: All Sciences Academy.

- Şimşek, Ö., Canlı, K., & Çetin, B. (2011). Ilgaz Dağları Türkiye Ciğerotları Marchantiophyta florasına katkılar. *Biological Diversity and Conservation*, 4(1), 7-10.
- Şimşek, Ö., Canlı, K., & Gürsu, G. (2016). Karasal Yaşamın Başlangıcında Briyofitler. *Anatolian Bryology*, 2(1-2), 70–74.
- Uslu, M., & Keçeli, T. (2019). İğneada Longoz Ormanları Milli Parkı (Demirköy-Kırklareli) Ciğerotları (Marchantiophyta) Florası. *Anatolian Bryology*, 5(2), 114-129.
- Uyar, G., Alataş, M., Ören, M., & Keçeli, T. (2007). The bryophyte flora of Yenice Forests (Karabük, Turkey).
- Wang, J., Dai, Z., Kasprzyk, T., Yao, X., Hagborg, A., Söderström, L., Zhang, J., Vanderpoorten, A., & Collart, F. (2025a). Inversion of the latitudinal diversity gradient at high taxonomic level in liverworts revealed by a phylogenetically deconstructive approach. *Annals of Botany*, 136(3), 451–472. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaf051>
- Wang, J., Qian, H., Dai, Z., Zhang, J., & Kessler, M. (2025b). Geographic and ecological effects on species richness of liverworts worldwide. *Ecography*, 2025(1), Article e07277. <https://doi.org/10.1111/ecog.07277>
- Yücel, K. M., Gökler, İ., & Tarım, H. (2024). Bozdağlar'ın Ciğerotu (Marchantiophyta) Florası. *Anatolian Bryology*, 10(1), 49-57.
- Yücel, K. M., Tarım, H., Keçeli, T., Gökler, İ. (2025). Current Checklist and Distribution of Liverworts (Marchantiophyta) and Hornworts (Anthocerotophyta) in Türkiye. *Anatolian Bryology*, 11(2), 131-148. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.1802457>
- Zhalov, K., Abdirasulov, F., Pardaboyev, S., Khurramova, M., Nagmetullaev, M., Zafar, M., Majeed, S., Alotaibi, M. O., Ibadullayeva, S., & Amin, A. (2025). Microhabitat hydrology and early succession: Liverworts as ecohydrological indicators. *Ecohydrology*, 18(3), Article e70027. <https://doi.org/10.1002/eco.70027>



# **Biyo-Esaslı Biyobozunmaz Biyoplastikler: Biyo-Polietilen ve Biyo-Propilen**

**Mithat ÇELEBİ<sup>1</sup>**

1- Doç. Dr.; Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü.  
[mithat.celebi@yalova.edu.tr](mailto:mithat.celebi@yalova.edu.tr) ORCID No: 0000-0002-2013-5354

## ÖZET

Plastik malzemelerin çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik küresel ölçekte artan farkındalık ve baskılar, biyoplastiklerin hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla önem kazanmasına yol açmıştır. Ancak biyoplastik kavramı çoğu zaman yalnızca biyolojik olarak bozunabilir polimerlerle özdeşleştirilmekte; bu durum, biyolojik olarak bozunmayan ancak yenilenebilir kaynaklardan üretilen biyo-esaslı biyobozunmaz biyoplastiklerin yeterince anlaşılmasını ve değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu kitap bölümü, bu boşluğu doldurmayı amaçlayarak, biyo-esaslı biyobozunmaz biyoplastiklerden olan biyo-polietilen (Biyo-PE) ve biyo-polipropilen (Biyo-PP) polimerlere odaklanmaktadır.

Bu çalışmada, biyo-esaslı biyobozunmaz biyoplastiklerin sürdürülebilir kalkınmadaki rolünü kapsamlı bir şekilde değerlendirilmektedir. Biyo-PE ve Biyo-PP üretiminde kullanılan temel üretim yaklaşımları ayrıntılı olarak ele alınmakta; biyokütlenin fermantasyon yoluyla biyoetanole dönüştürülmesi, ardından etanolün katalitik dehidrasyonu ile etilen ve propilen gibi temel monomerlerin elde edilmesi süreçleri açıklanmaktadır. Elde edilen biyo-esaslı monomerlerin, geleneksel polimerizasyon teknolojileri kullanılarak fosil bazlı muadilleriyle kimyasal ve yapısal olarak benzer polimerlere dönüştürülebildiği vurgulanmaktadır. Bu özellikleri sayesinde Biyo-PE ve Biyo-PP, mevcut işleme, kullanım ve geri dönüşüm altyapılarıyla tam uyumlu “drop-in” biyoplastikler olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, biyo-esaslı polimerlerin çevresel performansı yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) perspektifinden incelenmekte; özellikle şeker kamışı bazlı Biyo-PE üretiminin fosil bazlı polietilene kıyasla daha düşük sera gazı emisyonları ve daha düşük fosil enerji kullanımı sunduğu literatür bulguları ışığında tartışılmaktadır. Sonuç olarak, biyo-esaslı biyobozunmaz biyoplastiklerin, döngüsel ekonomi ve karbon yönetimi stratejileri kapsamında fosil bazlı plastiklere sürdürülebilir ve uygulanabilir alternatifler sunduğu ortaya konmaktadır.

*Anahtar Kelimeler – Biyoplastik, Biyo-etanol, Propilen, Biyo-polietilen, Biyo-polipropilen, Yaşam Döngü Analizi*

---

## GİRİŞ

Günümüzde küresel ölçekte sentetik materyallere olan bağımlılığın artması, plastik kirliliğini gezegenimiz için en kritik çevresel tehditlerden biri haline getirmiştir. Geleneksel plastiklerin kontrolsüz kullanımı; mikroplastik birikimi, doğal habitatların bozulması ve sera gazı emisyonlarındaki artış gibi ciddi ekolojik ve sağlık sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu olumsuz tablo, fosil yakıt tabanlı plastiklere karşı acil ve sürdürülebilir alternatiflerin

geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Yenilenebilir biyolojik kaynaklardan elde edilen biyoplastikler, bu çevresel krizle mücadelede stratejik bir çözüm yolu sunmaktadır. Biyoplastikler; düşük karbon ayak izleri, biyobozunurluk özellikleri ve döngüsel ekonomi modeline sağladıkları katkılarla, geleneksel plastiklerin yerini alma potansiyeline sahip yeni nesil materyallerdir (Sharma et al., 2025).

Biyoplastikler, günümüzde yıllık 400 milyon tonu aşan küresel plastik üretiminin yaklaşık %0,5'ini oluşturmaktadır. Son yıllardaki durgunluğun ardından, 2023 itibarıyla küresel plastik üretimi yeniden artış eğilimine girmiştir; bu artış, yükselen talep ve daha gelişmiş uygulama alanlarının ortaya çıkmasıyla ilişkilendirilmektedir. Buna paralel olarak, küresel biyoplastik üretim kapasitesinin 2023'te yaklaşık 2,18 milyon tondan 2028'de 7,43 milyon tona çıkması beklenmektedir. Bu öngörü, biyoplastiklerin önümüzdeki yıllarda plastik endüstrisinde daha belirgin bir paya sahip olacağını göstermektedir (European Plastic, 2023).

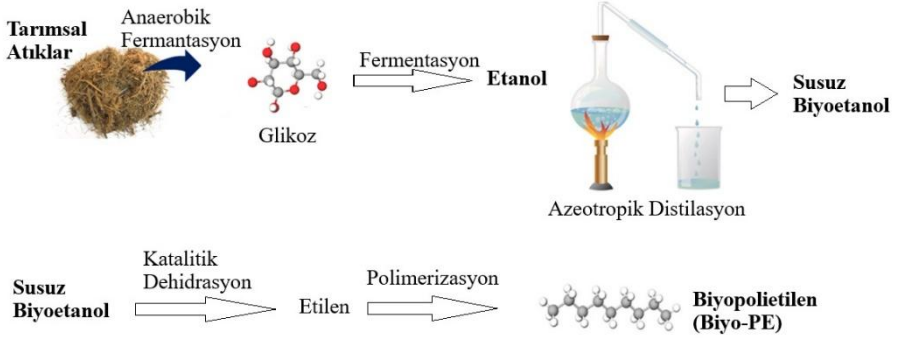
Biyo-esaslı polimer, biyokütleden elde edilen ya da biyokütleden türetilmiş monomerlerden üretilen ve nihai ürünlere dönüştürülme sürecinin herhangi bir aşamasında akış yoluyla şekillendirilebilen polimerdir. Biyoplastik terimi, literatürde çoğunlukla fosil kaynaklardan türetilmiş polimerlerin karşısı olarak kullanılmaktadır. Ancak bu kullanım, kavramsal açıdan yanıltıcı olabilmektedir; zira biyokütleden elde edilen her polimerin çevre dostu olduğu anlamına gelmemektedir. Bu nedenle, bazı bilimsel kaynaklarda “biyoplastik” teriminin kullanımının önerilmediği, bunun yerine daha açık ve teknik bir ifade olan “biyo-esaslı polimer” kavramının tercih edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Ayrıca, fosil bazlı bir polimere kimyasal yapı ve performans açısından benzer özellikler gösteren bir biyo-esaslı polimerin, yalnızca biyokütle kökenli olması çevresel üstünlük için yeterli değildir. Bu tür bir üstünlükten söz edilebilmesi için, ilgili malzemenin yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) sonuçlarının fosil bazlı muadiline kıyasla daha düşük çevresel etki ortaya koyması gerekmektedir. Bu yaklaşım, biyo-esaslı polimerlerin sürdürülebilirliğinin bilimsel ve nesnel kriterler çerçevesinde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Vert et al., 2012). Özetle, biyoplastikler, yenilenebilir kaynaklardan üretilen ve/veya biyobozunur ya da bu iki özelliği birlikte taşıyan plastik malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, bir polimerin biyoplastik olarak adlandırılabilmesi için ya biyokütle kökenli olması ya da biyobozunur özellik taşıması yeterlidir; her iki özelliği aynı anda taşıyan polimerler de biyoplastik sınıfı içinde yer almaktadır. Bu kapsamda biyoplastikler, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesine rağmen biyolojik olarak bozunmayan polimerleri (biyo-polietilen, biyo-propilen) ve fosil veya biyo-esaslı olmasına bakılmaksızın biyolojik olarak bozunabilen polimerleri de içeren geniş bir malzeme grubunu temsil etmektedir.

## BİYO-POLİETİLEN

Polietilen (PE), yüksek yoğunluklu (HDPE), lineer düşük yoğunluklu (LLDPE) ve düşük yoğunluklu (LDPE) gibi çeşitleriyle dünya genelinde en yaygın kullanılan termoplastik polimerlerinden biridir. Geleneksel PE üretimi, petrolden elde edilen etilen monomerinin katalitik polimerizasyonu ile gerçekleştirilir ve bu süreç, Ziegler–Natta veya matalosen tarzı katalizörler kullanılarak farklı polietilen tiplerinin elde edilmesini sağlar (Burelo et al., 2023).

Biyo-polietilen (Biyo-PE), fosil yakıtlar yerine biyokütleden elde edilen etilenden polimerize edilerek üretilen bir polietilen türüdür. Bu üretim yaklaşımında, genellikle şeker kamışı veya mısır gibi yenilenebilir kaynaklardan fermantasyon yoluyla elde edilen etanol, katalitik dehidrasyon reaksiyonu ile etilene dönüştürülmekte ve elde edilen bu biyo-etilen daha sonra konvansiyonel polimerizasyon süreçleriyle polietilene dönüştürülmektedir (Ritzen et al., 2024). Bu üretim yöntemi, etilenin petrokimyasal kökenli üretimine doğrudan bir alternatif sunmakta ve mevcut endüstriyel polietilen üretim altyapısıyla uyumlu olacak şekilde yüksek saflıkta monomer elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Nitekim, biyo-etilen üretiminde özellikle ikinci nesil (2G) lignoselülozik veya birinci nesil (1G) doğrudan şeker esaslı kaynaklar ile biyoetanolün dehidrasyonuna odaklanan güncel araştırmalar, bu sürecin teknik olarak uygulanabilir ve sürdürülebilir olduğunu ortaya koymaktadır (Mendieta et al., 2025). Elde edilen Biyo-PE, kimyasal yapı ve zincir mimarisi açısından konvansiyonel polietilen ile tamamen aynı olduğundan, mevcut işleme, şekillendirme ve geri dönüşüm teknolojilerinde herhangi bir değişiklik gerektirmeden kullanılabilmekte ve bu özelliği sayesinde “drop-in” biyo-esaslı bir polimer olarak değerlendirilmektedir (Ritzen et al., 2024).

Şekilde 1’de gösterilen süreçte, tarımsal atıklar biyokütle kaynağı olarak değerlendirilmekte ve uygun ön işlemler sonrasında anaerobik fermantasyona tabi tutularak hidroliz ürünleri üzerinden glikoz elde edilmektedir. Elde edilen glikoz, fermantasyon yoluyla etanole dönüştürülmekte; fermantasyon sonrasında oluşan etanol–su karışımı ise azeotropik damıtma yöntemiyle sudan ayrılarak susuz (anhidro) biyoetanol hâline getirilmektedir. Bu aşamayı takiben, susuz biyoetanol uygun katalizörler eşliğinde katalitik dehidrasyon reaksiyonuna sokularak etilene dönüştürülmektedir. Son aşamada, biyokütle kökenli etilen geleneksel polimerizasyon süreçleri kullanılarak polimerize edilmekte ve fosil bazlı muadilleriyle kimyasal olarak özdeş olan biyo-polietilen (Biyo-PE) elde edilmektedir (Burelo et al., 2023).



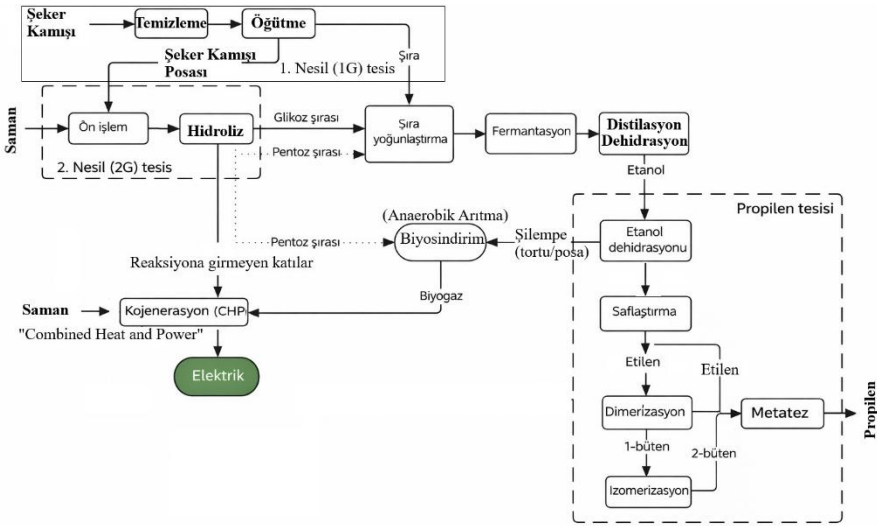
Şekil 1. Tarımsal atıkların fermantasyonu ile elde edilen biyoetanolden Biyo-PE üretimine yönelik süreç şeması.

Son yıllarda Biyo-PE ve diğer biyo-esaslı polimerlerin (Biyo-PP ve biyo-esaslı polietilen tereftalat, Biyo-PET) geliştirilmesine yönelik araştırmalar, özellikle yenilenebilir hammaddelerden monomer üretimi, biyokütle rafinasyonu ve sürdürülebilir üretim süreçleri bağlamında kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Bu çalışmalar, biyokütle kökenli etilen, propilen ve aromatik monomerlerin kimyasal veya biyoteknolojik yollarla üretimini ve bu monomerlerin mevcut petrokimyasal polimerizasyon altyapılarına entegrasyonunu ayrıntılı olarak tartışmaktadır. Siracusa ve Blanco (2020), Biyo-PE, Biyo-PP ve Biyo-PET’in fosil bazlı muadilleriyle kimyasal yapı ve performans açısından büyük ölçüde benzerlik gösterdiğini ve bu nedenle “drop-in” biyo-esaslı polimerler olarak değerlendirilebileceğini vurgulamıştır (Siracusa & Blanco, 2020).

## BİYO-POLİPROPİLEN

Polipropilen (PP), polietilenden (PE) sonra en yüksek üretim hacmine sahip ikinci ticari plastik olup, ambalajdan otomotiv bileşenlerine ve tıbbi cihazlara kadar geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. PP, PE ile karşılaştırıldığında daha yüksek mekanik stabilite ve zincir yapısındaki metil gruplarının etkisiyle daha iyi ısıl direnç sergilerken, kimyasal direnç açısından görece daha düşük performans göstermektedir. Yenilenebilir kaynaklı polietilenin endüstriyel ölçekte başarıyla ticarileştirilmesinin ardından, PP de biyokütle kökenli üretimi açısından gelecek vadede bir plastik malzeme olarak öne çıkmaktadır (Andreeßen & Steinbüchel, 2019; Kikuchi et al., 2017). Biyokütle bazlı propilen, farklı kimyasal ve biyokimyasal dönüşüm yolları kullanılarak üretilmektedir. Bu yaklaşımlardan ilki, tamamen biyokütle kökenli etanolden propilen sentezine dayanmaktadır. Bu süreçte etanol önce etilene dönüştürülmekte, ardından etilenin dimerizasyonu ile 2-büten elde edilmekte ve son aşamada etilen ile 2-bütenin metatez reaksiyonu

sonucunda propilen üretilmektedir. İkinci yaklaşımda propilen, n-bütanolün dehidrasyonu ile elde edilen bütlenlerin izomerizasyonu ve ardından etilen ile 2-bütlenin metatez reaksiyonu yoluyla sentezlenmektedir. Üçüncü üretim yolu, biyodizel üretiminin başlıca yan ürünü olan gliserolden türetilen propanın dehidrojenasyonu ile propilen elde edilmesine dayanmaktadır. Dördüncü ve beşinci yaklaşımlar ise fermantasyon temellidir; bu kapsamda şekerlerin fermantasyonu ile üretilen asetonun izopropanole indirgenmesi veya doğrudan şeker fermantasyonu yoluyla izopropanol üretimi ve bunu takiben izopropanolün dehidrasyonu ile propilen sentezi gerçekleştirilmektedir. Bu yolların herhangi biriyle biyokütleden elde edilen propilen, kimyasal yapı ve özellikler bakımından fosil bazlı propilen ile tamamen aynıdır. Dolayısıyla, biyokütle kökenli propilen, polipropilen (PP) üretiminde geleneksel, katalizörle yürütülen polimerizasyon süreçlerinde doğrudan kullanılabilir (Harmsen et al., 2014; Machado et al., 2016). Şekil 1’de gösterildiği üzere, buhar, elektrik ve biyo-propilen üretimini kapsayan bütünleşmiş bir 1G–2G şeker kamışı biyorafinerisi tasarlanmıştır (Machado et al., 2016).



Şekil 1. Buhar, elektrik ve biyo-propilen üretimini kapsayan entegre bir 1G–2G şeker kamışı biyorafinerisinin şematik diyagramı.

Polipropilen (PP), yapısında yalnızca hidrokarbonlardan ( $-\text{CH}_2-$  ve metil yan grupları) oluşan bir termoplastik olup, fonksiyonel oksijen veya ester gibi mikroorganizmaların enzimatik hidrolizini kolaylaştıran kimyasal grupları içermez. Bu yapısal özellikleri ve yüksek hidrofobikliği nedeniyle PP, çevresel mikroorganizmalar tarafından çoğunlukla bozunmaz ve çevrede uzun süre kalır, bu da PP'yi biyolojik olarak parçalanamayan plastikler sınıfına sokar (Arutchelvi et al., 2008; Hossain et al., 2024). Bununla birlikte,

literatürde nişasta veya doğal elyaf gibi biyolojik olarak parçalanabilir bileşenlerle fiziksel veya kimyasal olarak harmanlanmış PP esaslı kompozitlerin sınırlı da olsa biyolojik bozunma gösterdiğine dair araştırmalar mevcuttur. Bu stratejiler genellikle PP matrisinin dolgu ile daha ara yüzey etkileşimi göstermesi için ön işleme veya uyumlaştırıcı katkıların kullanılması ile gerçekleştirilir. Özellikle lignoselülozik elyaflar, selüloz veya nişasta katkıları, PP kompozitlerinin yüzey enerji profilini değiştirerek mikroorganizma ilişkisinin artmasına ve ağırlık kaybı gibi sınırlı bozunma davranışlarına yol açabilmektedir (Khoramnejadian, 2013; Luthra et al., 2020; Rana et al., 2022). Khoramejadian tarafından yapılan çalışmada, polipropilenin (PP) çevresel etkisini azaltmak amacıyla PP/nişasta karışımları (%10 ve %20 nişasta) hazırlanmış ve numunelerin altı aylık toprak gömme deneyleri ile sınırlı biyolojik bozunma gösterdiği belirlenmiştir. SEM analizleri ve *Pseudomonas aeruginosa* ile yapılan testler, PP/nişasta karışımlarında kısmi biyobozunmayı doğrulamıştır (Khoramnejadian, 2013).

Son yıllarda biyopolimer teknolojileri, fosil bazlı plastiklere sürdürülebilir alternatifler geliştirme hedefi doğrultusunda hızlı bir gelişim göstermektedir. Biyo-PP gibi malzemeler, biyokütleden elde edilen monomerlerin kimyasal ve biyoteknolojik dönüşüm süreçleriyle polimerize edilmesine odaklanan araştırmalar sayesinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Biyo-esaslı propilen veya propilen türevi monomerlerin geliştirilmesi, bu monomerlerin mevcut polipropilen üretim altyapılarına entegrasyonu ve ortaya çıkan malzemelerin performans özelliklerinin değerlendirilmesi, güncel çalışmaların temel odak noktalarını oluşturmaktadır (Siracusa & Blanco, 2020). Bu kapsamda, Eyiler (2025) tarafından gerçekleştirilen özgün bir araştırmada, 1,3-propandiol ve fumarik asit gibi biyokütle kökenli monomerler kullanılarak tamamen biyo-esaslı poli(propilen fumarat) esaslı polimerler ve bu polimerlerin kaolinit takviyeli nanokompozitleri sentezlenmiştir. Çalışmada elde edilen biyo-esaslı polimerlerin mekanik ve termal özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiş; sonuçlar, biyokütle kökenli propilen temelli polimerlerin mühendislik uygulamaları açısından rekabetçi performans sergileyebileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu tür biyo-esaslı moleküler yapıların fosil bazlı muadillere kıyasla sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunduğu vurgulanmıştır (Eyiler, 2025). Bununla birlikte, biyopolimer literatüründe biyo-esaslı propilen kaynaklarının geliştirilmesi, biyokütle dönüşüm süreçlerinin verimliliğinin artırılması ve bu monomerlerin ticari ölçekte polipropilen üretimine entegrasyonu üzerine yürütülen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu araştırmalar, Biyo-PP ve benzeri biyo-esaslı polimerlerin yalnızca laboratuvar ölçeğinde değil, endüstriyel ölçekte de uygulanabilirliğini desteklemekte ve sürdürülebilir malzemelerin ambalaj ve mühendislik uygulamalarında kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır (Siracusa & Blanco, 2020).

## ÇEVRESEL ETKİ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Biyopolietilenin çevresel sürdürülebilirliği, yalnızca üretim sürecine değil, aynı zamanda biyokütle kaynağı, hammaddenin temin coğrafyası ve kullanım ömrü sonu senaryolarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu kapsamda Ritzen ve arkadaşları (2024) tarafından gerçekleştirilen özgün bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) çalışması, biyokütle türü, tarımsal üretim koşulları ve son kullanım seçeneklerinin Biyo-HDPE'nin çevresel etkileri üzerinde belirleyici rol oynadığını sistematik olarak ortaya koymuştur. Çalışmada, sürdürülebilirlik analizlerinin yalnızca polimer üretim aşamasına odaklanmasının yetersiz olduğu; biyokütle temini, arazi kullanımı ve kullanım sonrası yönetimin (geri dönüşüm, enerji geri kazanımı veya bertaraf) çevresel performansı doğrudan etkilediği vurgulanmıştır (Ritzen et al., 2024).

Biyo-esaslı plastik üretimindeki artış, bu malzemelerin çevresel etkilerinin bütüncül olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Tsiropoulos ve ark. (2015) tarafından gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmasında, Avrupa'da üretilen tamamen biyo-esaslı yüksek yoğunluklu polietilenin (Biyo-HDPE) çevresel performansı, petrokimyasal muadiliyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Biyo-HDPE'nin sera gazı emisyonları yaklaşık  $-0,75$  kg CO<sub>2</sub>-eşdeğeri/kg polimer düzeyinde olup, bu değer fosil bazlı polietilene kıyasla yaklaşık %140 daha düşük bir küresel ısınma potansiyeline karşılık gelmektedir. Ayrıca, Biyo-HDPE üretiminde fosil olmayan enerji kullanımında yaklaşık %65 oranında azalma sağlandığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, biyokütle kökenli etilen kullanılarak üretilen polietilenin, uygun üretim ve tedarik zinciri koşulları altında karbon ayak izinin önemli ölçüde azaltılabildiğini ve sürdürülebilir plastikler arasında güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır (Tsiropoulos et al., 2015).

Yaşam döngüsü analizi (LCA) sonuçları, biyo-esaslı polipropilenin (PP), petrokimyasal kökenli PP'ye kıyasla sera gazı emisyonlarının azaltılmasında çevresel açıdan uygun bir alternatif olduğunu göstermektedir. Özellikle şeker kamışı bazlı üretim yolları, fosil kaynaklı PP ile karşılaştırıldığında daha üstün bir çevresel performans sergilemektedir. Bununla birlikte, şeker kamışından türetilen polietilen (PE) ile karşılaştırıldığında, biyo-esaslı PP için sağlanan sera gazı emisyonu azaltım oranının daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, PP üretiminde yer alan ilave dönüşüm ve reaksiyon basamaklarının sayısının artmasına bağlı olarak toplam enerji tüketiminin yükselmesinden kaynaklanmaktadır (Kikuchi et al., 2017; Tähkämö et al., 2022).

Cavetti ve ark., (2012) Brezilya'daki birinci nesil şeker kamışı biyorafinerilerinin teknik, çevresel ve ekonomik yönlerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Hem bağımsız (otonom) hem de ekli (entegre) tesislerin teknik-ekonomik değerlendirmesi yapılmış, yatırım maliyetinin tesis türüne

ve esneklik seviyesine bağılı olarak arttığı görülmüştür. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi sonuçları, optimizasyon teknolojilerinin hem bağımsız hem de bütünleşmiş tesislerde çevresel etkileri önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Etanol üretimi açısından, entegre tesisler çoğu çevresel etki kategorisinde bağımsız damıtmalara göre daha düşük etkiler sergilemiştir. Tesislerde esnekliğin artırılması, tüm etanol yaşam döngüsü ele alındığında çevresel etkiler üzerinde sınırlı etki yaparken, sadece endüstriyel süreç değerlendirildiğinde esnek üretim stratejileri çevresel etkilerin azaltılmasında faydalı olabilmektedir (Cavalett et al., 2012).

## **ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR VE PAZAR DURUMU**

Biyoplastikler; ambalaj ve tüketici ürünlerinden elektronik, otomotiv ve tekstil sektörlerine kadar giderek artan çeşitlilikte uygulama alanı bulmaktadır. 2023 yılı itibarıyla ambalaj sektörü, toplam biyoplastik pazarının %43'ünü (yaklaşık 934.000 ton) oluşturarak biyoplastiklerin en büyük kullanım alanı olmaya devam etmektedir (European Plastic, 2023). Küresel ölçekte biyo-esaslı polimer üretim kapasitesi, özellikle Biyo-PE ve Biyo-PP gibi dayanıklı biyoplastiklerin artan talebi ve sürdürülebilirlik odaklı politikalarla birlikte hızla yükselmeye devam etmektedir. Avrupa Biyoplastikler Birliği'nin 2025 pazar verileri, dünya genelinde biyo-esaslı plastik üretim kapasitesinin 2025'ten 2030'a kadar yaklaşık iki katına çıkarak 2,31 milyon tondan 4,69 milyon tona yükselmesinin beklendiğini göstermektedir; bu artışın arkasında, biyo-PE ve biyo-PP üretim kapasitesindeki belirgin genişleme ile çevresel hedefler ve döngüsel ekonomi stratejilerinin gücü bulunmaktadır. Bölgesel olarak bakıldığında Avrupa, yeni kapasite yatırımlarıyla biyo-PE ve biyo-PP üretiminde önemli bir artış yaşamaktadır ki bu da bölgesel sürdürülebilirlik hedefleri ve karbon nötr üretim politikalarıyla doğrudan ilişkilidir (European Bioplastics, 2025). Bu büyüme, özellikle Avrupa ve Latin Amerika'daki şeker kamışı gibi yenilenebilir hammaddelere dayalı üretim altyapılarının olanak sağladığı yatırım ve üretim artışı ile desteklenmektedir; örneğin Latin Amerika'da şeker kamışı kaynaklı biyo-PP üretiminin genişlediği ve bu bölgelerin biyopolimer üretiminde artan bir rol üstlendiği raporlanmaktadır (Global Growth Insights, 2025). Bu eğilim, biyo-esaslı malzemelerin sadece çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda endüstriyel üretimde ölçeklenebilir çözümler olarak küresel plastik tedarik zincirine entegre olma potansiyelini de güçlendirmektedir.

Hellvig ve Flores-Sahagun tarafından yapılan çalışmada, 1999–2017 yılları arasında biyo-esaslı polietilen (HDPE ve LLDPE) ve Biyo-PP teknolojilerinin gelişimi patent verilerine dayalı olarak analiz edilmiş ve bu alandaki pazar dinamikleri değerlendirilmiştir. Braskem'in söz konusu dönemde en fazla patente sahip firma olmamasına rağmen, dünyada ticari ölçekte biyo-esaslı polietilen üreten tek şirket olarak pazarda stratejik bir konum elde ettiğini ortaya koymaktadır. Araştırmada, biyo-esaslı ve fosil

bazlı polietilenlerin performans açısından eşdeğer olduğu, ancak *I'm green*<sup>TM</sup> etiketiyle pazarlanan biyo-esaslı ürünlerin çevre bilinci yüksek tüketiciler nezdinde marka değeri ve ticari avantaj sağladığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, biyo-esaslı polimer üretimindeki Araştırma Geliştirme yatırımlarında belirli bir dönemden sonra azalma görülmesine rağmen, biyo-esaslı polimerlere dayalı finansal enstrümanların ve piyasa değerinin önemli ölçüde arttığı rapor edilmiştir; bu durum, biyo-esaslı polimerlerin yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda piyasa ve yatırım odaklı bir değer unsuru haline geldiğini göstermektedir (Hellvig & Flores-Sahagun, 2021).

## GELECEK PERSPEKTİFİ

Güneydoğu Asya Uluslar Birliği (ASEAN) Artı üç bölgesinde plastik kullanımı 2022’de 152 milyon tondan 2050’de 280 milyon tona, plastik atık miktarı ise 113 milyon tondan 242 milyon tona çıkması beklenmektedir. ASEAN ülkelerinde plastik kullanımı özellikle alt orta gelirli ülkelerde hızlı artarken, Japonya, Çin ve Kore’yi kapsayan Artı Üç ülkelerinde daha ılımlı büyüme öngörülmektedir. Ambalaj sektörü en büyük uygulama alanı olmaya devam edecek, motorlu taşıt üretimi ve inşaat ise hızlı büyüyen sektörler arasında yer alacaktır. Geri dönüştürülmüş plastik miktarı üç kat artacak olsa da yanlış yönetilen atıklar %69 artarak politika yapıcılarının ciddi bir müdahalesini gerektirecektir (OECD, 2025). Bu bağlamda, biyo-esaslı biyobozunmaz biyoplastikler, döngüsel ekonomi ve karbon yönetimi stratejilerinin önemli bir bileşeni olmaya devam etmektedir. Plastics Europe’un *The Circular Economy for Plastics – A European Analysis* raporu, biyolojik esaslı ve karbon yakalanmış plastiklerin üretiminin döngüsel plastik sistemlerinde kritik rol oynadığını ve bu malzemelerin sürdürülebilir plastik çözümlerinde giderek daha önemli hâle geldiğini vurgulamaktadır (Plastics Europe, 2024).

## SONUÇ

Bu kitap bölümünde, biyoplastik literatüründe sıklıkla göz ardı edilen dayanıklı biyo-esaslı biyoplastikler, özellikle Bio-P) ve Bio-PP odağında kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır. Yapılan değerlendirmeler, biyoplastik kavramının yalnızca biyolojik olarak bozunabilir malzemelerle sınırlandırılmasının kavramsal ve teknik açıdan eksik olduğunu; yenilenebilir kaynaklardan üretilen ancak fosil bazlı muadilleriyle kimyasal ve mekanik açıdan özdeş olan biyolojik olarak bozunmayan biyoplastiklerin sürdürülebilir malzeme stratejilerinde kritik bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır. Bio-PE ve Bio-PP gibi “drop-in” biyoplastikler, mevcut üretim, işleme ve geri dönüşüm altyapılarına entegre olabilmeleri sayesinde, plastik endüstrisinin dönüşümünde uygulanabilir ve ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır.

Biyo-esaslı biyobozunmaz biyoplastikler, iklim değişikliğiyle mücadelede ve plastik kirliliğinin yönetiminde çift yönlü bir çözüm sunmaktadır. Üretim aşamasındaki düşük karbon ayak izi ve yaşam döngüsü sonundaki geri dönüşüm potansiyeli, bu malzemeleri geleceğin polimer ekonomisinde vazgeçilmez kılmaktadır. Ancak çevresel faydaların maksimize edilmesi için tarımsal girdilerin yönetimi ve geri dönüşüm altyapısının geliştirilmesi eş zamanlı olarak sürdürülmelidir.

Endüstriyel uygulamalar ve pazar analizleri, Braskem'in I'm green™ Bio-PE örneğinde olduğu gibi, biyo-esaslı polimerlerin artık yalnızca araştırma ve pilot ölçekli çözümler olmadığını; küresel pazarda ticari ölçekte üretilebildiğini ve marka değeri, yatırımcı ilgisi ve tüketici algısı açısından stratejik bir konuma ulaştığını göstermektedir. Bununla birlikte, patent faaliyetlerindeki dalgalanmalar ve Ar-Ge yatırımlarındaki değişimler, biyoplastik pazarının yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve politik dinamiklerden de güçlü biçimde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, biyo-esaslı biyobozunmaz biyoplastikler, döngüsel ekonomi, karbon yönetimi ve sürdürülebilir sanayi dönüşümü hedefleri kapsamında fosil bazlı plastiklere gerçekçi ve uygulanabilir alternatifler sunmaktadır. Gelecekte, bu malzemelerin yaygınlaşması; biyokütle tedarik zincirlerinin sürdürülebilirliği, şeffaf LCA uygulamaları, geri dönüşüm altyapısının güçlendirilmesi ve politika destek mekanizmalarının etkinliği ile doğrudan ilişkili olacaktır. Bu bağlamda, Bio-PE ve Bio-PP'nin hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda stratejik öneminin artarak devam edeceği öngörülmektedir.

## REFERANSLAR

- Andreeßen, C., & Steinbüchel, A. (2019). Recent developments in non-biodegradable biopolymers: Precursors, production processes, and future perspectives. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 103, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9483-6>
- Arutchelvi, J., Sudhakar, M., Arkatkar, A., Doble, M., Bhaduri, S., & Uppara, P. V. (2008). Biodegradation of polyethylene and polypropylene. In *Indian Journal of Biotechnology* (Vol. 7, Issue 1).
- Burelo, M., Hernández-Varela, J. D., Medina, D. I., & Treviño-Quintanilla, C. D. (2023). Recent developments in bio-based polyethylene: Degradation studies, waste management and recycling. In *Heliyon* (Vol. 9, Issue 11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21374>
- Cavalett, O., Junqueira, T. L., Dias, M. O. S., Jesus, C. D. F., Mantelatto, P. E., Cunha, M. P., Franco, H. C. J., Cardoso, T. F., Filho, R. M., Rossell, C. E. V., & Bonomi, A. (2012). Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(3). <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0424-7>
- European Bioplastics. (2025). *European Bioplastics presents the Results of the 2025 Market Data Report*. <https://www.european->

- European Plastic. (2023). *Global Production capacities of bioplastics 2023-2028 Global production capacities of bioplastics 2023 by material type Global production capacities of bioplastics 2028 by material type D E C E M B E R 2 0 2 3*. <http://www.european-bioplastics.org/news/publica-023>.
- Eyiler, E. (2025). Synthesis of unsaturated bio-based polypropylene fumarate/kaolinite nanocomposites via in situ polymerization. *Polymer Bulletin*, 82(13). <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05849-6>
- Global Growth Insights. (2025). *Top Synthetic and Bio-Based Polypropylene Companies in Global 2025*.
- Harmsen, P. F. H., Hackmann, M. M., & Bos, H. L. (2014). Green building blocks for bio-based plastics. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(3). <https://doi.org/10.1002/bbb.1468>
- Hossain, M. T., Shahid, M. A., Mahmud, N., Habib, A., Rana, M. M., Khan, S. A., & Hossain, M. D. (2024). Research and application of polypropylene: a review. In *Discover Nano* (Vol. 19, Issue 1). <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03952-z>
- Khoramnejadian, S. (2013). Microbial degradation of starch based polypropylene. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 7(4).
- Kikuchi, Y., Oshita, Y., Mayumi, K., & Hirao, M. (2017). Greenhouse gas emissions and socioeconomic effects of biomass-derived products based on structural path and life cycle analyses: A case study of polyethylene and polypropylene in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.179>
- Hellvig, E. L., & Flores-Sahagun, T. H. S. (2021). Investments in Braskem Green Polymers: Extraordinary Profits Instead of Decarbonization of the Environment. *International Journal of Sustainable Development Research*, 7(1), 17. <https://doi.org/10.11648/j.ijdsr.20210701.13>
- Luthra, P., Vimal, K. K., Goel, V., Singh, R., & Kapur, G. S. (2020). Biodegradation studies of polypropylene/natural fiber composites. *SN Applied Sciences*, 2(3). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2287-1>
- Machado, P. G., Walter, A., & Cunha, M. (2016). Bio-based propylene production in a sugarcane biorefinery: A techno-economic evaluation for Brazilian conditions. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(5). <https://doi.org/10.1002/bbb.1674>
- Mendieta, C. M., Zalazar, M. F., Covinich, L. G., Santori, G. F., Felissia, F. E., & Area, M. C. (2025). Sustainable Bioethylene Production from Lignocellulosic Bioethanol: Performance of Zeolitic Catalysts and Mechanistic Insights. *Processes*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/pr13092924>
- OECD. (2025). *Regional Plastics Outlook for Southeast and East Asia*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/5a8ff43c-en>
- Plastics Europe. (2024). *The Circular Economy for Plastics A European Analysis*.
- Rana, A. K., Thakur, M. K., Saini, A. K., Mokhta, S. K., Moradi, O., Rydzkowski, T., Alsanie, W. F., Wang, Q., Grammatikos, S., & Thakur, V. K. (2022). Recent developments in microbial degradation of polypropylene: Integrated approaches towards a sustainable environment. *Science of the Total Environment*, 826. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154056>
- Ritzen, L., Sprecher, B., Bakker, C., & Balkenende, R. (2024). Sustainability of bio-based polyethylene: The influence of biomass sourcing and end-of-life. *Journal of Industrial Ecology*, 28(6). <https://doi.org/10.1111/jiec.13555>

- Sharma, S., Kumar, G., Bhardwaj, S. K., Chauhan, A., Rathi, A., Kumar, J., Sahil, K., & Vishvamitera, S. (2025). Bioplastics as next-generation eco-friendly materials: a comprehensive review. In *Clean Technologies and Environmental Policy* (Vol. 27, Issue 10). <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03214-9>
- Siracusa, V., & Blanco, I. (2020). Bio-polyethylene (Bio-PE), Bio-polypropylene (Bio-PP) and Bio-poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. In *Polymers* (Vol. 12, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/polym12081641>
- Tähkämö, L., Ojanperä, A., Kemppe, J., & Deviatkin, I. (2022). Life cycle assessment of renewable liquid hydrocarbons, propylene, and polypropylene derived from bio-based waste and residues: Evaluation of climate change impacts and abiotic resource depletion potential. *Journal of Cleaner Production*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134645>
- Tsiropoulos, I., Faaij, A. P. C., Lundquist, L., Schenker, U., Briois, J. F., & Patel, M. K. (2015). Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.071>
- Vert, M., Doi, Y., Hellwich, K. H., Hess, M., Hodge, P., Kubisa, P., Rinaudo, M., & Schué, F. (2012). Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC recommendations 2012). *Pure and Applied Chemistry*, 84(2). <https://doi.org/10.1351/PAC-REC-10-12-04>



# **Triallyl Isocyanurate Molekülünün Elektronik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi**

**EMİNE TANIŞ\***

---

\* Prof. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü. E- mail: eminetanis@ahievran.edu.tr

## ÖZET

Bu çalışmada, tetrahidrofuran (THF) içinde çözünmüş 1,3,5-Triallyl-1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione (TAIC) bileşiğinin elektronik, optik ve elektriksel özellikleri, deneysel ölçümler ve teorik hesaplamalar birleştirilerek kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çözeltideki TAIC 'nin UV-Vis absorbands spektrumu kaydedilmiş ve spektral konumları, yoğunlukları ve dağılım özellikleri dahil olmak üzere absorpsiyon bantlarının dalga boyuna bağlı davranışı analiz edilmiştir. Absorbans verilerine dayanarak, TAIC' nin optik bant aralığı, doğrudan izin verilen geçiş modeli kullanılarak tahmin edilmiş ve bu da optik geçiş mekanizması ve elektronik yapısı hakkında değerli bilgiler sağlamıştır. Optik karakterizasyona ek olarak, TAIC 'nin elektriksel ve optik iletkenlik değerleri hesaplandı ve karşılaştırmalı olarak değerlendirildi. Sonuçlar, TAIC' nin elektriksel iletkenliğinin optik iletkenliğinden daha yüksek olduğunu göstermektedir, bu da moleküler yapı içinde verimli yük taşıma yollarının varlığını düşündürmektedir. Bu davranış, TAIC 'nin optoelektronik ve elektronik cihaz teknolojilerinde potansiyel uygulanabilirliğini vurgulamaktadır. Moleküler düzeyde deneysel gözlemleri daha da açıklığa kavuşturmak için, yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) kullanılarak kuantum kimyasal hesaplamalar yapılmıştır. En yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük boş moleküler orbital (LUMO) enerji seviyeleri, doğrusal olmayan optik (NLO) parametreleri birlikte hesaplanmış ve deneysel bulgularla ilişkilendirilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki iyi uyum, uygulanan metodolojilerin güvenilirliğini doğrulamaktadır. Genel olarak, TAIC' nin elektronik, optik ve doğrusal olmayan optik özelliklerinin kapsamlı değerlendirmesi, bu malzemenin yeni nesil organik optoelektronik uygulamalar için umut verici bir aday olduğunu göstermektedir.

*Anahtar Kelimeler:* TAIC; UV-Vis spektroskopisi; Optik bant aralığı, Elektriksel iletkenlik; Yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT); Doğrusal olmayan optik özellikler; Optoelektronik malzemeler.

## GİRİŞ

Özel elektronik ve optik özelliklere sahip organik malzemeler, organik ışıyan diyotlar, fotovoltaiik hücreler, fotodetektörler ve doğrusal olmayan optik bileşenler gibi optoelektronik cihazlar potansiyel uygulamaları nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Forrest, 2004; Friend et al., 1999). Özellikle, konjuge sistemler içeren heterosiklik bileşikler, ayarlanabilir bant aralıkları, yüksek yük hareketliliği ve yapısal esneklikleri nedeniyle ileri elektronik uygulamalar için uygun olmaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir (Facchetti, 2011). Bu nedenle, bu tür malzemelerin elektronik, optik ve elektriksel özelliklerinin temel düzeyde anlaşılması, yüksek performanslı organik optoelektronik cihazların rasyonel tasarımı ve optimizasyonu için gereklidir

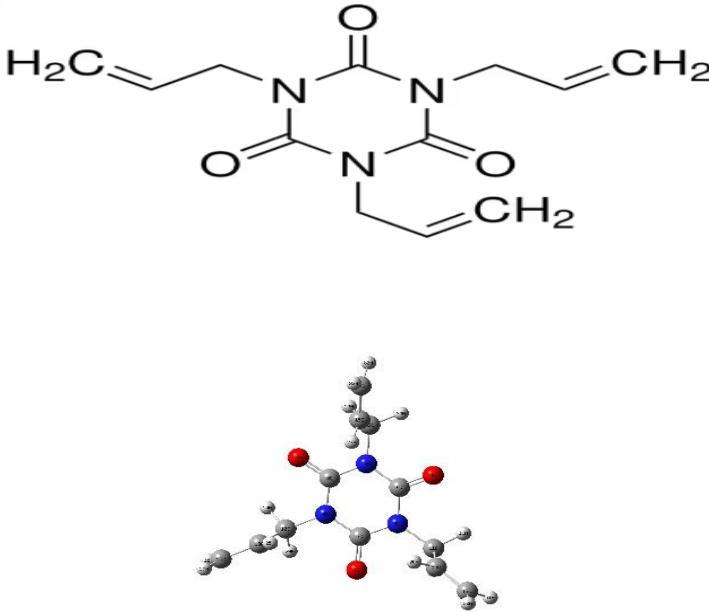
(Pope & Swenberg, 1999). Çeşitli heterosiklik sistemler arasında, 1,3,5-triazin bazlı bileşikler, güçlü elektron çekme özelliği, yüksek termal stabilitesi ve çok yönlü işlevselleştirme yetenekleri nedeniyle umut verici adaylar olarak ortaya çıkmıştır (Liu ve ark., 2018; Thomas ve ark., 2001). Alil ve karbonil fonksiyonel gruplarının triazin yapısına dahil edilmesi, elektronik yapıyı ve moleküller arası etkileşimleri önemli ölçüde değiştirebilir, bu da optik absorpsiyonun artmasına ve yük taşıma özelliklerinin iyileşmesine yol açar (Mishra & Bäuerle, 2012). Bu bağlamda, 1,3,5-Triallyl-1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione (TAIC) optoelektronik önemi olan ilginç bir moleküler sistemdir. TAIC, polimer ve kompozit malzemelerde çapraz bağlama ajanı olarak yaygın olarak kullanılsa da, içsel elektronik ve optik özellikleri henüz kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır (Mark, 1999). Çözücü etkileri, çözünen madde-çözücü etkileşimlerini ve moleküler konformasyonları etkileyerek organik moleküllerin optik tepkisini ve elektronik davranışını belirlemede önemli bir rol oynar (Reichardt & Welton, 2011). Tetrahidrofuran (THF) gibi polar aprotik çözücüler, organik bileşiklerin elektronik geçişleri ve absorpsiyon özelliklerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir (Kalyanasundaram, 1992). Sonuç olarak, TAIC'nin optik davranışını ve enerji bandı yapısını gerçekçi deney koşulları altında aydınlatmak için çözültideki TAIC'nin spektroskopik çalışmaları gereklidir. Deneysel araştırmalara ek olarak, yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) temelinde yapılan kuantum kimyasal hesaplamalar, elektronik geçişleri yorumlamak, sınır moleküler orbital enerjilerini tahmin etmek ve doğrusal olmayan optik özellikleri değerlendirmek için güçlü araçlar olduklarını kanıtlamıştır (Parr & Yang, 1989; Becke, 1993). Deneysel ölçümlerin DFT temelinde yapılan teorik hesaplamalarla birleştirilmesi, yük transfer mekanizmaları ve yapı-özellik ilişkileri hakkında daha derin bir anlayış sağlar. Bu çalışmada, THF içinde çözülmüş TAIC'nin elektronik, optik ve elektriksel özellikleri, UV-Vis spektroskopisi, iletkenlik analizi ve Gaussian yazılım paketi kullanılarak yapılan DFT hesaplamalarıyla kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Frisch et al., 2016). Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki korelasyon, TAIC'nin optoelektronik potansiyeli ve gelişmiş organik elektronik cihazlarda olası uygulamaları hakkında değerli bilgiler sunmaktadır.

## 2-DENEYSEL DETAYLAR

TAIC (1,3,5-Triallyl-1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione, CAS Numarası: 1025-15-6) ve THF çözücüsü Sigma-Aldrich kimya şirketinden satın alınmış ve saflaştırılmadan kullanılmıştır. Çözücü içerisinde çözülen numunenin ultraviyole absorpsiyon spektrumları, iki monokromatörlü HITACHI U-4100/1J0-0016, UV-vis kayıt spektrometresi kullanılarak 5 nm çözünürlükle 200 nm ile 600 nm arasında incelendi

### 3- ARAŞTIRMA VE BULGULAR

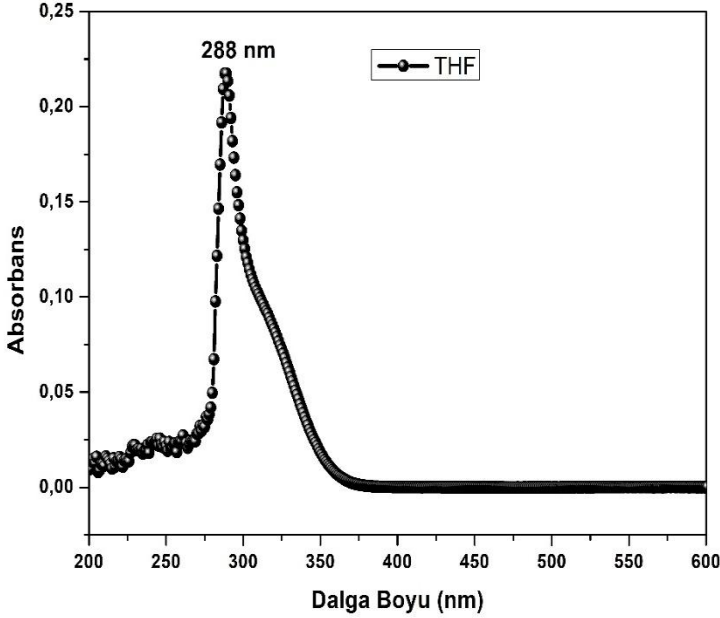
TAIC molekülünün deneysel formülü  $C_{12}H_{15}N_3O_3$  olup, moleküler ağırlığı 249.27 g/mol'dür. Molekülün geometrik 2D VE 3D yapısı şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. TAIC molekülünün 2D ve 3D yapısı

THF Çözücüsü içerisindeki deneysel absorbanans spektrumu şekil 2 de verilmiştir. Şekilden TAIC molekülü 288 nm de keskin bir pike sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ile TAIC molekülü orta Uv bölgesinde absorpsiyon spektrumuna sahip olduğu anlaşılmaktadır. OLED ve PLED uygulamaları için uygun olan ve 190 nm–330 nm aralığında bir absorpsiyon bant aralığına sahip olan Poli(metil metakrilat) (PMMA) ve Kadmiyum Sülfür (CdS) nanokompozitlerin (Abozaid, 2019:405), (Mohamed, 2020, 122285)

sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, TAIC 'un OLED ve PLED uygulamaları için uygun bir aday olabileceği anlaşılmıştır.

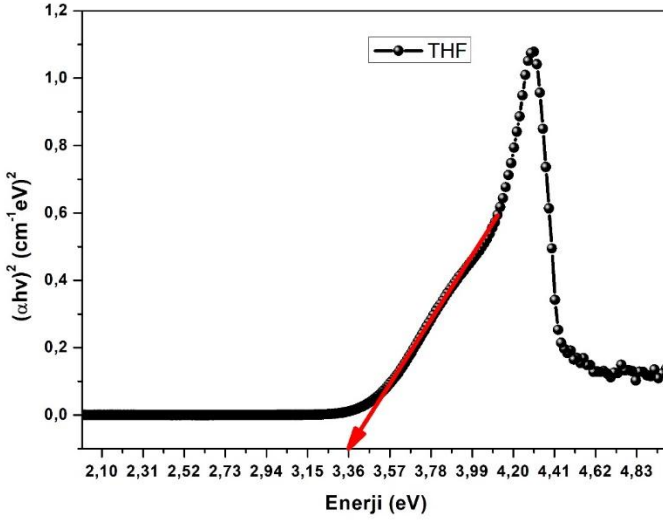


Şekil 2. TAIC molekülünün dalga boyuna bağlı soğurma spektrumu

Optik band aralığı bir malzemenin optik karakteristiğinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Literatürde Tauc bağlantısı (Tauc, 1974) yardımıyla hesabı mevcuttur (Yu, 2016: 90711), (Gao, 1998: 10842).

$$(\alpha h\nu) = A (h\nu - E_g)^n \quad (1)$$

Burada  $\alpha$  absorpsiyon katsayısı, A sabit,  $h\nu$  foton enerjisi,  $E_g$  optik enerji aralığı ve n bant aralıklarının türünü ölçen bir parametredir. TAIC için, bant aralığı türü (Georges, 2017:81) doğrudan izin verilen bant aralığı ( $n=2$ ) olarak belirlendi. Bunun için, THF içinde TAIC molekülünün  $(\alpha h\nu)^2$  grafiğini  $E_g$ 'ye karşı çizildi ve Şekil 3'te sunuldu Şekil 3'ün doğrusal bölgesinden  $E_g$  değerleri 3.36 eV olarak elde edilmiştir. Bu band aralığı değerleriyle TAIC molekülünün yarıiletken bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3. TAIC molekülünün enerjiye bağlı optik bant aralığı

Işığın şeffaf malzemeden geçerken frekans ve dalga boylarının nasıl değiştiğini gösteren bir parametre olan optik kırılma indisi ( $n$ ), optoelektronik için önemli bir değerdir (Abeles, 1972). Optik bant aralığı verileri ile elde edilen deneysel  $n$  değerleri aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir (Abeles, 1972).

$$n = \left\{ \left[ \frac{4R}{(R-1)^2} - k^2 \right]^{1/2} - \frac{R+1}{R-1} \right\} \quad (2)$$

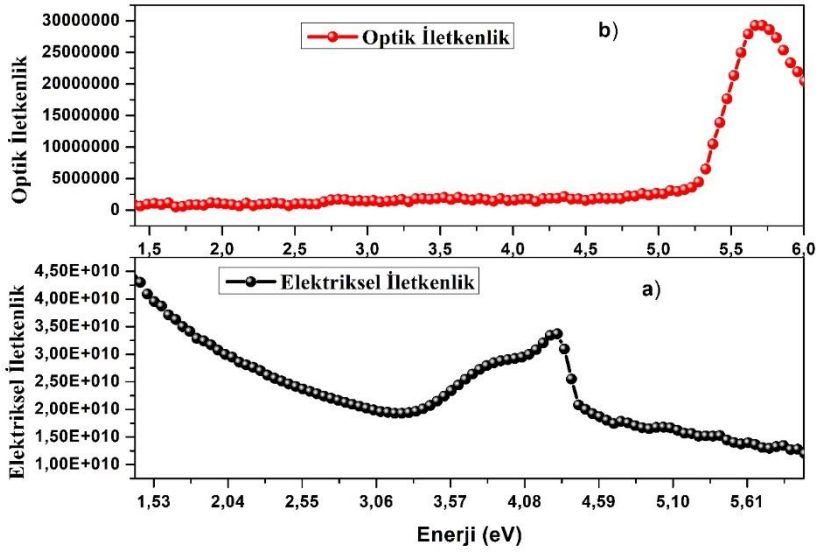
TAIC için kırılma indisi değeri 2,1 olarak hesaplandı. OLED malzemelerin dış kuplaj verimliliğinin artırılması amacıyla, düşük kırılma indisine sahip malzemelerin kullanıldığı çok sayıda çalışma literatürde rapor edilmiştir (Fehse ,2008:83303), (Fuchs, 2015: 245306), (Lu, 2016:3250). 2.1 kırılma indisi değerleri oldukça düşük ve en düşük değer, metal oksit nanomalzeme olan PMMA/TiO<sub>2</sub>'nin optik kırılma indisi değerleriyle karşılaştırıldığında (Schneider,2014:9919), (Jin,2013:767), (Yang, 2010:2658). TAIC optoelektronik cihazlar gibi uygulamalar için oldukça uygun bir materyaldir.

Elektrik iletkenliği ve optik iletkenlik, yüksek teknoloji cihazların optik ve fotonik özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir (Maulana, 2021:115206), (Haghgoo, 2019:728), (Mousavi, 2012:3137). Aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$\sigma_{optik} = \frac{\alpha n c}{4\pi} \quad (3)$$

$$\sigma_{elektrik} = \left(\frac{2\lambda}{\alpha}\right) \cdot \sigma_{optik} \quad (4)$$

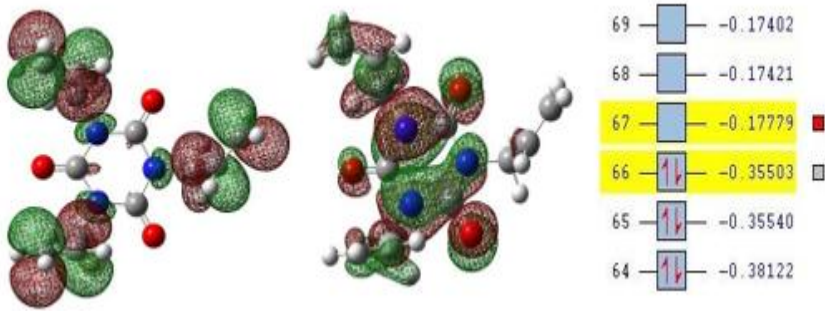
Bu denklemlerde,  $\alpha$  soğurma katsayısı,  $c$  ışık hızı ve  $n$  kırılma indisidir. Çalışılan çözücüde enerjiye bağlı elektriksel iletkenliğin değişim grafiği Şekil 4 (a) da verilmiştir. Şekilden elektriksel iletkenlik, yaklaşık 3 eV a kadar bir azalma eğilimde iken, ve 4,38 eV'de maksimum pik sağlamıştır. Şekil 4 (b) de, çalışmada kullanılan çözücüde foton enerjisine bağlı olarak optik iletkenlikteki değişimi göstermektedir. Foton enerjisi TAIC molekülünün bant aralığına yakın olduğunda, optik iletkenlikte ani bir artış olduğu gözlemlenmektedir. TAIC molekülünün elektriksel iletkenliğinin de optik iletkenliğinden çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. Farklı çözücülerde TAIC molekülünün a) Elektrik iletkenlik b) Optik iletkenlik spektrumları

TAIC molekülüne ait teorik hesaplamalar, zamanla bağlı yoğunluk fonksiyonel teorisi (TD-DFT) yöntemi kullanılarak Gaussian 09 yazılım paketi (Frisch et al., 2009) ve GaussView 5.0 görselleştirme programı

(Dennington et al., 2009) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan çok sayıda çalışma, yoğunluk fonksiyonel teorisine dayalı hesaplamaların moleküler geometri, elektronik yapı ve optik özelliklerin belirlenmesinde deneysel verilerle yüksek derecede uyumlu ve güvenilir sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır (Ben M'leh et al., 2018; Akman et al., 2020; Karrouchi et al., 2020; Romani et al., 2020; Hamd Hssain et al., 2021; Orek et al., 2017; Tanış, 2022). Bu yöntem sayesinde, çözücü ortamının elektronik yapı üzerindeki etkileri teorik olarak modellenmiştir. Ayrıca, en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ile en düşük boş moleküler orbital (LUMO) arasındaki enerji farkı olarak tanımlanan bant aralığı ( $E_g$ ) değerleri teorik olarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar deneysel bulgularla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5. TAIC molekülünün sınır moleküler orbitalleri.

Sınır moleküler orbital (FMO) teorisi, elektronların tek tek kimyasal bağlarla sınırlı kalmayıp tüm moleküler yapı üzerinde delocalize olduğunu varsayarak moleküllerdeki elektronik davranışı açıklar ve bu sırada iyi tanımlanmış kuantum mekaniği ilkelerine bağlı kalır. Bu çerçevede, en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) elektronların bulunduğu en yüksek enerji seviyesine karşılık gelirken, en düşük boş moleküler orbital (LUMO) mevcut en düşük boş enerji seviyesini temsil eder. Bu orbitaller arasındaki enerji farkı, enerji boşluğu ( $E_g$ ) olarak adlandırılır ve moleküler sistemlerin elektronik yapısını, optik tepkisini ve kimyasal reaktivitesini belirlemede önemli bir rol oynar. Bu çalışmada, incelenen sistemin  $E_g$  değeri THF çözücü ortamında 4,82 eV olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bant aralığı değeri, organik ışık yayan diyot (OLED) uygulamaları için umut vadeden bir aday olarak tanımlanan LiTiAlO<sub>4</sub> molekülünün literatürde bildirilen elektronik bant aralığı ile iyi bir uyum göstermektedir (Abdullah & Abdullah, 2025). Ayrıca, teorik olarak elde edilen  $E_g$  değerinin, karşılık gelen optik bant aralığı değerlerinden daha

yüksek olduğu bulunmuştur, bu da ek elektronik geçiş katkılarının varlığını göstermektedir. Şekil 5, HOMO ve LUMO moleküler orbitallerinin kontur grafiklerini ve bunlara karşılık gelen enerji seviyelerini göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi, triazin grubu HOMO orbitaline ihmal edilebilir bir katkı sağlarken, LUMO orbitalinin oluşumunda baskın bir rol oynamaktadır. Bu dağılım, triazin grubunun molekülün elektron kabul edici karakterini önemli ölçüde etkilediğini ve düşük enerjili elektronik geçişlerini yönettiğini göstermektedir.

| Tablo 1. TAIC molekülünün hesaplanmış dipol moment $\mu$ (D), polarizabilite $\alpha$ (e.s.u), ve birinci dereceden hiperpolarizabilite $\beta$ (e.s.u) değerleri. |                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Parameters                                                                                                                                                         | THF                       |
| $\mu_x$                                                                                                                                                            | 0.0248                    |
| $\mu_y$                                                                                                                                                            | -0.1263                   |
| $\mu_z$                                                                                                                                                            | 0.0009                    |
| $\mu$                                                                                                                                                              | 0.1287                    |
| $\alpha_{xx}$                                                                                                                                                      | 35.5093                   |
| $\alpha_{xy}$                                                                                                                                                      | -1.9192                   |
| $\alpha_{yy}$                                                                                                                                                      | 42.0843                   |
| $\alpha_{xz}$                                                                                                                                                      | 0.7110                    |
| $\alpha_{yz}$                                                                                                                                                      | -1.6098                   |
| $\alpha_{zz}$                                                                                                                                                      | 27.9243                   |
| $a$ (a.u)                                                                                                                                                          | 228.0393                  |
| $a$ (e.s.u)                                                                                                                                                        | $34.8353 \times 10^{-23}$ |
| $\Delta a$ (a.u)                                                                                                                                                   | 468.6206                  |
| $\Delta a$ (e.s.u)                                                                                                                                                 | $63.0011 \times 10^{-23}$ |
| $\beta_{xxx}$                                                                                                                                                      | 150.0249                  |
| $\beta_{xxy}$                                                                                                                                                      | -107.9100                 |
| $\beta_{xyy}$                                                                                                                                                      | -77.4143                  |
| $\beta_{yyy}$                                                                                                                                                      | 32.7465                   |
| $\beta_{zxx}$                                                                                                                                                      | 0.5681                    |
| $\beta_{xyz}$                                                                                                                                                      | -0.4037                   |
| $\beta_{zyy}$                                                                                                                                                      | 0.6436                    |
| $\beta_{xzz}$                                                                                                                                                      | -15.9815                  |

|                                |                           |
|--------------------------------|---------------------------|
| $\beta_{yzz}$                  | -23.7524                  |
| $\beta_{zzz}$                  | -0.0851                   |
| $\beta_{tot} \text{ (a.u.)}$   | 160.6315                  |
| $\beta_{tot} \text{ (e.s.u.)}$ | $12.5368 \times 10^{-30}$ |

Doğrusal olmayan optik (NLO) malzemeler; telekomünikasyon, bilgi depolama, optik anahtarlama, haberleşme, optik sensörler ve sinyal işleme gibi birçok alanda kullanılan optoelektronik aygıtlardaki geniş uygulama potansiyelleri nedeniyle günümüzde büyük ilgi görmektedir (Govindarasu & Kavitha, 2014). Yeni NLO malzemelerinin keşfi ve geliştirilmesi, teorik hesaplama yöntemlerinin sağladığı doğruluk ve güvenilirlik sayesinde etkin ve öngörülebilir bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Yamashita, 2012; Khoo, 2014; Anthony et al., 2008; Fantin et al., 2007; Drozd & Marchewka, 2006). Bu çalışmada NLO özellikleri, B3LYP/6-311++G(d,p) temel seti kullanılarak hesaplanan elektrik dipol momenti ( $\mu$ ), moleküler polarizabilite ( $\alpha$ ) ve birinci dereceden hiperpolarizabilite ( $\beta$ ) parametreleri temel alınarak değerlendirilmiştir. Gaussian 09 yazılımı aracılığıyla elde edilen çıktı dosyalarından türetilen  $3 \times 3 \times 3$  matris bileşenleri, ilgili matematiksel ifadeler kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 1’te sunulmuştur. Bu bağlamda dipol moment ( $\mu$ ) değeri 0.1287 olarak hesaplanmış, toplam birinci dereceden hiperpolarizabilite değeri  $\beta_{tot} \text{ (e.s.u.)}$   $12.5368 \times 10^{-30}$  ve ortalama polarizabilite  $\alpha \text{ (e.s.u.)}$  ise  $34.8353 \times 10^{-23}$  olarak belirlenmiştir. Etkin bir NLO malzemenin  $\beta_{tot}$ ,  $\mu_{tot}$  ve  $\Delta\alpha$  parametrelerinin, referans malzeme olarak yaygın biçimde kullanılan üreye kıyasla yeterince yüksek olması beklenmektedir. Yapılan karşılaştırmada, PHMB’nin birinci dereceden hiperpolarizabilite değerinin üreye göre yaklaşık 1.5 kat daha yüksek olduğu, buna ek olarak ortalama polarizabilite değerinin ise yaklaşık 12 kat arttığı gözlemlenmiştir (üre için  $\beta_{tot} = 194.7 \times 10^{-33} \text{ esu}$  ve  $\Delta\alpha = 3.8312 \times 10^{-24} \text{ esu}$ ). Elde edilen bu sonuçlar, PHMB’nin doğrusal olmayan optik uygulamalar açısından umut vadeden bir malzeme olduğunu ortaya koymaktadır.

## SONUÇ

Bu çalışmada, tetrahidrofuran (THF) çözücüsü içerisinde çözünmüş TAIC organik malzemesinin elektronik, optik ve bazı elektriksel özellikleri deneysel ve kuramsal yöntemler kullanılarak kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Deneysel UV–Vis absorbans ölçümleri sonucunda, TAIC malzemesinin 288 nm dalga boyunda belirgin bir absorbans piki sergilediği gözlemlenmiştir. Optik analizler doğrultusunda, doğrudan izinli geçiş modeli kullanılarak hesaplanan en yüksek optik bant aralığı enerji değeri 3.36 eV olarak belirlenmiştir. Elektriksel ve optik iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması sonucunda, TAIC’in elektriksel iletkenliğinin optik iletkenliğe kıyasla belirgin

biçimde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, malzemenin etkin yük taşıma özelliklerine sahip olduğunu ve optoelektronik uygulamalar açısından avantajlı bir yapıya işaret ettiğini göstermektedir. Elde edilen deneysel sonuçların, literatürde optoelektronik teknolojiler için uygun olduğu bildirilen benzer organik malzemelerin sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel bulguları desteklemek amacıyla, HOMO–LUMO moleküler orbitalleri ve doğrusal olmayan optik (NLO) özellikleri içeren kuantum kimyasal hesaplamalar yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen teorik sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki iyi uyum, uygulanan yöntemlerin güvenilirliğini doğrulamaktadır. Sonuç olarak, TAIC organik malzemesinin bu çalışmada belirlenen elektronik, optik, doğrusal olmayan optik (NLO) ve elektriksel özellikleri dikkate alındığında, optoelektronik cihaz uygulamaları için güçlü bir aday olduğu sonucuna varılmıştır.

## REFERANSLAR

- Abdullah, B. J., & Abdullah, N. R. (2025). LiTiAlO<sub>4</sub>: A novel wide band gap semiconductor for optoelectronic and thermal management—Insight from DFT and AIMD within HSE06. *Micro and Nanostructures*, 207, 208312.
- Abozaid, R. M., Lazarević, Z. Ž., Radović, I., Gilić, M., Šević, D., Rabasović, M. S., & Radojević, V. (2019). Optical properties and fluorescence of quantum dots CdSe/ZnS PMMA composite films with interface modifications. *Optical Materials*, 92, 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.04.058>
- Akman, F., Issaoui, N., & Kazachenko, A. S. (2020). Intermolecular hydrogen bond interactions in the thiourea/water complexes (Thio-(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>) (n = 1–5): X-ray, DFT, NBO, AIM, and RDG analyses. *Journal of Molecular Modeling*, 26, 1–16.
- Alisher, G. E., Ibodulla, F. T., & Abdukhakim, A. Z. (2017). DFT and TD-DFT study of isomeric 5-(pyridyl)-1,3,4-oxadiazol-2-thiones and 2-methylthio-5-(pyridyl)-1,3,4-oxadiazoles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 187, 191–197.
- Anthony, J. K., Kim, H. C., Lee, H. W., Mahapatra, S. K., Lee, H. M., Kim, C. K., Kim, K., Lim, H., & Rotermu, F. (2008). Particle size-dependent giant nonlinear absorption in nanostructured Ni–Ti alloys. *Optics Express*, 16, 11193–11202.
- Ben M’leh, C., Brandán, S. A., Issaoui, N., Roisnel, T., & Marouani, H. (2018). Synthesis, molecular structure, vibrational and theoretical studies of a new noncentrosymmetric organic sulphate with promising NLO properties. *Journal of Molecular Structure*, 1171, 771–785.
- Bhattacharjee, P. R. (2018). Refinement of the definitions of angles of incidence, reflection, refraction, and critical angle in ray optics. *Optik*, 172, 1187–1192.

Dennington, R., Keith, T., & Millam, J. (2009). *GaussView* (Version 5). Semichem Inc.

Drozd, M., & Marchewka, M. K. (2006). The structure, vibrational spectra and nonlinear optical properties of the L-lysine–tartaric acid complex: Theoretical studies. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 64(1), 6–23.

Fantin, P. A., Barbieri, P. L., Cana Neto, A. C., & Jorge, F. E. (2007). Augmented Gaussian basis sets of triple and quadruple zeta valence quality for the atoms H and from Li to Ar: Applications in HF, MP2, and DFT calculations of molecular dipole moment and dipole (hyper)polarizability. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 810, 103–111.

Fehse, K., Meerheim, R., Walzer, K., Leo, K., Lövenich, W., & Elschner, A. (2008). Lifetime of organic light emitting diodes on polymer anodes. *Applied Physics Letters*, 93(8), 083303. <https://doi.org/10.1063/1.2975369>

Forrest, S. R. (2004). The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic. *Nature*, 428(6986), 911–918.

Friend, R. H., Gymer, R. W., Holmes, A. B., Burroughes, J. H., Marks, R. N., Taliani, C., & Wright, G. N. (1999). Electroluminescence in conjugated polymers. *Nature*, 397(6715), 121–128.

Frisch, M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B., Scuseria, G. E., Robb, M. A., *et al.* (2009). *Gaussian 09* (Revision A.2). Gaussian, Inc.

Fuchs, C., Will, P.-A., Wieczorek, M., Gather, M. C., Hofmann, S., Reineke, S., Leo, K., & Scholz, R. (2015). Enhanced light emission from top-emitting organic light-emitting diodes by optimizing surface plasmon polariton losses. *Physical Review B*, 92(24), 245306. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.245306>

Gao, X., Bare, S. R., Weckhuysen, B. M., & Wachs, I. E. (1998). In situ spectroscopic investigation of molecular structures of highly dispersed vanadium oxide on silica under various conditions. *The Journal of Physical Chemistry B*, 102(52), 10842–10852.

Georges, S., & Zhenhua, P. (2017). III–V semiconductor photoelectrodes. In *Semiconductors and Semimetals* (Vol. 97, pp. 81–138). Elsevier.

Govindarasu, K., & Kavitha, E. (2014). Vibrational spectra, molecular structure, NBO, UV, NMR and first-order hyperpolarizability analysis of 4-methoxy-4'-nitrobiphenyl by density functional theory. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 122, 130–141.

Haghighi, M., Ansari, R., & Hassanzadeh-Aghdam, M. K. (2019). Prediction of electrical conductivity of carbon fiber–carbon nanotube-reinforced polymer hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 167, 728–735.

Hamd Hssain, A., Gündüz, B., Majid, A., & Bulut, N. (2021). NTCDA compounds of optoelectronic interest: Theoretical insights and experimental investigation. *Chemical Physics Letters*, 780, 138918. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138918>

Khoo, I. C. (2014). Nonlinear optics, active plasmonics and metamaterials with liquid crystals. *Progress in Quantum Electronics*, 38, 77–117.

Lu, C.-Y., Jiao, M., Lee, W.-K., Chen, C.-Y., Tsai, W.-L., Lin, C.-Y., & Wu, C.-C. (2016). Achieving above 60% external quantum efficiency in organic light-emitting devices using ITO-free low-index transparent electrode and emitters with preferential horizontal emitting dipoles. *Advanced Functional Materials*, 26(19), 3250–3258.

Maniyar, A. K., Nadaf, Y. F., Khasim, S., *et al.* (2024). Photophysical studies on donor– $\pi$ –acceptor substituted 1,3,4-oxadiazole derivatives for optoelectronic application: Experimental and theoretical analysis. *Journal of Optics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-01841-z>

Mantarçı, A. (2020). Solvent effects on optical properties of 26DCzPPy material. *Optik*, 224, 165709.

Mousavi, H. (2012). Optical conductivity of carbon nanotubes. *Optics Communications*, 285(6), 3137–3139.

Najare, M. S., Patil, M. K., Nadaf, A. A., Mantur, S., Inamdar, S. R., & Imtiyaz, I. A. M. (2019). Synthesis, characterization and photophysical properties of a new class of pyrene substituted 1,3,4-oxadiazole derivatives. *Optical Materials*, 88, 256–265.

Orek, C., Gündüz, B., Kaygili, O., & Bulut, N. (2017). Electronic, optical, and spectroscopic analysis of TBADN organic semiconductor: Experiment and theory. *Chemical Physics Letters*, 678, 130–138.

Rasheed, M., & Barillé, R. (2017). Optical constants of DC sputtering derived ITO, TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>:Nb thin films characterized by spectrophotometry and spectroscopic ellipsometry for optoelectronic devices. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 476, 1–14.

Schneider, J., Matsuoka, M., Takeuchi, M., Zhang, J., Horiuchi, Y., Anpo, M., & Bahnemann, D. W. (2014). Understanding TiO<sub>2</sub> photocatalysis: Mechanisms and materials. *Chemical Reviews*, 114(19), 9919–9986.

Tanış, E. (2022). Optical and photonic properties dependence on HNMB solvents: An emitter molecule for OLEDs. *Optik*, 252, 168576. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168576>

Tauc, J. (Ed.). (1974). *Amorphous and liquid semiconductors*. Springer.

Tomasi, J., Mennucci, B., & Cammi, R. (2005). Quantum mechanical continuum solvation models. *Chemical Reviews*, 105(8), 2999–3094.

Waddar, B., Gandi, S., Parne, S. R., Chari, V. R., & Prasanth, G. R. (2024). Investigation of second-order NLO properties of novel 1,3,4-oxadiazole derivatives: A DFT study. *Journal of Molecular Modeling*, 30(5), 118.

Yamashita, S. (2012). A tutorial on nonlinear photonic applications of carbon nanotube and graphene. *Journal of Lightwave Technology*, 30(4), 427–447.

Yu, R., Yuan, M., Li, T., Tu, Q., & Wang, J. (2016). Preparation, structure and luminescence properties of Ba<sub>2</sub>V<sub>2</sub>O<sub>7</sub> microrods. *RSC Advances*, 6(93), 90711–90717.

Zhang, T., Jiang, S., Wang, G., Zuo, Y., Yu, S., Zhang, Q., & Hu, X. (2024). 1,3,4-Oxadiazole derivative: Photophysical, gelation, self-assembly, and Fe<sup>3+</sup> fluorescence sensing properties. *Journal of Chemical Research*, 48(3).  
<https://doi.org/10.1177/17475198241255788>



# **Bir Oksidazol Türevinin Çözücü Ortamındaki Elektronik, Optik ve Algılama Özelliklerinin İncelenemesi**

**EMİNE TANIŞ\***

---

\* Prof. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü. E-mail: [eminetanis@ahievran.edu.tr](mailto:eminetanis@ahievran.edu.tr). ORCID No: 0000-0001-6815-9286

## ÖZET

Bu çalışmada, etanol, benzen ve dimetil sülfoksit (DMSO) çözücü ortamlarının, 5-(4-piridil)-1,3,4-oksadiazol-2(3H)-tion (POT) organik malzemesinin elektronik, optik, elektriksel ve algılama özellikleri üzerindeki etkileri deneysel ölçümler yoluyla kapsamlı biçimde araştırılmıştır. Farklı çözücülerin POT molekülü ile olan etkileşimlerinin, malzemenin elektronik yapısını ve buna bağlı optoelektronik parametrelerini belirgin şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, POT'un farklı çözücülerde elde edilen absorpsiyon spektrumları ayrıntılı olarak incelenmiş; soğurma bantlarının dalga boyu konumu, şiddeti ve spektral dağılımındaki değişimler, çözücüye bağlı moleküler etkileşimler açısından yorumlanmıştır. Optik özelliklerin daha derinlemesine anlaşılabilmesi amacıyla, POT'un optik bant aralığı değerleri doğrudan izinli geçiş modeli kullanılarak hesaplanmış ve çözücü ortamının bant aralığı üzerinde önemli bir düzenleyici rol oynadığı ortaya konulmuştur. Bunun yanı sıra, kırılma indisi, yansıma ve kontrast gibi temel optik parametreler belirlenmiş; elde edilen sonuçlar, POT'un ışık-madde etkileşimi davranışının çözücü seçimiyle etkin biçimde ayarlanabildiğini göstermiştir. Özellikle kontrast değerlerinde gözlenen değişimler, POT'un algılama hassasiyetinin çözücü ortamına bağlı olarak optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, POT malzemesinin elektriksel ve optik iletkenlik değerleri karşılaştırılmış ve elektriksel iletkenliğin optik iletkenliğe kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, POT'un yük taşıma mekanizmaları açısından optoelektronik aygıt uygulamaları için uygun bir aday olduğunu göstermektedir. Genel olarak elde edilen bulgular, POT'un fotodetektörler, optik sensörler ve diğer yeni nesil optoelektronik cihazlarda kullanılabilirliğini desteklemekte ve çözücü mühendisliğinin bu tür organik malzemelerin performansını artırmada etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır.

*Anahtar Kelimeler: Oksadiazol, Optoelektronik cihazlar, Elektrik İletkenlik, Optik İletkenlik, POT.*

---

## GİRİŞ

Özel optoelektronik özelliklere sahip heterosiklik bileşiklerin araştırılması, fotonik cihazlar, sensörler ve doğrusal olmayan optik sistemlerdeki potansiyel uygulamaları nedeniyle modern malzeme biliminin merkezi bir teması haline gelmiştir (Najare, 2019:256). Bunlar arasında, 1,3,4-oksadiazol türevleri, yapısal kararlılıkları, ayarlanabilir konjugasyonları ve uygun yük taşıma özellikleri nedeniyle çok yönlü çerçeveler olarak ortaya çıkmıştır (Waddar, 2024: 118). Elektron veren ve elektron alan ikame gruplarını içerebilme özellikleri, moleküler polarite, bant aralığı ve foto fiziksel davranış üzerinde

hassas kontrol sağlar ve bu bileşikler ileri optik teknolojiler için umut vaat eden adaylar haline getirir (Maniyar,2024:1).

Bu sınıf içinde, 5-(4-piridil)-1,3,4-oksadiazol-2(3H)-tion (POT) özellikle ilgi çekicidir. Piridil ikame maddesi elektron afinitesini artırırken, tiyon grubu geniş konjügasyon ve potansiyel molekül içi yük transferine katkıda bulunur. Bu yapısal özellikler, bileşiğin güçlü absorpsiyon, floresan emisyonu ve doğrusal olmayan kırılma davranışı dahil olmak üzere önemli optik tepkiler sergileyebileceğini düşündürmektedir. Optoelektronik uygulamalar için uygunluğunu değerlendirmek için, optik ve elektronik parametrelerinin kapsamlı bir analizi gereklidir.

Bu çalışmada, molekülün optik performansını tanımlayan çok çeşitli parametreleri elde edilip, analiz edildi. Bunlar arasında, elektronik geçiş davranışı hakkında bilgi sağlayan absorpsiyon spektrumu; uyarılma için enerji eşiğini belirleyen optik bant aralığı; ışık yayılımı ve yüzey etkileşimleri için kritik öneme sahip kırılma indisi; görüntüleme ve anahtarlama uygulamalarıyla ilgili optik kontrast yer almaktadır. Ayrıca, malzeme içindeki yük taşınımı ve foton-elektron etkileşimlerini değerlendirmek için hem elektriksel iletkenlik hem de optik iletkenlik incelenmiştir.

Çözücü etkisinin incelenmesine yönelik geliştirilen çağdaş yöntemler, çözücü-çözünen etkileşimlerinin maddenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde belirgin değişimlere neden olduğunu ortaya koymuştur (Zhang, 2024:7). Bu bağlamda, çözücünün rolünün değerlendirilmesi, incelenen moleküllerin yapısal ve fonksiyonel özelliklerinin kapsamlı biçimde anlaşılması açısından temel bir bilimsel gereklilik teşkil etmektedir.

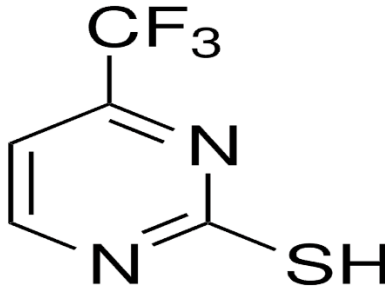
Literatürde POT numunesiyle ilgili yapısal ve spektroskopik özellikleriyle ilgili iki çalışma mevcuttur (Sıdır,2025: 116610), (Alisher, 2017, 191). Bu çalışmalarda POT molekülünün spektroskopik özellikleri hem deneysel hem de teorik yaklaşımlar yoluyla incelenmiştir. Fakat POT malzemesinin optik, elektronik ve fotonik özellikleri ile ilgili literatürde hiçbir araştırma bildirilmemiştir. Buna göre, bu çalışmada, bir oksadiazol türeviden olan POT numunesinin çeşitli çözücü ortamlarında elektronik, optik ve fotonik özellikleri açısından kapsamlı bir şekilde deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçların, heterosiklik sistemler hakkındaki bilginin genişletilmesine katkıda bulunması ve 5-(4-piridil)-1,3,4-oksadiazol-2(3H)-tionun yeni nesil fotonik ve optoelektronik teknolojilerdeki potansiyelini vurgulaması beklenmektedir.

## 2-DENEYSEL DETAYLAR

POT molekülü, etanol, benzen ve Dimetil Sülfoksit (DMSO) çözücüleri Sigma-Aldrich şirketinden %97 nin üzerinde saflıkta satın alındı. Çözücüler içerisinde çözülen numunenin ultraviyole absorpsiyon spektrumları, iki monokromatörlü HITACHI U-4100/1J0-0016, UV-vis kayıt spektrometresi kullanılarak 5 nm çözünürlükle 200 nm ile 600 nm arasında incelendi.

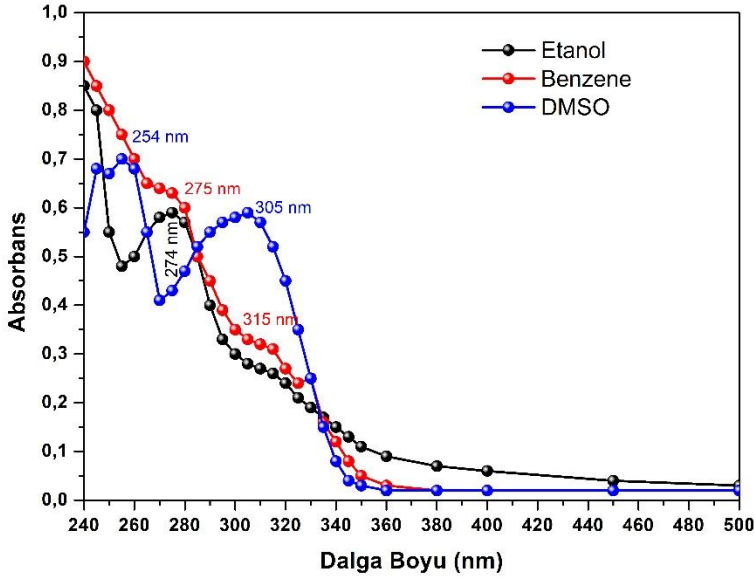
## 3- ARAŞTIRMA VE BULGULAR

POT molekülünün deneysel formülü  $C_7H_5N_3OS$  olup, moleküler ağırlığı 179.20 g/mol'dür. Molekülün geometrik yapısı şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. POT molekülünün 2D yapısı

Çözücüler içerisindeki deneysel absorpsiyon spektrumları şekil 2 de verilmiştir. Şekilden POT molekülü etanol çözücüsü içerisinde 274 nm de keskin bir pike, DMSO içerisinde 254 nm ve 305 nm de iki pike, benzen de ise 275 nm ve 315 nm de keskin olmayan iki pike sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ile POT molekülü orta ve yakın Uv bölgesinde absorpsiyon spektrumuna sahip olduğu anlaşılmaktadır. OLED ve PLED uygulamaları için uygun olan ve 190 nm–330 nm aralığında bir absorpsiyon bant aralığına sahip olan Poli(metil metakrilat) (PMMA) ve Kadmiyum Sülfür (CdS) nanokompozitlerin (Abozaid, 2019:405), (Mohamed, 2020, 122285) sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, POT ‘un OLED ve PLED uygulamaları için uygun bir aday olabileceği anlaşılmıştır. Ayrıca POT molekülünün bu çalışmada kullanılan çözücüler için farklı absorpsiyon piklerine sahip olması çözücü etkisine sahip bir yapıda olduğunu da göstermektedir.



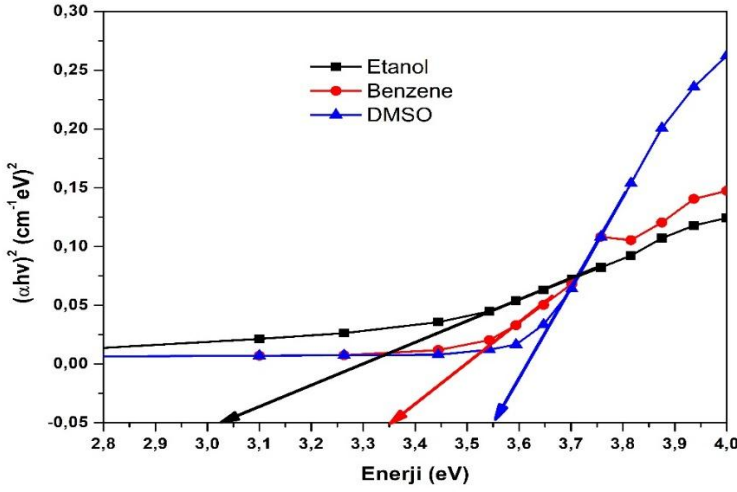
Şekil 2. POT molekülünün dalga boyuna bağlı soğurma spektrumları

Optik band aralığı bir malzemenin optik karakteristiğinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Literatürde Tauc bağlantısı (Tauc, 1974) yardımıyla hesabı mevcuttur (Yu, 2016: 90711), (Gao, 1998: 10842).

$$(\alpha h\nu) = A (h\nu - E_g)^n \quad (1)$$

Burada  $\alpha$  absorpsiyon katsayısı, A sabit,  $h\nu$  foton enerjisi,  $E_g$  optik enerji aralığı ve n bant aralıklarının türünü ölçen bir parametredir. POT için, bant aralığı türü (Georges, 2017:81) doğrudan izin verilen bant aralığı ( $n=2$ ) olarak belirlendi. Bunun için, çalışılan çözücüler için POT molekülünün  $(\alpha h\nu)^2$  grafiğini  $E_g$ 'ye karşı çizildi ve Şekil 3'te sunuldu Şekil 3'ün doğrusal bölgelerinden  $E_g$  değerleri hesaplandı ve POT'un  $E_g$  değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'den görülebileceği gibi, POT'un  $E_g$  değerleri etanol için yaklaşık 3,03 eV, benzen için 3,35 eV, DMSO için 3.50 eV olarak elde edilmiştir. Bu band aralığı değerleriyle POT molekülünün yarıiletken bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır.

| Tablo 1. POT molekülünün farklı çözücülerde band aralık ve kırılma indisi değerleri. |            |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|------|
| Çözücüler                                                                            | $E_g$ (eV) | n    |
| Etanol                                                                               | 3,03       | 1,47 |
| Benzen                                                                               | 3.35       | 1,49 |
| DMSO                                                                                 | 3.50       | 1,50 |



Şekil 3. POT molekülünün enerjiye bağlı optik bant aralığı

Işığın şeffaf malzemeden geçerken frekans ve dalga boylarının nasıl değiştiğini gösteren bir parametre olan optik kırılma indisi (n), optoelektronik için önemli bir değerdir (Abeles, 1972). Optik band aralığı verileri ile elde edilen deneysel n değerleri de Tablo 1 de sunulmuştur. OLED malzemelerin dış kuplaj verimliliğinin artırılması amacıyla, düşük kırılma indisine sahip malzemelerin kullanıldığı çok sayıda çalışma literatürde rapor edilmiştir (Fehse ,2008:83303), (Fuchs, 2015: 245306), (Lu, 2016:3250). Tabloda görüldüğü gibi, kırılma indisi değerleri oldukça düşük ve en düşük değer etanol içerisinde. Metal oksit nanomalzeme olan PMMA/TiO<sub>2</sub>'nin optik kırılma indisi değerleriyle karşılaştırıldığında (Schneider,2014:9919), (Jin,2013:767), (Yang, 2010:2658). POT optoelektronik cihazlar gibi uygulamalar için oldukça uygun bir materyaldir.

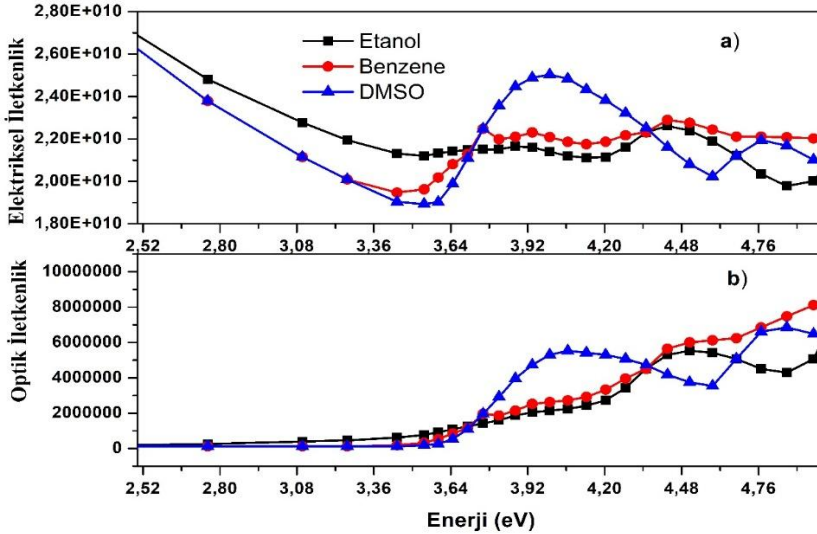
Elektrik iletkenliği ve optik iletkenlik, yüksek teknolojlili cihazların optik ve fotonik özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir (Maulana, 2021:115206), (Haghgoo, 2019:728), (Mousavi, 2012:3137). Aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$\sigma_{optik} = \frac{anc}{4\pi} \quad (2)$$

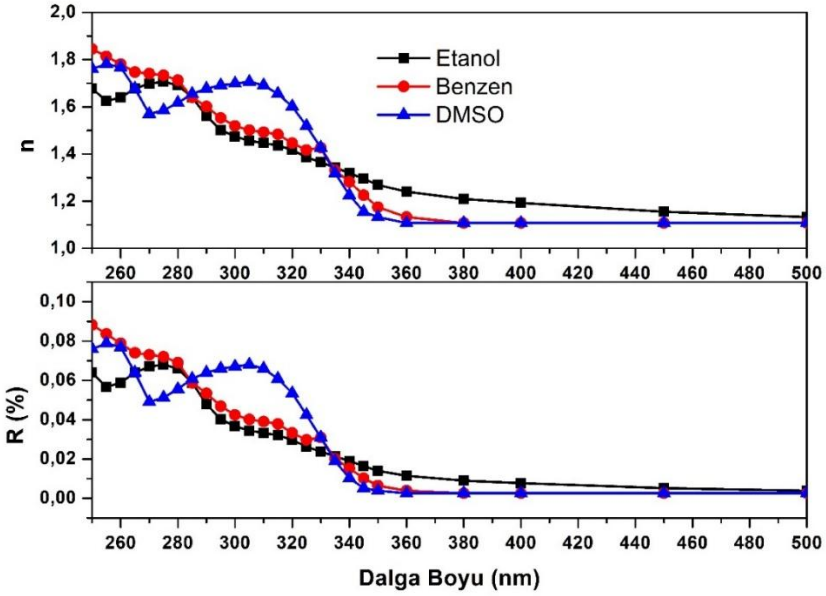
$$\sigma_{elektrik} = \left(\frac{2\lambda}{\alpha}\right) \cdot \sigma_{optik} \quad (3)$$

$$\alpha = 2.303 \frac{A}{d} \quad (4)$$

Bu denklemlerde,  $\alpha$  soğurma katsayısı,  $c$  ışık hızı ve  $n$  kırılma indisidir. Çalışılan çözücülerde enerjiye bağı elektriksel iletkenliğin değışim grafiği Şekil 4 (a) da verilmiştir. Şekilden elektriksel iletkenlik, yaklaşık 3,5 eV'lik bir enerji değerinden sonra azaldı ve farklı çözücüler için farklı iletkenlik değerlerinde 4 eV'de maksimum pikler sağlamıştır. Bu nedenle, optik iletkenliğin kullanılan çözücülere göre değıştiği görölmüştür. Şekil 4 (b) de, çalışmada kullanılan çözücülerde foton enerjisine bağı olarak optik iletkenlikteki değışimi göstermektedir. Foton enerjisi POT molekülünün bant aralığına eşit olduğunda, optik iletkenlikte ani bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Elektriksel iletkenliğin, optik iletkenlik gibi, çözücülere göre değıştiği görölmüştür. POT molekülünün elektriksel iletkenliğinin de optik iletkenliğinden çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. Farklı çözücülerde POT molekülünün a) Elektrik iletkenlik b) Optik iletkenlik spektrumları



Şekil 5. POT molekülünün a) Kırılma indisi b) Yansım oranı spektrumları

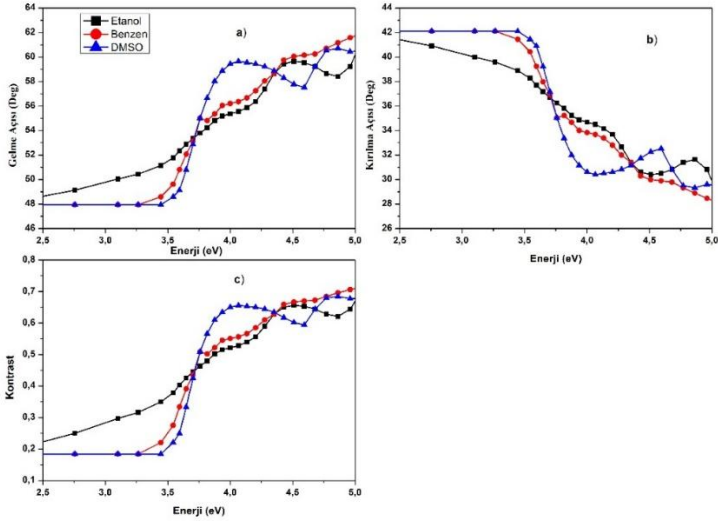
Şekil 5'te, dalga boyuna bağlı olarak elde edilen kırılma indisi (a) ve yansım oranı (b) değerleri sunulmaktadır. Etanol ve benzen çözeltilerinde 275 nm'nin, DMSO çözeltilerinde ise 305 nm'nin ötesinde kırılma indisi değerlerinde hızlı bir azalma gözlenmiştir. Bu maksimum değerler, örneğin ilgili çözücü ortamındaki yaklaşık optik bant aralığını temsil etmektedir. Tüm çözücülerde bant aralığına ulaşıldığında kırılma indisi değerlerinde belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Şekil 5-(b)'de POT molekülünün yansım pikleri, etanol ve benzen çözeltilerinde 275 nm'de, DMSO çözeltilerinde ise 305 nm'de ortaya çıkmaktadır. Bu dalga boylarında POT'un gelen ışığın yaklaşık %8'ini yansıttığı belirlenmiştir. İlgili eşik değerlerin ardından hem kırılma indisi hem de yansım oranları azalma eğilimi göstermektedir. Ayrıca, POT'un yansım oranı tüm çözücülerde dar bir dalga boyu aralığında %3'ten %8'e yükselmiştir. Bu bulgular, optik bant aralığı içerisinde belirgin bir soğurma davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, POT molekülü optik özellikleri çözücü ortamına bağlı olarak değişmekte ve bant aralığına ulaşıldığında hem kırılma indisi hem de yansım oranlarında hızlı bir azalma meydana gelmektedir. Ayrıca POT'un yansım özelliğinin düşük olması onun absorpsiyon özelliğinin yüksek olduğunu özellikle fotovoltaik hücreler, optik sensörler, anti-reflektif kaplamalar ve lazer-fotonik sistemler için oldukça uygun bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Malzemelerin optoelektronik performansı, geliş açısı ( $\Phi_1$ ), kırılma açısı ( $\Phi_2$ ) ve kontrast ( $\alpha_c$ ) gibi temel parametrelerden büyük ölçüde etkilenir (Bhattacharjee, 2018:1187).  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  aşağıdaki formüller (5) ve (6) ile verilebilir;

$$\Phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (5)$$

$$\Phi_2 = \sin^{-1}\left(\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sin \Phi_1\right) \quad (6)$$

Bu bağlamda,  $n_1$  ortamın kırılma indisine karşılık gelirken,  $n_2$  POT molekülünün kırılma indisini ifade eder. Şekil 6(a, b) ilgili çözücüler için enerjiye bağlı olarak değişen geliş ve kırılma açılarını göstermektedir. Şekil 6a, etanol, benzen ve DMSO'da POT'un geliş açısını ( $\Phi_1$ ) göstermektedir; burada maksimum değerler, her bir çözücü için optik bant aralığı enerjisinde elde edilmektedir. Denklem (6) kullanılarak hesaplanan kırılma açısının ( $\Phi_2$ ) enerjiye bağlı değişimi Şekil 6b'de gösterilmektedir. Giriş açısının aksine, kırılma açısı tüm çözücülerde optik bant aralığı enerjilerinde belirgin bir minimum sergiler, bu da bu kritik enerjilerde optik saçılmanın azaldığını ve ışık iletiminin iyileştiğini gösterir.  $\Phi_2$ 'ye kıyasla tutarlı bir şekilde daha yüksek olan  $\Phi_1$  değerleri, arayüzey optik etkilerinin hacimsel kırılma süreçleri üzerinde baskın bir rol oynadığını göstermektedir (Rasheed, 2017:1). Bu durum, optoelektronik cihaz mimarilerinde verimli yük-foton kuplajı için oldukça elverişlidir. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen nispeten daha yüksek geliş açısı ve kırılma açısı değerleri, görünür spektral bölgede daha önceki çalışmalarda (Forrest, 2004:911), (Friend, 1999:121) belirtilen, POT'un optik özelliklerinin çözücü kaynaklı modülasyonuna atfedilebilir. Bu bulgular, kontrollü ışık yayılımı, azaltılmış saçılma kayıpları ve ayarlanabilir optik tepkilerin cihaz performansının artırılması için gerekli olduğu fotodedektörler, ışık yayan cihazlar ve optik modülatörler gibi optoelektronik uygulamalar için POT molekülünün potansiyelini vurgulamaktadır.



Şekil 6. POT molekülünün a) Geliş açısı b) Kırılma açısı c) Kontrast spektrumları

POT'un hassasiyetini değerlendirmek için kritik bir parametre olan kontrast, denklem 7 kullanılarak elde edildi. Kontrastın enerji ve çözücüye bağlı değişimi Şekil 6c'de gösterilmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, minimum kontrast değeri DMSO çözücüsünde yaklaşık 3,50 eV'de gözlemlenirken, maksimum kontrast da yine DMSO'da 4,06 eV'de elde edilmektedir. Etanol ve benzen içerisinde kontrast benzer davranışlar sergilemiştir. Bu kontrast modülasyonu, optik tepkinin hem foton enerjisine güçlü, çözücü ortamına zayıf bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle, POT için elde edilen kontrast değerleri, yüksek performanslı optoelektronik cihazlarda uygulanabilirliği ile tanınan 26DczPPy (Mantarcı, 2020:165709) malzemesi için bildirilen değerlerle karşılaştırılabilir. Bu tür karşılaştırılabilir kontrast davranışı, POT'un optoelektronik uygulamalar için, özellikle de verimli sinyal algılama ve modülasyonu için yüksek kontrast ve hassasiyetin gerekli olduğu fotodetektörler ve optik modülatörler gibi cihazlarda önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

$$\alpha_c = 1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (7)$$

## SONUÇ

Sonuç olarak, DMSO, etanol ve benzen çözücülerin POT molekülünün elektronik, optik, elektriksel ve algılama özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Absorbans spektrumları, çözücü ortamının POT molekülünün elektronik yapısında önemli değişikliklere neden olduğunu gösteren, çözücüye bağlı belirgin absorpsiyon özellikleri ortaya koymuştur. En yüksek doğrudan optik bant aralığı enerjisi DMSO'da elde edilirken, en düşük değer etanolde gözlemlenmiştir, bu da çözücü seçimi yoluyla optik özelliklerin ayarlanabilirliğini göstermektedir. POT molekülünün kırılma indisi, çözücü türüne göre belirgin bir değişiklik gösterirken, yansıma oranı tüm çözücülerde nispeten düşük ve neredeyse sabit kalmıştır. Ayrıca, hassasiyeti gösteren kontrast değerlerinin, çözücü seçimi ile etkili bir şekilde kontrol edildiği bulunmuştur, bu da POT molekülünün algılama ile ilgili uygulamalar için potansiyelini vurgulamaktadır. Son olarak, optik iletkenliğe kıyasla önemli ölçüde daha yüksek elektriksel iletkenlik, POT molekülünün, verimli yük taşınımı ile ayarlanabilir optik tepki bir arada gerekli olan optoelektronik cihaz uygulamaları için uygunluğunu vurgulamaktadır.

## REFERANSLAR

- Abozaid, R. M., Lazarević, Z. Z., Radović, I., Gilić, M., Šević, D., Rabasović, M. S., & Radojević, V. (2019). Optical properties and fluorescence of quantum dots CdSe/ZnS PMMA composite films with interface modifications. *Optical Materials*, 92, 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.04.058>
- Alisher, G. E., Ibodulla, F. T., & Abdulkhakim, A. Z. (2017). DFT and TD-DFT study of isomeric 5-(pyridyl)-1,3,4-oxadiazol-2-thiones and 2-methylthio-5-(pyridyl)-1,3,4-oxadiazoles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 187, 191–197.
- Bhattacharjee, P. R. (2018). Refinement of the definitions of angles of incidence, reflection, refraction, and critical angle in ray optics. *Optik*, 172, 1187–1192.
- Fehse, K., Meerheim, R., Walzer, K., Leo, K., Lövenich, W., & Elschner, A. (2008). Lifetime of organic light emitting diodes on polymer anodes. *Applied Physics Letters*, 93(8), 083303. <https://doi.org/10.1063/1.2975369>
- Forrest, S. R. (2004). The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic. *Nature*, 428(6986), 911–918.
- Friend, R. H., Gymer, R. W., Holmes, A. B., Burroughes, J. H., Marks, R. N., Taliani, C., & Wright, G. N. (1999). Electroluminescence in conjugated polymers. *Nature*, 397(6715), 121–128.

Fuchs, C., Will, P.-A., Wieczorek, M., Gather, M. C., Hofmann, S., Reineke, S., Leo, K., & Scholz, R. (2015). Enhanced light emission from top-emitting organic light-emitting diodes by optimizing surface plasmon polariton losses. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*, 92(24), 245306. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.245306>

Gao, X., Bare, S. R., Weckhuysen, B. M., & Wachs, I. E. (1998). In Situ Spectroscopic Investigation of Molecular Structures of Highly Dispersed Vanadium Oxide on Silica under Various Conditions. *The Journal of Physical Chemistry B*, 102(52), 10842–10852.

Georges, S., & Zhenhua, P. (2017). III–V Semiconductor Photoelectrodes. In *Semiconductors and Semimetals* (Vol. 97, pp. 81–138). Elsevier.

Haghgoo, M., Ansari, R., & Hassanzadeh-Aghdam, M. K. (2019). Prediction of electrical conductivity of carbon fiber-carbon nanotube-reinforced polymer hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 167, 728–735.

Jin, J., Qi, R., Su, Y., Tong, M., & Zhu, J. (2013). Preparation of high-refractive index PMMA/TiO<sub>2</sub> nanocomposites by one-step in situ solvothermal method. *Iranian Polymer Journal*, 22(10), 767–774.

Lu, C.-Y., Jiao, M., Lee, W.-K., Chen, C.-Y., Tsai, W.-L., Lin, C.-Y., & Wu, C.-C. (2016). Achieving above 60% external quantum efficiency in organic light-emitting devices using ITO-free low-index transparent electrode and emitters with preferential horizontal emitting dipoles. *Advanced Functional Materials*, 26(19), 3250–3258.

Maniyar, A. K., Nadaf, Y. F., Khasim, S., et al. (2024). Photophysical studies on donor- $\pi$ -acceptor substituted 1,3,4-oxadiazole derivatives for optoelectronic application: experimental and theoretical analysis. *Journal of Optics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-01841-z>

Mantarcı, A. (2020). Solvent effects on optical properties of 26DCzPPy material. *Optik*, 224, 165709.

Maulana, L. Z., Li, Z., Uykur, E., Manna, K., Polatkan, S., Felser, C., Dressel, M., & Pronin, A. V. (2021). Broadband optical conductivity of the chiral multifold semimetal PdGa. *Physical Review B*, 103(11), 115206.

Mohamed, M. B., & Abdel-Kader, M. H. (2020). Effect of annealed ZnS nanoparticles on the structural and optical properties of PVA polymer nanocomposite. *Materials Chemistry and Physics*, 241, 122285.

Mousavi, H. (2012). Optical conductivity of carbon nanotubes. *Optics Communications*, 285(6), 3137–3139.

Najare, M. S., Patil, M. K., Nadaf, A. A., Mantur, S., Inamdar, S. R., & Imtiyaz, I. A. M. (2019). Synthesis, characterization and photophysical properties of a new class of pyrene substituted 1,3,4-oxadiazole derivatives. *Optical Materials*, 88, 256–265.

Rasheed, M., & Barillé, R. (2017). Optical constants of DC sputtering derived ITO, TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>:Nb thin films characterized by spectrophotometry and spectroscopic

ellipsometry for optoelectronic devices. \*Journal of Non-Crystalline Solids, 476\*, 1–14.

Schneider, J., Matsuoka, M., Takeuchi, M., Zhang, J., Horiuchi, Y., Anpo, M., & Bahnemann, D. W. (2014). Understanding TiO<sub>2</sub> photocatalysis: Mechanisms and materials. *Chemical Reviews*, 114(19), 9919–9986.

Sıdır, İ., Lopes, S., Paixao, J. A., Nikitin, T., Jesus, A. J. L., & Fausto, R. (2026). [Makale başlığı]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 470, 116610.

Tauc, J. (Ed.). (1974). *Amorphous and liquid semiconductors*. Springer.

Waddar, B., Gandi, S., Parne, S. R., Chari, V. R., & Prasanth, G. R. (2024). Investigation of second-order NLO properties of novel 1,3,4-oxadiazole derivatives: a DFT study. *Journal of Molecular Modeling*, 30(5), 118.

Yang, Z., Peng, H., Wang, W., & Liu, T. (2010). Crystallization behavior of poly( $\epsilon$ -caprolactone)-layered double hydroxide nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 116(5), 2658–2667.

Yu, R., Yuan, M., Li, T., Tu, Q., & Wang, J. (2016). Preparation, structure and luminescence properties of Ba<sub>2</sub>V<sub>2</sub>O<sub>7</sub> microrods. *RSC Advances*, 6(93), 90711–90717.

Zhang, T., Jiang, S., Wang, G., Zuo, Y., Yu, S., Zhang, Q., & Hu, X. (2024). 1,3,4-Oxadiazole derivative: photophysical, gelation, self-assembly, and Fe<sup>3+</sup> fluorescence sensing properties. *Journal of Chemical Research*, 48(3). <https://doi.org/10.1177/17475198241255788>



# **Mermer Sektöründe Müşteri Şikayetlerinin Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Sınıflandırılması**

**Mefharet Sena DEMİRTAŞ<sup>1</sup>**

**Eralp DOĞU<sup>2</sup>**

- 1- İstatistikçi; Afet İşleri ve Risk Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ula, Türkiye. [msenademirtas@gmail.com](mailto:msenademirtas@gmail.com) ORCID No: 0000-0002-9492-0400
- 2- Prof. Dr.; Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Fakültesi İstatistik Bölümü, Menteşe, Muğla, Türkiye. [eralp.dogu@mu.edu.tr](mailto:eralp.dogu@mu.edu.tr) ORCID No: 0000-0002-8256-7304

## ÖZET

Müşteri memnuniyeti, modern işletmeler için stratejik bir başarı faktörüdür. Bu çalışma, kuvars ve mermer esaslı tezgah taşı üreten bir işletmenin müşteri şikâyetlerini makine öğrenmesi algoritmaları ile analiz etmeyi amaçlamaktadır. Türkiye’de faaliyet gösteren bir fabrikanın 2021-2024 yılları arasındaki gerçek şikâyet verileri kullanılarak; Naive Bayes, K-En Yakın Komşu (KNN), Stepwise Lojistik Regresyon, Rastgele Orman (RF) ve XGBoost modelleri karşılaştırılmıştır. Bulgular, şikâyetlerin %58,9 oranında çatlama sorunlarında ve %89,8 oranında montajı yapılmış ürünlerde yoğunlaştığını göstermektedir. Performans analizleri sonucunda, bölgesel segmentasyon yapıldığında KNN algoritmasının eğitim ve test tutarlılığı ve göreceli başarısı ile şikâyetlerin sınıflandırılmasında en başarılı model olduğu tespit edilmiştir. Müşteri segmentasyonu ve bölgesel farklılıkların model performansını önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir.

*Anahtar Kelimeler – Müşteri Memnuniyeti, Şikâyet Analizi, Makine Öğrenmesi, XGBoost, Mermer Sektörü.*

---

## GİRİŞ

Müşteri memnuniyeti, günümüz iş dünyasında rekabet avantajı sağlamanın temel unsurlarından biridir. İşletmeler için müşterinin beklentilerinin karşılanması, uzun vadeli başarıya ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır. Mermer endüstrisi, ürünlerin genellikle uzun vadeli kullanıma yönelik olması sebebiyle, yüksek kalitede ürün ve hizmet sunulmasını gerektiren, müşteri geri bildirimlerine karşı oldukça hassas bir sektördür.

Müşteri şikâyetlerinin yönetimi ve makine öğrenmesi ile analizi üzerine yapılan çalışmalar, bu tekniklerin işletmelere sağladığı stratejik avantajları vurgulamaktadır. Literatürde müşteri şikâyetlerinin makine öğrenmesi yöntemleriyle sınıflandırılması üzerine yapılan çalışmalar, bu tekniklerin işletmeler için kritik bir geri bildirim ve iyileştirme kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye özelinde yapılan araştırmalarda Koruyan ve Ekeryılmaz (2022), tüketici elektroniği sektöründeki şikâyetleri Lojistik Regresyon ile %80 doğrulukla kategorize ederken; Kuyucuk (2022), pandemi dönemindeki kargo şikâyetlerini altı ana başlıkta incelemiş ve en yaygın sorunun dağıtım gecikmeleri olduğunu saptamıştır. Benzer şekilde Sipahi ve Çullu (2022), e-perakendecilik sektöründe 18.265 şikâyeti analiz ederek en fazla şikâyetin "güvenilirlik" boyutunda toplandığını belirlemiş; Arı (2022) ise tüketici değerlendirmelerinin faydalılık düzeyini tahmin etmek amacıyla altı farklı denetimli algoritmayı test ederek yeni bir model

önermiştir. Hizmet sektöründe ise Sezgin ve Duman (2023), Alanya'daki otellere yönelik Tripadvisor yorumlarını analiz etmiş ve en fazla olumsuz geri bildirimin çalışanlar ile yiyecek-içecek hizmetlerinden kaynaklandığını tespit etmiştir.

Uluslararası literatürde makine öğrenmesi modelleri, müşteri kaybı (churn) tahmini ve davranış analizi gibi daha karmaşık problemlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Vafeiadis vd. (2015), telekomünikasyon sektöründe AdaBoost ile güçlendirilmiş SVM modelinin %97 doğrulukla en yüksek başarıyı sergilediğini göstermiştir. Khodabandehlou ve Zivari Rahman (2017) tarafından geliştirilen altı aşamalı çerçevede, müşteri davranış verileri üzerinden yapılan tahminlerde Yapay Sinir Ağlarının (ANN) %97.92 doğrulukla en iyi performansı verdiği, özellikle boost etme yöntemlerinin basit modellere göre üstünlük sağladığı vurgulanmıştır. Havayolu endüstrisinde ise Kumar ve Zymbler (2019), Twitter verileri üzerinde gerçekleştirdikleri duygu analizinde Konvolüsyonel Sinir Ağlarının (CNN) geleneksel SVM ve ANN modellerinden daha üstün sonuçlar ürettiğini ve müşteri deneyimini iyileştirmede önemli bir potansiyele sahip olduğunu belirtmiştir.

Son dönemdeki çalışmalar, Yapay Sinir Ağlarının (ANN) müşteri memnuniyetini sınıflandırmadaki yüksek kapasitesine odaklanmaktadır. Siregar (2023) tarafından yapılan çalışmada, Backpropagation ANN yöntemi ile %100 doğruluk oranına ulaşarak müşteri memnuniyetini kusursuz bir şekilde sınıflandırabildiği kanıtlanmıştır. Bu teknik başarılar, işletmeler için şikâyet yönetiminin sadece bir operasyonel süreç değil, aynı zamanda stratejik bir fırsat olduğunu göstermektedir. Davidow (2003) tarafından da vurgulandığı üzere, etkin yönetilen şikâyet süreçleri memnuniyetsiz bir müşteriyi sadık bir paydaşa dönüştürebilirken, kötü bir yönetim güven kaybına ve gelecekteki iş fırsatlarının yitirilmesine neden olmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, tezgâh taşı üreten bir mermer fabrikasındaki müşteri şikâyetlerini ele alarak, değerlendirmeye alınacak müşteri şikâyetlerini tahmin edebilen algoritmaları kıyaslamaktır. Araştırma kapsamında müşteri segmentleri (A, B veya C) ve bölgesel dağılımlar (1, 2 veya 3. bölge) arasındaki karmaşık ilişkiler modern veri analitiği yöntemleriyle incelenmiştir.

## MATERYAL ve YÖNTEM

## Veri Seti ve Değişkenler

Çalışmanın veri kaynağı, ülkemizde kuvars malzemesi üreten bir fabrikanın şikâyet kayıtlarından derlenmiştir. Veri seti; şikâyet yılı, bölge bilgileri, ürün tipi, firma önceliği ve çatlama lekelene kadar uzanan detaylı şikâyet nedenleri gibi kritik veri noktalarından oluşmaktadır. Şikâyetlerin sonucuna ilişkin "ret" veya "kabul" geri bildirimlerini de içeren bu kapsamlı yapı, işletmenin müşteri memnuniyetini artırmak için ihtiyaç duyduğu stratejik iyileştirme alanlarını belirlemek üzere kurgulanmıştır.

Analiz sonuçlarına göre, fabrikaya gelen şikâyetlerin en yaygın nedeni %58,9 ile çatlama sorunlarıyken, bunu %33,1 ile lekelenme şikâyetleri takip etmektedir. Coğrafi bazda 1. Bölge %35,8 ile en yüksek şikâyet oranına sahipken, zaman bazında 2023 yılı %37,1'lik payla şikâyetlerin en yoğun yaşandığı dönem olmuştur. Ayrıca şikâyetlerin %50,3 gibi büyük bir kısmının "B" öncelik kategorisindeki firmalardan geldiği görülmekte, bu veriler şikâyetlerin belirli bölgelerde, yıllarda ve sorun türlerinde yoğunlaştığını açıkça ortaya koymaktadır.

## Uygulanan Makine Öğrenmesi Akışı

Bu çalışmada uygulanan makine öğrenmesi iş akışı, verilerin toplanmasından sonuçların raporlanmasına kadar uzanan dört temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, mermer fabrikasının veri tabanından elde edilen şikâyet kayıtları; şikâyet kodları, ürün tipleri ve bölgesel bilgiler gibi değişkenler bazında analiz edilebilir hale getirilmesi için veri ön işleme ve dönüştürme işlemlerine tabi tutulmuştur. Modeller müşteri şikâyetinin reddi veya kabulü kararının tahmin edilmesi amaçlı olarak oluşturulmuştur. Bu kararın verilmesi için yukarıda belirtilen şikâyet detayları girdi olarak kullanılmıştır. İkinci aşamada, model geliştirme süreci için hazırlanan veri seti rastgele örneklem yöntemiyle %80 eğitim ve %20 test seti olarak ikiye ayrılmıştır. Eğitim seti kullanılarak Naive Bayes, KNN, Rastgele Orman, XGBoost ve Adımsal Lojistik Regresyon modelleri eğitilmiş; aşırı öğrenmeyi engellemek ve modellerin genelleme yeteneğini artırmak amacıyla 10 katlı çapraz doğrulama (10-fold cross validation) yöntemi uygulanmıştır.

Üçüncü aşamada, eğitilen modellerin performansı test seti üzerinden R Studio yazılımı kullanılarak; doğruluk (accuracy), kappa istatistiği, duyarlılık ve belirlilik gibi metriklerle analiz edilmiştir. Son

aşamada ise elde edilen performans çıktıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, en yüksek başarıyı gösteren algoritmalar üzerinden müşteri memnuniyetini artırmaya yönelik sektörel çıkarımlar yapılarak raporlanmıştır.

## **Kullanılan Algoritmalar**

Naive Bayes (NB), Bayes teoremine dayanan ve sınıflar arasındaki tüm özniteliklerin birbirinden bağımsız olduğu varsayımıyla çalışan olasılıksal bir modeldir (Lubis vd., 2022). Her özelliğin ilgili sınıfa katkısını bağımsız olarak değerlendiren bu yöntem, hesaplanan olasılıkları çarparak en yüksek değere sahip kategoriye seçer. Özellikle büyük veri kümelerinde hızlı işlem yapabilmesi ve hesaplama kolaylığı sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir.

K-En Yakın Komşu (KNN), veri noktalarını birbirlerine olan yakınlıklarına göre sınıflandıran parametrik olmayan bir algoritmadır (Pandey ve Jain, 2017; Efeoğlu ve Tuna, 2021). Sınıflandırılacak her yeni örnek, kendisine en yakın olan " $k$ " sayıdaki komşusunun kategorilerine bakılarak ve aralarındaki en yaygın sınıf seçilerek atanır. Veri noktaları arasındaki mesafeyi belirlemek için genellikle Öklid mesafe formülünden yararlanılır.

Rastgele Orman (Random Forest - RF) (Breiman, 2001), birden fazla karar ağacını paralel şekilde oluşturarak çoğunluk oyuna dayanan bir topluluk öğrenme yöntemidir. Farklı veri alt kümeleri üzerinde eğitilen çok sayıda ağacın ortalamasını alarak sınıflandırma yaptığı için tek bir karar ağacına göre çok daha yüksek doğruluk sağlar ve aşırı öğrenme (overfitting) problemini minimize eder.

XGBoost (XGBTree), gradyan artırma (gradient boosting) çerçevesinin hesaplama gücü ve hız açısından optimize edilmiş bir versiyonudur (Chen ve Guestrin, 2016). Ardışık olarak oluşturulan karar ağaçları üzerinden çalışır ve her yeni ağaç, bir önceki ağacın hatalarını düzeltecek şekilde sisteme dahil edilir.

Stepwise Lojistik Regresyon (STEP), lojistik regresyon modelini kurarken değişken seçimini otomatize eden istatistiksel bir yaklaşımdır (McCarthy vd., 2022; Sarkar, vd., 2010). Modeldeki en anlamlı öznitelikleri adım adım ekleyerek veya çıkararak optimum değişken setini belirler. Bu yöntem, gereksiz değişkenleri eleyerek modelin açıklayıcı gücünü artırır.

## Kullanılan Yazılım

Veri analizi ve görselleştirme süreçleri için R Studio yazılımının 4.3.3 sürümü kullanılmıştır. Bu sürüm, en güncel özellikleri ile verilen etkin bir şekilde işlenmesine ve yorumlanmasına olanak tanımıştır. Veri seti, Excel kullanılarak düzenlenmiş, belirli istatistiksel testlerin gerçekleştirilmesi için Jamovi yazılımından yardım alınmıştır. Kullanılan R paketleri; caret (Kuhn, 2008), randomForest (Breiman vd, 2018), gbm (Greenwell vd., 2020), xgboost (Chen vd., 2019), C5.0 (Kuhn ve Quinlan, 2023).

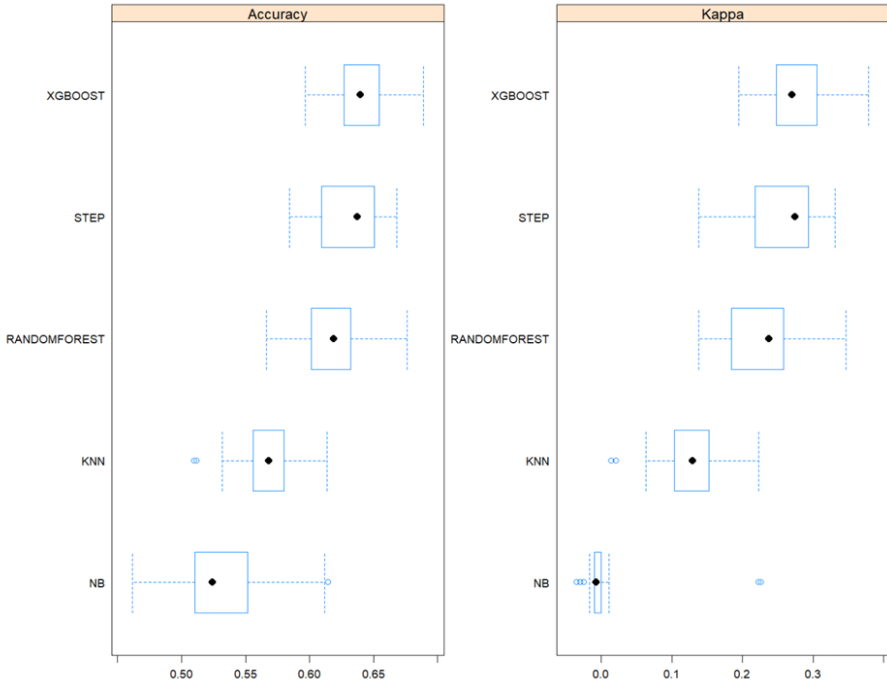
## SONUÇ

### Meta Data için Model Performansı

Tüm veri setini kapsayan "meta veri" üzerinden yürütülen analizlerde, test veri seti sonuçları modellerin sınıflandırma başarısını farklı metrikler bazında ortaya koymuştur. Elde edilen bulgulara göre, K-En Yakın Komşu (KNN) modeli %61 doğruluk oranı ve 0,22 Kappa değeri ile test aşamasında en yüksek genel başarıyı sergilemiştir. KNN modelini, %59 doğruluk ve 0,18 Kappa değeri ile Adımsal Lojistik Regresyon takip ederken; XGBoost modeli %58 doğruluk ve 0,16 Kappa değerine ulaşmıştır. Eğitim verilerinde (Şekil 2) XGBoost en yüksek öğrenme kapasitesini sergilerken, test verileri üzerinde KNN ve Adımsal Lojistik Regresyon modellerinin daha dengeli ve yüksek bir tahmin başarısı gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak, meta veri üzerinde elde edilen bu sonuçların genel olarak oldukça sınırlı bir performans sergilediği görülmektedir. Bu bağlamda, model performansının daha üst seviyelere çekilebilmesi için bölgesel ayrıştırma ve müşteri segmentasyonu gibi yaklaşımların şikâyet sonuçlarını tahmin etmedeki etkinliğinin detaylıca araştırılması gerektiği değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Meta data için test veri seti için performans indikatörü değerleri

| Modeller/<br>Performans<br>İndikatörleri | Doğruluk | Doğruluk<br>için %95<br>güven<br>aralığı<br>alt<br>sınırı | Doğruluk<br>için %95<br>güven<br>aralığı<br>üst<br>sınırı | Kappa | Duyarlılık | Belirlilik |
|------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------|------------|------------|
| Naive Bayes                              | 0,54     | 0,48                                                      | 0,60                                                      | 0,01  | 0,01       | 0,99       |
| K-En Yakın<br>Komşu                      | 0,61     | 0,55                                                      | 0,67                                                      | 0,22  | 0,70       | 0,59       |
| Rasgele<br>Orman                         | 0,55     | 0,48                                                      | 0,60                                                      | 0,08  | 0,50       | 0,59       |
| Xgboost                                  | 0,58     | 0,52                                                      | 0,64                                                      | 0,16  | 0,59       | 0,57       |
| Adımsal<br>Lojistik<br>Regresyon         | 0,59     | 0,53                                                      | 0,65                                                      | 0,18  | 0,61       | 0,57       |



Şekil 1: Meta data için eğitim sonunda doğruluk ve kappa istatistiklerine dair sonuçlar

## Müşteri Segmentasyonuna Dayalı Model Performansı

Yapılan analizler (Tablo 2), şikâyetlerin öncelik gruplarına göre ayrılmasının modellerin ayırt edici gücünü artırmadığını, aksine tahmin sonuçlarını istatistiksel olarak zayıflattığını göstermiştir. A ve C grubu segmentlerinde Naive Bayes ve XGBoost gibi modellerin %63 ile %70 arasında doğruluk oranları vermesine rağmen, Duyarlılık veya Belirlilik değerlerinden birinin "0" olması, modellerin gerçek bir tahmin yapmak yerine sadece en yoğun sınıfa odaklandığını kanıtlamaktadır. Modellerin tesadüfi başarıdan ne kadar uzak olduğunu gösteren Kappa istatistiği, tüm segmentlerde oldukça düşük (genellikle 0 civarı veya negatif) seyretmiştir. Bu durum, elde edilen doğruluk oranlarının yanıltıcı olduğunu ve modellerin sınıflar arasında anlamlı bir ayrım yapamadığını doğrulamaktadır. En yoğun veri grubuna sahip B segmentinde bile en iyi sonuç veren Adımsal Lojistik Regresyon'un Kappa değerinin 0,23'te kalması, segmentasyonun şikâyet sonuçlarını öngörmek için tek başına yeterli bir kriter olmadığını göstermektedir. Şikâyetlerin firma önceliğine göre segmentlere ayrılmasının tahmin modelleri üzerinde pozitif bir etkisi gözlemlenmemiştir. Bu bulgular, şikâyet yönetiminde firma önceliğinden ziyade, şikâyet içeriği veya teknik detaylar gibi daha belirleyici değişkenlerin modelleme sürecine dahil edilmesi gerektiğini işaret etmektedir.

Tablo 2. Müşteri segmentasyonun dayalı test veri seti için performans indikatörü değerleri

| Modeller/<br>Performans<br>İndikatörleri | Segment | Doğruluk | Doğruluk<br>için %95<br>güven<br>aralığı alt<br>sınırı | Doğruluk<br>için %95<br>güven<br>aralığı<br>üst sınırı | Kappa | Duyarlılık | Belirlilik |
|------------------------------------------|---------|----------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------|------------|------------|
| Naive Bayes                              | A       | 0,70     | 0,54                                                   | 0,82                                                   | 0     | 0          | 1          |
| Rasgele Orman                            | A       | 0,60     | 0,44                                                   | 0,75                                                   | 0,12  | 0,46       | 0,66       |
| Xgboost                                  | A       | 0,70     | 0,54                                                   | 0,82                                                   | 0     | 0          | 1          |
| Adımsal Lojistik Regresyon               | A       | 0,60     | 0,44                                                   | 0,75                                                   | -0,05 | 0,15       | 0,80       |
| Naive Bayes                              | B       | 0,61     | 0,52                                                   | 0,69                                                   | 0     | 0          | 1          |
| Rasgele Orman                            | B       | 0,56     | 0,48                                                   | 0,65                                                   | 0,10  | 0,46       | 0,63       |
| Xgboost                                  | B       | 0,62     | 0,53                                                   | 0,69                                                   | 0,05  | 0,0        | 0,95       |
| Adımsal Lojistik Regresyon               | B       | 0,65     | 0,57                                                   | 0,72                                                   | 0,23  | 0,43       | 0,79       |

|                            |   |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| Naive Bayes                | C | 0,63 | 0,53 | 0,73 | 0    | 1    | 0    |
| Rasgele Orman              | C | 0,62 | 0,52 | 0,72 | 0,05 | 0,90 | 0,14 |
| Adımsal Lojistik Regresyon | C | 0,57 | 0,46 | 0,67 | 0,06 | 0,68 | 0,39 |
| Xgboost                    | C | 0,63 | 0,52 | 0,72 | 0    | 1    | 0    |

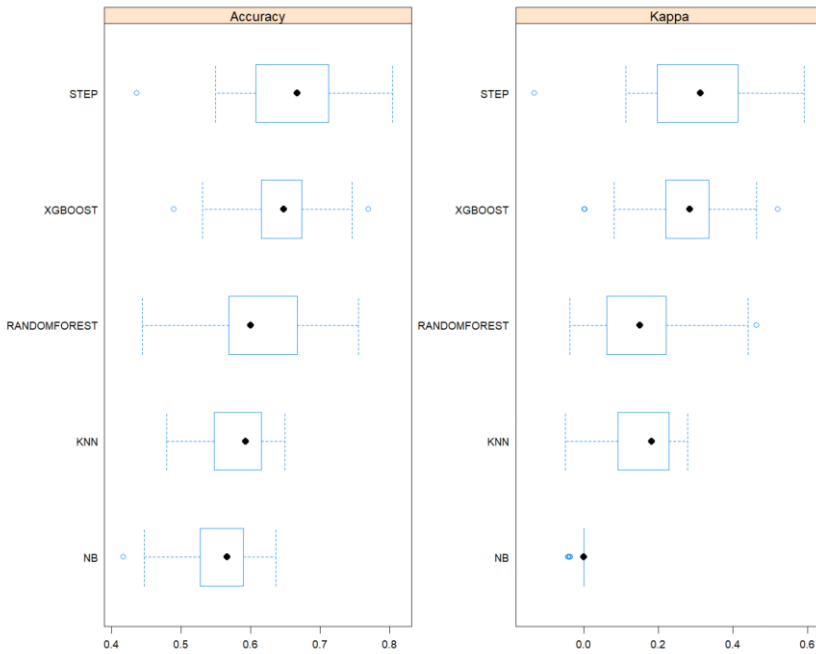
### Bölgelere Dayalı Model Performansı

Müşteri şikâyetlerinin bölgesel bazda analizi (Tablo 3, Şekil 2-4), modellerin coğrafi veri grupları üzerindeki tahmin gücünün değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. 1. Bölge, 2. Bölge ve 3. Bölge için gerçekleştirilen analizler sonucunda, 1. Bölge test veri seti sonuçlarına göre K-En Yakın Komşu (KNN) modeli, %77 doğruluk ve 0,53 Kappa değeri ile bu bölgedeki en yüksek performansı sergilemiştir. Eğitim aşamasında ise Adımsal Lojistik Regresyon (STEP) modeli %65 doğruluk ile öne çıkmaktadır. Bölgesel bazda KNN modeli, hem duyarlılık (%68) hem de belirlilik (%85) oranlarıyla oldukça güçlü bir sınıflandırma başarısı sunmaktadır. 2. Bölge’de test setinde en yüksek başarıyı yine KNN modeli (%68 doğruluk, 0,30 Kappa) elde etmiştir. Eğitim süreci sonuçlarını gösteren grafiklerde ise XGBoost modelinin medyan değerlerde hafif bir üstünlüğe sahip olduğu görülmektedir. Adımsal Lojistik Regresyon da %66 doğruluk oranıyla KNN modeline yakın, kararlı bir performans sergilemiştir. Şikâyet yoğunluğunun en fazla olduğu 3. bölgede Adımsal Lojistik Regresyon, %67 doğruluk ve 0,33 Kappa değeri ile test setinde en başarılı model olmuştur. Eğitim aşamasında Rastgele Orman (RF) modeli %61 doğruluk ile dikkat çekerken, KNN modeli test setinde %64 doğruluk oranıyla ikinci sırada yer almıştır. Bölgesel segmentasyonun meta veri analizine kıyasla modellerin doğruluk oranlarını artırdığı gözlemlenmiştir. Özellikle KNN modelinin sergilediği görece yüksek doğruluk oranı, bölgesel dinamiklerin şikâyet sonuçlarını tahmin etmede firma segmentasyonuna göre çok daha etkili bir parametre olduğunu kanıtlamaktadır.

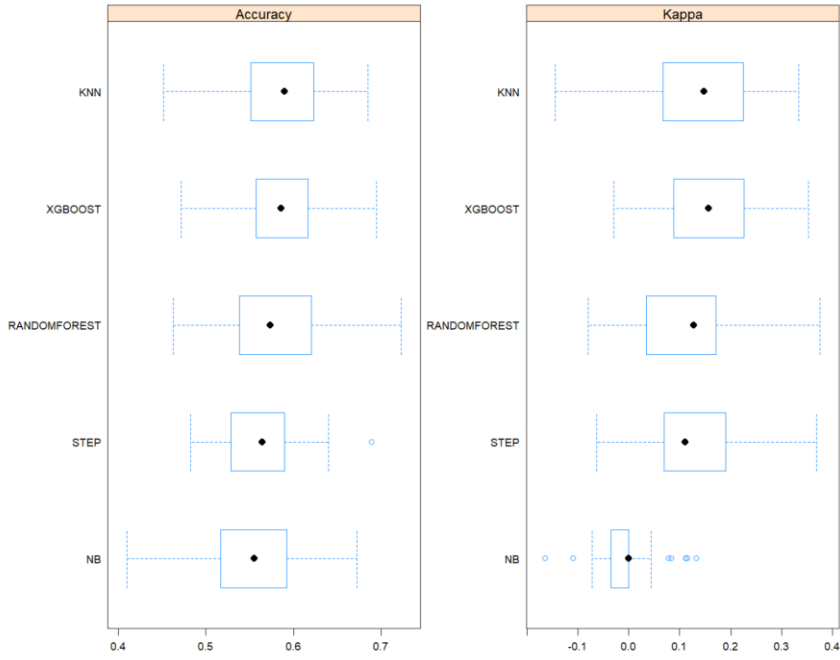
Tablo 3. Bölgelere dayalı test veri seti için performans indikatörü değerleri

| Modeller/<br>Performans<br>İndikatörleri | Bölgeler | Doğruluk | Doğruluk<br>için %95<br>güven<br>aralığı alt<br>sınırı | Doğruluk<br>için %95<br>güven<br>aralığı<br>üst sınırı | Kappa | Duyarlılık | Belirlilik |
|------------------------------------------|----------|----------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------|------------|------------|
| Naive Bayes                              | 1        | 0,54     | 0,40                                                   | 0,67                                                   | 0,10  | 0,71       | 0,39       |
| K-En Yakın<br>Komşu                      | 1        | 0,77     | 0,65                                                   | 0,87                                                   | 0,53  | 0,68       | 0,85       |

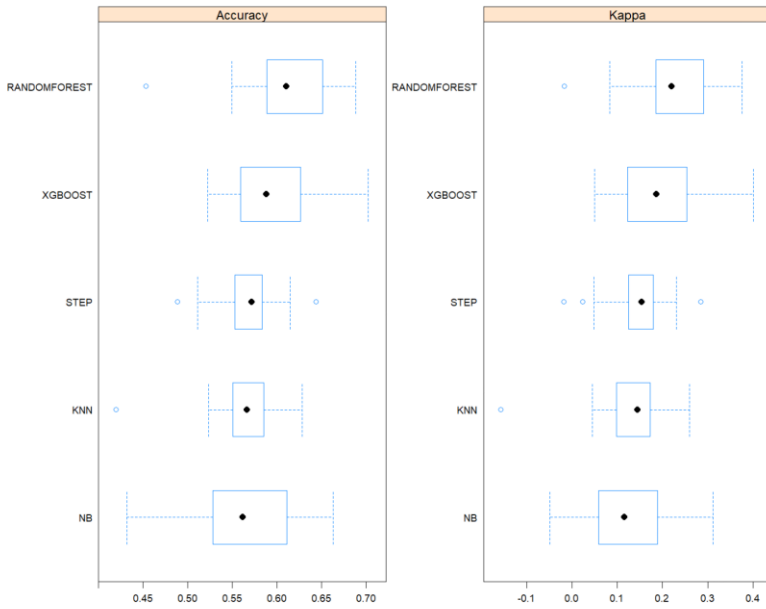
|                            |   |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| Rasgele Orman              | 1 | 0,54 | 0,41 | 0,67 | 0,10 | 0,71 | 0,40 |
| Xgboost                    | 1 | 0,65 | 0,52 | 0,77 | 0,29 | 0,50 | 0,79 |
| Adımsal Lojistik Regresyon | 1 | 0,67 | 0,54 | 0,78 | 0,33 | 0,57 | 0,75 |
| Naive Bayes                | 2 | 0,65 | 0,52 | 0,76 | 0,19 | 0,22 | 0,95 |
| K-En Yakın Komşu           | 2 | 0,68 | 0,55 | 0,79 | 0,30 | 0,44 | 0,84 |
| Rasgele Orman              | 2 | 0,60 | 0,47 | 0,72 | 0,14 | 0,37 | 0,76 |
| Xgboost                    | 2 | 0,65 | 0,52 | 0,76 | 0,20 | 0,30 | 0,89 |
| Adımsal Lojistik Regresyon | 2 | 0,66 | 0,53 | 0,77 | 0,27 | 0,45 | 0,81 |
| Naive Bayes                | 3 | 0,56 | 0,45 | 0,65 | 0,10 | 0,18 | 0,92 |
| K-En Yakın Komşu           | 3 | 0,64 | 0,53 | 0,73 | 0,27 | 0,69 | 0,58 |
| Rasgele Orman              | 3 | 0,56 | 0,45 | 0,65 | 0,11 | 0,49 | 0,62 |
| Xgboost                    | 3 | 0,60 | 0,50 | 0,70 | 0,21 | 0,59 | 0,62 |
| Adımsal Lojistik Regresyon | 3 | 0,67 | 0,56 | 0,75 | 0,33 | 0,67 | 0,66 |



Şekil 2: 1. bölge için eğitim sonunda doğruluk ve kappa istatistiklerine dair sonuçlar



Şekil 3: 2. bölge için eğitim sonunda doğruluk ve kappa istatistiklerine dair sonuçlar



Şekil 4: 3. bölge için eğitim sonunda doğruluk ve kappa istatistiklerine dair sonuçlar

## Genel Değerlendirme

Bu çalışma, mermer sektöründe müşteri şikâyetlerinin makine öğrenmesi algoritmaları ile analiz edilmesinin işletmelere sağladığı stratejik avantajları ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla uyumluluk göstermektedir. İnan (2019) otel yorumlarında Lojistik Regresyon ile %92 doğruluğa ulaşırken, bu çalışmada mermer sektörü özelinde en yüksek performansı KNN modeli vermiştir. Koruyan ve Ekeryılmaz (2022), şikâyetlerin kategorize edilmesinin hizmet kalitesini artırmadaki kritik rolünü vurgulamıştır. Bu çalışma da benzer şekilde, mermer sektöründeki "çatlama" ve "lekelenme" gibi temel sorun alanlarının makine öğrenmesi ile tespit edilmesinin müşteri sadakatini güçlendireceğini kanıtlamış aynı zamanda bölgesel incelemelerin model kalitesini arttırdığını tespit etmiştir.

Araştırma sonuçları ışığında, mermer fabrikası ve benzeri üretim tesisleri için şu stratejik iyileştirme önerileri sunulmaktadır. İşletmeler, şikâyet yönetim süreçlerine yüksek doğruluk oranına sahip algoritmaları dahil etmelidir. Müşteri hizmetleri ekiplerinin iş yükünü azaltmak ve taleplere daha hızlı yanıt verebilmek adına şikâyetleri otomatik sınıflandıran sistemler geliştirilmelidir. Analizler sonucunda en fazla şikâyet alan bölgeler ve sorun tipleri belirlenerek, bu alanlarda üretim ve kalite kontrol süreçleri revize edilmelidir.

Çalışmanın sunduğu önemli katkılara rağmen bazı kısıtları mevcuttur. Veriler belirli bir mermer fabrikasına dayandığı için sonuçlar diğer sektörlerde veya farklı coğrafi bölgelere doğrudan genellenemeyebilir. Müşteri şikâyetleri öznel ifadeler içerdiğinden, bu çalışmada dilsel farklılıklar ve duygusal tonlar tam olarak modellenememiştir; bu durum tahmin doğruluğunu etkileyebilecek bir unsurdur. Verilerin toplandığı zaman dilimi (2021-2024), pandemi sonrası ekonomik ve sosyal koşullardan etkilenmiş olabilir.

Müşteri memnuniyeti yönetimi konusundaki bilgi birikimini artırmak adına gelecekteki araştırmalarda şu yaklaşımlar izlenebilir. Şikâyet metinlerini daha derinlemesine analiz edebilmek için Doğal Dil İşleme (NLP), duygu analizi ve metin madenciliği teknikleri kullanılmalıdır. Makine öğrenmesi modellerine ek olarak, derin öğrenme yöntemlerinin sürece entegrasyonu analiz güvenilirliğini artıracaktır. Şikâyetlerin zaman içerisindeki değişimi incelenmeli; farklı kültürler ve sektörler arası karşılaştırmalı çalışmalar yapılarak evrensel stratejiler geliştirilmelidir.

## REFERANSLAR

Arı, O. (2022). Tüketici yorumlarının fayda düzeyinin tahminlenmesine yönelik bir araştırma: Makine öğrenmesi algoritmalarının karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 115s.

Breiman, L. (2001). Random Forests. Machine Learning, 45(1), 5-32.

Breiman, L., Cutler, A., Liaw, A., Wiener, M., & Liaw, M. A. (2018). Package 'randomforest'. University of California, Berkeley: Berkeley, CA, USA, 81, 1-29.

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785-794.

Chen, T., He, T., Benesty, M., & Khotilovich, V. (2019). Package 'xgboost'. R version, 90(1-66), 40.

Davidow, M. (2003). Organizational responses to customer complaints: What Works and what doesn't. *Journal of service research*, 5(3): 225-250.

Efeoglu, E., & Tuna, G. (2021). Analysis of the parameters that affect the measurements of reflection coefficients and evaluation of the effects of parameters for K nearest neighbors-based liquid classification. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 4(2), 155-167.

Greenwell, B., Boehmke, B., Cunningham, J., & GBM Developers. (2020). *gbm: Generalized Boosted Regression Models*. R package version 2.1.8.

Khodabandehlou, S., ve Zivari Rahman, M. (2017). Comparison Of Supervised Machine Learning Techniques For Customer Churn Prediction Based On Analysis Of Customer Behavior, *Journal of Systems and Information Technology*, 65-93.

Koruyan, K., ve Ekeryilmaz, A. (2022). Makine Öğrenmesi ile Müşteri Şikayetlerinin Sınıflandırılması, *AJIT-E: Academic Journal of Information Technology*, 13(50): 168-183.

Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1-26.

Kuhn, M., & Quinlan, R. (2023). C50: C5.0 Decision Trees and Rule-Based Models. R package version 0.1.8.

Kumar, S. ve Zymbler, M. (2019). A Machine Learning Approach To Analyze Customer Satisfaction From Airline Tweets, *Journal of Big Data*, 6 (62).

Kuyucuk, T. (2022). Pandemi Döneminde Türkiye'de, Kargo Firmalarına Yapılan Şikâyetlerin Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 94s.

Lubis, A. R., Nasution, M. K. M., Sitompul, O. S., & Zamzami, E. M. (2022). The feature extraction for classifying words on social media with the Naïve Bayes algorithm. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 11(3), 1041.

McCarthy, R. V., McCarthy, M. M., & Ceccucci, W. (2022). Predictive models using regression. In *Applying Predictive Analytics: Finding Value in Data* (pp. 87-121). Cham: Springer International Publishing.

Sarkar, S. K., Midi, H., & Rana, S. (2010). Model selection in logistic regression and performance of its predictive ability. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(12), 5813-5822.

Sezgin, M. ve Duman, A. (2023). Elektronik Ağızdan Ağıza Pazarlama Kapsamında Konaklama İşletmelerine Yönelik Çevrimiçi Yorumların Duygu Analizi Yöntemiyle İncelenmesi: Alanya Örneği, *Türk Turizm Araştırmaları Dergisi*, 7 (2): 244-265.

Sipahi, G A. ve ullu, B. (2022). E-Perakendecilikte evrimii Ŗikâyetlerin Yapay

Zekâ Uygulaması ile Hizmet Kalitesi Boyutları Açısından Değerlendirilmesi, 26. Pazarlama Kongresi, 23-25 Haziran 2022, KırŖehir, 26: 286.

Siregar, V. M. M., Sinaga, K., Sirait, E., Manalu, A. S. ve Yunus, M. (2023).

Classification of Customer Satisfaction Through Machine Learning: An Artificial Neural Network Approach, Computers & Security, 3(3).

Pandey, A., & Jain, A. (2017). Comparative analysis of KNN algorithm using various normalization techniques. International Journal of Computer Network and Information Security, 10(11), 36.

Vafeiadis, T., Diamantaras, K. I., Sarigiannidis, G. ve Chatzisavvas, K. Ch. (2015). A Comparison of Machine Learning Techniques For Customer Churn Prediction. Simulation Modelling Practice and Theory, 55: 1-9.



# **Fitokimyasalların Gücü: Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Biyolojik Aktiviteleri**

**Handan SARAÇ<sup>1</sup>**

**Ahmet DEMİRBAŞ<sup>2</sup>**

- 1- Dr. Öğr. Üyesi; Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü. [handansarac@cumhuriyet.edu.tr](mailto:handansarac@cumhuriyet.edu.tr) ORCID No: 0000-0001-7481-7978.
- 2- Prof. Dr.; Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü. [ademirbas76@hotmail.com](mailto:ademirbas76@hotmail.com) ORCID No: 0009-0003-8759-8745.

## ÖZET

Bitkiler, insanlık tarihi boyunca beslenme, korunma ve hastalıkların tedavisi gibi temel ihtiyaçların karşılanmasında önemli bir rol oynamış; özellikle tıbbi ve aromatik bitkiler geleneksel sağlık sistemlerinin temel bileşenleri arasında yer almıştır. Bu bitkilerin terapötik etkileri büyük ölçüde fitokimyasallar olarak adlandırılan ve bitkilerde doğal olarak bulunan biyoaktif ikincil metabolitlerden kaynaklanmaktadır. Fitokimyasallar; antioksidan, antimikrobiyal, anti-inflamatuvar ve antikanser etkileri başta olmak üzere geniş bir biyolojik aktivite spektrumuna sahiptir. Günümüzde, sentetik ilaçların gelişimine rağmen dünya nüfusunun önemli bir bölümü, daha iyi tolere edilmeleri, daha az yan etki göstermeleri ve kolay erişilebilir olmaları nedeniyle bitkisel kökenli ürünleri birincil ya da tamamlayıcı tedavi yöntemi olarak tercih etmektedir.

Bu derleme çalışmasında, tıbbi ve aromatik bitkilerde bulunan başlıca fitokimyasal grupların (polifenoller, terpenoidler, alkaloidler, karotenoidler, saponinler ve fitosteroller) biyolojik aktiviteleri ele alınmıştır. Ayrıca, bu bileşiklerin antioksidan savunma sistemleri üzerindeki rolleri, mikrobiyal dirençle mücadeledeki potansiyelleri, inflamatuvar süreçler ve kanser gelişimi üzerindeki etkileri güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Tıbbi ve Aromatik Bitkiler, Fitokimyasallar, İkincil Metabolitler, Biyolojik Aktivite, İnsan Sağlığı*

---

## GİRİŞ

### Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin İnsan Sağlığındaki Yeri

Bitkiler, insanlığın başlangıcından bu yana beslenme, barınma, ısınma ve hastalıkların tedavisi gibi temel ihtiyaçları karşılamak için kullanılmış; günümüzde ise giderek artan bir ilgiyle kullanılmaya devam etmektedir (Sevindik ve ark., 2017; Mohammed ve ark., 2018; Sarac, 2021). Bitkiler arasında önemli bir grubu temsil eden, tıbbi ve aromatik bitkiler, dünya genelinde pek çok toplumda binlerce yıldır geleneksel tedavi uygulamalarının temelini oluşturan en eski ilaç kaynakları arasında yer almaktadır. Bu bitkilerin faydalı etkilerine dair deneyime dayalı bilgi birikimi ise yüzyıllar boyunca kuşaktan kuşağa aktararak günümüze ulaşmıştır (Marrelli, 2021). Bu nedenle, günlük yaşamın ve kültürün ayrılmaz bir parçası haline gelen tıbbi ve aromatik bitkilerin tarih öncesi çağlarda bile sağlık sistemlerinde tıbbi amaçlı kullanımlarına yönelik birçok kanıt bulunmaktadır. Yaklaşık 2.500 yıl önce "Tıbbın babası" olarak bilinen Hipokrat'ın, "Besinlerimiz ilacımız, ilacımız besinimiz olmalıdır" sözü bitkilerin tatları ile tedavi edici özelliklerini

birleştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte Hipokrat kitaplarında çoğu tıbbi ve aromatik bitki olmak üzere 400 bitkiden bahsetmiştir (Aslan ve Ayaz, 2019; Varlı ve ark., 2020).

Tıbbi ve aromatik bitkilerin zengin biyoçeşitliliği, potansiyel sağlık yararları taşıyan geniş bir kimyasal bileşen yelpazesi sunmaktadır (Dar ve ark., 2023). Bitkisel tedavilerin etkinliğini ortaya koymak amacıyla dünya genelinde çok sayıda çalışma yapılmış ve elde edilen umut verici sonuçlar, bitkisel kökenli ilaçların sentezine yol açmıştır (Bitwell ve ark., 2023). Günümüzde farmasötik kimyada sentetik ilaçların geliştirilmesinde kaydedilen önemli ilerlemelere karşın, dünya nüfusunun yaklaşık %75–80’i—özellikle gelişmekte olan ülkelerde—insan vücudu tarafından daha iyi tolere edilmeleri, daha az yan etki göstermeleri ve daha kolay ulaşılabilir olmaları nedeniyle birincil sağlık hizmetlerinde bitkisel kökenli ilaçları tercih etmektedir (Vaou ve ark., 2021; Gonfa ve ark., 2023). Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelere reçeteli ilaçların yaklaşık %25’i, bitkilerden elde edilen aktif bileşenleri içermektedir (Jose ve ark., 2018). Bitkisel tedavi uygulamaları her zaman bilimsel yaklaşımlarla elde edilen kanıtlara sıkı sıkıya dayanmadığından, tıbbi bitkilerin kullanımı, diğer tedavilerle birlikte tamamlayıcı ve alternatif tedavi yöntemi olarak kabul edilmektedir (Awuchi ve Amagwula, 2020; Nwozo ve ark., 2023) ve geleneksel bitkisel tedavilerden türetilmiş birçok modern ilaç, çağdaş farmakoterapide kullanılmaktadır (Marelli, 2021; Dar ve ark., 2023). Dünya Sağlık Örgütü’nün (WHO) envanter listesine göre, bugüne kadar tedavi amaçlı kullanılan yaklaşık 20.000 tıbbi bitki türü kayıt altına alınmıştır (Sarac, 2021; Vaou ve ark., 2021; Gonfa ve ark., 2023). Tıbbi bitki türlerinin yalnızca sınırlı bir kısmının tam anlamıyla bilimsel incelemeye tabi tutulmuş olması, bu alanda ayrıntılı araştırmalara duyulan ihtiyacı daha da belirgin hale getirmektedir. Bu nedenle, tıbbi bitkilerin biyolojik aktiviteleri ve bu aktivitelerden sorumlu fitokimyasallar hakkında bilgi birikimimizi artırmak amacıyla kapsamlı bir şekilde araştırma yapmak gereklidir (Moghadamtousi ve ark., 2013).

Bu derlemede, tıbbi ve aromatik bitkilerde bulunan çeşitli fitokimyasalların biyolojik aktiviteleri ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri kapsamlı bir şekilde özetlenmekte; antioksidan, antimikrobiyal, antiinflamatuvar ve diğer farmakolojik etkileri ele alınarak, kronik hastalıklarla mücadelede doğal ajanlar olarak potansiyelleri vurgulanmaktadır.

### ***Fitokimyasalların Tanımı ve Sınıflandırılması***

Fitokimyasal terimi iki bölümden oluşur: “*phyto*” bitki anlamına gelirken, “*chemical*” bitkilerde bulunan çeşitli doğal bileşikler ifade eder (Wani ve ark., 2023). Bu bağlamda, fitokimyasallar, bitkilerde doğal olarak bulunan, düşük moleküler ağırlıklı biyoaktif moleküller olarak tanımlanır (Koche ve ark., 2016; Rodríguez-Negrete ve ark., 2024). Bu moleküllerin

çoğu, bitkilerin büyümesi, gelişmesi ve üremesinde doğrudan rol oynamadığından, daha çok kendilerini korumak ve hayatta kalma yeteneğini artırmak için gerekli olduğundan, 1891 yılında “sekonder (ikincil) metabolitler” olarak adlandırılmıştır (Yang ve Ling, 2025). Buna karşın, karbonhidratlar, nükleik asitler, yağ asitleri, proteinler ve büyüme düzenleyicileri “primer (birincil) metabolitler” olarak adlandırılır ve bitki dokularında yaygın olarak bulunarak, bitkilerin büyümesi ve gelişmesi için gerekli metabolik faaliyetleri yürütür (Bitwell ve ark., 2023; Yang ve Ling, 2025). Birincil ve ikincil metabolitler arasındaki en temel fark, birincil metabolitlerin enerji metabolizmasına ve bitki hücrelerinin yapısına katkıda bulunmasıdır. İkincil metabolitler ise bitkilerin çevre ile etkileşimleri için gerekli olan besin değeri taşımayan bileşiklerdir (Rodríguez-Negrete ve ark., 2024). Bazı fitokimyasallar renk veya koku sağlar, bazıları bitkinin kendi içinde ya da diğer organizmalarla etkileşimlerinde sinyal molekülleri olarak görev yapar ve birçoğunun doğal pestisit işlevi gördüğüne inanılmaktadır (Johnson, 2013). Bitkilerdeki önemli rollerinin yanı sıra, sahip oldukları çeşitli farmakolojik aktiviteler nedeniyle insan sağlığı açısından da büyük önem taşırlar (Roy ve ark., 2022).

Fitokimyasallar, yüzyıllardır dünya genelindeki toplumlar için büyük bir değere sahiptir. Bu metabolitler, sağlık sistemlerinde çeşitli hastalıkların tedavisinde ilaç olarak kullanılmıştır (Bitwell ve ark., 2023). Tıbbi ve aromatik bitkilerin fitokimyasalları, çeşitli sağlık sorunlarının tedavisinde kullanılan ilaçların kaynağını oluşturmakta ve yeni ilaçların keşfi için potansiyel kaynaklar sunmaktadır (Bachheti ve ark., 2020; Gonfa ve ark., 2023). Fitokimyasalların, antioksidan, antimikrobiyal, anti-inflamatuvar ve antikanser gibi biyolojik aktivitelere sahip olduğu ve bu nedenle sağlık üzerinde olumlu etki gösterdikleri birçok bilimsel çalışma ile kanıtlanmıştır (Hu ve ark., 2023). Tam tahıllar, meyveler, sebzeler, baklagiller, kuruyemişler, tohumlar, baharatlar, tıbbi ve aromatik bitkiler gibi çeşitli kaynaklardan elde edilebilirler ve günümüze kadar 4.500’den fazla fitokimyasal tanımlanmıştır (Koche ve ark., 2016; Kumar ve ark., 2023; Wani ve ark., 2023; Muscolo ve ark., 2024). Bu bileşikler bitkinin tohum, meyve, gövde, kabuk ve yaprak gibi farklı kısımlarında değişen miktarlarda bulunurlar (Siddiqui ve ark., 2024).

Bitkilerdeki fitokimyasalların türü ve yoğunluğu, bitki türü, çeşidi ile yetiştirme koşulları (toprak, bölge, rakım, mevsim, iklim) gibi içsel ve dışsal faktörlere bağlı olarak değişir (Koche ve ark., 2016; Kumar ve ark., 2023; Wani ve ark., 2023). Bununla birlikte, fitokimyasallar yapısal olarak oldukça çeşitlidir ve bu durum onların farklı fizikokimyasal özelliklere sahip olmasına neden olur (Hu ve ark., 2023). Ayrıca, her yıl çok sayıda yeni fitokimyasalın keşfedilmesi veya eklenmesi nedeniyle henüz tutarlı bir sınıflandırma yapılamamıştır (Siddiqui ve ark., 2024). Önemli fitokimyasallar arasında polifenoller, terpenoidler, alkaloidler, karotenoidler, saponinler ve fitosteroller yer almaktadır (Shad ve ark., 2014).

- **Polifenoller:** En büyük ikincil metabolitler grubu olarak kabul edilen polifenoller, bitkisel kaynaklı besinlerde (özellikle meyveler, sebzeler, kuruyemişler, tohumlar, kırmızı şarap, bitter çikolata, zeytinyağı, çay ve kakao) doğal olarak bulunan biyolojik olarak aktif bileşiklerdir (Abbas ve ark., 2017; Kumar ve Goel, 2019; Roy ve ark., 2022; Elmas, 2024). Polifenollerin kimyasal yapısı, en az bir fenil halkası ve bir veya daha fazla hidroksil grubunun varlığıyla karakterizedir (Bertelli ve ark., 2021). Polifenoller; fenolik asitler, flavonoidler (en yaygın flavonoid kuersetindir), stilbenler, kumarinler ve tanenler gibi farklı sınıflara ayrılır. Her bir sınıf kendine özgü yapısal özellikler ve biyolojik aktiviteler sergiler (Xie ve ark., 2024) Yapılan çok sayıda çalışma, polifenollerin kendine özgü yapıları sayesinde antioksidan, anti-inflamatuvar, antikanserojen, antibakteriyel ve bağışıklık düzenleyici gibi çeşitli biyolojik aktiviteler gösterdiğini ortaya koymuştur (Chang ve ark., 2023; Wang ve ark., 2023; Mao ve ark., 2024). Hem hayvan hem de insan çalışmalarında, polifenollerin anti-inflamatuvar ve antioksidan özelliklerinin, çeşitli bulaşıcı olmayan hastalıkların önlenmesi ve tedavisindeki potansiyel rollerine sağlam bir temel oluşturduğu tutarlı biçimde gösterilmiştir. Bu hastalıklar; kanser, kardiyovasküler hastalıklar (KVH), diyabet, pankreatit, osteoporoz, gastrointestinal fonksiyon bozuklukları, akciğer hasarı ve nörodejeneratif hastalıklar gibi geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır (Muscolo ve ark., 2024). Bu nedenle polifenoller, gıda, tıp ve sağlık ürünleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte bazı polifenoller (flavonoidler, kateşinler ve tanenler), düşük suda çözünürlükleri, kimyasal kararsızlıkları, hızlı metabolizmaları ve fizyolojik koşullar altında zayıf emilimleri nedeniyle gıda veya farmasötik formülasyonlardaki kullanımda ciddi sınırlamalara sahiptir (Hanuka ve ark., 2022; Chen ve ark., 2023). Bu durum, polifenolik bileşiklerin stabilitesinin ve biyoyararlanımının artırılmasının güncel araştırmalarda önemli bir odak noktası olmasına yol açmıştır (Lu ve ark., 2025).
- **Terpenoidler:** Hidrokarbon yapısına sahip ikincil metabolitler olan terpenoidler, 5C'lu izopren ünitelerinden ( $C_5H_8$ ) oluşan ve yapısal açıdan oldukça çeşitli olan büyük bir grubu temsil eder (Baydar, 2019). Bitkilere koku (özellikle uçucu yağların bileşenleri olarak), tat ve pigmentasyon özelliklerini kazandırır (Kamran ve ark., 2022). Terpenoidlerin sınıflandırılması, yapılarında bulunan izopren birimlerinin oluşturduğu karbon atomu sayısına dayanmaktadır. Sınıflandırması; monoterpenoidler ( $C_{10}H_{16}$ ), seskiterpenoidler ( $C_{15}H_{24}$ ), diterpenoidler ( $C_{20}H_{32}$ ), sesterterpenoidler ( $C_{25}H_{40}$ ) ve triterpenoidler ( $C_{30}H_{48}$ ) şeklindedir

(Siddiqui ve ark., 2024). Bu bileşiklerin birçoğu, gıda ve kozmetik ürünlerinde aroma ve koku verici olarak kullanılmaları nedeniyle ticari açıdan büyük önem taşımaktadır (Koche ve ark., 2016). Ayrıca, terpenoidlerin; antioksidan, antimikrobiyal, anti-inflamatuvar, antialerjik, antikanser, antimetastatik, antianjiyogenez ve apoptoz indükleyici etkiler gibi geniş bir biyolojik aktivite yelpazesi vardır (Adefegha ve ark., 2022; Camara ve ark., 2024). Terpenoidler, sahip oldukları çeşitli biyolojik ve farmakolojik özellikler nedeniyle dünya genelinde birçok insan hastalığının tedavisinde etkili bileşikler olarak kullanılmaktadır. Önemli antikanser bileşiklerden biri olan taksol (paklitaksel), bu ikincil metabolit grubuna aittir (Wani ve ark., 2023).

- **Alkaloidler:** Alkaloidler, azot atomları içeren ve özellikle yüksek organizmaların sinir sistemi üzerinde etkili biyolojik aktiviteleri ile öne çıkan, doğal olarak oluşan organik bileşiklerdir (Bhambhani ve ark., 2021). Yapısal olarak çoğu alkaloid, amin tipi bir yapıya sahip ve en az bir azot atomu içeren aromatik bir halka ile karakterizedir (Ma ve ark., 2018). Genellikle amino asitlerden sentezlenen bu bileşikler, başta bitkiler olmak üzere bazı mantar ve bazı hayvan türlerinde de bulunur (Aniszewski, 2007). Alkaloidler, doğada patojenlere karşı önemli savunma ajanları olarak işlev görür ve bitkilerde bilinen ikincil metabolitlerin yaklaşık %20'sini oluşturur (Kaushik ve ark., 2021). Tarih boyunca alkaloidler, bitkisel tedavilerde doğal formlarıyla kullanılan geleneksel tıbbın ayrılmaz bir parçası olmuştur (Bernardini ve ark., 2018). Günümüzde ise bitki kaynaklı alkaloidler ve bunların sentetik türevlerine olan araştırma ilgisi, alkaloidlerin sergilediği antimalaryal, anti-inflamatuvar, antiviral, antikanser, antioksidan ve antimikrobiyal gibi çeşitli farmakolojik etkiler ile diğer biyolojik aktivitelerden kaynaklanmaktadır (Tang ve ark., 2016; He ve Zhang, 2019). Alkaloidler, kimyasal yapıları ve farmakolojik aktiviteleri sayesinde yeni ilaçların keşfi için önemli bir kaynak sağlar (Islam ve ark., 2024).
- **Karotenoidler:** Karotenoidler, renk verici maddeler olarak kullanılan başlıca fitokimyasal bileşik grubunu oluşturmaktadır (Tümer, 2023). Bu doğal pigmentler; yenilebilir meyve ve sebzelerde, mantarlarda, çiçeklerde ve hatta hayvanlar âleminde ıstakoz ile alabalık gibi türlerde görülen renklerin büyük bir kısmından sorumludur (Rodriguez-Amaya, 2016). Karotenoidler, bitki dokularında klorofillerle birlikte bulunur ve meyve ile sebzelerde yaygın olarak görülür. Bu grup bileşiklerden  $\beta$ -karoten, A vitamininin öncüsü (provitamin) olarak işlevi görür ve gereksinim halinde A vitaminine dönüştürülür (Samaranayaka ve ark., 2011; Demir ve Akpınar, 2020). Hayati öneme sahip ikincil metabolitler

olan karotenoidler; göz, kardiyovasküler sistem ve cilt sağlığı, bağışıklık fonksiyonları, bilişsel yetiler ve kemik sağlığı da dâhil olmak üzere insan organlarının çeşitli işlevlerinin sürdürülmesinde kritik rol oynar. Etki mekanizmaları arasında serbest radikallerin nötralize edilmesi, gen ekspresyonunun modülasyonu ve inflamatuvar yolların düzenlenmesi yer almaktadır (Papapostolou ve ark., 2023).

- **Saponinler:** Saponinler, bitkilerde bulunan ikincil metabolitler olup, hem glikozitlerden hem de şekerlerden oluşan bileşiklerdir. Amfifilik özellik gösterirler; aglikon kısmı lipofilik (yağ seven) özellik gösterirken, karbonhidrat birimi hidrofilik (su seven) özellik gösterir (Vincken ve ark., 2007; Jolly ve ark., 2024). Saponinler, suda sabun köpüğü oluşturma yetenekleriyle bilinir ve yapısal olarak çeşitlilik gösterir (Bezerra ve ark., 2021). Dikotiledon bitkilerde bulunan triterpenoid saponinler ve monokotiledon bitkilerde bulunan steroidal saponinler olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar (Mietlińska, 2023). Saponinlerin, antikanser, antimikrobiyal, antiprotzoal, antikolesterol ve anti-inflamatuvar gibi biyolojik aktiviteleri vardır (Kaur ve ark., 2024).
- **Fitosteroller:** Bitkilerde bulunan steroller, fitosteroller olarak adlandırılır ve triterpen ailesine ait steroid alkollerini oluştururlar (Nurmi, 2012). Bitkilerde yaygın olarak bulunan bu bileşikler, kimyasal yapı ve fizyolojik işlevleri bakımından kolesterole benzerlik gösterirler (Nattagh ve ark., 2022); ancak yan zincirleri ve halka yapılarının doyumluk dereceleri açısından farklılık arz ederler (MacKay ve Jones, 2011). Serbest formda bulunabildikleri gibi ester veya glikozid bağları aracılığıyla kovalent olarak da bağlanabilirler (Moreau ve ark., 2018). Ayçiçeği, susam, yerfıstığı ve soya gibi yağlı tohumlarda bol miktarda bulunur ve insan beslenmesinde önemli bir rol oynar (Baydar, 2019). Fitosterollerin yapısal farklılıkları, biyolojik aktiviteleri ile doğrudan ilişkilidir (Suttiarporn ve ark., 2015). Son yıllarda, fitosteroller olağanüstü fizyolojik aktiviteleri nedeniyle yoğun ilgi görmüştür. Kolesterol düşürücü, anti-inflamatuvar, antibakteriyel ve antikanser etkiler de dâhil olmak üzere birçok fizyolojik aktiviteye sahiptirler (Tapiero ve ark., 2003; Shen ve ark., 2024). Fitosterol açısından zengin gıdaların uzun süreli tüketimi, kanser riskini yaklaşık %20 oranında azaltabilir (Ramprasath ve Awad, 2015). Ayrıca fitosterollerin, insanlarda kardiyovasküler ve serebrovasküler hastalıkların önlenmesinde de etkili oldukları saptanmıştır (Shahzad ve ark., 2017). Bu özellikleri nedeniyle, fitosteroller nutrasötik veya farmasötik gibi uygulamalarda son derece umut vericidir (Resende ve ark., 2024).

**Tablo 1.** Bitkilerde bulunan başlıca fitokimyasallar, kaynak bitkiler ve biyolojik aktiviteleri

| Fitokimyasal | Sınıflandırması                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Bitki Kaynağı                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Biyolojik Aktivitesi                                                                                                                              | Kaynaklar                                                                                                                                                                              |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Polifenoller | Fenolik asitler <ul style="list-style-type: none"><li>• Hidroksibenzoik asitler</li><li>• Hidroksisinnamik asitler</li></ul> Flavonoidler <ul style="list-style-type: none"><li>• Antosiyaninler</li><li>• Flavan-3-oller</li><li>• Flavonlar</li><li>• Flavanonlar</li><li>• Flavonoller</li></ul> StilbenlerKumarinlerTanenler <ul style="list-style-type: none"><li>• Hidroilizlenebilir tanenler</li><li>• Kondanse tanenler</li></ul> | <i>Acalypha indica</i><br><i>Aloe vera</i><br><i>Azadirachta indica</i><br><i>Bacopa monnieri</i><br><i>Betula pendula</i><br><i>Brysonima crassa</i><br><i>Camellia sinensis</i><br><i>Cannabis sativa</i><br><i>Citrus unshiu</i><br><i>Ginkgo biloba</i><br><i>Matricaria chamomilla</i><br><i>Melissa officinalis</i><br><i>Mentha longifolia</i><br><i>Mentha piperita</i><br><i>Mesua thwaitesii</i><br><i>Momordica charantia</i><br><i>Rosmarinus officinalis</i><br><i>Salvia officinalis</i><br><i>Salvia sclarea</i><br><i>Zingiber officinale</i><br><i>Thymus vulgaris</i> | Antioksidan<br>Antibakteriyel<br>Antiviral<br>Anti-inflamatuvar<br>Antimutajenik<br>Antikanserojen<br>Anti-obezite                                | Arfaoui, 2021; Bandici ve ark., 2022; Roy ve ark., 2022; Svydenko ve ark., 2022; Bitwell ve ark., 2023; Dar ve ark., 2023; Kumari ve ark., 2024; Zhang ve Lu, 2024; Wan ve ark., 2025; |
| Terpenoidler | Monoterpenoidler <ul style="list-style-type: none"><li>• Timol</li><li>• Mentol</li><li>• Aurapten</li><li>• D-limonen</li><li>• Perillik asit</li><li>• Karvakrol</li></ul> Seskiterpenoidler                                                                                                                                                                                                                                             | <i>Achillea millefolium</i><br><i>Carum copticum</i><br><i>Centipeda minima</i><br><i>Ginkgo biloba</i><br><i>Lippia multiflora</i><br><i>Mentha piperita</i><br><i>Nigella sativa</i><br><i>Ocimum gratissimum</i><br><i>Origanum vulgare</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Antimikrobiyal<br>Antioksidan<br>Anti-inflamatuvar<br>Antihelmintik<br>Antiviral<br>Antifungal<br>Antiparaziter<br>Antireumatik<br>Antikanserojen | Koche ve ark., 2016; Gholami-Ahangaran ve ark., 2022; Kamran ve ark., 2022; Dar ve ark., 2023; Jangjoo ve Joshaghani, 2023; Wani ve ark., 2023; Siddiqui ve ark., 2024                 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                           |                                                                                      |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ambrosin</li> <li>• Koronopilin</li> <li>• Artemisin</li> </ul> Diterpenoidler <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taksol</li> <li>• Triptolid</li> <li>• Krosetin</li> <li>• Fitol</li> </ul> Sesterterpenoidler <ul style="list-style-type: none"> <li>• Skualen</li> <li>• Bisabolol</li> </ul> Triterpenoidler <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ursolik asit</li> <li>• Betulinik asit</li> <li>• Lupeol</li> </ul> | <i>Satureja hortensis</i><br><i>Satureja intermedia</i><br><i>Satureja thymbra</i><br><i>Thymbra capitata</i><br><i>Thymus ciliates</i><br><i>Thymus pectinatus</i><br><i>Thymus vulgaris</i><br><i>Thymus zygis</i><br><i>Trachyspermum ammi</i><br><i>Zataria multiflora</i><br><i>Zingiber officinale</i> |                                                                           |                                                                                      |
| Alkaloidler | Gerçek alkaloidler <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atropin</li> <li>• Nikotin</li> </ul> Protoalkaloidler <ul style="list-style-type: none"> <li>• Feniletilamin türevli alkaloidler</li> </ul> Psödoalkaloidler                                                                                                                                                                                                                                                     | <i>Atropa belladonna</i><br><i>Catharanthus roseus</i><br><i>Coffea arabica</i><br><i>Datura stramonium</i><br><i>Nicotiana tabacum</i><br><i>Rauvolfia serpentina</i><br><i>Camptotheca acuminata</i>                                                                                                       | Antikanserojen<br>Antimikrobiyal<br>Sedatif<br>Analjezik<br>Antispazmodik | Koche ve ark., 2016; Bitwell ve ark., 2023; Wani ve ark., 2023; Kumari ve ark., 2024 |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                             |                                                                                                                       |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kafein</li> <li>• Solanidin</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                   | <i>Dioscorea hispida</i><br><i>Papaver somniferum</i><br><i>Rhazya stricta</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                             |                                                                                                                       |
| Karotenoidler | Karotenler <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\alpha</math>-Karoten</li> <li>• <math>\beta</math>-karoten</li> <li>• Likopen</li> </ul> Ksantofiller <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeaksantin</li> <li>• Kriptoksantin</li> <li>• Astaksantin</li> <li>• Lutein</li> </ul> | <i>Brassica oleracea</i><br><i>Calendula officinalis</i><br><i>Citrus sinensis</i><br><i>Crocus sativus</i><br><i>Daucus carota</i><br><i>Petroselinum crispum</i><br><i>Raphanus sativus</i><br><i>Solanum lycopersicum</i><br><i>Spinacia oleracea</i><br><i>Trigonella foenum</i>                                                                                   | Antioksidan<br>Antikanserojen<br>Anti-inflamatuvar<br>Antimikrobiyal                                                        | Özcan ve ark., 2020; Balázs ve ark., 2023; Mohd Hatta ve ark., 2023; Wani ve ark., 2023;                              |
| Saponinler    | Triterpenoid saponinler <ul style="list-style-type: none"> <li>• Monodezmozidik</li> <li>• Didezmozidik</li> </ul> Steroidal saponinler <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spirostanol</li> <li>• Furostanol</li> <li>• Kolestan</li> </ul>                                                 | <i>Acacia concinna</i><br><i>Acanthophyllum squarrosum</i><br><i>Achyranthus bidentata</i><br><i>Chenopodium quinoa</i><br><i>Glycyrrhiza glabra</i><br><i>Panax ginseng</i><br><i>Quillaja saponaria</i> Molina<br><i>Sapindus mukorossi</i><br><i>Sapindus saponaria</i><br><i>Saponaria officinalis</i><br><i>Tribulus terrestris</i><br><i>Vaccinium myrtillus</i> | Antifungal<br>Antimikrobiyal<br>Antikanserojen<br>Anti-inflamatuvar<br>Ekspektoran (balgam söktürücü)<br>Hemolitik aktivite | Abdel-Reheim ve ark., 2022; Bitwell ve ark., 2023; Kaur ve ark., 2024; Kumari ve ark., 2024; Grzywaczyk ve ark., 2025 |
| Fitosteroller | 4,4-dimetil steroller<br>4 $\alpha$ -monometil steroller<br>Desmetil steroller                                                                                                                                                                                                                    | <i>Kuruyemişler</i><br><i>Meyveler</i><br><i>Sebzeler</i><br><i>Tohumlar</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Antimikrobiyal<br>Antikanserojen<br>Anti-inflamatuvar<br>Antioksidan<br>Anti-obezite                                        | Nattagh-Eshtivani ve ark., 2022; Wani ve ark., 2023; Khallouki ve ark., 2024                                          |

## **Fitokimyasalların Biyolojik Aktiviteleri**

Tıbbi ve aromatik bitkiler, farklı farmakolojik aktivitelere sahip biyoaktif bileşiklerin keşfi ve geliştirilmesi için değerli kaynaklar olmuşlardır (Dar ve ark., 2023). Bu nedenle, bitkilerin fitokimyası, bitkisel ürünlerin farklı hastalıklara karşı potansiyel bir tedavi aracı olarak kullanılabilmesi açısından önemli bir avantaja sahiptir. Yan etkilerinin minimal olması nedeniyle, bitki temelli ilaçlar insan ve çiftlik hayvanlarında görülen çeşitli hastalıkların tedavisinde alternatif ilaçlar olarak kullanılmakta ve toplumda kullanımı hızla artarak, yüksek kabul görmektedir (Gonfa ve ark., 2023).

Fitokimyasallar, antioksidan, antimikrobiyal, anti-inflamatuvar, antikanserojen, antidiyabetik ve bağışıklık sistemini güçlendirici etkiler göstererek kardiyovasküler sağlığın desteklenmesine, kanserin önlenmesine ve genel yaşam süresinin uzamasına katkıda bulunurlar (Jang ve Lee, 2023; Yang and Ling, 2025).

### **Antioksidan Etki**

Çok sayıda hastalığın etiyolojisi, vücudun antioksidan kapasitesini aşan serbest radikal oluşumu ile ilişkilendirilmiştir (Nwozo ve ark., 2023). Serbest radikallerin sebep olduğu oksidatif stres, yaşlanma sürecine etki ettiği kadar kanser, şeker hastalığı, nörodejeneratif ve kardiyovasküler hastalıklar gibi çeşitli rahatsızlıklara da yol açabilmektedir (Saraç ve ark., 2021). Özellikle bitkisel kaynaklı besinlerle alınan doğal antioksidanlar, hücreleri serbest radikallerin neden olduğu hasara karşı korur (Saraç ve ark., 2021; Dar ve ark., 2023; Nwozo ve ark., 2023). Polifenoller ve karotenoidler, bitkilerde yaygın olarak bulunan ve bitkilerin antioksidan özelliklerine en fazla katkıyı sağlayan fitokimyasallardır (Zang ve ark., 2015). Özellikle  $\beta$ -karoten, kuersetin, kurkumin, resveratrol, mirisetin ve kaempferol temel antioksidan biyoaktif bileşikler arasında yer almaktadır (Muscolo ve ark., 2024). Antioksidan fitokimyasallar güçlü antioksidan özelliklerinin yanı sıra anti-inflamatuvar etkiye de sahiptir; bu özellikler aynı zamanda diğer biyoaktivitelerin ve sağlık yararlarının da temelini oluşturmaktadır (Zang ve ark., 2015). Antimutajenik, antikanserojenik, antiaging gibi birçok biyolojik aktivite, antioksidan özellikli bileşiklere dayandırılmaktadır (Saraç ve ark., 2018a).

### **Antimikrobiyal etki**

Antibiyotiklerin yaygın, bilinçsiz, düzensiz ve kontrolsüz kullanımı, antimikrobiyal direncin ortaya çıkmasına yol açmış ve günümüzde mevcut birçok ilacın etkisiz hâle gelmesine neden olmuştur (Saraç ve ark., 2018b). Bu

durum, WHO tarafından önemli bir küresel sağlık sorunu olarak tanımlanmıştır (El-Saadony ve ark., 2025). Bu nedenle, antibiyotik kullanımını azaltabilecek ve direnç gelişimiyle mücadele edebilecek yeni antimikrobiyal ajanların geliştirilmesine yönelik artan bir ihtiyaç duyulmaktadır. Nitekim, araştırmacılar mikrobiyal dirence karşı etkili olabilecek yeni biyoaktif kimyasalların bitkilerden izole edilmesi ve tanımlanmasına yönelmişlerdir (Vaou ve ark., 2021). Tıbbi ve aromatik bitkiler, *in vitro* çalışmalarda antimikrobiyal aktivite gösterdiği belirlenen çok çeşitli kimyasal bileşikler bakımından zengindir (Saraç ve ark., 2018b). En güçlü antimikrobiyal aktiviteyi gösteren, tıbbi açıdan önemli fitokimyasallar arasında alkaloidler, organosülfür bileşikler, fenolik bileşikler, kumarinler ve terpenoidler yer almaktadır (Murugaiyan ve ark., 2022). Bu maddeler; bakteriler, mantarlar ve virüsler gibi çok sayıda mikroorganizmayı inhibe edebilmektedir ve etki mekanizmaları mikrobiyal zarların bozulması, temel enzimlerin inhibisyonu ve immün yanıtın modülasyonu gibi süreçleri içermektedir (Dar ve ark., 2023). Buna ek olarak, antibiyotiklerle kombinasyon hâlinde de etki gösterebilirler (Vaou ve ark., 2021).

### **Anti-inflamatuvar Etki**

İnflamasyon, kronik hastalıkların ilerlemesinde patofizyolojik süreçlerde temel bir role sahip olan, bağışıklık sisteminin önemli bir yanıtıdır (Sivapalan ve ark., 2023). İnflamasyon, vücudun doğal bir savunma mekanizması olmakla birlikte, uzun süreli inflamasyon birçok hastalığın (otoimmün hastalıklar, astım, inflamatuvar bağırsak hastalıkları ve kardiyovasküler komplikasyonlar gibi) gelişimine yol açabilmektedir (Oliveira-Costa ve ark., 2022). Birçok anti-inflamatuvar ilacın mevcut olmasına rağmen, uzun süreli kullanımlarına bağlı ortaya çıkan ciddi yan etkiler ve çoğu zaman yüksek maliyetleri, hastalık sürecinin etkin biçimde kontrol edilmesinde önemli engeller oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu konvansiyonel ilaçlara uygun alternatifler aranmaktadır (Moudgil ve Venkatesha, 2022). Çoğu tıbbi ve aromatik bitkide bulunan çeşitli aktif bileşenlerin inflamatuvar etkilere karşı koruyucu özellikler gösterdiği kanıtlanmış olup, özellikle tıbbi ve aromatik bitkilerden elde edilen biyoaktif maddelerin, inflamatuvar yolları düzenleyerek ve pro-inflamatuvar medyatörlerin üretimini azaltarak anti-inflamatuvar etki gösterdiği belirlenmiştir (Wen ve ark., 2022; Dar ve ark., 2023). Flavonoidler (özellikle kuersetin benzeri flavonoidler) ve terpenoidler gibi fitokimyasallar, antiinflamatuvar özelliklere sahiptir (Sivapalan ve ark., 2023).

## Antikanser Etki

Gün geçtikçe görülme sıklığı artan kanser, insanların yaşamını tehdit eden en önemli hastalıklardan biri hâline gelmiştir (Saraç ve ark., 2018a). Günümüzde, kanser tedavisindeki ilerlemelere rağmen, kemoterapötik ilaçlar ve mevcut tedavi yöntemleri hala yetersiz kalmakta, hastalığın şiddeti ve ölüm oranları artış göstererek, tedaviye bağlı yaşam kalitesinde düşüşler yaşanmaktadır (George ve ark., 2021; Samsunlu ve Lenger, 2023). Bu nedenle, mevcut kanser tedavi yöntemlerine ek olarak, doğal bitkisel tedavi olanaklarının geliştirilmesi son yıllarda büyük önem kazanmıştır (Saraç ve Tüzün, 2021). Bitkisel ürünler yüzyıllardır antikanser ve kanser kemopreventif amaçlarla kullanılmasına rağmen, bitkilerden elde edilen aktif bileşiklerin araştırılması özellikle son birkaç on yılda yoğun ilgi görmüştür (George ve ark., 2021). Meyve ve sebzeler açısından zengin diyetlerin kanserden koruyucu etkisi olduğunu gösteren epidemiyolojik çalışmalar, biyolojik olarak aktif bitki ikincil metabolitlerinin antikanserojen etkiler gösterebileceği olasılığına dikkat çekmiştir (Johnson, 2007). Tıbbi ve aromatik bitkilerden elde edilen doğal ürünler, terpenoid ve flavonoid moleküllerini de içeren yapısal zenginlikleri sayesinde apoptozu indüklemeleri ve gen ekspresyonunu düzenlemeleri nedeniyle umut verici antikanser ajanlar olarak giderek daha fazla tanınmaktadır (Quintero-Rincó ve ark., 2025). Günümüzde kullanılan antikanser ilaçların %60'tan fazlası, bir şekilde doğal kaynaklardan elde edilmiştir (Asma ve ark., 2022). Antikanserojen aktiviteye sahip önemli fitokimyasallar; polifenoller, terpenoidler, alkaloidler ve karotenoidlerdir (Samsunlu ve Lenger, 2023). Bu fitokimyasalların antikanser etkileri; hücre döngüsünün durdurulması, apoptozun indüklenmesi, anjiyogenezin ve metastazın baskılanması, oksidatif stresin düzenlenmesi ve kanser hücrelerinde anormal şekilde aktive olmuş sinyal yollarının inhibisyonu gibi çok yönlü mekanizmalar aracılığıyla gerçekleşmektedir (Dar ve ark., 2023). Ayrıca bu bileşikler, sağlıklı normal hücreleri korurken, premalign ve neoplastik ya da malign hücreleri yok etmekte veya bu hücreler üzerinde toksik etki göstermektedir (George ve ark., 2021; Quintero-Rincó ve ark., 2025).

## SONUÇ

Sonuç olarak, özellikle tıbbi ve aromatik bitkilere ait fitokimyasalların zengin biyolojik aktiviteleri, kronik hastalıkların önlenmesi ve tedavisinde doğal ajanlar olarak önemli bir potansiyele sahip olduklarını göstermektedir. Bu bileşiklerin daha ayrıntılı olarak karakterize edilmesi ve etki

mekanizmalarının aydınlatılması, gelecekte yeni ve güvenli farmasötik ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

## REFERANSLAR

- Abbas, M., Saeed, F., Anjum, F. M., Afzaal, M., Tufail, T., Bashir, M. S., ... ve Suleria, H. A. R. (2017). Natural polyphenols: An overview. *International Journal of Food Properties*, 20(8), 1689-1699.
- Abdel-Reheim, M. A., Ashour, A. A., Khattab, M. A., ve Gaafar, A. G. A. (2022). Quillaja saponaria bark saponin attenuates methotrexate induced hepatic oxidative stress, inflammation and associated liver injury in rats. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 12(5), 129-141.
- Adefegha, S. A., Oboh, G., ve Oluokun, O. O. (2022). Food bioactives: the food image behind the curtain of health promotion and prevention against several degenerative diseases. *Studies in Natural Products Chemistry*, 72, 391-421.
- Aniszewski, T. (2007). *Alkaloids-secrets of life: Alkaloid chemistry, biological significance, applications and ecological role*. Elsevier.
- Arfaoui, L. (2021). Dietary plant polyphenols: Effects of food processing on their content and bioavailability. *Molecules*, 26(10), 2959.
- Aslan, R., ve Ayaz, K. (2019). Fonksiyonel gıda: besinler ilacımız olabilir mi. *Ayrıntı Dergisi*, 7(77), 45-49.
- Asma, S. T., Acaroz, U., Imre, K., Morar, A., Shah, S. R. A., Hussain, S. Z., ... ve Ince, S. (2022). Natural products/bioactive compounds as a source of anticancer drugs. *Cancers*, 14(24), 6203.
- Awuchi, C. G., ve Amagwula, I. O. (2020). The biochemistry, toxicology, and Uses of the ecologically active phytochemicals: Alkaloids, terpenes, polyphenols, and glycosides. *Merit Research Journals*, 5(1), 6-21.
- Bachheti, A., Sharma, A., Bachheti, R.K., Husen, A., ve Pandey, D.P., (2020). Plant Allelochemicals and Their Various Applications. In *Co-Evolution of Secondary Metabolites*; M'errillon, J.M., Ramawat, K.G., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 441-465.
- Balázs, V. L., Gulyás-Fekete, G., Nagy, V., Zubay, P., Szabó, K., Sándor, V., ... ve Deli, J. (2023). Carotenoid Composition of *Calendula officinalis* Flowers with Identification of the Configuration of 5, 8-Epoxy-carotenoids. *ACS Agricultural Science & Technology*, 3(11), 1092-1102.
- Bandici, L., Teusdea, A. C., Soproni, V. D., Hathazi, F. I., Arion, M. N., Molnar, C. O., ve Vicas, S. I. (2022). The influence of microwave treatments on bioactive compounds and antioxidant capacity of *Mentha piperita* L. *Materials*, 15(21), 7789.
- Baydar, H. (2019). *Tıbbi ve aromatik bitkiler bilimi ve teknolojisi*. 7. Basım, Nobel Akademik Yayıncılık.
- Bernardini, S., Tiezzi, A., Laghezza Masci, V., ve Ovidi, E. (2018). Natural products for human health: an historical overview of the drug discovery approaches. *Natural product research*, 32(16), 1926-1950.
- Bertelli, A., Biagi, M., Corsini, M., Bainsi, G., Cappellucci, G., ve Miraldi, E. (2021). Polyphenols: From theory to practice. *Foods*, 10(11), 2595.

- Bezerra, K. G., Silva, I. G., Almeida, F. C., Rufino, R. D., ve Sarubbo, L. A. (2021). Plant-derived biosurfactants: Extraction, characteristics and properties for application in cosmetics. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 34, 102036.
- Bhambhani, S., Kondhare, K. R., ve Giri, A. P. (2021). Diversity in chemical structures and biological properties of plant alkaloids. *Molecules*, 26(11), 3374.
- Bitwell, C., Indra, S. S., Luke, C., ve Kakoma, M. K. (2023). A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants. *Scientific African*, 19, e01585.
- Câmara, J. S., Perestrelo, R., Ferreira, R., Berenguer, C. V., Pereira, J. A., & Castilho, P. C. (2024). Plant-derived terpenoids: A plethora of bioactive compounds with several health functions and industrial applications—A comprehensive overview. *Molecules*, 29(16), 3861.
- Chang, J., Huang, C., Li, S., Jiang, X., Chang, H., ve Li, M. (2023). Research progress regarding the effect and mechanism of dietary polyphenols in liver fibrosis. *Molecules*, 29(1), 127.
- Chen, H., Lin, S., Wu, J., Xu, Y., Cai, X., ve Wang, S. (2023). The structure, antioxidant activity, and stability of fish gelatin/chitooligosaccharide nanoparticles loaded with apple polyphenols. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(8), 4211-4220.
- Dar, R. A., Shahnawaz, M., Ahanger, M. A., ve Majid, I. U. (2023). Exploring the diverse bioactive compounds from medicinal plants: a review. *The Journal of Phytopharmacology*, 12(3), 189-195.
- Demir, T., ve Akpınar, Ö. (2020). Bitkilerde bulunan fitokimyasalların biyolojik aktiviteleri. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(8), 1734-1746.
- Elmas, C. (2024). Polifenoller ve özellikleri. *Sağlık & Bilim 2024: Polifenoller ve Sağlık*, 7.
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Mohammed, D. M., Korma, S. A., Alshahrani, M. Y., Ahmed, A. E., ... ve Ibrahim, S. A. (2025). Medicinal plants: bioactive compounds, biological activities, combating multidrug-resistant microorganisms, and human health benefits-a comprehensive review. *Frontiers in Immunology*, 16, 1491777.
- George, B. P., Chandran, R., ve Abrahamse, H. (2021). Role of phytochemicals in cancer chemoprevention: Insights. *Antioxidants*, 10(9), 1455.
- Gholami-Ahangaran, M., Ahmadi-Dastgerdi, A., Azizi, S., Basiratpour, A., Zokaei, M., ve Derakhshan, M. (2022). Thymol and carvacrol supplementation in poultry health and performance. *Veterinary Medicine and Science*, 8(1), 267-288.
- Gonfa, Y. H., Tessema, F. B., Bachheti, A., Rai, N., Tadesse, M. G., Singab, A. N., ... ve Bachheti, R. K. (2023). Anti-inflammatory activity of phytochemicals from medicinal plants and their nanoparticles: A review. *Current Research in Biotechnology*, 6, 100152.
- Grzywaczyk, A., Rojewska, M., Smulek, W., McNaughton, D. A., Prochaska, K., Gale, P. A., ve Kaczorek, E. (2025). Glycyrrhiza glabra L. Saponins Modulate the Biophysical Properties of Bacterial Model Membranes and Affect Their Interactions with Tobramycin. *Langmuir*, 41(18), 11701-11710.

- Hanuka-Katz, I., Okun, Z., Parvari, G., ve Shpigelman, A. (2022). Structure dependent stability and antioxidant capacity of strawberry polyphenols in the presence of canola protein. *Food Chemistry*, 385, 132630.
- He, J., Zhang, F. L., Li, Z. H., Yang, H. X., Shao, Q., Feng, T., ve Liu, J. K. (2019). Monoterpenoid indole alkaloids from the bark of *Melodinus henryi*. *Fitoterapia*, 138, 104354.
- Hu, Y., Lin, Q., Zhao, H., Li, X., Sang, S., McClements, D. J., ... ve Qiu, C. (2023). Bioaccessibility and bioavailability of phytochemicals: Influencing factors, improvements, and evaluations. *Food Hydrocolloids*, 135, 108165.
- Islam, M. R., Akash, S., Islam, M. M., Sarkar, N., Kumer, A., Chakraborty, S., ... ve Khan, H. (2024). Alkaloids as drug leads in Alzheimer's treatment: mechanistic and therapeutic insights. *Brain Research*, 1834, 148886.
- Jang, J. H., ve Lee, T. J. (2023). Mechanisms of phytochemicals in anti-inflammatory and anti-cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(9), 7863.
- Jangjoo, M., ve Joshaghani, A. (2023). The role of *Achillea millefolium* in traditional medicine: A review of its use in different cultures. *Journal of Multidisciplinary Care (JMDC)*, 12(3):152-156.
- Johnson, I. T. (2007). Phytochemicals and cancer. *Proceedings of the Nutrition Society*, 66(2), 207-215.
- Johnson, I. T. (2013). Phytochemicals and health. *Handbook of Plant Food Phytochemicals: sources, stability and extraction*, 49-67.
- Jolly, A., Hour, Y., ve Lee, Y. C. (2024). An outlook on the versatility of plant saponins: a review. *Fitoterapia*, 174, 105858.
- Jose, J., Raju, D., ve Nayak, P. (2018). Microspheres-Novel Drug Delivery Carrier for Plant Extracts for Antibacterial Activity. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 11: 1681-1684.
- Kamran, S., Sinniah, A., Abdulghani, M. A., ve Alshawsh, M. A. (2022). Therapeutic potential of certain terpenoids as anticancer agents: a scoping review. *Cancers*, 14(5), 1100.
- Kaur, R., Mishra, V., Gupta, S., Sharma, S., Vaishnav, A., ve Singh, S. V. (2024). Industrial and environmental applications of plant-derived saponins: an overview and future prospective. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(9), 3012-3026.
- Kaushik, B., Sharma, J., Kumar, P., ve Shourie, A. (2021). Phytochemical properties and pharmacological role of plants: secondary metabolites. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 18(1), 23.
- Khallouki, F., Zennouhi, W., Hajji, L., Bourhia, M., Benbacer, L., El Bouhali, B., ... ve Lizard, G. (2024). Current advances in phytosterol free forms and esters: Classification, biosynthesis, chemistry, and detection. *Steroids*, 212, 109520.
- Koche, D., Shirsat, R., ve Kawale, M. (2016). An overreview of major classes of phytochemicals: their types and role in disease prevention. *Hislopia Journal*, 9(1/2), 1-11.
- Kumar, A., P, N., Kumar, M., Jose, A., Tomer, V., Oz, E., ... ve Oz, F. (2023). Major phytochemicals: recent advances in health benefits and extraction method. *Molecules*, 28(2), 887.
- Kumar, N., ve Goel, N. 2019. Phenolic acids: natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports*, 24, e00370.

- Kumari, N., Prakash, S., Sharma, N., Puri, S., Thakur, M., Singh, J., ve Kumar, M. (2024). Medicinal and aromatic plants as potential sources of bioactives along with health-promoting activities. *Current Food Science and Technology Reports*, 2(4), 359-376.
- Lu, M., Guo, Y., Ji, L., Xue, H., Li, X., ve Tan, J. (2025). Insights into interactions between polyphenols and proteins and their applications: An updated overview. *Journal of Agriculture and Food Research*, 102269.
- Ma, X., Cao, N., Zhang, C., Guo, X., Zhao, M., Tu, P., ve Jiang, Y. (2018). Cytotoxic carbazole alkaloid derivatives from the leaves and stems of *Murraya microphylla*. *Fitoterapia*, 127, 334-340.
- MacKay, D. S., ve Jones, P. J. (2011). Phytosterols in human nutrition: Type, formulation, delivery, and physiological function. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(12), 1427-1432.
- Mao, T., Wescombe, P., ve Mohan, M. S. (2024). Predominance of non-covalent interactions of polyphenols with milk proteins and their health promoting properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(32), 11871-11893.
- Marrelli, M. (2021). Medicinal plants. *Plants*, 10(7), 1355.
- Mietlińska, K. (2023). Polyphenols and saponins—properties and application in cosmetics. *Biotechnology and Food Science*, 85(1), 16-33.
- Moghadamtousi, S. Z., Goh, B. H., Chan, C. K., Shabab, T., ve Kadir, H. A. (2013). Biological activities and phytochemicals of *Swietenia macrophylla* King. *Molecules*, 18(9), 10465-10483.
- Mohammed, F. S., Akgul, H., Sevindik, M. ve Khaled, B. M. T. (2018). Phenolic content and biological activities of *Rhus coriaria* var. *zebaria*. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(8), 5694-5702.
- Mohd Hatta, F. A., Othman, R., Ali, Q. A., Hassan, N., ve Ramya, R. (2023). Carotenoids composition, antioxidant and antimicrobial capacities of *Crocus sativus* L. stigma. *Food Research*, 7, 337-343.
- Moreau, R. A., Nyström, L., Whitaker, B. D., Winkler-Moser, J. K., Baer, D. J., Gebauer, S. K., ve Hicks, K. B. (2018). Phytosterols and their derivatives: Structural diversity, distribution, metabolism, analysis, and health-promoting uses. *Progress in Lipid Research*, 70, 35-61.
- Moudgil, K. D., ve Venkatesha, S. H. (2022). The anti-inflammatory and immunomodulatory activities of natural products to control autoimmune inflammation. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1), 95.
- Murugaiyan, J., Kumar, P. A., Rao, G. S., Iskandar, K., Hawser, S., Hays, J. P., ... ve van Dongen, M. B. (2022). Progress in alternative strategies to combat antimicrobial resistance: focus on antibiotics. *Antibiotics*, 11(2), 200.
- Muscolo, A., Mariateresa, O., Giulio, T., ve Mariateresa, R. (2024). Oxidative stress: the role of antioxidant phytochemicals in the prevention and treatment of diseases. *International journal of Molecular Sciences*, 25(6), 3264.
- Nattagh-Eshstivani, E., Barghchi, H., Pahlavani, N., Barati, M., Amiri, Y., Fadel, A., ... ve Ghavami, A. (2022). Biological and pharmacological effects and nutritional impact of phytosterols: A comprehensive review. *Phytotherapy Research*, 36(1), 299-322.
- Nattagh-Eshstivani, E., Barghchi, H., Pahlavani, N., Barati, M., Amiri, Y., Fadel, A., ... ve Ghavami, A. (2022). Biological and pharmacological effects and nutritional

- impact of phytosterols: A comprehensive review. *Phytotherapy Research*, 36(1), 299-322.
- Nurmi, T. (2012). Variation of phytosterols and steryl ferulates in wheat grains and fractions. Department of Food and Environmental Sciences, University of Helsinki, Academic Dissertation. Helsinki, 118 pp.
- Nwozo, O. S., Effiong, E. M., Aja, P. M., ve Awuchi, C. G. (2023). Antioxidant, phytochemical, and therapeutic properties of medicinal plants: A review. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 359-388.
- Oliveira-Costa, J. F., Meira, C. S., Neves, M. V. G. D., Dos Reis, B. P. Z. C., ve Soares, M. B. P. (2022). Anti-inflammatory activities of betulinic acid: a review. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 883857.
- Özcan, M., Arslan, D., ve Ünver, A. (2020). Fonksiyonel Gıdalar Ve Fitokimyasallar. *Akademik Gıda*, 1(5), 40-45.
- Papapostolou, H., Kachrimanidou, V., Alexandri, M., Plessas, S., Papadaki, A., ve Kopsahelis, N. (2023). Natural Carotenoids: Recent Advances on Separation from Microbial Biomass and Methods of Analysis. *Antioxidants*, 12, 1030.
- Quintero-Rincón, P., Caballero-Gallardo, K., ve Olivero-Verbel, J. (2025). Natural anticancer agents: prospection of medicinal and aromatic plants in modern chemoprevention and chemotherapy. *Natural Products and Bioprospecting*, 15(1), 25.
- Ramprasath, V. R., ve Awad, A. B. (2015). Role of phytosterols in cancer prevention and treatment. *Journal of AOAC International*, 98(3), 735-738.
- Resende, J., Sosa, F. H., Coutinho, J. A., Rocha, J., Silvestre, A. J., ve Santos, S. A. (2024). Sustainable phytosterol extraction from *Codium tomentosum* using eutectic solvents. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(24), 9037-9044.
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2019). Natural food pigments and colorants. In *Bioactive molecules in food* (pp. 867-901). Springer, Cham.
- Rodríguez-Negrete, E. V., Morales-González, A., Madrigal-Santillán, E. O., Sánchez-Reyes, K., Álvarez-González, I., Madrigal-Bujaidar, E., ... ve Morales-González, J. A. (2024). Phytochemicals and their usefulness in the maintenance of health. *Plants*, 13(4), 523.
- Roy, A., Khan, A., Ahmad, I., Alghamdi, S., Rajab, B. S., Babalghith, A. O., ... vev Islam, M. R. (2022). Flavonoids a bioactive compound from medicinal plants and its therapeutic applications. *BioMed Research International*, (1), 5445291.
- Samaranayaka, A. G. P., ve Li-Chan, E. C. Y. (2011). Food-derived peptidic antioxidants: A review of their production, assessment, and potential applications. *Journal of Functional Food*, 3: 229-254.
- Samsunlu, E. T., ve Lenger, Ö. F. (2023). Fitokimyasalların Kanser Hücreleri Üzerine Apoptotik Etkileri. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 1662-1674.
- Shahzad, N., Khan, W., Ali, A., Saluja, S. S., Sharma, S., Al-Allaf, F. A., ... ve Al-Ghamdi, S. S. (2017). Phytosterols as a natural anticancer agent: Current status and future perspective. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 88, 786-794.
- Sarac, H. (2021). Bioactive components and biological activities of the cardamom (*Elettaria cardamomum* L.) plant. *Research & Reviews in Science and Mathematics*, 91, 91-108.

- Saraç, H., Daştan, T., Demirbaş, A., Daştan, S. D., Karaköy, T., ve Durukan, H. (2018a). Madımak (*Polygonum cognatum* Meissn.) bitki özütlerinin besin elementleri ve in vitro antikanserojen aktiviteleri yönünden değerlendirilmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 340-347.
- Saraç, H., Daştan, T., Durukan, H., Daştan, S. D., Demirbaş, A., ve Karaköy, T. (2018b). Kırmızı gelincik (Fam: Papaveraceae, *Glaucium grandiflorum* Boiss. & Huet var. *grandiflorum*) bitkisinin farklı özütlerinin besin elementi içeriğinin ve in vitro antiproliferatif etkilerinin değerlendirilmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 417-428.
- Saraç, H., Durukan, H., ve Demirbaş, A. (2021). Nutrient concentrations and antioxidant activity of *Achillea millefolium* L.(yarrow), one of the important medicinal plants. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 9(3), 590-594.
- Saraç, H., ve Tüzün, B. (2021). Determination of the activities of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) extract against liver cancer proteins. In *International Antalya Scientific Research and Innovative Studies Congress* December (pp. 18-21).
- Sevindik, M., Akgul, H., Pehlivan, M. ve Selamoglu, Z. (2017). Determination of therapeutic potential of *Mentha longifolia* ssp. *longifolia*. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(7), 4757-4763.
- Shad, A. A., Ahmad, S., Ullah, R., Abdel-Salam, N. M., Fouad, H., Rehman, N. U., ... ve Saeed, W. (2014). Phytochemical and biological activities of four wild medicinal plants. *The Scientific World Journal*, (1), 857363.
- Shen, M., Yuan, L., Zhang, J., Wang, X., Zhang, M., Li, H., ... ve Xie, J. (2024). Phytosterols: Physiological functions and potential application. *Foods*, 13(11), 1754.
- Siddiqui, T., Khan, M. U., Sharma, V., ve Gupta, K. (2024). Terpenoids in essential oils: Chemistry, classification, and potential impact on human health and industry. *Phytomedicine Plus*, 4(2), 100549.
- Sivapalan, S., Dharmalingam, S., Venkatesan, V., Angappan, M., ve Ashokkumar, V. (2023). Phytochemical analysis, anti-inflammatory, antioxidant activity of *Calotropis gigantea* and its therapeutic applications. *Journal of Ethnopharmacology*, 303, 115963.
- Suttiarporn, P., Chumpolsri, W., Mahatheeranont, S., Luangkamin, S., Teepsawang, S., ve Leardkamolkarn, V. (2015). Structures of phytosterols and triterpenoids with potential anti-cancer activity in bran of black non-glutinous rice. *Nutrients*, 7(3), 1672-1687.
- Svydenko, L., Vergun, O., Ivanišová, E., Korablova, O., ve Šramková, K. F. (2022). Polyphenol compounds and antioxidant activity of *Salvia officinalis* L. and *Salvia sclarea* L. *Agrobiodiversity for Improving Nutrition, Health and Life Quality*, 6(2), 139-148.
- Tang, X. P., Cao, S. Q., Song, Y., ve Zhou, L. S. (2016) Cytotoxic melodinus type alkaloids from the ethanol extract of *Melodinus fusiformis*. *Fitoterapia*, 115:106–110.
- Tapiero, H., Townsend, D. M., ve Tew, K. D. (2003). Phytosterols in the prevention of human pathologies. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 57(8), 321-325.

- Tümer, F. (2023). Bilimsel Keşifler ve Uygulamalar: İlaç Araştırmalarından Gıda Endüstrisine, Bitki Biyolojisi ve Kimyada Polimer Kimyasına Geniş Bir Bakış. Bölüm I, BİDGE Yayınları.
- Vaou, N., Stavropoulou, E., Voidarou, C., Tsigalou, C., ve Bezirtzoglou, E. (2021). Towards advances in medicinal plant antimicrobial activity: A review study on challenges and future perspectives. *Microorganisms*, 9(10), 2041.
- Varlı, M., Hancı, H., ve Kalafat, G. (2020). Tıbbi ve aromatik bitkilerin üretim potansiyeli ve biyoyararlılığı. *Research Journal of Biomedical and Biotechnology*, 1(1), 24-32.
- Vincken, J. P., Heng, L., de Groot, A., ve Gruppen, H. (2007). Saponins, classification and occurrence in the plant kingdom. *Phytochemistry*, 68(3), 275-297.
- Wan, C., Langyan, S., Echeverria, J., Devkota, H. P., Tewari, D., Moosavi, M. A., ... ve Li, M. (2025). Edible fruits and berries as a source of functional polyphenols: Current scene and future perspectives. *Phytochemistry Reviews*, 24(2), 1197-1225.
- Wang, S., Li, Y., Ma, C., Huang, D., Chen, S., Zhu, S., ve Wang, H. (2023). Enzymatic molecular modification of water-soluble polyphenols: Synthesis, structure, bioactivity and application. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(33), 12637-12651.
- Wani, T. A., Bhat, I. A., Guleria, K., Fayaz, M., Anju, T., Haritha, K., ... ve Kaloo, Z. A. (2023). Phytochemicals: diversity, sources and their roles. In *Phytochemical Genomics: Plant Metabolomics and Medicinal Plant Genomics* (pp. 3-33). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Wen, S. Y., Wei, B. Y., Ma, J. Q., Wang, L., ve Chen, Y. Y. (2022). Phytochemicals, Biological Activities, Molecular Mechanisms, and Future Prospects of *Plantago asiatica* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(1), 143-173.
- Xie, A. J., Li, M. H., Li, Z. W., ve Yue, X. Q. (2024). A preparation of debranched waxy maize starch derivatives: Effect of drying temperatures on crystallization and digestibility. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130684.
- Yang, Y., ve Ling, W. (2025). Health benefits and future research of Phytochemicals: A literature review. *The Journal of Nutrition*, 155(1), 87-101.
- Zhang, L., ve Lu, J. (2024). Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) polyphenols and inflammatory bowel diseases: Major phytochemicals, functional properties, and health effects. *Fitoterapia*, 177, 106074.
- Zhang, Y. J., Gan, R. Y., Li, S., Zhou, Y., Li, A. N., Xu, D. P., ve Li, H. B. (2015). Antioxidant phytochemicals for the prevention and treatment of chronic diseases. *Molecules*, 20(12), 21138-21156.



# **Endüstriyel Boyaların Gideriminde Peroksidazların Kullanımı**

**Hatice NOHUT<sup>1</sup>**

**Doç. Dr. Yağmur ÜNVER<sup>2</sup>**

- 1- Yüksek Lisans Öğrencisi; Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Moleküler Biyoloji ve Genetik Anabilim Dalı.  
hatice.nohut20@ogr.atauni.edu.tr ORCID No: 0009-0004-0805-7527
- 2- Doç. Dr.; Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü.  
yunver@atauni.edu.tr ORCID No: 0000-0003-1497-081X

## ÖZET

Endüstriyel faaliyetlerin artması ile sanayinin ve nüfusun hızla büyümesinin bir sonucu olarak ortaya çıkan kirleticiler, biyolojik olarak zor parçalanmaları, toksisiteleri ve kalıcılıkları nedeniyle ekosistem üzerinde ciddi sorunlara yol açmaktadır. Özellikle tekstil kaynaklı olarak açığa çıkan azo, antrakinon ve trifenilmetan boya ların geleneksel arıtım yöntemleriyle ortadan kaldırılması oldukça güç olmakla birlikte, bu yöntemler etkili olsa bile çevreye daha fazla zarar vermektedir. Bu durumda alternatif çözüm yolları arama ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu noktada enzimatik giderim yöntemleri; çevre dostu olmaları ve ara ürün olarak yeni bir kirletici oluşturmamaları nedeniyle ön plana çıkmaktadır.

Bu bölümde, çevre kirliliğine neden olan endüstriyel boya ların özellikleri ve çevreye verdikleri zararlar ele alınmış ve bu boya ların giderimi için çevre dostu peroksidaz enzimleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, doğal enzimlerin stabilite ve saflaştırma zorluklarına nazaran rekombinant peroksidazların sağladığı avantajlar vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, enzim temelli biyokatalitik çalışmalar, enzimlerin boya gideriminde çevre dostu, sürdürülebilir ve etkin olarak sunduğu çözümleri ortaya koymaktadır. Özellikle rekombinant enzim sistemlerinin biyokatalitik uygulamalar açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu gösterilmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Endüstriyel boya lar, peroksidazlar, rekombinant peroksidazlar, boya giderimi, detoksifikasyon*

---

## GİRİŞ

İnsanlığın öngöremediği en temel iki zorluk enerji ve çevredir. Çevrenin korunması, insanlık için en önemli sorumluluklardan biridir. Dünya nüfusunun ve sanayileşmenin hızla artmasıyla birlikte, modern toplumda yaygın bir şekilde kullanılan ve insan yapımı kimyasalların yarattığı yeni ortaya çıkan kirleticiler çevreye ve su kaynaklarına girmeye devam etmektedir. Kozmetikler, pestisitler, farmasötikler, kişisel ve ev bakım ürünleri ile toksik ağır metaller, çevresel kaynaklı ortaya çıkan kirleticilerdir (Rasheed, Bilal, et al., 2018). Bu kirleticiler son derece toksik ve kanserojeniktir.

Sanayi faaliyetlerinden kaynaklanan kirleticiler yani işlenmemiş atık sular, suya ve emisyonlarının doğrudan atmosfere bırakılması sonucu su kaynaklarını ve toprağın doğal yapısını değiştirerek bozmakta ve hava kalitesini olumsuz etkilemektedir (Sellami et al., 2022). Ayrıca birikimleri sonucu tüm ekosistem için ciddi tehditler oluşturmaktadır (Ahmed et al., 2017; Bansal & Kanwar, 2013; Bilal et al., 2018; Rasheed, Li, et al., 2018). Atık

materyaller, sentetik boyalar, fenolik bileşikler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar, uçucu organik bileşikler, poliklorlu bifeniller, pestisitler ve ilaç kalıntıları tüm zamanların en sık karşılaşılan kirleticilerdir. (Sellami et al., 2022). Sanayinin diğer sektörlere hızla yayılması, bu tehlikeli bileşiklerin ve zor parçalanıran kirleticilerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu toksik bileşenlerin etkili atık yönetim sistemi sağlanmaksızın çevreye salınması, ekosistemde kaçınılmaz zararlara ve insan sağlığının tehlikeye girmesine yol açmaktadır (Sellami et al., 2022). Bu bağlamda, en kalıcı kirleticiler arasında tekstil boyları yer almaktadır. Tekstil boyları içeren atık suların doğal su kaynaklarına boşaltılması, canlı organizmalar için ciddi tehlikeler oluşturmaktadır. Üstelik bazı renkler suyun ışık geçirgenliğini azaltarak sucul ortamdaki fotosentetik aktiviteyi bile olumsuz etkileyebilmektedir (Pajot et al., 2014).

Atık sulardan endüstriyel boyların giderimi için fiziksel ve kimyasal yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler, adsorpsiyon, koagölasyon, filtrasyon ve radyasyondur. Ancak bu tekniklerin her biri farklı detoksifikasyon kapasitesine sahip olmakla birlikte her birinin oldukça maliyetli ve çevreye daha fazla zarar verebilme ihtimalinden dolayı bazı sınırlılıkları vardır. Bu durumda atık sulardan boyların gideriminde, enzimatik giderme yaklaşımı ön plana çıkmaktadır (Durán & Esposito, 2000). Örneğin, peroksidaz enzimleri parçalanması zor kirleticileri, organik kirleticileri, başka ürüne dönüştürerek ya da parçalama yoluyla giderme özelliğine sahiptir (Husain, 2010). Bu enzim sınıfının, yüksek seçicilik ve spesifik katalitik özelliklerine sahip olması, onu biyokatalitik giderim açısından ön plana çıkarmaktadır (Bilal et al., 2022).

Peroksidazlar (EC 1.11.1.7), iki substrat arasında yükseltgenme-indirgenme (redoks) tepkimelerini katalizleyen, oksidoredüktaz enzim sınıfına ait olan enzimlerdir. Bu enzimler birer hemoproteindir ve yapılarında prostetik grup olarak demir (III) protoporfirin IX içerirler. Peroksidazlar doğada geniş bir dağılıma sahiptir. Birçok canlıda bulunan bu enzimler, mantar (*Candida krusei*, *Coprinopsis cinerea* ve *Phanerochaete chrysosporium*), bitki (*Armoracia rusticana*) ve bakteriler (*Bacillus sphaericus*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas sp.* ve *Citrobacter sp.*) gibi farklı kaynaklardan elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, peroksidaz kaynağı olarak birçok bitki bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; yaban turpu (*A. rusticana*), papaya (*Carica papaya*) ve muz (*musa paradisiaca*) (Bansal & Kanwar, 2013). Bu enzim sınıfının substrat ilgisi, optimum pH'ı ve inhibitör duyarlılığı izoenzimlerine göre farklılık gösterebilmektedir.

## 1) ENDÜSTRİYEL BOYALAR VE YAPISAL ÖZELLİKLERİ

Boyalar, ilaç, kozmetik, tekstil ve kâğıt gibi farklı sektörlerde kullanılan, toksik, canlı dokularda zamanla biriken (biyobirikimli) ve biyolojik olarak parçalanamayan en kalıcı kirleticilerden biridir. Bu boyalar tekstilde, boyama, baskı, renkli fotoğraf ve petrol ürünlerinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Bansal & Kanwar, 2013). Her yıl suya binlerce ton boya atığı bırakılmaktadır. Çevrede kirlilik oluşturan atık boyaların %54'ü bu şekilde yayılmaktadır. Yapılarında kromoforik ve oksokromik gruplar barındıran bu boyalar, doğal su kaynaklarına ulaşır ışığı seçici olarak adsorbe edip doğal florayı bozmaktadır. Bu şekilde sulara karışan boyalar insan üzerinde DNA (deoksiribonükleik asit) hasarı da dahil olmak üzere cilt ülserasyonu, dermatit, bulantı gibi sorunlara yol açabilmektedir (Wesenberg et al., 2003). Dünya genelinde 100.000'den fazla boyar madde mevcuttur ve yıllık yaklaşık olarak  $7 \times 10^5$  ton boyar madde üretimi gerçekleştirilir. Bunun çoğunluğunu tekstil endüstrisi oluşturmaktadır (Das & Mishra, 2017). Bu boyaların bir kısmı kullanılmamakta ve işlenmiş atık sularda birikmektedir (Cui et al., 2016). Bu nedenle, boyalardan kaynaklanan su kirliliğinin dikkat gerektiren hem mevcut olan hem de giderek daha da büyüyen bir sorun olduğu ortadadır. Diğer yandan, bu boyar maddelerin yaklaşık %60-70 kadarını azo boyalar, %15'ini antrakınonlar ve indigoitler oluşturmaktadır (Routoula & Patwardhan, 2020). Reaktif azo, antrakınon ve trifenilmetan boyaları en çok kullanılan boyalar olarak kabul edilir (Sudha & Saranya, 2014). Bu boyaların işleme sırasında bağlanamamış ve su ile reaksiyona girerek hidrolize olmuş boya molekülleri, genelde atık sularda bulunur (Mishra & Maiti, 2018). Boyama süreçlerinde, atık suya karışıp ortadan kalkmış olan boya miktarı net olarak bilinmese de bu miktarın dünya genelinde yıllık %15'ten fazla ya da yaklaşık olarak 280 kt (kiloton) olduğu tahmin edilmektedir (Kalyani et al., 2009).

### 2.1) Azo Boyalar

Azo boyalar yaygın şekilde kullanılır, ancak buna rağmen kimyasal işlemlere dirençli tasarlandıklarından dolayı doğada kalıcı ve zor bozunur olduğu kabul edilmektedir (Saratale et al., 2009; Selvaraj et al., 2021). Tekstil endüstrisi tarafından salınan bu boyalar sularda  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  seviyelerindeyken, salınım sonrası bu konsantrasyon 10–200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  seviyelerine ulaşabilmektedir (O'Neill et al., 1999). Bundan dolayı suyun yapısı bozularak, ışık geçirgenliğini azalır, fotosentez engellenir ve çözünmüş oksijen miktarının azalmasına neden olur (Berradi et al., 2019; Sarker et al., 2019). Ayrıca azo boyaların ve ara ürünlerinin insanlar üzerinde de olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu boyalar, topraklarda birikip, biyobirikim yoluyla içme suyu kanallarına taşınabilmektedir (Salter-Blanc et al., 2016). Örneğin; Reactive

Brilliant Red boyası, insanda serum albümini inhibe ettiği, kas kasılmasına/spazmlara neden olduğu ve vücut enzimlerine bağlanarak işlevlerinde değişikliğe yol açtığı bildirilmiştir (Selvaraj et al., 2021). Dispersol Black boyasının ise kanserojen ve mutajen özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir (Carneiro et al., 2010). Sentetik boyaların doğal yollarla bozunarak giderilmesi süreci yeterli olmadığından (Berradi et al., 2019), azo boyaların ve diğer boyaların giderimi güncel ve önemli bir araştırma konusudur.

### **1.2) Antrakinon Boyalar**

Antrakinon boyalar, reaktif boyalar arasında azo boyalardan sonra ikinci en büyük gruptur (Cai et al., 2021). Ayrıca, doğada genel olarak glikozidik formlar halinde bulunan, doğal olarak oluşan antrakinonlar, en büyük doğal kinon grubunu oluşturur (Shahid et al., 2019). Kimyasal yapısında  $=C=O$  kromofor grubu ile karakterizedir (Padmanaban et al., 2013). Aromatik halkaların birbirine bağlandığı yapının varlığından ve karmaşık yapılarından dolayı parçalanmaya karşı oldukça dirençlidir. Katalitik olarak parçalanması zor olan antioksidan diantron grubu içerir. Bu yüzden, bu boyalar çevrede ciddi kirliliğe neden olmaktadır. Antrakinon boyaların bakteriyel parçalanmasıyla ilgili çalışmalar giderek artmaktadır. Bununla birlikte, bu boyaların parçalanması için gerekli enzimleri genellikle mantarlardan elde edildiği bilinmektedir (Li et al., 2019).

### **1.3) Trifenilmetan Boyalar**

Trifenilmetan boyalar, kimyasal yapılarındaki tritil grubuyla karakterize edilen aromatik ksenobiyotik bileşiklerdir. Bu boyalar, biyosit olarak tekstilde ve balık yetiştiriciliğinde kullanılan en büyük üçüncü boya sınıfıdır (Carliell et al., 1998; Chen et al., 2009). Ayrıca; gıda, yağ, mum, vernik, plastik ve biyolojik süreçlerdeki örnekler için de boyar madde olarak kullanılabilir (Gregory, 2009). Reaktif trifenilmetan boyalarının artan kullanımı ve bu boyaların atık sularda bulunması, ekoloji için risk teşkil etmektedir. Ayrıca bu boyalar, geleneksel arıtım yöntemlerinden kolaylıkla geçebilmektedir Şimdiye kadar optimize koşullarda bu tür boyaların giderimini sağlayabilen birçok mikroorganizma türü tanımlanmıştır (Ayed et al., 2010).

## 2. TEMEL PEROKSİDAZ TÜRLERİ VE BOYA GİDERİMİNDEKİ KULLANIMLARI

Peroksidazlar (E.C.1.11.1.7), oksidoredüktaz enzim sınıfına ait olup, hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) varlığında iki substrat arasında yükseltgenme-indirgenme (redoks) tepkimelerini katalizleyen enzimlerdir. Prokaryotlardan ökaryotlara kadar birçok canlıda bulunan peroksidazlar; mantarlar, bitkiler, bakteriler ve süt gibi farklı kaynaklardan elde edilebilir. Bu enzimlerin substrat ilgisi, optimum pH ve inhibitör duyarlılığı izoenzimlerine göre değişiklik göstermektedir (Almaz et al., 2021).

Bu başlık altında endüstriyel boyaların gideriminde kullanılan temel peroksidaz türleri ve farklı boyaların giderimindeki etkileri ele alınmıştır. Litaeratürde boya giderimi ve dekolorizasyon için kullanılan peroksidazlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Peroksidazlar ve Boya Gideriminde Kullanımları

| Peroksidaz Türü                | Kullanım Amacı                   | Referans                       |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Horseradish Peroksidaz (HRP)   | Dekolorizasyon                   | (Ulson de Souza et al., 2007)  |
| Horseradish Peroksidaz (HRP)   | Dekolorizasyon                   | (Mohan et al., 2005)           |
| Horseradish Peroksidaz (HRP)   | Dekolorizasyon                   | (Šekuljica et al., 2015)       |
| Horseradish Peroksidaz (HRP)   | Dekolorizasyon                   | (Zhumabekova et al., 2024)     |
| Lignin Peroksidaz (LiP)        | Degredasyon                      | (Ferreira-Leitão et al., 2007) |
| Lignin Peroksidaz (LiP)        | Boya Giderimi                    | (Dube et al., 2024)            |
| Manganez Peroksidaz (MnP)      | Boya giderimi                    | (Rekik et al., 2019)           |
| Manganez Peroksidaz (MnP)      | Degredasyon                      | (Thampraphaphon et al., 2022)  |
| Versatil Peroksidaz (VP)       | Boya giderimi ve detoksifikasyon | (Rybczyńska-Tkaczyk, 2022)     |
| Boya Giderici Peroksidaz (DyP) | Boya giderimi                    | (Lin et al., 2026)             |

|                       |          |                 |                             |
|-----------------------|----------|-----------------|-----------------------------|
| Boya                  | Giderici | Biyoremediasyon | (Duan et al., 2024)         |
| Peroksidaz (DyP)      |          |                 |                             |
| Laktoperoksidaz (LPO) |          | Boya giderimi   | (EL-Fakharany et al., 2019) |
| Rekombinant A2A       | HRP      | Dekolorizasyon  | (Abul et al., 2025)         |
| Rekombinant A2A       | HRP      | Dekolorizasyon  | (Liu et al., 2024)          |

## 2.1. Horseradish Peroksidaz (HRP)

Yaban turpu peroksidazı (HRP), *A. rusticana* bitkisinden elde edilen, yaygın olarak çalışılan bitkisel kaynaklı bir enzim olup, ( $H_2O_2$ ) varlığında çeşitli inorganik ve organik bileşikler okside etme kapasitesine sahip bir oksidoredüktaz enzimidir (Robinson, 2015). HRP,  $H_2O_2$ 'yi parçalar ve çeşitli substratların oksidasyonunu hızlandırır. Son yıllarda, boyar maddeler, fenoller ve ksenobiyotikler gibi tehlikeli kirleticiler HRP enzimi kullanılarak arıtılmıştır (Ulson de Souza et al., 2007). Yapılan birçok çalışmada, HRP'nin  $H_2O_2$  varlığında aromatik azo bileşiklerini parçaladığını, azo boyalarını degrade edip çöktürebildiğini (Mohan et al., 2005; Zhumabekova et al., 2024) ve antrakınon boyalarında parçalanmasını attırdığını göstermektedir (Celebi et al., 2013; Šekuljica et al., 2015).

Mohan ve arkadaşları (2005) yaptıkları bir çalışmada, bitki kaynaklı peroksidaz ile asidik azo boya (Acid Black 10 BX) giderimi incelemişlerdir. Yaban turpu peroksidazını (HRP), yaban turpu köklerinden izole edip hem serbest hem de immobilize formlarının performansını değerlendirmişlerdir. Deneysel verilere göre, boya konsantrasyonu, pH, enzim ve  $H_2O_2$  konsantrasyonunun boya giderim potansiyeli üzerinde önemli rol oynadığını bildirmişlerdir. Akrilamid jel üzerine immobilize edilmiş HRP, serbest HRP'ye göre daha etkili, ancak aljinat ile immobilize HRP'ye kıyasla daha düşük performans sergilemiştir. Ayrıca immobilize edilmiş HRP'nin tekrar tekrar kullanılabilceği de rapor edilmiştir. Sonuç olarak HRP ile azo boya içeren atık suların arıtılabildiği görülmüştür (Mohan et al., 2005).

HRP'nin tekstil boyalarının dekolorizasyonunda uygulanabilirliği S.M.A.G.U. de Souza ve arkadaşları (2007) tarafından da doğrulanmıştır. Yapılan çalışmada optimum pH,  $H_2O_2$  ve enzim miktarı gibi faktörler üzerinde çalışılmış ve remazol turkuaz mavi G133 boyasının yaklaşık %59, lanaset mavi 2R boyasının %94, tekstil atık suyunun ise %52 oranında dekolorize olduğu bildirilmiştir. *Daphnia magna* üzerinde yapılan toksisite testleri ile enzimatik işlem sonrası toksisitede azalma olduğu bildirilirken, *Artemia salina* üzerinde herhangi bir değişiklik olmadığı bildirilmiştir. Bu sonuçlar, HRP'nin farklı boya ve atık sularda biyolojik giderici olarak etkili olabileceğini desteklemektedir (Ulson de Souza et al., 2007).

HRP enziminin, antrakinon boyaların atık sulardan dekolorizasyonunda uygulanabilirliği açısından incelendiği bir diğer çalışma, Šekuljica ve arkadaşları (2015) tarafından yapılmıştır. Çalışmada asidik mavi 225 ve asidik mor 109 (C.I. Acid Blue 225 ve C.I. Acid Violet 109) boyları kullanılmış, enzim konsantrasyonu, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu, sıcaklık, boya konsantrasyonu ve pH gibi parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Her iki boyanın dekolorizasyonu için pH ve sıcaklık profillerinin benzer olduğunu bulmuşlardır. Optimum koşullarda asidik mor 109'un %94,7'si (0,15 IU/mL enzim, 0,4 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 30 mg/L boya, pH 4, 24 °C ve 15 dakika inkübasyon) ve asidik mavi 225'in %89,36'sı (0,15 IU/mL enzim, 0,04 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 30 mg/L boya, pH 5, 24 °C ve 32 dakika inkübasyon) dekolorize edilmiştir. Enzimatik dekolorizasyon sonrası toksisite düşüşü sağlanmıştır. Bu bulgular, HRP'nin antrakinon boyaların atık sulardan etkin bir şekilde giderilmesinde uygulanabilirliğini desteklemektedir (Šekuljica et al., 2015).

Son olarak, PEDMT (poly(ethylene glycol dimethacrylate-N-methacryloyl-amido-L-tryptophan methyl ester)) üzerinde immobilize edilen HRP'nin etkinliği, Zhumabekova ve arkadaşları (2024) tarafından farklı bir çalışmada incelenmiştir. PEDMT'nin yüzey alanı (1103 m<sup>2</sup>/g), gözenek hacmi (1,94 cm<sup>3</sup>/g) ve gözenek boyutu (9,99–55,3 Å) ile HRP immobilizasyonu için uygun olduğunu belirlemişlerdir. PEDMT ile immobilize edilen HRP enzimini kongo kırmızısı (CR) ve reaktif siyah (RB5) boylarının dekolorizasyonu için kullanmışlardır. Optimum çalışma şartları (pH 6,0, sıcaklık; 45–50 °C ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu; %3 (v/v)) belirlenen immobilize enzim, 10 ardışık kullanım sonrası başlangıç aktivitesinin %55'inden fazlasını korumuştur. Dekolorizasyon çalışmaları, CR ve RB5 boyları üzerinde yapılmış ve 30 dakika sonunda pH 6 ve 45 °C'de sırasıyla %98,20 ve %47,99 dekolorizasyon verimi elde edilmiştir. Üç ardışık kullanım sonrası CR ve RB5 için immobilize HRP, başlangıç aktivitesinin %89 ve %27'sini korumuştur (Zhumabekova et al., 2024). Bu sonuçlar, PEDMT-HRP sisteminin atık su arıtımında uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

## 2.2. Lignin Peroksidaz (LiP)

Lignin peroksidazlar, lignini parçalayan enzimlerden biridir. Bu özellik LiP'e ligninaz özelliği kazandırır. Bu enzim sınıfı yapısında temel bir bileşen olarak hem grubu içerir. LiP, C–C ve C–O bağlarını parçalayabilmesinin yanı sıra fenoller polimerize edebilme potansiyeline de sahiptir (Herath et al., 2024).

Ferreira-Leitão ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, metilen mavisinin LiP ile degradasyonunda, reaksiyon koşulları sistematik olarak optimize etmişlerdir. Bu kapsamda, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> fazlalığının enzimi inaktive etmesini önlemek amacıyla peroksiti kademeli olarak eklemiş ve LiP:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> molar oranlarını 1:900'e kadar test etmişlerdir. Optimizasyon çalışmaları sırasında, 30 °C'de 50 mg/L metilen mavisini içeren reaksiyon karışımlarında LiP'in 30

dakika içinde etkin degradasyon sağladığını belirlemişlerdir. Enzim stabilitesi 990 µM'ye kadar peroksit derişimlerinde korunmuş, kademeli peroksit ekleme yaklaşımının ise toplam peroksit miktarının 1980 µM'ye kadar yükseltilebilmesine olanak sağladığı bildirilmiştir. Ayrıca LiP'nin 60 °C'ye kadar yapısal kararlılığını sürdürmesi ile bu yöntemin endüstriyel uygulamalara uyarlanabilirliğini artırdığı sonucuna varılmıştır (Ferreira-Leitão et al., 2007).

Dube ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan bir çalışmada ise *Escherichia coli* ve *Pseudomonas aeruginosa* kültürlerinden elde edilen lignin peroksidazın malaşit yeşili (MG), remazol parlak mavi R (RBBR), kongo kırmızısı (CR) ve azure B (AZ) boyalarının giderimi ve detoksifikasyonundaki etkinliği araştırılmıştır. *E. coli* kaynaklı lignin peroksidaz için AZ boyasının gideriminde optimum koşulların 20 mg/mL enzim, 50 mg/L boya, 1,5 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH 7,0 ve 50 °C olduğu, MG boyasının ise pH 9,0 ve 30 °C'de 20 dakika içinde etkin gideriminin sağlandığını belirlemişlerdir. *P. aeruginosa* kaynaklı lignin peroksidazın AZ boyası gideriminde pH 9,0 ve 40 °C'de, MG gideriminde ise pH 6,0 ve 30 °C'de yüksek performans gösterdiğini rapor etmişlerdir. Her iki enzimin CR ve RBBR boyalarının gideriminde ticari lignin peroksidaza kıyasla daha yüksek bozunma etkinliği sergilediğini de bildirmişlerdir. Ayrıca, enzimatik bozunma sonrası elde edilen ürünlerin *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Proteus mirabilis* ve *E. coli* suşlarının büyümesini desteklemesi, boyaların toksisitesinin enzimatik işlem sonrası önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Bu sonuçlar, bakteriyel kaynaklı lignin peroksidazların endüstriyel boya içeren atık suların arıtımında etkili olduğunu ve çevre dostu biyokatalizörler olarak kullanılabileceği göstermektedir (Dube et al., 2024).

### 2.3. Manganez Peroksidaz (MnP)

Manganez peroksidaz (EC 1.11.1.13; MnP), bir oksidoredüktaz enzimidir. Yapısında hem grubu içeren glikoproteinlerden oluşur. Bu enzim lignolitik aktiviteye ve çevre kirleticilerini biyolojik olarak parçalayabilme potansiyele sahiptir. Özellikle atık sulardan boya gideriminde biyokatalizör olarak ön plana çıkmaktadır (Chang et al., 2021).

Rekik ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, yakın zamanda izole edilen bir beyaz kök fungusu olan *Trametes pubescens* i8 suşundan MnP (MnP TP55) enziminin saflaştırıldığını bildirmişlerdir. MnP TP55'i remazol parlak mavi (Remazol Brilliant Blue), cibacet parlak mavi (Cibacet Brilliant Blue BG), metil yeşili (Methyl Green), indigo karmin (Indigo Carmine), direkt kırmızı 5B (Direct Red 5B), remazol parlak mor 5R (Remazol Brilliant Violet 5R), Poly R-478 ve asit mavisi 158 (Acid Blue 158) dâhil olmak üzere 8 farklı boya türünün parçalanmasında kullanmışlardır. Saf enzimlerin başlangıç boya derişiminin 50 µM olduğu koşullarda, 24 saatlik

sürede sırasıyla %42, %46, %50, %64, %66, %76, %88 ve %95 oranlarında renk giderimi sağladığını bildirmişlerdir (Rekik et al., 2019).

Thampraphaphon ve arkadaşları (2022) yaptıkları bir çalışmada ise 16 beyaz çürükçül mantar izolatu arasında *Trametes hirsuta* PW17-41 suşunun endüstriyel atık sularda bulunan lacivert EC-R, yakut S3B ve süper siyah G boyaalarının gideriminde yüksek etkinlik gösterdiğini belirlemişlerdir. Boya giderimi naylon süngerler üzerinde immobilize edilen mantar miselyumu kullanılarak gerçekleştirilmiş, karbon ve azot kaynağı olarak palm şekeri ve amonyum nitrat varlığında %95,39 dekolorizasyon sağlanmıştır. Optimum koşullarda (pH 5, 30 °C, 100 rpm), atık sudaki arıtım süresi yedi günden güne indirgenmiştir. UV–görünür spektroskopisi ve FTIR spektrumları, boya gideriminin biyodegradasyon yoluyla gerçekleştiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, immobilize *T. hirsuta* hücrelerinin yüksek konsantrasyondaki tekstil boyaalarının gideriminde ve endüstriyel atık su arıtımında etkili bir biyokatalitik sistem sunduğunu göstermektedir (Thampraphaphon et al., 2022).

#### 2.4. Çok Yönlü Peroksidaz (Versatil Peroksidaz)

Çok yönlü peroksidaz (VP), tek bir enzim yapısı olup, yapısında hem MnP'nin hem de LiP'in aktivitelerini içeren hibrit lignolitik enzimdir. Tıpkı manganez peroksidaz ve lignin peroksidaz gibi yüksek redoks potansiyeline sahip olan aromatik bileşikler oksitleyebilmektedir (Ruiz-Deñas et al., 2009). VP, yapısında bir hem grubu içeren oksidoredüktazdır.

Rybczyńska-Tkaczyk (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, *Bjerkandera adusta* CCBAS 930'dan üretilen immobilize edilmiş versatil peroksidazın (icVP/Ba), antikanser ilacı mitoksantronun (MTX) biyolojik renk giderimi ve detoksifikasyon potansiyeli araştırılmıştır. MTX bulunan kültür ortamında elde edilen versatil peroksidazı, %4 sodyum aljinat kullanılarak immobilize etmişlerdir. 95 U/mL enzim aktivitesi koşullarında yürütülen deneylerde, 10 µg/mL MTX'in 72 saat sonunda %95,57 oranında giderildiği belirlenmiştir. MTX'in biyolojik giderimi, fenolik bileşik düzeylerinde %85 ve serbest radikal düzeylerinde %90 oranında azalma ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışma, immobilize edilmiş versatil peroksidazın mitoksantronun etkin bir şekilde giderilebileceğini gösteren ilk çalışma olması bakımından literatürde önemli bir yer tutmaktadır (Rybczyńska-Tkaczyk, 2022).

#### 2.5. Boya Giderici Peroksidaz (DyP)

Boya giderici peroksidazlar (DyP; EC 1.11.1.19), hem grubu içeren enzimler olup, mikrobiyal kökenlidirler. Bu enzimler, boyaaların detoksifikasyonundaki potansiyellerinden dolayı büyük ilgi görmektedir. DyP'ler, boya substratlarını oksitleme açısından geniş bir yelpazeye sahip olmakla birlikte, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin indirgenmesini katalizler (Lin et al., 2026).

Lin ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan bir çalışmada, *Brevibacillus agri*'den elde edilen, yeni bir boya giderici peroksidaz (BaDyP) tanımlanmış ve karakterize edilmiştir. Rekombinant BaDyP, yapısal olarak farklı yedi boyayı etkin biçimde gidermiştir. BaDyP'nin D240E varyantının, reaktif siyah 5'i %96,7, kongo kırmızısını %95,0 ve metilen mavisini ise %93,2 oranında giderdiğini belirlemişlerdir. Bunların yanı sıra BaDyP ile endüstriyel atık suyun giderimi sağlanmış ve %78,1 verimle dekolorizasyon görülmüştür. D240E mutanlığı ile bu değer, %93,3'e yükselmiş ve %19,5'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Sonuç olarak, BaDyP enzimi atık su toksisitesini azaltmış, boyaların yapısal bozunumu FTIR analizi ile doğrulanmıştır (Lin et al., 2026).

Duan ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, *Rhodococcus jostii* kaynaklı boya giderici peroksidaz (DyP; RhDyPB) *Escherichia coli*'de rekombinant olarak üretilmiş ve reaktif mavi 19, eozin Y, indigo karmin ve malaşit yeşili boyalarının giderimindeki etkinliğini araştırmışlardır. Safılaştırılmış RhDyPB'nin tüm boyalar için pH-bağımlı dekolorizasyon sergilediği, en yüksek giderim oranının pH 6,0 koşullarında malaşit yeşili için %94,4 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca RhDyPB ekspresyonunun reaktif mavi 19, indigo karmin ve malaşit yeşili için giderim hızlarını artırdığını rapor etmişlerdir. Bu çalışma ile DyP enzimlerinin ve DyP eksprese eden hücre sistemlerinin boya içeren atık suların biyoremediasyonunda etkili bir yaklaşım sunduğu gösterilmektedir (Duan et al., 2024).

## 2.6. Laktoperoksidaz (LPO)

Laktoperoksidaz (LPO) enzimi, merkezinde kovalent bağlı bir hem grubu içerir ve yaklaşık olarak 78 kDa moleküler ağırlığa sahip glikoproteindir. Memelilerin vücut sıvılarından salgılanan önemli bir peroksidaz enzimidir. LPO'nun temel işlevi,  $H_2O_2$  varlığında oksidasyon reaksiyonlarını katalizlemektir. Ayrıca yüksek biyolojik ve antimikrobiyal aktiviteye sahiptir (EL-Fakharany et al., 2019).

EL-Fakharany ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, silika nanopartiküller üzerine immobilize edilen laktoperoksidazın (LPO) sentetik boya giderimini artırdığını göstermişlerdir. LPO ile immobilize edilmiş silika nanopartiküllerin  $H_2O_2$  varlığında, kristal viyole ve Coomassie Blue R250 boyalarının 6 saat içerisinde %100'ünü, kongo kırmızısının  $H_2O_2$  varlığında %90,6'sını, yokluğunda ise %79,3'ünü, metil kırmızısının ise %85'ini giderdiğini bildirmişlerdir. Bu bulgular, peroksidazların oksidasyon yoluyla boya giderimi gerçekleştirebildiğini ve aynı zamanda enzim-nanopartikül sistemleriyle de uygulanabilirliğini göstermektedir (EL-Fakharany et al., 2019).

## 2.7. Rekombinant Peroksidazlar

Rekombinant DNA teknolojisi, doğada kendiliğinden bir arada bulunması mümkün olmayan, genetik mühendisliği teknikleri kullanılarak farklı kaynaklardan elde edilen DNA parçalarının in vitro olarak kesilip birleştirilmesi işlemlerini kapsamaktadır. Bu teknoloji birçok protein, enzim ve hormon üretimini mümkün kılmaktadır. Doğal protein kaynakları sınırlıdır ve istenen ürünün konsantrasyonu genelde düşüktür. Bu durum, doğal proteinlerin ekstraksiyonunu çok daha pahalı ve zor hale getirmektedir. Dolayısıyla, genetiği değiştirilen organizmalardan yüksek seviyede protein üretimi, doğal kaynaklardan protein ekstraksiyonuna önemli bir alternatif sağlar. Özellikle mikroorganizmalar, hızlı büyüme oranları ve genetik olarak manipülasyonlarının kolaylığı sebebiyle rekombinant protein üretiminde sıklıkla kullanılan konakçılar arasındadır (Mattanovich et al., 2012).

Literatürde, boya gideriminde kullanılmak üzere, yüksek verimde elde edilebilmesi ve kolay şekilde saflaştırılması bakımından peroksidazların rekombinant üretimi ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Bu peroksidazlardan biri HRP'dir. Doğal HRP, çok sayıda izoenzim formu içermesi, disülfid bağları ve glikozilasyon gibi yapısal özellikleri nedeniyle saflaştırılması zor ve maliyetlidir. Ayrıca farklı izoenzimlerin aktivite ve stabilite özellikleri değişkenlik gösterebilmektedir (Passardi et al., 2005). Dolayısıyla, bu sınırlılıkları aşmak için rekombinant üretim sistemleri geliştirilmiştir. Özellikle *Komagataella phaffii* gibi ökaryotik sistemler, stabil ve yüksek aktiviteye sahip HRP izoenzimlerinin üretimi için uygun bir platform sunmaktadır (Abul et al., 2025). Bu sistem, yüksek düzeyde salgılama, doğru katlanma, glikozilasyon ve enzimin tek adımda afinite tekniğiyle saflaştırılması gibi avantajlar sağlar. Bu sayede, HRP'nin farklı boya türlerinde etkinliği korunurken, üretim süreci daha kontrollü ve ekonomik hâle gelir.

Abul ve arkadaşları (2025) tarafından bildirildiği üzere, *K. phaffii* hücreleri tarafından salgılanan ve afinite tekniğiyle tek adımda saflaştırılan rekombinant HRP A2A (rHRP A2A) izoenzimi, asit mavi 113, alizarin kırmızısı ve remazol parlak mavi R boyalarını giderim potansiyeli açısından incelemişlerdir. 0,006 EU/mL rHRP A2A ile yapılan renk giderimlerinde asit mavi 113, alizarin kırmızısı ve remazol parlak mavi R için sırasıyla %71,27, %62,26 ve %31,22 dekolorizasyon gözlemlenmiştir. ABTS redoks aracısının ise, elektron transferini hızlandırarak boyaların daha kısa sürede ve yüksek verimde dekolorizasyonunu sağladığı bildirilmiştir.

Bir diğer rekombinant enzim ile boya giderimi Liu ve arkadaşları (2024) tarafından *Ganoderma lucidum* kaynaklı rekombinant DyP peroksidazı (GIDyP2) üzerine yapılmıştır. *G. lucidum*' dan elde ettikleri GIDyP2 geni *E. coli*'de heterolog olarak ifade ettirilmiş olan rekombinant enzimin gualikol'e

karşı en güçlü afiniteyi ve en dikkat çekici katalitik verimliliği sergilediğini bildirmişlerdir. Ayrıca reaktif mavi 19, reaktif parlak mavi X-BR, reaktif siyah 5, metil turuncu, tripan mavisi ve malaşit yeşili dâhil olmak üzere çeşitli boyalara karşı renk giderme ve detoksifikasyon özellikleri sergilediği görülmüştür. GIDyP2'nin stabil çalışabildiği optimum şartlarını pH 4, 35 °C (ABTS substratı için) ve T<sub>50</sub> değerini 51 °C olarak belirlemişlerdir. Bu şartlarda immobilize edilmeden de çeşitli boyaları hem dekolorize etmiş hem de toksisitesini azaltmıştır. Bu çalışma rekombinant GIDyP2'nin atık sulardaki boyaların arıtımında uygulanabilirliğini göstermektedir (Liu et al., 2024).

### 3. SONUÇ

Enzim temelli biyokatalitik sistemler, peroksidaz enzimleri aracılığıyla dirençli endüstriyel boyaların gideriminde çevre dostu, çevreyle uyumlu ve oldukça etkili bir alternatif oluşturmaktadır. Doğal peroksidazların izoenzim çeşitliliği nedeniyle saflaştırma zorluğu ve maliyetinin fazla olması kullanımı kısıtlamaktadır. Dolayısıyla, rekombinant peroksidazların geliştirilmesi ve moleküler düzeyde iyileştirilmesi, atık sulardan boyaların giderilmesinde sürdürülebilir, kontrollü ve uygulanabilirlik açısından önemini artırmaktadır. Gelecekte, rekombinant üretimin, enzim mühendisliği stratejileriyle daha ileriye taşınarak endüstri kaynaklı atıkların karıştığı kirli suların ve toprakların arıtımında daha yaygın olarak kullanılacağı öngörülmektedir.

### REFERANSLAR

- Abul, N., Yildiz Arslan, S., Unver, Y., & Ozdemir, H. (2025). Decolorization of Azo and Anthraquinone Dyes Using Recombinant Horseradish Peroxidase A2A Isoenzyme Produced by *Komagataella phaffii*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 197(7), 4547–4564. <https://doi.org/10.1007/s12010-025-05239-8>
- Ahmed, I., M. N. Iqbal, H., & Dhama, K. (2017). Enzyme-Based Biodegradation of Hazardous Pollutants – An Overview. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 5(4). [https://doi.org/10.18006/2017.5\(4\).402.411](https://doi.org/10.18006/2017.5(4).402.411)
- Almaz, Z., Oztekin, A., Abul, N., Gerni, S., Erel, D., Kocak, S. M., Sengül, M. E., & Ozdemir, H. (2021). A new approach for affinity-based purification of horseradish peroxidase. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 68(1). <https://doi.org/10.1002/bab.1899>

- Ayed, L., Chaieb, K., Cheref, A., & Bakhrouf, A. (2010). Biodegradation and decolorization of triphenylmethane dyes by *Staphylococcus epidermidis*. *Desalination*, 260(1–3). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.052>
- Bansal, N., & Kanwar, S. S. (2013). Peroxidase(s) in environment protection. In *The Scientific World Journal* (Vol. 2013). <https://doi.org/10.1155/2013/714639>
- Berradi, M., Hsissou, R., Khudhair, M., Assouag, M., Cherkaoui, O., El Bachiri, A., & El Harfi, A. (2019). Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs. In *Heliyon* (Vol. 5, Issue 11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02711>
- Bilal, M., Bagheri, A. R., Vilar, D. S., Aramesh, N., Eguiluz, K. I. B., Ferreira, L. F. R., Ashraf, S. S., & Iqbal, H. M. N. (2022). Oxidoreductases as a versatile biocatalytic tool to tackle pollutants for clean environment – a review. In *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (Vol. 97, Issue 2). <https://doi.org/10.1002/jctb.6743>
- Bilal, M., Rasheed, T., Sosa-Hernández, J. E., Raza, A., Nabeel, F., & Iqbal, H. M. N. (2018). Biosorption: An interplay between marine algae and potentially toxic elements—A review. In *Marine Drugs* (Vol. 16, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/md16020065>
- Cai, J., Pan, A., Li, Y., Xiao, Y., Zhou, Y., Chen, C., Sun, F., & Su, X. (2021). A novel strategy for enhancing anaerobic biodegradation of an anthraquinone dye reactive blue 19 with resuscitation-promoting factors. *Chemosphere*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127922>
- Carliell, C. M., Barclay, S. J., Shaw, C., Wheatley, A. D., & Buckley, C. A. (1998). The effect of salts used in textile dyeing on microbial decolourisation of a reactive azo dye. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 19(11). <https://doi.org/10.1080/09593331908616772>
- Carneiro, P. A., Umbuzeiro, G. A., Oliveira, D. P., & Zanoni, M. V. B. (2010). Assessment of water contamination caused by a mutagenic textile effluent/dyehouse effluent bearing disperse dyes. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1–3). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.106>
- Celebi, M., Kaya, M. A., Altikatoglu, M., & Yildirim, H. (2013). Enzymatic decolorization of anthraquinone and diazo dyes using horseradish peroxidase enzyme immobilized onto various polysulfone supports. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 171(3). <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0377-x>
- Chang, Y., Yang, D., Li, R., Wang, T., & Zhu, Y. (2021). Textile dye biodecolorization by manganese peroxidase: A review. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 15). <https://doi.org/10.3390/molecules26154403>

- Chen, C. Y., Kuo, J. T., Cheng, C. Y., Huang, Y. T., Ho, I. H., & Chung, Y. C. (2009). Biological decolorization of dye solution containing malachite green by *Pandora pulmonicola* YC32 using a batch and continuous system. *Journal of Hazardous Materials*, 172(2–3). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.009>
- Cui, M. H., Cui, D., Gao, L., Wang, A. J., & Cheng, H. Y. (2016). Azo dye decolorization in an up-flow bioelectrochemical reactor with domestic wastewater as a cost-effective yet highly efficient electron donor source. *Water Research*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.027>
- Das, A., & Mishra, S. (2017). Removal of textile dye reactive green-19 using bacterial consortium: Process optimization using response surface methodology and kinetics study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.10.005>
- Duan, X., Pi, Q., & Tang, L. (2024). pH-dependent and whole-cell catalytic decolorization of dyes using recombinant dye-decolorizing peroxidase from *Rhodococcus jostii*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 47(3). <https://doi.org/10.1007/s00449-024-02968-8>
- Dube, S. L., Osunsanmi, F. O., Ikhane, A. O., Mosa, R. A., & Opoku, A. R. (2024). Biodegradation and Detoxification of Some Dyes by Crude Lignin Peroxidase Complex Produced by *Escherichia coli* Accession No: LR0250096.1 and *Pseudomonas aeruginosa* Accession No: CP031449.2. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/app14178012>
- Durán, N., & Esposito, E. (2000). Potential applications of oxidative enzymes and phenoloxidase-like compounds in wastewater and soil treatment: A review. In *Applied Catalysis B: Environmental* (Vol. 28, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(00\)00168-5](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(00)00168-5)
- EL-Fakharany, E. M., Abd-Elhamid, A. I., & El-Deeb, N. M. (2019). Preparation and characterization of novel nanocombination of bovine lactoperoxidase with Dye Decolorizing and anti-bacterial activity. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44961-2>
- Ferreira-Leitão, V. S., de Carvalho, M. E. A., & Bon, E. P. S. (2007). Lignin peroxidase efficiency for methylene blue decolouration: Comparison to reported methods. *Dyes and Pigments*, 74(1). <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.02.002>
- Gregory, P. (2009). Dyes and Dye Intermediates. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0425051907180507.a01.pub2>
- Herath, I. S., Udayanga, D., Jayasanka, D. J., & Hewawasam, C. (2024). Textile dye decolorization by white rot fungi – A review. In *Bioresource Technology Reports* (Vol. 25). <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101687>

- Husain, Q. (2010). Peroxidase mediated decolorization and remediation of wastewater containing industrial dyes: A review. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 9, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s11157-009-9184-9>
- Kalyani, D. C., Telke, A. A., Dhanve, R. S., & Jadhav, J. P. (2009). Ecofriendly biodegradation and detoxification of Reactive Red 2 textile dye by newly isolated *Pseudomonas* sp. SUK1. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2–3). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.020>
- Li, H. hong, Wang, Y. tao, Wang, Y., Wang, H. xia, Sun, K. kai, & Lu, Z. mei. (2019). Bacterial degradation of anthraquinone dyes. In *Journal of Zhejiang University: Science B* (Vol. 20, Issue 6). <https://doi.org/10.1631/jzus.B1900165>
- Lin, W., Lin, W., Yang, L., Zhang, C., Li, X., Xiao, J., Chen, X., Cai, F., Chen, C., Zhang, M., Zhang, Y., & Li, L. (2026). Characterization of a novel Dye-Decolorizing peroxidase from *Brevibacillus agri* and its application in detoxification of textile industry wastewater. *Bioresource Technology*, 440. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133430>
- Liu, D., Diao, W., Chen, H., Qi, X., Fang, H., Yu, X., Li, L., Bai, Y., & Liang, C. (2024). Heterologous expression and characterization of a dye-decolorizing peroxidase from *Ganoderma lucidum*, and its application in decolorization and detoxification of different types of dyes. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 40(10). <https://doi.org/10.1007/s11274-024-04084-x>
- Mattanovich, D., Branduardi, P., Dato, L., Gasser, B., Sauer, M., & Porro, D. (2012). Recombinant protein production in yeasts. *Methods in Molecular Biology*, 824. [https://doi.org/10.1007/978-1-61779-433-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-61779-433-9_17)
- Mishra, S., & Maiti, A. (2018). The efficacy of bacterial species to decolourise reactive azo, anthroquinone and triphenylmethane dyes from wastewater: a review. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 25, Issue 9). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1273-2>
- Mohan, S. V., Prasad, K. K., Rao, N. C., & Sarma, P. N. (2005). Acid azo dye degradation by free and immobilized horseradish peroxidase (HRP) catalyzed process. *Chemosphere*, 58(8). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.070>
- O'Neill, C., Hawkes, F. R., Hawkes, D. L., Lourenço, N. D., Pinheiro, H. M., & Delée, W. (1999). Colour in textile effluents - Sources, measurement, discharge consents and simulation: A review. In *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (Vol. 74, Issue 11). [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199911\)74:11<1009::AID-JCTB153>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199911)74:11<1009::AID-JCTB153>3.0.CO;2-N)
- Padmanaban, V. C., Prakash, S. S., Sherildas, P., Jacob, J. P., & Nelliparambil, K. (2013). Biodegradation of Anthraquinone Based Compounds: Review.

- Pajot, H. F., Martorell, M. M., & De Figueroa, L. I. C. (2014). Ecology of dye decolorizing yeasts. In *Bioremediation in Latin America: Current Research and Perspectives*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05738-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05738-5_14)
- Passardi, F., Cosio, C., Penel, C., & Dunand, C. (2005). Peroxidases have more functions than a Swiss army knife. In *Plant Cell Reports* (Vol. 24, Issue 5). <https://doi.org/10.1007/s00299-005-0972-6>
- Rasheed, T., Bilal, M., Nabeel, F., Iqbal, H. M. N., Li, C., & Zhou, Y. (2018). Fluorescent sensor based models for the detection of environmentally-related toxic heavy metals. In *Science of the Total Environment* (Vol. 615). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.126>
- Rasheed, T., Li, C., Bilal, M., Yu, C., & Iqbal, H. M. N. (2018). Potentially toxic elements and environmentally-related pollutants recognition using colorimetric and ratiometric fluorescent probes. In *Science of the Total Environment* (Vols. 640–641). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.232>
- Rekik, H., Zarái Jaouadi, N., Bouacem, K., Zenati, B., Kourdali, S., Badis, A., Annane, R., Bouanane-Darenfed, A., Bejar, S., & Jaouadi, B. (2019). Physical and enzymatic properties of a new manganese peroxidase from the white-rot fungus *Trametes pubescens* strain i8 for lignin biodegradation and textile-dyes biodecolorization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.053>
- Robinson, P. K. (2015). Enzymes: principles and biotechnological applications. *Essays in Biochemistry*, 59. <https://doi.org/10.1042/BSE0590001>
- Routoula, E., & Patwardhan, S. V. (2020). Degradation of Anthraquinone Dyes from Effluents: A Review Focusing on Enzymatic Dye Degradation with Industrial Potential. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 54, Issue 2). <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03737>
- Ruiz-Dueñas, F. J., Morales, M., García, E., Miki, Y., Martínez, M. J., & Martínez, A. T. (2009). Substrate oxidation sites in versatile peroxidase and other basidiomycete peroxidases. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 60, Issue 2). <https://doi.org/10.1093/jxb/ern261>
- Rybczyńska-Tkaczyk, K. (2022). Bioremoval and Detoxification of the Anticancer Drug Mitoxantrone Using Immobilized Crude Versatile Peroxidase (icVP/Ba) Bjerkandera adusta CCBAS 930. *Biology*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/biology11111553>
- Salter-Blanc, A. J., Bylaska, E. J., Lyon, M. A., Ness, S. C., & Tratnyek, P. G. (2016). Structure-Activity Relationships for Rates of Aromatic Amine Oxidation by

- Manganese Dioxide. *Environmental Science and Technology*, 50(10).  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00924>
- Saratale, R. G., Saratale, G. D., Kalyani, D. C., Chang, J. S., & Govindwar, S. P. (2009). Enhanced decolorization and biodegradation of textile azo dye Scarlet R by using developed microbial consortium-GR. *Bioresource Technology*, 100(9). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.013>
- Sarker, M., Shin, S., Jeong, J. H., & Jhung, S. H. (2019). Mesoporous metal-organic framework PCN-222(Fe): Promising adsorbent for removal of big anionic and cationic dyes from water. *Chemical Engineering Journal*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.039>
- Šekuljica, N., Prlainović, N., Stefanović, A. B., Žuža, M. G., Čičkarić, D. Z., Mijin, D., & Knezevic-Jugovic, Z. D. (2015). Decolorization of anthraquinonic dyes from textile effluent using horseradish peroxidase: Optimization and kinetic study. *Scientific World Journal*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/371625>
- Sellami, K., Couvert, A., Nasrallah, N., Maachi, R., Abouseoud, M., & Amrane, A. (2022). Peroxidase enzymes as green catalysts for bioremediation and biotechnological applications: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 806). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150500>
- Selvaraj, V., Swarna Karthika, T., Mansiya, C., & Alagar, M. (2021). An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications. In *Journal of Molecular Structure* (Vol. 1224). <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129195>
- Shahid, M., Wertz, J., Degano, I., Aceto, M., Khan, M. I., & Quye, A. (2019). Analytical methods for determination of anthraquinone dyes in historical textiles: A review. In *Analytica Chimica Acta* (Vol. 1083). <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.07.009>
- Sudha, M., & Saranya, a. (2014). Microbial degradation of Azo Dyes: A review. *Int. J. Curr. Microbiol. ...*, 3(2).
- Thampraphaphon, B., Phosri, C., Pisutpaisal, N., Thamvithayakorn, P., Chotelersak, K., Sarp, S., & Suwannasai, N. (2022). High Potential Decolourisation of Textile Dyes from Wastewater by Manganese Peroxidase Production of Newly Immobilised *Trametes hirsuta* PW17-41 and FTIR Analysis. *Microorganisms*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050992>
- Ulson de Souza, S. M. A. G., Forgiarini, E., & Ulson de Souza, A. A. (2007). Toxicity of textile dyes and their degradation by the enzyme horseradish peroxidase (HRP). *Journal of Hazardous Materials*, 147(3). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.003>

- Wesenberg, D., Kyriakides, I., & Agathos, S. N. (2003). White-rot fungi and their enzymes for the treatment of industrial dye effluents. *Biotechnology Advances*, 22(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.011>
- Zhumabekova, A., Noma, S. A. A., Tümay Özer, E., & Osman, B. (2024). Decolorization of Congo Red and Reactive Black 5 Dyes with Horseradish Peroxidase-Immobilized Cross-Linked Polymeric Microbeads. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(7). <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08748-6>



# **Genom Düzenleme Araçları**

**İbrahim DAĞCI<sup>1</sup>**

**Yağmur ÜNVER<sup>2</sup>**

1- İbrahim DAĞCI; Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Moleküler Biyoloji ve Genetik Ana Bilim Dalı. [ibrahim.dagci16@ogr.atauni.edu.tr](mailto:ibrahim.dagci16@ogr.atauni.edu.tr) ORCIDNo: 0000-0002-6354-2654

2- Doç. Dr. Yağmur ÜNVER; Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü. [yunver@atauni.edu.tr](mailto:yunver@atauni.edu.tr) ORCIDNo: 0000-0003-1497-081X

## ÖZET

Genom düzenleme teknolojileri, genom üzerinde hedefe yönelik ve kontrollü değişiklikler yapılmasını mümkün kılarak modern biyolojinin en hızlı gelişen alanlarından biri hâline gelmiştir. Bu alandaki ilk yaklaşımlar protein temelli sistemlere dayanırken, zamanla CRISPR tabanlı teknolojilerin geliştirilmesi gen düzenlemeyi daha esnek, erişilebilir ve yaygın biçimde uygulanabilir kılmıştır. Takip eden yıllarda ise, çift zincir kırığına dayalı düzenlemelerin sınırlılıklarını aşmayı amaçlayan yeni nesil yöntemler ortaya çıkmış; DNA'yı kesmeden veya genom bütünlüğünü bozmadan daha hassas müdahaleler yapılabilmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu gelişmeler, genetik düzenlemenin yalnızca tek tek genleri değiştirmekle sınırlı olmadığını, aynı zamanda genomun daha geniş yapısal ve işlevsel düzeylerde yeniden ele alınabileceğini göstermiştir. Bu bağlamda gen düzenleme teknolojilerinin gelişimi, baz düzeyindeki hassas değişikliklerden başlayarak gen bölgelerinin, düzenleyici elementlerin ve hatta daha büyük genomik segmentlerin kontrollü biçimde yeniden düzenlenmesine kadar uzanan çok katmanlı bir süreci yansıtmaktadır. Ancak teknik kapasitedeki bu artışa rağmen, genomun karmaşık organizasyonu, hücrel bağlama özgü yanıtlar ve yapılan müdahalelerin uzun vadeli biyolojik sonuçları hâlen tam olarak anlaşılmış değildir. Bu durum, gen düzenlemeyi yalnızca bir mühendislik problemi olmaktan çıkararak, temel biyolojik bilinmezliklerle iç içe geçmiş dinamik bir araştırma alanı hâline getirmektedir. Buna karşın günümüzde geliştirilen genetik düzenleme araçları, daha güvenli, daha öngörülebilir ve daha kesin genetik müdahalelerin mümkün olabileceği bir geleceğin altyapısını oluşturmakta; birçok hastalığın tedavisine yönelik yeni ve etkili yaklaşımların geliştirilmesi için umut vadetmektedir.

***Anahtar Kelimeler** – Genom düzenleme, CRISPR teknolojileri, Yeni nesil genom mühendisliği, Köprü rekombinaz, Prime düzenleme*

---

## GİRİŞ

### ***Genom Düzenleme Araçlarının Kısa Tarihçesi***

Genom düzenleme, moleküler biyolojinin en hızlı gelişen ve yaşam bilimlerinin yönünü kökten değiştiren alanlarından biridir. Genomu doğrudan

hedef olarak, belirli DNA dizilerinde kontrollü değişiklikler yapma olanağı sunan bu teknoloji, yalnızca biyolojik sistemleri anlamamızı derinleştirmekle kalmamış, aynı zamanda kalıtsal hastalıkların tedavisinden tarımsal verimliliğin artırılmasına kadar geniş bir uygulama alan meydana getirmiştir. Günümüzde genomu yeniden programlama araçları, canlılığın temel kodunu düzenleyebilme kapasitemizle, insanlığın doğa üzerindeki müdahalesinin en ileri noktalarından birini temsil etmektedir. Bu alanın tarihsel temelleri, 1953 yılında James Watson, Francis Crick ve Rosalind Franklin'in DNA'nın üç boyutlu çift sarmal yapısını tanımlamalarıyla atılmıştır (Watson and Crick 1953). Franklin'in X-ışını kristalografisiyle elde ettiği "Fotoğraf 51", DNA'nın helikal yapısının çözülmesinde belirleyici olmuştur. Bu keşif, genetik bilginin kimyasal doğasını anlamamıza ve kalıtımın moleküler temellerini çözümlememize olanak tanımıştır (Sutton n.d.). 1970'lerde bakteriyel savunma sistemlerinin moleküler analizleri sırasında keşfedilen restriksiyon endonükleazları, DNA'nın belirli dizilerden kesilmesine olanak sağlayarak rekombinant DNA teknolojisinin anahtarı hâline gelmiştir. Bu enzimler sayesinde DNA, öngörülebilir ve tekrar edilebilir biçimlerde manipüle edilebilmiş ve klonlama süreçleri standartlaştırılmıştır. Smith ve Nathans tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, genomik DNA'nın yapısal karakterizasyonu ve modüler manipölasyonu açısından dönüm noktası niteliğindedir (Smith and Nathans 1973). Restriksiyon enzimlerinin keşfi aynı zamanda genom manipölasyonunun mekanik bir işlem hâline gelmesinin başlangıcı olmuştur. 1970'lerde geliştirilen restriksiyon endonükleazları ve DNA ligaz enzimleri, DNA'nın belirli bölgelerinden kesilip yeniden birleştirilmesine imkân tanıyarak rekombinant DNA teknolojisine doğmasına yol açmıştır (Loenen et al. 2014; Roberts 2005). Bu dönemde ilk transgenik bakterilerin, bitkilerin ve hayvanların üretilmesi, genetik bilginin laboratuvar ortamında yeniden düzenlenebileceğini göstermiştir. Rekombinant DNA teknolojisi ve restriksiyon enzimlerinin kullanımı, transgenik organizmaların sistematik biçimde geliştirilmesine olanak sağlamış; 1980'lerin başında fare genomuna yabancı DNA aktarılması memeli genetiğinin değiştirilebilirliğini ortaya koymuştur (Palmiter and Brinster 1986). 1980'lerin sonuna gelindiğinde genetik modifikasyonun tarımsal biyoteknolojiye uygulanması, transgenik bitkilerin küresel ölçekte yaygınlaşmasına ve biyoteknolojik dönüşümün tarımsal üretime taşınmasına zemin hazırlamıştır. Böylece transgenik organizmalar, bu dönemde bilimsel bir araç olmanın ötesine geçerek biyoteknolojinin endüstriyel ve etik tartışmalarının merkezine yerleşmiştir. Bu gelişmelerin devamında, 1980'ler ve 1990'larda genetik müdahaleyi daha hedefli hale getirme arayışları öne çıkmış; homolog rekombinasyon ve transpozon tabanlı sistemlerin geliştirilmesi, araştırmacılara genom üzerinde daha kontrollü değişiklikler yapma olanağı sunmuştur. Ancak bu yöntemlerin düşük verimlilikleri ve organizma türüne bağlı teknik sınırlılıkları, geniş ölçekli uygulamaların önünde önemli engeller oluşturmıştır. Bu dönemde araştırmacılar, doğada DNA'yı tanıyabilen ve

kesebilen sistemleri yapay biçimde yönlendirebilmenin yollarını aramaya başlamıştır. Bu çabalar, 2000’li yılların başında çinko parmak nükleazları (ZFN; Zinc Finger Nucleases) ve transkripsiyon aktivatörü benzeri efektör nükleazları (TALEN; Transcription activator-like effector nucleases) sistemlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Chandrasegaran and Carroll 2016). Her ne kadar bu araçlar genetik hedefleme açısından önemli bir dönüm noktası olsa da yüksek maliyet, zorlu tasarım süreçleri ve sınırlı özgüllük gibi sorunlar, daha basit ve etkili sistem arayışlarını sürdürmüştür. Bu arayış, 2012 yılında CRISPR-Cas9 sisteminin keşfiyle devrimsel bir döneme girmiştir. Bakteriyel bağışıklık sisteminden uyarlanan bu teknoloji, rehber RNA aracılığıyla genomdaki spesifik dizilerin kolayca hedeflenmesine ve kesilmesine olanak tanıyarak gen düzenlemeyi erişilebilir, hızlı ve yüksek doğrulukta bir süreç haline getirmiştir (Jinek et al. 2012). CRISPR-Cas9’un başarısı, yalnızca genom düzenlemenin sınırlarını genişletmekle kalmamış, aynı zamanda baz düzenleme (base editing), prime düzenleme (prime editing) ve epigenetik yeniden programlama gibi alt teknolojilerin gelişimini de tetiklemiştir. Böylece, gen düzenleme yalnızca DNA dizisini değiştirme aracı olmaktan çıkarak, gen ifadesini, epigenetik durumları ve hatta hücresel kaderi yeniden tanımlayabilen bir biyoteknolojik devrim haline gelmiştir. Bugün gelinen noktada, genom düzenleme teknolojileri, insan hastalıklarının tedavisinde klinik uygulamalara doğru hızla ilerlemekte; nadir genetik hastalıklardan kansere, nörolojik bozukluklardan viral enfeksiyonlara kadar birçok alanda umut vadetmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojilerin etik, güvenlik ve toplumsal etkilerine ilişkin tartışmalar da giderek derinleşmektedir.

### ***Gen Düzenlemenin Temel Prensipleri***

Gen düzenleme, genomun belirli bölgelerinde hedefe yönelik değişikliklerin yapılmasını sağlayan moleküler mekanizmalara dayanır. Bu teknolojilerin altında yatan temel prensip, DNA dizisinin tanınması, kontrollü biçimde kesilmesi ve hücresel onarım sistemlerinin bu kırıkları yeniden birleştirerek istenen genetik değişikliğin gerçekleşmesini sağlamasıdır. Dolayısıyla gen düzenlemenin başarısı, hem DNA hedef tanıma doğruluğuna hem de DNA onarım yollarının etkinliğine bağlıdır (Lieber 2010; Mengstie and Wondimu 2021). Gen düzenleme teknolojilerinin temelini, hedef DNA üzerinde kontrollü biçimde oluşturulan çift zincir kırıkları (DSBs; Double-Strand Breaks) oluşturur. ZFN, TALEN ve CRISPR-Cas9 gibi platformlar, bu kırıkları oluşturarak hücrenin endojen DNA onarım mekanizmalarını devreye sokar. Bu yaklaşım literatürde “kes ve yapıştır” paradigması olarak tanımlanmaktadır (Jasin and Rothstein 2013). Hücre, genom bütünlüğünü korumak amacıyla DSB’leri hızla onarmaya yönelir; ancak seçilen onarım yolu, ortaya çıkacak genetik değişikliğin niteliğini ve doğruluk düzeyini belirler. Literatürde baskın iki onarım mekanizması öne çıkmaktadır:

Homolog olmayan uç birleştirme (NHEJ; Non-Homologous End Joining) ve Homoloji Yönlendirmeli Onarım (HDR; Homology-Directed Repair). NHEJ, kırık uçlarını herhangi bir şablona ihtiyaç duymadan birleştiren hızlı ve baskın bir mekanizmadır ve çoğu zaman küçük ekleme veya delesyonlara yol açar. Bu nedenle gen işlevinin ortadan kaldırılmasını hedefleyen “knock-out” stratejilerinde tercih edilmektedir (Chang et al. 2017). Buna karşılık HDR, yüksek doğruluk sağlayan ve bir homolog DNA şablonunun rehberliğinde gerçekleşen bir onarım yoludur. Bu özelliği sayesinde, HDR belirli mutasyonların hassas biçimde düzeltilmesi veya dış kaynaklı genetik materyalin genoma doğru konumda entegre edilmesi gibi uygulamalarda kritik bir rol üstlenir (Jasin and Rothstein 2013). Ayrıca HDR etkinliği S ve G2 fazlarında artarken, NHEJ çoğu hücre tipinde hızlı ve baskındır. Bu durum hücre döngüsünün onarım yolu seçimini doğrudan etkilemektedir (Richardson et al. 2016). Dolayısıyla, bir gen düzenleme stratejisinin tasarımında NHEJ ve HDR arasındaki denge, hedef hücre tipi, hücre döngüsü durumu ve düzenlemenin amacı birlikte değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım, gen düzenleme çalışmalarının hem etkinliğini hem de doğruluk düzeyini belirleyen temel faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Başarılı bir gen düzenlemenin ikinci temel unsuru hedef tanıma özgüllüğüdür. Farklı gen düzenleme sistemleri, DNA dizilerini tanımak için farklı mekanizmalar kullanır. Örneğin, ZFN ve TALEN’ler, özel olarak tasarlanmış DNA-bağlayıcı protein bölgeleri aracılığıyla hedefleri tanıırken, CRISPR-Cas sistemleri DNA’ya rehber RNA (guide RNA; gRNA) molekülleri ile yönlendirilir (Doudna and Charpentier 2014; Urnov et al. 2010a). CRISPR sistemlerinde hedef tanıma, gRNA’nın tamamlayıcı baz eşleşmesi ve Cas9 proteininin PAM (protospacer adjacent motif) dizisini tanınması ile sağlanır. Bu moleküler tanıma mekanizmalarının doğruluğu, sistemin özgüllüğünü doğrudan belirler. Ancak, hedef dışı bağlanmalar (off-target) gen düzenleme güvenliğini tehdit ettiğinden, gRNA tasarımı ve Cas proteinlerinin modifikasyonu bu riski azaltacak şekilde optimize edilmektedir (Zhang et al. 2015). Gen düzenleme verimliliği yalnızca moleküler mekanizmalara değil, aynı zamanda hücresel bağlama da bağlıdır. Hücre döngüsünün evresi, özellikle HDR verimini belirleyen kritik bir faktördür ve bu yol en etkin şekilde S ve G2 fazlarında çalışır. Ayrıca kromatin yapısının açıklığı, hedef DNA dizisine erişilebilirliği doğrudan etkiler. Kromatini açık hale getiren düzenleyici proteinlerin veya epigenetik modifikasyonların kullanımı, düzenleme verimini artırabilir. Bir diğer önemli parametre, gen düzenleme bileşenlerinin hücreye teslim edilme yöntemidir. Bu bileşenler DNA, mRNA ya da doğrudan Cas proteini ve gRNA kompleksi (Ribonükleoprotein; RNP) formunda hücreye aktarılabilir. Aktarımda lipid nanopartiküller, elektroporasyon veya viral vektörler sıklıkla kullanılır (Mali et al. 2013). Bu temel prensipler, farklı gen düzenleme teknolojilerinin (ZFN, TALEN, CRISPR-Cas sistemleri ve rekombinazlar gibi) geliştirilmesinin kuramsal temelini oluşturur. Bu araçlar, aynı biyolojik mekanizmaları farklı moleküler

stratejilerle kullanarak genom mühendisliğinde özgüllük, verimlilik ve çok yönlülük kazandırmışlardır. Literatürde kesin bir terminolojik mutabakat olmamakla birlikte, çoğu araştırmacı tarafından mevcut teknolojiler gelişimsel perspektiften birkaç kuşak şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu çerçevede genom düzenleme araçları, (i) ilk kuşakta protein tabanlı bölge spesifik nükleazlar (Meganükleaz, ZFN, TALEN), (ii) ikinci kuşakta CRISPR/Cas sistemleri (Cas9, Cas12, Cas13), (iii) üçüncü kuşakta çift zincir kırığı oluşturmada daha hassas modifikasyonlar gerçekleştiren ileri nesil platformları içerir. Bu kuşak; baz düzeyi modifikasyon sağlayan baz düzenleme (base editing) ve prime düzenleme (prime editing) teknolojilerinin yanı sıra, rekombinaz tabanlı ve DSB-bağımsız sistemlerin genişletildiği yeni nesil köprü rekombinaz (bridge recombinase) stratejilerini de kapsamaktadır. Bu kuşak ayrımını belirleyen temel faktörler, (a) hedefleme mekanizmasının programlanabilirliği, (b) DNA kesme ve onarım süreçlerinin kontrol edilebilirliği, (c) düzenlemenin doğruluk düzeyi, (d) hücrel toksisite ve hedef dışı bağlanma riskleri ve (e) terapötik uygulanabilirlik gibi parametrelerdir. İlk kuşak araçlar genom düzenlemenin temel prensibini ortaya koymuş ve DSB üzerinden hücrel tamiri yönlendirmiş; ikinci kuşak RNA rehberli sistemler programlanabilirliği artırarak genom düzenlemeye uygulanabilirliğini artırmıştır; üçüncü kuşak ise “DSB-free” yaklaşımıyla genomik stabilite ve güvenlik açısından önemli bir paradigma değişimi yaratmıştır.

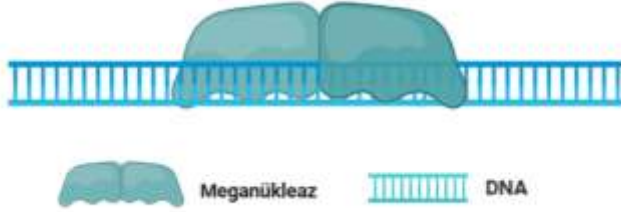
## BİRİNCİ NESİL GEN DÜZENLEME ARAÇLARI

Genom düzenleme teknolojilerinin ilk nesli, ortak olarak protein DNA etkileşimine dayalı hedefleme ve çift zincir kırığı oluşturan endonükleaz aktivitesi ile karakterizedir. Bu dönemde geliştirilen araçlar – meganükleazlar, çinko parmak nükleazları ve transkripsiyon aktivatör benzeri efektör nükleazları– belirli genomik lokuslarda kontrollü DSB oluşturarak hücrenin endojen tamir mekanizmalarını (özellikle NHEJ ve HDR) yönlendirmek üzere tasarlanmıştır. Bu sistemler; transgenik hayvan ve bitki üretimi, gen fonksiyon analizi, hastalık modellerinin oluşturulması ve erken dönem gen tedavisi yaklaşımlarında geniş çaplı olarak kullanılmış, böylece CRISPR tabanlı ikinci nesil teknolojilerin üzerine inşa edildiği kavramsal ve teknik zemini oluşturmuştur (Gaj, Gersbach, and Barbas 2013).

### *Meganükleazlar*

Meganükleazlar (homing endonükleazlar), tipik olarak 14–40 baz çifti uzunluğunda, nadir bulunan tanıma dizilerine bağlanarak yüksek özgüllükle DSB oluşturan doğal endodeoksiribonükleazlardır. Bu enzimler LAGLIDADG, GIY-YIG, His-Cys box gibi çeşitli yapısal ailelere ayrılır ve intron ve intein gibi mobil genetik elementlerin genom içinde yayılımını

kolaylaştırmak üzere işlev görür. Genom düzenleme bağlamında meganükleazların en önemli avantajı, uzun tanıma dizileri nedeniyle son derece düşük hedef dışı bağlanma potansiyeline ve yüksek özgüllüğe sahip olmalarıdır. Model sistemlerde I-SceI ve I-CreI gibi meganükleazlar aracılığıyla homolog rekombinasyonun uyarılması, hedefe yönelik gen yer değiştirme ve gen düzeltme uygulamalarında önemli bir dönüm noktasıdır (Silva et al. 2011). Bununla birlikte, meganükleazların *de novo* yeniden tasarlanması oldukça güçtür; her yeni hedef dizi, aktif merkez mimarisi ve DNA bağlanma yüzeyinin yeniden mühendisliğini gerektirir. Protein mühendisliği ve yönlendirilmiş evrim yaklaşımları ile hedef özgüllüğünün yeniden programlanması mümkün olsa da, süreç yıllar alabilen, maliyetli ve yüksek uzmanlık gerektiren bir yapıya sahiptir. Bu nedenle meganükleazlar, kavramsal olarak genom düzenlemenin başlangıç noktalarından birini temsil etse de, geniş ölçekli genomik tarama ve yüksek verimli uygulamalar için pratik bir platform hâline gelememiş; daha sonra geliştirilen modüler ve kolay programlanabilir sistemler (ZFN, TALEN ve CRISPR) tarafından büyük ölçüde gölgede bırakılmıştır (Silva et al. 2011).

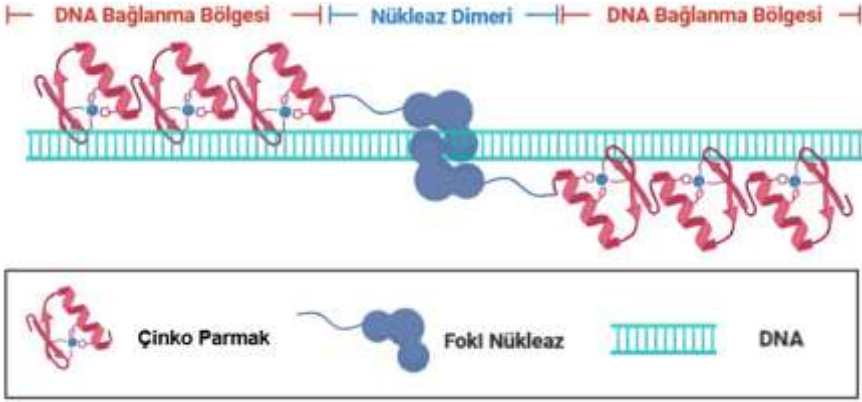


Şekil 1. Meganükleazların Modüler Yapısı (BioRender.com’da oluşturuldu).

### Çinko Parmak Nükleazlar (ZFN)

ZFN, genom üzerinde hedefe özgü çift zincir kırıkları oluşturabilen, protein mühendisliğine dayalı ilk programlanabilir gen düzenleme sistemlerinden biridir. Bu sistemler, DNA’ya özgül olarak bağlanabilen çinko parmak motifleri ile DNA kesme aktivitesine sahip bir endonükleaz alanının füzyonundan oluşur. Her bir çinko parmak motifi tipik olarak üç baz çifti uzunluğundaki bir DNA dizisini tanıyacak şekilde tasarlanabildiğinden, birden fazla motifin art arda bağlanmasıyla genomda uzun ve özgül hedef dizilerin tanınması mümkün hâle gelir (Urnov et al. 2010b). ZFN’lerde DNA kesimi, FokI endonükleaz alanının dimerizasyonuna bağlıdır. Bu nedenle hedef bölgede karşılıklı iki ZFN monomerinin bağlanması gerekir ve bu yapı, kesim özgüllüğünü artıran temel bir güvenlik mekanizması olarak değerlendirilir (Y. G. Kim, Cha, and Chandrasegaran 1996). Hedef bölgede oluşturulan DSB, hücrenin doğal DNA onarım yollarını aktif eder ve bu kırıkların NHEJ veya HDR yoluyla onarılması sonucunda sırasıyla gen nakavtı (knock-out) ya da hassas gen ekleme/düzeltilme (knock-in) uygulamaları gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte ZFN teknolojisinin en

önemli sınırlılığı, her yeni hedef dizisi için özgül DNA-bağlayıcı proteinlerin yeniden tasarlanması ve optimize edilmesinin gerekmesi olup, bu süreç yüksek teknik uzmanlık, uzun geliştirme süresi ve maliyet gerektirmektedir. Ayrıca bağlanma özgülüğünün protein-DNA etkileşimlerine dayanması, bağlam-bağımlı tanıma hatalarına ve hedef dışı (off-target) kesim risklerine yol açabilmektedir (Y. G. Kim, Cha, and Chandrasegaran 1996). Tüm bu sınırlamalarına rağmen ZFN'ler, programlanabilir nükleaz kavramının genom mühendisliğine kazandırılmasında öncü rol oynamış; daha esnek, ölçeklenebilir ve kullanıcı dostu gen düzenleme teknolojilerinin geliştirilmesi için kavramsal ve teknik bir temel oluşturmuştur.

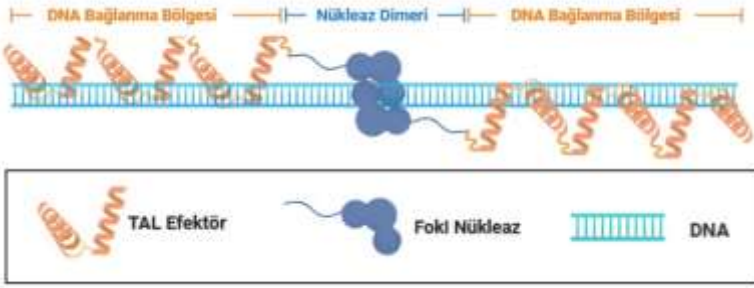


Şekil 2. Çinko Parmak Nükleazların (ZFN) Modüler Yapısı (BioRender.com'da oluşturuldu).

### ***Transkripsiyon Aktivatörü Benzeri Efektör Nükleazlar (TALEN)***

TALEN, genom üzerinde hedefe özgü çift zincir kırıkları oluşturabilen, protein-DNA etkileşimlerine dayalı programlanabilir gen düzenleme sistemleridir ve çinko parmak nükleazlarına kıyasla daha öngörülebilir ve modüler bir hedef tanıma mantığı sunmalarıyla öne çıkar. TALEN'ler, *Xanthomonas* bakterilerinden köken alan transkripsiyon aktivatörü benzeri efektör (TALE) proteinlerinin DNA'ya bağlanan tekrar motifleri ile FokI endonükleaz alanının füzyonundan oluşur. Her bir TALE tekrar ünitesi tek bir nükleotidi tanıyacak şekilde yapılandırılmış olup, bu tanıma özgülüğü tekrarların 12. ve 13. amino asit pozisyonlarında yer alan RVD (repeat-variable diresidue) motifleri tarafından belirlenir (Christian et al. 2010). Bu bire bir nükleotid-tanıma ilişkisi, TALEN'lerin hedef dizilerin rasyonel ve öngörülebilir biçimde tasarlanmasına olanak tanıyarak, protein-DNA etkileşimlerinin bağlam bağımlılığını azaltan önemli bir avantaj sağlar. ZFN sistemlerinde olduğu gibi TALEN'lerde de DNA kesimi, FokI nükleaz alanının dimerizasyonuna bağlıdır ve hedef bölgede karşılıklı iki TALEN monomerinin bağlanması gereklidir. Bu durum, özgülüğü artıran yapısal bir kontrol mekanizması olarak işlev görür (Boch et al. 2009; Christian et al.

2010). Oluşturulan DSB'ler hücrel DNA onarım yollarını aktif eder ve NHEJ yoluyla gen nakavtı (knock-out) veya HDR yoluyla hassas gen ekleme ve düzeltme (knock-in) uygulamalarının gerçekleştirilmesine imkân tanır. TALEN teknolojisi, ZFN'lere kıyasla daha düşük hedef dışı bağlanma aktivitesi ve daha geniş hedefleme esnekliği sunmasına rağmen, büyük ve tekrarlayan protein yapılarının klonlanmasının teknik olarak zor olması, hücrelere aktarımı ve hücre içi ekspresyon süreçlerinde sınırlamalar yaratmaktadır (Miller et al. 2010). Buna rağmen TALEN'ler, protein tabanlı gen düzenleme teknolojilerinin olgunlaşmasında kritik bir aşamayı temsil etmiş ve daha ölçeklenebilir, RNA-rehberli sistemlerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.



**Şekil 3.** TALEN'in Modüler Yapısı (BioRender.com'da oluşturuldu).

## İKİNCİ NESİL GEN DÜZENLEME ARAÇLARI

İkinci nesil gen düzenleme sistemleri arasında CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats: Düzenli Aralıklı Kısa Palindromik Tekrarlar) tabanlı teknolojiler ön plana çıkmakta olup, bu sistemler içerisinde özellikle CRISPR-Cas9, CRISPR-Cas12 ve CRISPR-Cas13 en yaygın ve işlevsel platformlar olarak değerlendirilmektedir (Makarova et al. 2019). CRISPR sistemleri, ilk olarak bakteriler ve arkelerde tanımlanan, yabancı genetik elementlere karşı gelişmiş bir adaptif bağışıklık mekanizması olarak keşfedilmiştir. Bu sistemlerin genomlarda düzenli aralıklarla tekrarlanan kısa palindromik diziler ve bu diziler arasına yerleşmiş, daha önce karşılaşılan bakteriyofaj veya plazmid kökenli DNA parçalarından (spacer) oluştuğu gösterilmiştir (Barrangou et al. 2007). Söz konusu spacer dizileri, hücrenin geçmiş enfeksiyonlara ait genetik bir hafıza işlevi görerek, tekrar eden enfeksiyonlarda hedef nükleik asitlerin özgül biçimde tanınmasını ve etkisiz hâle getirilmesini sağlar (Mojica et al. 2005). Bu yönüyle CRISPR-Cas sistemleri, prokaryotlarda nadir görülen kazanılmış bağışıklık örneklerinden birini temsil etmektedir. CRISPR lokusları ile birlikte işlev gören CRISPR-ilişkili (Cas) proteinler, bu bağışıklık yanıtının yürütülmesinde merkezi rol oynar; spacer dizilerinden türetilen küçük rehber RNA'lar, Cas proteinlerini tamamlayıcı nükleik asit dizilerine yönlendirerek hedef özgüllüğünü belirler. CRISPR sistemlerinin biyolojik işlevinin

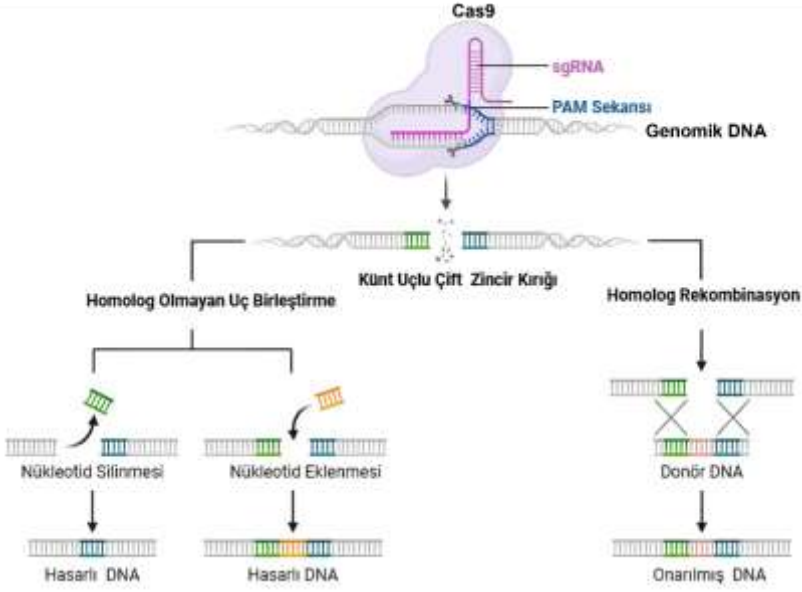
çözülmesinde, bu yapıların farklı prokaryotik genomlarda korunmuş olması ve spacer dizilerinin mobil genetik elementlerle olan doğrudan ilişkisi kritik ipuçları sunmuştur. Özellikle CRISPR dizilerinin fonksiyonel anlamının ilk kez sistematik biçimde yorumlanması, Francisco Mojica ve çalışma arkadaşlarının öncü katkılarıyla mümkün olmuş, bunu izleyen çalışmalar CRISPR-Cas sistemlerinin prokaryotik adaptif bağışıklığın temel bir bileşeni olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur (Mojica et al. 2000; Van Der Oost et al. 2014). Bu biyolojik keşiflerin ardından CRISPR-Cas mekanizmasının programlanabilirliği fark edilmiş ve rehber RNA dizisinin değiştirilmesiyle hedef özgülüğünün yeniden yönlendirilebileceği gösterilmiştir. Bu bağlamda, CRISPR-Cas9 sisteminin RNA-rehberli moleküler kesim mekanizmasının gen düzenleme açısından deneysel olarak aydınlatılması ve programlanabilir bir platforma dönüştürülmesi, Jennifer Doudna ve Emmanuelle Charpentier tarafından gerçekleştirilen çalışmalarla mümkün olmuştur (Jinek et al. 2012). Bu durum, hedef tanımanın protein yapısından bağımsız olarak yalnızca nükleotid dizisi üzerinden belirlenebilmesini mümkün kılmış ve CRISPR sistemlerini önceki protein tabanlı gen düzenleme yaklaşımlarından kavramsal olarak ayırmıştır. Bunu izleyen süreçte Cas12 (Cpf1) ve Cas13 gibi alternatif CRISPR efektör sistemlerinin moleküler özellikleri, hedefleme mantıkları ve uygulama potansiyelleri, büyük ölçüde Feng Zhang ve çalışma arkadaşlarının öncü çalışmalarıyla ortaya konmuş; bu katkılar CRISPR platformunun DNA ve RNA düzeyinde genişletilmesini sağlamıştır (Abudayyeh et al. 2016; Zetsche et al. 2015). Bu kavramsal kırılma noktası, CRISPR sistemlerinin doğal savunma mekanizmasından çıkarılarak genom mühendisliğinde kullanılabilecek evrensel bir gen düzenleme aracına dönüştürülmesinin önünü açmıştır.

### ***CRISPR-Cas9 Sistemi***

CRISPR-Cas9 sistemi, hedef DNA dizilerinde özgül ve kontrollü çift zincir kırıkları oluşturabilen, RNA rehberli bir endonükleaz platformu olarak işlev görür. Sistem temel olarak üç ana bileşenden oluşur: Cas9 endonükleaz proteini, rehber RNA (guide RNA; gRNA) ve hedef DNA üzerinde tanınması zorunlu olan protospacer adjacent motif (PAM) dizisi. Bu bileşenlerin koordineli etkileşimi, Cas9'un genom üzerinde yüksek özgülükle kesim yapabilmesini sağlar. Cas9 proteini, yapısal olarak iki ana fonksiyonel bölgeden oluşur: hedef tanıma (recognition; REC) lobu ve nükleaz (NUC) lobu (Nishimasu et al. 2014). REC lobu, rehber RNA ile kompleks oluşturarak hedef DNA'nın tanınmasından sorumlu iken, NUC lobu DNA kesimini gerçekleştiren katalitik alanları içerir. Nükleaz lobu içerisinde yer alan HNH ve RuvC endonükleaz domainleri, çift zincirli DNA'nın her bir ipliğini ayrı ayrı keserek DSB oluşumunu sağlar. HNH domaini, rehber RNA'ya tamamlayıcı olan DNA ipliğini keserken, RuvC domaini karşıt DNA ipliğini parçalar; bu eşzamanlı aktivite sonucunda hedef bölgede genellikle künt uçlu

bir çift zincir kırığı meydana gelir (Nishimasu et al. 2014). Rehber RNA, doğal sistemde ayrı crRNA ve tracrRNA moleküllerinden oluşmakla birlikte, gen düzenleme uygulamalarında bu iki RNA'nın füzyonuyla oluşturulan tek bir sentetik yapı olan tek rehber RNA (sgRNA: single guide RNA) yaygın olarak kullanılmaktadır (Sternberg et al. 2014). sgRNA, yaklaşık 20 nükleotid uzunluğundaki hedefe özgü dizisi aracılığıyla genomda kesilmesi istenen bölgeyi belirler. Bu RNA-DNA baz eşleşmesi, Cas9'un hedef özgüllüğünü belirleyen ana unsurdur ve protein yapısında herhangi bir değişiklik gerektirmeden sistemin yeniden programlanabilmesini mümkün kılar (Jinek et al. 2012). Cas9'un hedef DNA üzerinde kesim gerçekleştirebilmesi için, hedef dizinin bitişiğinde belirli bir PAM dizisinin bulunması zorunludur. PAM dizisi, Cas9'un hedef DNA'ya ilk bağlanma ve tarama sürecinde kritik bir rol oynar ve sistemin kendi genomunu CRISPR spacer dizilerinden ayırt etmesini sağlayan bir güvenlik mekanizması olarak işlev görür. PAM tanıma sonrasında DNA lokal olarak açılır ve rehber RNA ile hedef DNA arasında tamamlayıcı baz eşleşmesi oluşur. Bu eşleşmenin yeterli stabiliteye ulaşması, Cas9 proteininde konformasyonel bir değişikliği tetikler ve nükleaz domainlerinin aktif olmasına yol açar. Böylece Cas9, hedef lokusta kesin bir DSB oluşturarak hücresel DNA onarım mekanizmalarını devreye sokar. Oluşturulan çift zincir kırığı, hücrenin doğal DNA tamir yolları tarafından onarılır. NHEJ yolunun baskın olduğu durumlarda küçük insersiyon veya delesyonlar meydana gelir ve bu durum gen nakavt stratejilerinin temelini oluşturur. Buna karşılık HDR yolunun uygun koşullarda aktif edilmesi, homolog bir şablon kullanılarak hedef bölgenin hassas biçimde yeniden yazılmasına olanak tanır ve knock-in uygulamalarının gerçekleştirilmesini mümkün kılar (Yeh, Richardson, and Corn 2019). Bu bağlamda CRISPR-Cas9 sistemi, genomda kesim yapan bir "moleküler makas" olmanın ötesinde, hücresel DNA onarım süreçlerini yönlendirerek genetik bilginin kontrollü biçimde değiştirilmesini sağlayan programlanabilir bir mühendislik aracıdır. Bununla birlikte CRISPR-Cas9 sisteminin yüksek etkinliğine rağmen, genom düzenleme uygulamalarında dikkate alınması gereken çeşitli sınırlılıkları bulunmaktadır. Bunların başında, Cas9-rehber RNA kompleksinin hedef dizisine yüksek derecede benzerlik gösteren genomik bölgelerde istenmeyen kesimler gerçekleştirebilmesi olarak tanımlanan hedef dışı (off-target) etkiler gelmektedir. Hedef dışı kesimler, rehber RNA ile hedef DNA arasındaki baz eşleşmesinde belirli sayıda uyumsuzluğun tolere edilebilmesi, genomda PAM benzeri dizilerin yaygınlığı ve lokal kromatin yapısının Cas9 erişilebilirliğini etkilemesi gibi faktörlerden kaynaklanabilmektedir (Fu et al. 2013). Bu tür istenmeyen kesimler, gen fonksiyonlarının yanlışlıkla bozulmasına, genomik instabiliteye veya hücresel toksisiteye yol açabileceğinden, özellikle terapötik uygulamalar açısından önemli bir güvenlik sorunu oluşturmaktadır. Ayrıca Cas9 sisteminin PAM dizisine bağımlı olması, hedeflenebilir genomik bölgelerin kapsamını sınırlamakta; hassas gen ekleme uygulamalarında HDR verimliliğinin hücre döngüsüne bağlı olarak düşük seyretmesi ise knock-in

stratejilerinin etkinliğini kısıtlamaktadır. Bu sınırlılıkların aşılmasına yönelik olarak yüksek özgülükte Cas9 varyantlarının geliştirilmesi, rehber RNA tasarım algoritmalarının optimize edilmesi ve alternatif CRISPR efektör sistemlerinin araştırılması yönünde yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Dolayısıyla, CRISPR-Cas9 sistemi güçlü ve esnek bir gen düzenleme aracı olmakla birlikte, hedef dışı bağlanma etkiler ve bağlama özgü sınırlılıklar nedeniyle dikkatli tasarım, kapsamlı doğrulama ve uygulama bağlamına özgü optimizasyon gerektiren bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir.



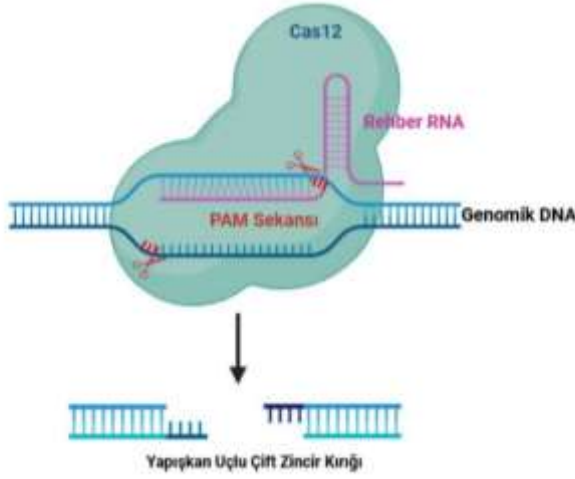
**Şekil 4.** CRISPR-Cas9 Sisteminin Modüler Yapısı (BioRender.com’da oluşturuldu)

### ***CRISPR-Cas12 (Cpf1) Sistemi***

CRISPR-Cas12 sistemleri (ilk tanımlandığı adıyla Cpf1), ikinci nesil CRISPR tabanlı gen düzenleme teknolojileri içerisinde Cas9’a alternatif olarak geliştirilmiş, hedef tanıma ve DNA kesim mekanizması bakımından özgün özellikler sergileyen RNA rehberli endonükleaz platformlarıdır (Zetsche et al. 2015). Cas12 sistemleri, rehber RNA (crRNA) aracılığıyla hedef DNA dizisini tanıyan tek bir efektör proteinin aktivitesine dayanmakla birlikte, PAM gereksinimi, RNA mimarisi ve kesim geometrisi açısından Cas9 sistemlerinden belirgin şekilde ayrılmaktadır. Bu özellikler, Cas12’yi yalnızca alternatif bir gen düzenleme aracı değil, aynı zamanda farklı uygulama alanlarına uyarlanabilen çok yönlü bir CRISPR platformu hâline getirmiştir. Cas12 sisteminin temel bileşenleri Cas12 endonükleaz proteini, hedef özgüllüğünü belirleyen tek bir crRNA ve hedef DNA üzerinde tanınması zorunlu olan PAM dizisidir. Cas12, Cas9’dan farklı olarak genellikle T-zengin PAM dizilerini tanır (örneğin 5’-TTTV-3’, burada V = A,

C veya G ) (Yamano et al. 2016). Bu PAM tercihinin genom genelinde daha geniş bir kapsama sahip olması, Cas9'un PAM bağımlılığı nedeniyle hedeflenemeyen birçok genomik bölgenin Cas12 ile düzenlenebilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca Cas12 sistemlerinde hedef tanıma için ek bir tracrRNA'ya ihtiyaç duyulmaması, RNA bileşenlerinin sadeleşmesini ve sistem tasarımının daha kolay hâle gelmesini sağlamaktadır. Moleküler mekanizma açısından Cas12, PAM dizisinin tanınmasının ardından hedef DNA üzerinde lokal bir açılma oluşturur ve rehber RNA ile hedef DNA arasında tamamlayıcı baz eşleşmesi gerçekleşir. Bu eşleşme Cas12 proteini üzerinde konformasyonel bir değişimi tetikler ve nükleaz özelliği aktif olur (Zetsche et al. 2015). Cas9'un künt uçlu kesiminden farklı olarak Cas12, çift zincirli DNA üzerinde basamaklı (staggered) bir kesim gerçekleştirerek tek iplikli çıkıntılar (5' overhangs) oluşturur. Bu kesim geometrisi, özellikle homolog rekombinasyona dayalı knock-in uygulamalarında donor DNA'nın entegrasyonunu kolaylaştırabilecek bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Oluşturulan çift zincir kırığı, hücrenin NHEJ veya HDR yolları tarafından onarılır ve bu süreçler, sırasıyla gen nakavtı veya hassas gen ekleme stratejilerinin temelini oluşturur. Cas12 sistemlerinin bir diğer ayırt edici özelliği, hedef DNA'ya bağlandıktan sonra hedef dışı tek iplikli DNA moleküllerini parçalayabilen "kollateral (trans) nükleaz aktivitesine" sahip olmalarıdır (Chen et al. 2018). Bu özellik, klasik gen düzenleme bağlamında potansiyel bir özgüllük sınırlaması olarak değerlendirilebilse de, moleküler tanı teknolojileri açısından son derece güçlü bir avantaja dönüşmüştür. Cas12'nin hedef DNA'yı tanınmasıyla aktif olan bu trans-aktivite, floresan veya kolorimetrik olarak işaretlenmiş rapor moleküllerinin hızlı biçimde parçalanmasına olanak tanımakta ve böylece düşük kopya sayısındaki nükleik asit hedeflerinin bile yüksek duyarlılıkla tespit edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu mekanizma, CRISPR tabanlı tanı platformlarının (örneğin patojen, viral veya mutasyon tespiti) geliştirilmesinde Cas12'yi merkezi bir bileşen hâline getirmiştir (Broughton et al. 2020; Chen et al. 2018). Sonuç olarak CRISPR-Cas12 sistemleri, geniş PAM uyumluluğu, sade rehber RNA mimarisi, basamaklı DNA kesim paterni ve trans-nükleaz aktivitesi gibi özellikleriyle Cas9 tabanlı yaklaşımların ötesine geçen işlevsel avantajlar sunmaktadır. Bu nitelikler, Cas12'yi hem genom düzenleme hem de moleküler tanı uygulamaları için esnek ve çok yönlü bir CRISPR platformu olarak konumlandırmaktadır. Bununla birlikte CRISPR-Cas12 sistemleri de, Cas9 sistemine benzer bazı sınırlılıklar taşımaktadır. Rehber RNA-DNA etkileşimlerinde belirli düzeyde uyumsuzluğun tolere edilebilmesi, Cas9'da olduğu gibi Cas12 tabanlı düzenlemelerde de hedef dışı bağlanma ve kesim riskini tamamen ortadan kaldırmamaktadır. Ayrıca Cas12'nin belirli PAM dizilerine (ör. 5'-TTTV-3') bağımlı olması, Cas9'da olduğu gibi hedeflenebilir genomik bölgelerin kapsamını sınırlayabilmektedir. Bu nedenle Cas12 sistemleri, sundukları yapısal ve fonksiyonel avantajlara rağmen, özellikle

hassas genom düzenleme uygulamalarında Cas9 benzeri özgüllük ve güvenlik değerlendirmeleri gerektiren bir teknoloji olarak ele alınmalıdır.

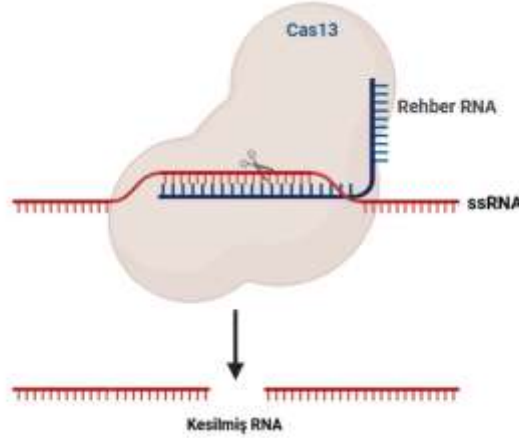


Şekil 5. CRISPR-Cas12 Sistemi Modüler Yapısı (BioRender.com’da oluşturuldu)

### **CRISPR-Cas13 Sistemi**

CRISPR-Cas13 sistemleri, DNA yerine tek iplikli RNA (ssRNA; single strand RNA) moleküllerini hedefleyebilen RNA rehberli endonükleazlar olarak, CRISPR teknolojilerinin transkriptom düzeyine genişlemesini sağlamıştır. Cas13 proteinleri, rehber RNA (crRNA) aracılığıyla hedef RNA dizisini tanıır ve bağlanma sonrasında RNA üzerinde özgül kesim gerçekleştiren RNaz özelliğini aktif eder. Bu özellik, Cas13 sistemlerini gen ekspresyonunun post-transkripsiyonel düzeyde doğrudan kontrol edilmesine olanak tanıyan özgün bir gen düzenleme platformu hâline getirmiştir. Cas13 sistemlerinde hedef tanıma, crRNA ile hedef RNA arasında gerçekleşen tamamlayıcı baz eşleşmesine dayanır. Cas9 ve Cas12 sistemlerinden farklı olarak Cas13 proteinleri PAM dizisine ihtiyaç duymaz; bunun yerine bazı Cas13 varyantlarında hedef RNA üzerinde kısa bir protospacer flanking site (PFS) tercihinin bulunduğu rapor edilmiştir (Gootenberg et al. 2017). Bu PAM bağımsız hedefleme mantığı, Cas13’ün farklı transkriptler üzerinde daha geniş bir hedefleme esnekliği sunmasını mümkün kılar. Hedef RNA’ya bağlanmanın ardından Cas13 proteini üzerinde konformasyonel bir değişim meydana gelir ve protein bünyesinde yer alan HEPN (Higher Eukaryotes and Prokaryotes Nucleotide-binding) domainleri aktive olur. Bu domainler, hedef RNA üzerinde özgül kesim gerçekleştirerek transkriptin parçalanmasına ve fonksiyonel olarak susturulmasına yol açar. Cas13 sistemlerinin ayırt edici bir özelliği, hedef RNA’nın tanınmasını takiben yalnızca hedef molekülü değil, çevredeki diğer ssRNA moleküllerini de kesebilen kollateral RNaz aktivitesine sahip olmalarıdır (Nager et al. 2017). Bu kontrolsüz RNaz aktivitesi, hücresel bağlamda potansiyel bir toksisite ve

özgüllük sorunu oluşturabilse de moleküler tanı uygulamaları açısından son derece değerli bir avantaja dönüşmüştür.



Şekil 6. CRISPR-Cas13 Sistemi Modüler Yapısı (BioRender.com’da oluşturuldu).

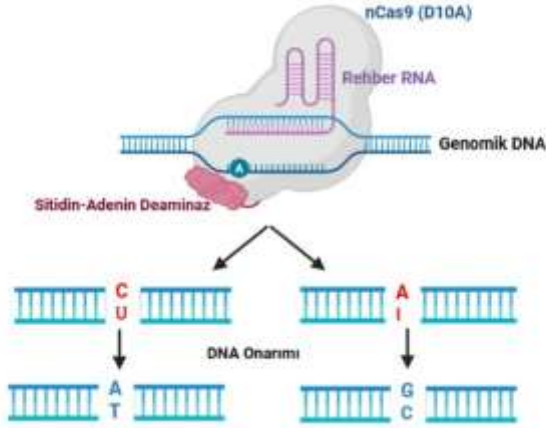
## ÜÇÜNCÜ NESİL GEN DÜZENLEME ARAÇLARI

İkinci nesil gen düzenleme teknolojileri olarak tanımlanan CRISPR-Cas tabanlı sistemler, genom mühendisliğinde devrim niteliğinde bir ilerleme sağlamış olsa da bu yaklaşımların büyük ölçüde çift zincir kırıklarına dayanması, hedef dışı kesimler, istenmeyen insersiyon ve delelesyon (indel) oluşumları ve hücresel DNA onarım yanıtlarının öngörülemezliği gibi önemli sınırlılıkları da beraberinde getirmiştir. Özellikle terapötik uygulamalar açısından DSB kaynaklı genomik instabilite riski, daha hassas ve kontrollü düzenleme stratejilerine olan ihtiyacı belirgin hâle getirmiştir. Bu gereksinim doğrultusunda geliştirilen üçüncü nesil gen düzenleme teknolojileri, genomda kesim oluşturmada veya yalnızca tek iplikli DNA üzerinde sınırlı müdahaleler gerçekleştirilerek genetik bilginin baz veya kısa dizi düzeyinde doğrudan yeniden yazılmasını mümkün kılan yaklaşımları kapsamaktadır. Bu nesildeki sistemlerin temel amacı, hücresel DNA onarım yollarına olan bağımlılığı azaltmak, düzenleme sonuçlarını daha öngörülebilir hâle getirmek ve hedeflenen genetik değişiklikleri minimum yan etki ile gerçekleştirmektir. Bu bağlamda, baz düzenleme ve prime düzenleme teknolojileri klasik CRISPR-Cas sistemlerinin kesim temelli doğasından ayrılarak, genetik bilginin nokta mutasyonu veya kısa dizi düzeyinde hassas biçimde düzenlenmesini sağlayan ve üçüncü nesil gen düzenlemenin temel temsilcileri olarak konumlanan yenilikçi platformlar olarak öne çıkmaktadır.

### ***Baz Düzenleme (Base Editing) Sistemi***

Baz düzenleme teknolojileri, genomda çift zincir kırığı oluşturmaksızın belirli nükleotidlerin doğrudan kimyasal olarak

dönüştürülmesini sağlayan üçüncü nesil gen düzenleme yaklaşımlarını temsil etmektedir (Komor et al. 2016). Bu sistemler, klasik CRISPR-Cas tabanlı kesim stratejilerinin yol açtığı genomik instabilite ve onarım süreçlerindeki belirsizlikleri azaltmayı amaçlayarak geliştirilmiştir (Gaudelli et al. 2017). Baz düzenlemenin temel prensibi, hedef DNA dizisinde kontrollü ve lokal bir baz dönüşümünün gerçekleştirilmesi olup bu dönüşüm, hücresel DNA onarım mekanizmaları tetiklenmeden veya yalnızca sınırlı ölçüde devreye sokularak elde edilir. Baz düzenleme sistemleri temel olarak üç ana bileşenden oluşur: katalitik aktivitesi baskılanmış veya tek iplikli kesim yapacak şekilde modifiye edilmiş bir Cas proteini (genellikle nükleaz-inaktif Cas9 veya Cas9 nickase), hedef özgüllüğünü belirleyen rehber RNA ve spesifik baz dönüşümünü katalizleyen bir deaminaz enzimi. Rehber RNA tarafından hedef bölgeye yönlendirilen Cas proteini, DNA'yı tamamen kesmeden lokal olarak açar ve tek iplikli DNA bölgesinin oluşmasını sağlar. Bu açığa çıkan tek iplikli bölgede görev yapan deaminaz enzimi, belirli bir nükleotidin kimyasal yapısını değiştirerek hedeflenen baz dönüşümünü gerçekleştirir. Geliştirilen baz düzenleme sistemleri, gerçekleştirdikleri dönüşüm tipine göre iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Sitidin baz editörleri (cytosine base editors; CBE), sitidini urasile dönüştürerek sonuçta C•G → T•A baz çiftine yol açan düzenlemeleri mümkün kılarken; adenin baz editörleri (adenine base editors; ABE) adenin bazını inosine dönüştürerek A•T → G•C dönüşümünü sağlamaktadır (Komor et al. 2016). Bu dönüşümler, insan genomunda gözlenen tek bazlı patojenik mutasyonların önemli bir bölümünün teorik olarak düzeltebilmesine olanak tanımaktadır. Baz düzenleme süreci sırasında oluşan ara ürünler, hücresel DNA onarım mekanizmaları tarafından doğal baz eşleşmeleri şeklinde stabilize edilir ve kalıcı genetik değişiklikler elde edilir. Baz düzenleme teknolojilerinin en önemli avantajı, DSB oluşturmamaları nedeniyle indel oluşumu riskini büyük ölçüde azaltmaları ve düzenleme sonuçlarının daha öngörülebilir olmasını sağlamalarıdır. Bu özellik, özellikle hassas genom düzenleme ve terapötik uygulamalar açısından baz düzenlemeyi cazip bir yaklaşım hâline getirmiştir. Bununla birlikte baz düzenleme sistemleri yalnızca belirli baz dönüşümleriyle sınırlıdır ve insersiyon, delesyon veya tüm baz değişimleri gibi daha karmaşık genetik düzenlemeleri gerçekleştiremez (Rees and Liu 2018). Ayrıca hedef bölgede birden fazla düzenlenebilir bazın bulunması durumunda istenmeyen yan dönüşümler ortaya çıkabilmekte ve bu durum düzenleme hassasiyetini sınırlandırabilmektedir. Bu sınırlılıklar, baz düzenleme teknolojilerinin genetik bilginin yalnızca belirli bir alt kümesini düzenleyebildiğini ortaya koymuş ve daha geniş kapsamlı, esnek ve çok yönlü düzenleme stratejilerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaları teşvik etmiştir. Bu gereksinim doğrultusunda geliştirilen prime düzenleme teknolojileri, baz düzenlemenin bulunduğu DSB'siz yaklaşımı daha ileriye taşıyarak, hemen her tür küçük genetik değişikliğin hedefe özgü biçimde gerçekleştirilmesini mümkün kılan bir sonraki evrimsel adımı temsil etmektedir.

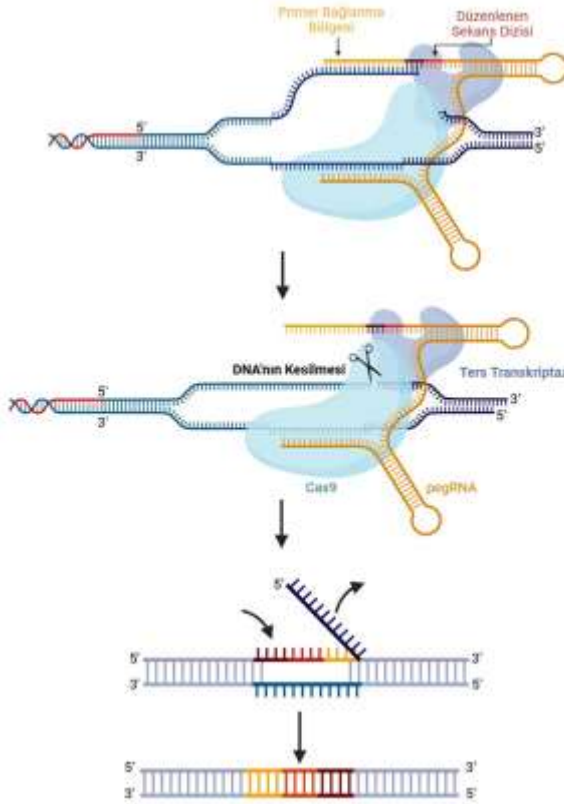


Şekil 7. Baz Düzenleme Sistemi Modüler Yapısı (BioRender.com’da oluşturuldu).

### ***Prime Düzenleme (Prime Editing) Sistemi***

Prime düzenleme teknolojileri, üçüncü nesil gen düzenleme yaklaşımları içerisinde en kapsamlı ve esnek düzenleme potansiyeline sahip platformlardan biri olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler, genomda çift zincir kırığı oluşturmadan ve dışarıdan çift iplikli bir donör DNA gerektirmeden, hedef DNA dizisinin baz, kısa insersiyon veya delesyon düzeyinde hassas biçimde yeniden yazılmasını mümkün kılmaktadır (Anzalone et al. 2019). Prime düzenleme, baz düzenleme teknolojilerinin yalnızca sınırlı baz dönüşümleriyle kısıtlı kalmasının ardından, daha geniş bir mutasyon yelpazesini güvenli ve kontrollü biçimde düzenleyebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Prime düzenleme sisteminin temel bileşenleri, tek iplikli kesim yapacak şekilde modifiye edilmiş bir Cas proteini (genellikle Cas9 nickase), ters transkriptaz (RT, reverse transcriptase) enzimi ve özel olarak tasarlanmış bir prime düzenleme rehber RNA (pegRNA; prime editing guide RNA) molekülüdür (H. K. Kim et al. 2020). Cas9 nickase, rehber RNA aracılığıyla hedef DNA bölgesine yönlendirilerek yalnızca tek iplikli bir kesik oluşturur. Bu sınırlı kesim, genom bütünlüğünü ciddi biçimde bozmadan düzenleme sürecinin başlatılmasını sağlar. pegRNA ise klasik rehber RNA’dan farklı olarak hem hedef tanıma dizisini hem de düzenlenmesi istenen yeni genetik bilgiyi içeren bir RNA şablonu barındırır (Anzalone et al. 2019). Moleküler mekanizma açısından prime düzenleme süreci, hedef DNA ipliğinde oluşturulan tek iplikli kesikten sonra başlar. Cas9 RT füzyon proteini, pegRNA üzerinde yer alan şablon diziyi kullanarak hedef DNA’ya tamamlayıcı yeni bir DNA uzantısı sentezler. Bu sentezlenen DNA bölgesi, hedef lokusta mevcut dizinin yerini alacak şekilde genomik DNA ile eşleşir. Takiben hücresel DNA onarım mekanizmaları devreye girerek yeni sentezlenen dizinin genomda kalıcı hâle gelmesini sağlar (Anzalone et al.

2019). Bu süreç, klasik HDR mekanizmalarına kıyasla daha az hücre döngüsü bağımlılığı göstermekte ve daha öngörülebilir düzenleme sonuçları üretmektedir. Prime düzenleme teknolojilerinin en önemli avantajı, hemen her tür küçük genetik değişikliğin (nokta mutasyonları, kısa insersiyonlar ve delesyonlar) tek bir platform üzerinden gerçekleştirilebilmesidir (Anzalone et al. 2022). Bu özellik, prime düzenlemeyi yalnızca baz düzenlemenin bir alternatifi değil, aynı zamanda onu kapsayan ve aşan bir gen düzenleme yaklaşımı hâline getirmektedir. Ayrıca DSB oluşturmaması sayesinde indel oluşumu ve büyük genomik yeniden düzenlenmeler gibi riskleri önemli ölçüde azaltması, prime düzenlemeyi özellikle hassas genom düzenleme ve terapötik uygulamalar açısından cazip kılmaktadır. Bununla birlikte, prime düzenleme sistemlerinin de bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Sistem mimarisinin görece karmaşık olması, pegRNA tasarımının dikkatli optimizasyon gerektirmesi ve düzenleme verimliliğinin hedef bölgeye ve hücresel bağlama bağlı olarak değişkenlik göstermesi, uygulama sürecini zorlaştırabilmektedir. Ayrıca büyük ölçekli genetik değişikliklerin gerçekleştirilmesi prime düzenleme için halen sınırlı bir alan oluşturmaktadır. Buna rağmen, prime düzenleme sunduğu yüksek esneklik ve DSB'siz düzenleme kapasitesi sayesinde, üçüncü nesil gen düzenleme teknolojileri içerisinde genetik bilginin en kapsamlı biçimde yeniden yazılmasına olanak tanıyan platform olarak öne çıkmaktadır.



**Şekil 8.** Prime Düzenleme Sistemi Modüler Yapısı (*BioRender.com*’da oluşturuldu).

Yakın zamanda yapılan bir çalışmada üçüncü nesil programlanabilir RNA kılavuzlu araçları teşvik ederek genom tasarımı yeni bir çıkış açması beklenen köprü rekombinaz tabanlı sistem geliştirilmiştir (Durrant et al. 2024). Bu sistem, iki uzak DNA bölgesi arasında programlanabilir köprüler oluşturarak genom mimarisinin doğrudan yeniden tasarlanmasına olanak tanımakta; bu yaklaşım gen düzenlemeyi “kesme” veya “yazma” işlemlerinin ötesine taşıyarak genom mimarisi mühendisliği kavramını ortaya koymaktadır.

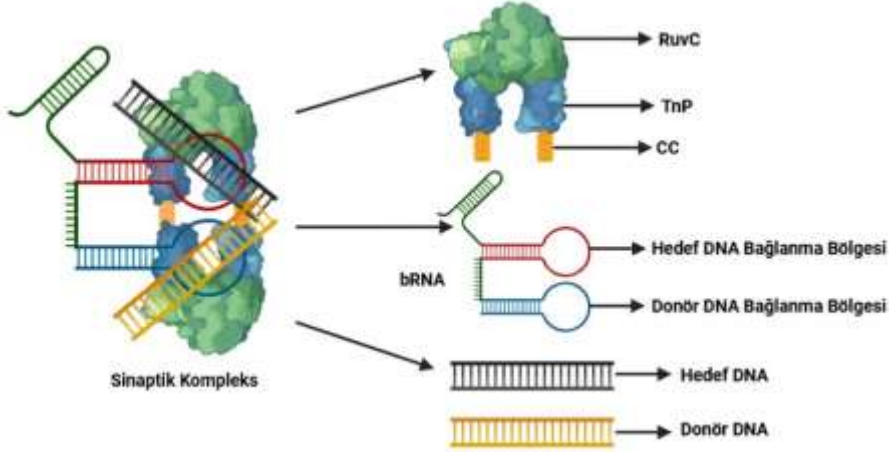
### **Köprü Rekombinaz (Bridge Recombinase) Sistemi**

Köprü rekombinazlar, genom düzenleme teknolojilerinde, DNA üzerinde çift zincir kırığı oluşturmadan, hedeflenmiş DNA segmentlerinin yönlendirilmiş ve konservatif biçimde yeniden düzenlenmesini mümkün kılan özgün RNA rehberli sistemlerdir (Durrant et al. 2024). Bu yaklaşımlar, gen düzenlemeyi tek tek nükleotidlerin değiştirilmesi veya lokal dizilerin yeniden yazılması düzeyinden çıkararak, genomun daha üst ölçekli organizasyonunun —gen kasetleri, düzenleyici bölgeler ve segmentler arası ilişkilerin—

doğrudan programlanabildiği bir mimari düzeye taşımaktadır. Bu yönüyle köprü rekombinazlar, önceki nesil gen düzenleme teknolojilerinin niceliksel bir devamı değil, genom mühendisliği anlayışını kökten dönüştüren niteliksel bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Köprü rekombinaz sistemlerinin keşfi, prokaryotik genomlarda bulunan IS110, IS621 ve IS622 ailelerine ait mobil genetik elementlerin fonksiyonel olarak yeniden değerlendirilmesiyle mümkün olmuştur (Altae-Tran et al. 2021). Başlangıçta klasik transpozonlar olarak sınıflandırılan bu elementlerin, rastlantısal yer değiştirme yerine, RNA tarafından yönlendirilen ve yüksek özgüllükle gerçekleşen konservatif rekombinasyon olayları gerçekleştirebildiği ortaya konmuştur (Hiraizumi et al. 2024). Bu bulgular, DNA hedeflemenin protein-DNA etkileşimlerine değil, özel olarak işlev gören kodlanmayan RNA moleküllerine dayandığını göstermiştir. Böylece köprü rekombinazlar, RNA'nın genom mimarisini belirleyen aktif bir düzenleyici unsur olarak işlev gördüğü, CRISPR sonrası dönemin en özgün genom düzenleme platformlarından biri olarak tanımlanmıştır. Bu sistemlerin moleküler mimarisi, protein ve RNA bileşenlerinin yüksek derecede koordinasyonuna dayanır. Köprü rekombinaz çekirdeğini, IS110/IS621/IS622 kökenli Tnp (rekombinaz/transpozaz benzeri) protein oluşturur. Tnp proteini, rekombinasyon reaksiyonunun katalitik yürütülmesinden sorumlu olmakla birlikte, klasik transpozazlardan farklı olarak tek başına DNA üzerinde rastlantısal bir aktivite sergilemez. Bu protein ile birlikte yer alan RuvC proteini, fosfodiester bağlarının kontrollü biçimde yeniden düzenlenmesini mümkün kılan kimyasal reaksiyonun merkezinde yer alır. Ancak bu alan yalnızca doğru hedefleme ve kompleks oluşumu sağlandığında aktif hâle gelir (Durrant et al. 2024). Böylece rekombinasyon süreci, çift zincir kırığı oluşturmada ve serbest DNA uçları meydana getirmeden ilerler. Protein bileşeninin işlevselliğini tamamlayan bir diğer kritik yapı ise sarmal-sarmal (coiled-coil; CC) bölgeleridir. Bu yapısal modüller, rekombinaz proteinlerinin doğru oligomerizasyonunu, hedef DNA segmentlerinin uzaysal olarak birbirine yaklaştırılmasını ve rekombinasyon için gerekli olan sinaptik kompleksin stabilizasyonunu sağlar (Durrant et al. 2024). Sarmal-sarmal bölgeleri sayesinde sistem yalnızca katalitik bir enzim olarak değil, aynı zamanda genom üzerinde iki uzak lokusu fiziksel olarak organize edebilen bir mimari platform olarak çalışır. Bu özellik, köprü rekombinazların gerçekleştirdiği yeniden düzenlemelerin yüksek doğrulukla ve öngörülebilir biçimde meydana gelmesini sağlayan temel unsurlardan biridir. Köprü rekombinaz sistemlerinin ayırt edici ve belirleyici bileşeni ise kodlanmayan köprü RNA (bridge RNA; bRNA)'dır. bRNA, klasik CRISPR rehber RNA'larından köklü biçimde ayrılır; çünkü yalnızca tek bir hedef diziyi işaretlemek yerine, aynı anda iki farklı genomik lokusla baz eşleşmesi kurabilecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu çift işlevli RNA molekülü, bir yandan hangi DNA segmentlerinin yeniden düzenlemeye gireceğini belirleyerek hedef özgüllüğünü sağlar, diğer yandan bu iki segmenti aynı moleküler kompleks içerisinde fiziksel olarak bir araya getirerek rekombinaz

proteinini aktif konformasyona yönlendirir (Hiraizumi et al. 2024). Bu nedenle bRNA, yalnızca bir rehber değil, rekombinasyon reaksiyonunu başlatan ve yöneten moleküler bir köprü işlevi görür. Köprü rekombinazların çalışma mekanizması, bRNA'nın iki hedef DNA bölgesiyle eş zamanlı etkileşimiyle başlar. Bu etkileşim, genom üzerinde önceden tanımlanmış lokusların uzaysal olarak yakınlaştırılmasını ve protein-RNA-DNA bileşenlerinden oluşan sinaptik bir kompleksin kurulmasını sağlar. Sinaptik kompleksin oluşumunu takiben Tnp-RuvC katalitik çekirdeği aktif olur ve hedef DNA segmentleri arasında konservatif bir yeniden düzenleme gerçekleştirilir (Durrant et al. 2024). Bu süreç sırasında DNA'da kalıcı çift zincir kırıkları oluşmaz ve hücresel DNA onarım mekanizmaları devreye sokulmaz. Sonuç olarak rekombinasyon olayı yüksek doğrulukta ve tekrarlanabilir bir biçimde tamamlanır. Sistem, DNA segmentlerinin genomdan çıkarılması, belirli bir lokusa entegre edilmesi veya yönünün ters çevrilmesi gibi farklı yeniden düzenleme türlerini destekleyebilmektedir (Durrant et al. 2024). Bu özellikleriyle köprü rekombinazlar, gen düzenlemeyi yalnızca gen veya baz düzeyinde bir müdahale olmaktan çıkararak, genom organizasyonunun ve mimarisinin doğrudan yeniden tasarlanabildiği bir mühendislik alanına dönüştürmektedir. Büyük DNA segmentlerinin hedefe özgü ve güvenli biçimde yeniden düzenlenebilmesi, çok genli modifikasyonların tek bir olayda gerçekleştirilebilmesi ve genom bütünlüğünün korunması, bu sistemleri sentetik biyoloji, kompleks gen ağlarının yeniden yapılandırılması ve ileri biyoteknolojik uygulamalar için benzersiz kılmaktadır. Bu nedenle köprü rekombinazlar, gen düzenleme teknolojilerinde önceki tüm yaklaşımlardan yalnızca teknik olarak değil, kavramsal olarak da ayrılan bir dönüm noktasını temsil etmektedir. Bununla birlikte köprü rekombinaz sistemleri, sundukları yenilikçi ve dönüştürücü potansiyele rağmen henüz erken aşamada olmaları nedeniyle çeşitli sınırlılıklar barındırmaktadır. Öncelikle bu sistemlerin doğal olarak tanımlandığı IS110, IS621 ve IS622 kökenli bağlamların büyük ölçüde prokaryotik genomlarla sınırlı olması, ökaryotik hücrelerde etkinlik, stabilite ve hedef özgüllük açısından kapsamlı optimizasyon gereksinimini beraberinde getirmektedir. Köprü RNA tasarımının karmaşıklığı, aynı anda iki genomik lokusun doğru biçimde tanınmasını gerektirdiğinden, hedef dışı etkileşimler veya istenmeyen genomik yeniden düzenlemeler açısından dikkatli hesaplamalar yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca sistemin büyük ve çok bileşenli protein RNA kompleksleri oluşturması, hücre içine etkin şekilde taşınmasını ve kontrollü ekspresyonunu teknik olarak zorlaştırabilmektedir. Rekombinasyonun öngörülebilir yapısı teorik bir avantaj sunsa da genomun üç boyutlu organizasyonu, kromatin erişilebilirliği ve hücresel bağlama özgü faktörlerin rekombinasyon verimliliği üzerindeki etkileri henüz tam olarak anlaşılmış değildir. Bu nedenlerle köprü rekombinazlar, gen düzenlemede yeni bir kavramsal çerçeve sunmakla birlikte, geniş ölçekli biyoteknolojik ve klinik uygulamalara geçmeden önce

özellik, güvenlik, taşınabilirlik ve hücre uyumluluk açısından derinlemesine değerlendirilmesi gereken bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir (Durrant et al. 2024; Hiraizumi et al. 2024; Perry et al. 2025).



Şekil 9. Köprü Rekombinaz Modüler Yapısı (BioRender.com’da oluşturuldu)

## SONUÇ

Gen düzenleme teknolojilerinde son yıllarda geliştirilen farklı nesil araçlar, hedefleme özgülüğünün artırılması, istenmeyen genomik hasarın azaltılması ve düzenleme sonuçlarının daha kontrollü biçimde yönlendirilebilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Çift zincir kırığına dayalı yaklaşımlardan DSB içermeyen sistemlere, hatta genom mimarisini yeniden düzenlemeyi hedefleyen yeni platformlara uzanan bu çeşitlilik, genetik müdahalelerin ölçeğini ve hassasiyetini önemli ölçüde genişletmiştir. Bununla birlikte, bu kadar çok sayıda sistemin keşfedilmiş ve geliştirilmiş olmasına rağmen, genomun bütüncül işleyişi, hücre bağlama özgü yanıtları ve yapılan müdahalelerin uzun vadeli sonuçları hâlen tam olarak anlaşılmış değildir. Genomun karmaşık ve çok katmanlı düzenleme yapısı, gen düzenleme sonuçlarının her zaman öngörülebilir olmasını zorlaştırmakta; bu durum gen düzenlemeyi yalnızca teknik bir mesele olmaktan çıkararak temel biyolojik bir bilinmezlik alanı hâline getirmektedir. Buna rağmen, mevcut gen düzenleme araçları genom üzerinde daha güvenli, daha etkin ve daha kesin müdahalelerin mümkün olabileceği bir geleceğin altyapısını oluşturmakta ve gen düzenlemenin henüz keşfedilmemiş potansiyellerine işaret etmektedir. Bu doğrultuda, günümüzde geliştirilen genetik düzenleme araçlarının yalnızca mevcut problemlere çözüm sunmakla kalmayıp, gelecekte ortaya çıkacak yeni ve daha gelişmiş teknolojilerin önünü açması, böylece yakın gelecekte birçok hastalığın kesin ve hedefe özgü

genetik tedavilerle etkin biçimde kontrol altına alınabilmesi ümit edilmektedir.

## REFERANSLAR

- Abudayyeh, Omar O., Jonathan S. Gootenberg, Silvana Konermann, Julia Joung, Ian M. Slaymaker, David B.T. Cox, Sergey Shmakov, Et Al. 2016. "C2c2 Is A Single-Component Programmable Rna-Guided Rna-Targeting Crispr Effector." *Science* 353(6299). Doi:10.1126/Science.Aaf5573;Issue:Issue:Doi.
- Altae-Tran, Han, Soumya Kannan, F. Esra Demircioglu, Rachel Oshiro, Suchita P. Nety, Luke J. McKay, Mensur Dlakić, Et Al. 2021. "The Widespread Is200/Is605 Transposon Family Encodes Diverse Programmable Rna-Guided Endonucleases." *Science* 374(6563): 57–65. Doi:10.1126/Science.Abj6856;Website:Website:Aaas-Site;Journal:Journal:Science;Wgroup:String:Publication.
- Anzalone, Andrew V., Xin D. Gao, Christopher J. Podracky, Andrew T. Nelson, Luke W. Koblan, Aditya Raguram, Jonathan M. Levy, Jaron A.M. Mercer, And David R. Liu. 2022. "Programmable Deletion, Replacement, Integration And Inversion Of Large Dna Sequences With Twin Prime Editing." *Nature Biotechnology* 40(5): 731–40. Doi:10.1038/S41587-021-01133-W.
- Anzalone, Andrew V., Peyton B. Randolph, Jessie R. Davis, Alexander A. Sousa, Luke W. Koblan, Jonathan M. Levy, Peter J. Chen, Et Al. 2019. "Search-And-Replace Genome Editing Without Double-Strand Breaks Or Donor Dna." *Nature* 576(7785): 149–57. Doi:10.1038/S41586-019-1711-4;Techmeta.
- Barrangou, Rodolphe, Christophe Fremaux, Hélène Deveau, Melissa Richards, Patrick Boyaval, Sylvain Moineau, Dennis A. Romero, And Philippe Horvath. 2007. "Crispr Provides Acquired Resistance Against Viruses In Prokaryotes." *Science (New York, N.Y.)* 315(5819): 1709–12. Doi:10.1126/Science.1138140.
- Boch, Jens, Heidi Scholze, Sebastian Schornack, Angelika Landgraf, Simone Hahn, Sabine Kay, Thomas Lahaye, Anja Nickstadt, And Ulla Bonas. 2009. "Breaking The Code Of Dna Binding Specificity Of Tal-Type Iii Effectors." *Science* 326(5959): 1509–12. Doi:10.1126/Science.1178811.
- Broughton, James P., Xianding Deng, Guixia Yu, Clare L. Fasching, Venice Servellita, Jasmeet Singh, Xin Miao, Et Al. 2020. "Crispr–Cas12-Based Detection Of Sars-Cov-2." *Nature Biotechnology* 2020 38:7 38(7): 870–74. Doi:10.1038/S41587-020-0513-4.
- Chandrasegaran, Srinivasan, And Dana Carroll. 2016. "Origins Of Programmable Nucleases For Genome Engineering." *Journal Of Molecular Biology* 428(5): 963–89. Doi:10.1016/J.Jmb.2015.10.014.
- Chang, Howard H.Y., Nicholas R. Pannunzio, Noritaka Adachi, And Michael R. Lieber. 2017. "Non-Homologous Dna End Joining And Alternative Pathways To Double-Strand Break Repair." *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 18(8): 495–506. Doi:10.1038/Nrm.2017.48;Subjmeta.
- Chen, Janice S., Enbo Ma, Lucas B. Harrington, Maria Da Costa, Xinran Tian, Joel M. Palefsky, And Jennifer A. Doudna. 2018. "Crispr-Cas12a Target Binding Unleashes Indiscriminate Single-Stranded Dnase Activity." *Science* 360(6387): 436–39. Doi:10.1126/Science.Aar6245;Website:Website:Aaas-Site;Journal:Journal:Science;Wgroup:String:Publication.

- Christian, Michelle, Tomas Cermak, Erin L. Doyle, Clarice Schmidt, Feng Zhang, Aaron Hummel, Adam J. Bogdanove, And Daniel F. Voytas. 2010. "Targeting Dna Double-Strand Breaks With Tal Effector Nucleases." *Genetics* 186(2): 757–61. Doi:10.1534/Genetics.110.120717.
- Doudna, Jennifer A., And Emmanuelle Charpentier. 2014. "The New Frontier Of Genome Engineering With Crispr-Cas9." *Science* 346(6213). Doi:10.1126/Science.1258096.
- Durrant, Matthew G., Nicholas T. Perry, James J. Pai, Aditya R. Jangid, Januka S. Athukoralage, Masahiro Hiraizumi, John P. Mcspedon, Et Al. 2024. "Bridge Rnas Direct Programmable Recombination Of Target And Donor Dna." *Nature* 2024 630:8018 630(8018): 984–93. Doi:10.1038/S41586-024-07552-4.
- Fu, Yanfang, Jennifer A. Foden, Cyd Khayter, Morgan L. Maeder, Deepak Reyon, J. Keith Joung, And Jeffry D. Sander. 2013. "High-Frequency Off-Target Mutagenesis Induced By Crispr-Cas Nucleases In Human Cells." *Nature Biotechnology* 31(9): 822–26. Doi:10.1038/Nbt.2623.
- Gaj, Thomas, Charles A. Gersbach, And Carlos F. Barbas. 2013. "Zfn, Talen And Crispr/Cas-Based Methods For Genome Engineering." *Trends In Biotechnology* 31(7): 397. Doi:10.1016/J.Tibtech.2013.04.004.
- Gaudelli, Nicole M., Alexis C. Komor, Holly A. Rees, Michael S. Packer, Ahmed H. Badran, David I. Bryson, And David R. Liu. 2017. "Programmable Base Editing Of T To G C In Genomic Dna Without Dna Cleavage." *Nature* 551(7681): 464–71. Doi:10.1038/Nature24644;Techmeta.
- Gootenberg, Jonathan S., Omar O. Abudayyeh, Jeong Wook Lee, Patrick Essletzbichler, Aaron J. Dy, Julia Joung, Vanessa Verdine, Et Al. 2017. "Nucleic Acid Detection With Crispr-Cas13a/C2c2." *Science* 356(6336): 438–42. Doi:10.1126/Science.Aam9321;Page:String:Article/Chapter.
- Hiraizumi, Masahiro, Nicholas T. Perry, Matthew G. Durrant, Teppei Soma, Naoto Nagahata, Sae Okazaki, Januka S. Athukoralage, Et Al. 2024. "Structural Mechanism Of Bridge Rna-Guided Recombination." *Nature* 630(8018): 994–1002. Doi:10.1038/S41586-024-07570-2;Techmeta.
- Jasin, Maria, And Rodney Rothstein. 2013. "Repair Of Strand Breaks By Homologous Recombination." *Cold Spring Harbor Perspectives In Biology* 5(11). Doi:10.1101/Cshperspect.A012740.
- Jinek, Martin, Krzysztof Chylinski, Ines Fonfara, Michael Hauer, Jennifer A. Doudna, And Emmanuelle Charpentier. 2012. "A Programmable Dual-Rna-Guided Dna Endonuclease In Adaptive Bacterial Immunity." *Science* 337(6096): 816–21. Doi:10.1126/Science.1225829.
- Kim, Hui Kwon, Goosang Yu, Jinman Park, Seonwoo Min, Sungtae Lee, Sungroh Yoon, And Hyongbum Henry Kim. 2020. "Predicting The Efficiency Of Prime Editing Guide Rnas In Human Cells." *Nature Biotechnology* 2020 39:2 39(2): 198–206. Doi:10.1038/S41587-020-0677-Y.
- Kim, Yang Gyun, Jooyeon Cha, And Srinivasan Chandrasegaran. 1996. "Hybrid Restriction Enzymes: Zinc Finger Fusions To Fok I Cleavage Domain." *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America* 93(3): 1156–60. Doi:10.1073/Pnas.93.3.1156;Issue:Issue:Doi.
- Komor, Alexis C., Yongjoo B. Kim, Michael S. Packer, John A. Zuris, And David R. Liu. 2016. "Programmable Editing Of A Target Base In Genomic Dna Without Double-Stranded Dna Cleavage." *Nature* 2015 533:7603 533(7603): 420–24. Doi:10.1038/Nature17946.

- Lieber, Michael R. 2010. "The Mechanism Of Double-Strand Dna Break Repair By The Nonhomologous Dna End Joining Pathway." *Annual Review Of Biochemistry* 79: 181. Doi:10.1146/Annurev.Biochem.052308.093131.
- Loenen, Wil A.M., David T.F. Dryden, Elisabeth A. Raleigh, Geoffrey G. Wilson, And Noreen E. Murray. 2014. "Highlights Of The Dna Cutters: A Short History Of The Restriction Enzymes." *Nucleic Acids Research* 42(1): 3–19. Doi:10.1093/Nar/Gkt990.
- Makarova, Kira S., Yuri I. Wolf, Jaime Iranzo, Sergey A. Shmakov, Omer S. Alkhnbashi, Stan J.J. Brouns, Emmanuelle Charpentier, Et Al. 2019. "Evolutionary Classification Of Crispr–Cas Systems: A Burst Of Class 2 And Derived Variants." *Nature Reviews Microbiology* 2019 18:2 18(2): 67–83. Doi:10.1038/S41579-019-0299-X.
- Mali, Prashant, Luhan Yang, Kevin M. Esvelt, John Aach, Marc Guell, James E. Dicarlo, Julie E. Norville, And George M. Church. 2013. "Rna-Guided Human Genome Engineering Via Cas9." *Science* 339(6121): 823–26. Doi:10.1126/Science.1232033.
- Mengstie, Misganaw Asmamaw, And Belay Zawdie Wondimu. 2021. "Mechanism And Applications Of Crispr/Cas-9-Mediated Genome Editing." *Biologics : Targets & Therapy* 15: 353. Doi:10.2147/Btt.S326422.
- Miller, Jeffrey C., Siyuan Tan, Guijuan Qiao, Kyle A. Barlow, Jianbin Wang, Danny F. Xia, Xiangdong Meng, Et Al. 2010. "A Tale Nuclease Architecture For Efficient Genome Editing." *Nature Biotechnology* 2010 29:2 29(2): 143–48. Doi:10.1038/Nbt.1755.
- Mojica, Francisco J.M., César Díez-Villaseñor, Jesús García-Martínez, And Elena Soria. 2005. "Intervening Sequences Of Regularly Spaced Prokaryotic Repeats Derive From Foreign Genetic Elements." *Journal Of Molecular Evolution* 60(2): 174–82. Doi:10.1007/S00239-004-0046-3.
- Mojica, Francisco J.M., Cesar Díez-Villaseñor, Elena Soria, And Guadalupe Juez. 2000. "Biological Significance Of A Family Of Regularly Spaced Repeats In The Genomes Of Archaea, Bacteria And Mitochondria." *Molecular Microbiology* 36(1): 244–46. Doi:10.1046/J.1365-2958.2000.01838.X.
- Nager, Andrew R., Jaclyn S. Goldstein, Vicente Herranz-Pérez, Didier Portran, Fan Ye, Jose Manuel Garcia-Verdugo, And Maxence V. Nachury. 2017. "An Actin Network Dispatches Ciliary Gpcrs Into Extracellular Vesicles To Modulate Signaling." *Cell* 168(1-2): 252–63.E14. Doi:10.1016/J.Cell.2016.11.036.
- Nishimasu, Hiroshi, F. Ann Ran, Patrick D. Hsu, Silvana Konermann, Soraya I. Shehata, Naoshi Dohmae, Ryuichiro Ishitani, Feng Zhang, And Osamu Nureki. 2014. "Crystal Structure Of Cas9 In Complex With Guide Rna And Target Dna." *Cell* 156(5): 935–49. Doi:10.1016/J.Cell.2014.02.001.
- Van Der Oost, John, Edze R. Westra, Ryan N. Jackson, And Blake Wiedenheft. 2014. "Unravelling The Structural And Mechanistic Basis Of Crispr–Cas Systems." *Nature Reviews Microbiology* 2014 12:7 12(7): 479–92. Doi:10.1038/Nrmicro3279.
- Palmiter, R. D., And R. L. Brinster. 1986. "Germ-Line Transformation Of Mice." *Annual Review Of Genetics* 20: 465–99. Doi:10.1146/Annurev.Ge.20.120186.002341.
- Perry, Nicholas T., Liam J. Bartie, Dhruva Katrekar, Gabriel A. Gonzalez, Matthew G. Durrant, James J. Pai, Alison Fanton, Et Al. 2025. "Megabase-Scale Human Genome Rearrangement With Programmable Bridge Recombinases." *Science*.

- Doi:10.1126/Science.Adz0276;Page:String:Article/Chapter.
- Rees, Holly A., And David R. Liu. 2018. "Base Editing: Precision Chemistry On The Genome And Transcriptome Of Living Cells." *Nature Reviews Genetics* 2018 19:12 19(12): 770–88. Doi:10.1038/S41576-018-0059-1.
- Richardson, Christopher D., Graham J. Ray, Mark A. Dewitt, Gemma L. Curie, And Jacob E. Corn. 2016. "Enhancing Homology-Directed Genome Editing By Catalytically Active And Inactive Crispr-Cas9 Using Asymmetric Donor Dna." *Nature Biotechnology* 2016 34:3 34(3): 339–44. Doi:10.1038/Nbt.3481.
- Roberts, Richard J. 2005. "How Restriction Enzymes Became The Workhorses Of Molecular Biology." *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America* 102(17): 5905–8. Doi:10.1073/Pnas.0500923102.
- Silva, George, Laurent Poirot, Roman Galetto, Julianne Smith, Guillermo Montoya, Philippe Duchateau, And Frédéric Pâques. 2011. "Meganucleases And Other Tools For Targeted Genome Engineering: Perspectives And Challenges For Gene Therapy." *Current Gene Therapy* 11(1): 11. Doi:10.2174/156652311794520111.
- Smith, Hamilton O., And Daniel Nathans. 1973. "A Suggested Nomenclature For Bacterial Host Modification And Restriction Systems And Their Enzymes." *Journal Of Molecular Biology* 81(3): 419–23. Doi:10.1016/0022-2836(73)90152-6.
- Sternberg, Samuel H., Sy Redding, Martin Jinek, Eric C. Greene, And Jennifer A. Doudna. 2014. "Dna Interrogation By The Crispr Rna-Guided Endonuclease Cas9." *Nature* 2014 507:7490 507(7490): 62–67. Doi:10.1038/Nature13011.
- Sutton, Brian. "The Story Behind Photograph 51 | Feature From King's College London." <https://www.kcl.ac.uk/the-story-behind-photograph-51> (October 8, 2025).
- Urnov, Fyodor D., Edward J. Rebar, Michael C. Holmes, H. Steve Zhang, And Philip D. Gregory. 2010a. "Genome Editing With Engineered Zinc Finger Nucleases." *Nature Reviews Genetics* 11(9): 636–46. Doi:10.1038/Nrg2842.
- Urnov, Fyodor D., Edward J. Rebar, Michael C. Holmes, H. Steve Zhang, And Philip D. Gregory. 2010b. "Genome Editing With Engineered Zinc Finger Nucleases." *Nature Reviews Genetics* 2010 11:9 11(9): 636–46. Doi:10.1038/Nrg2842.
- Watson, J. D., And F. H.C. Crick. 1953. "Molecular Structure Of Nucleic Acids: A Structure For Deoxyribose Nucleic Acid." *Nature* 171(4356): 737–38. Doi:10.1038/171737a0.
- Yamano, Takashi, Hiroshi Nishimasu, Bernd Zetsche, Hisato Hirano, Ian M. Slaymaker, Yinqing Li, Iana Fedorova, Et Al. 2016. "Crystal Structure Of Cpf1 In Complex With Guide Rna And Target Dna." *Cell* 165(4): 949–62. Doi:10.1016/J.Cell.2016.04.003.
- Yeh, Charles D., Christopher D. Richardson, And Jacob E. Corn. 2019. "Advances In Genome Editing Through Control Of Dna Repair Pathways." *Nature Cell Biology* 2019 21:12 21(12): 1468–78. Doi:10.1038/S41556-019-0425-Z.
- Zetsche, Bernd, Jonathan S. Gootenberg, Omar O. Abudayyeh, Ian M. Slaymaker, Kira S. Makarova, Patrick Essletzbichler, Sara E. Volz, Et Al. 2015. "Cpf1 Is A Single Rna-Guided Endonuclease Of A Class 2 Crispr-Cas System." *Cell* 163(3): 759–71. Doi:10.1016/J.Cell.2015.09.038.
- Zhang, Xiao Hui, Louis Y. Tee, Xiao Gang Wang, Qun Shan Huang, And Shi Hua Yang. 2015. "Off-Target Effects In Crispr/Cas9-Mediated Genome Engineering." *Molecular Therapy Nucleic Acids* 4(11): E264.

Doi:10.1038/Mtna.2015.37.



# **KRD Toplam Kurallarına Giriş**

**Jale Y. SÜNGÜ**

1- Prof. Dr.; Kocaeli Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü.  
[jyilmazkaya@kocaeli.edu.tr](mailto:jyilmazkaya@kocaeli.edu.tr) ORCID No:0000-0002-1046-5755

## ÖZET

Kuantum Renk Dinamiği (KRD) toplam kuralları, perturbatif olmayan rejimdeki hadron özelliklerini (kütle, bozunma sabiti ve form faktörler gibi), temel KRD Lagrangian'ının kuark ve gluon derecesindeki parametreleriyle ilişkilendiren güçlü bir analitik yöntemdir. Bu yöntem, Shifman, Vainshtein ve Zakharov tarafından 1979' da önerilmiştir ve temelini, hadronik akımların korelasyon fonksiyonlarının Operatör Çarpım Açılımı (OPE) ile analizinden alır. OPE, korelasyon fonksiyonunu, perturbatif KRD katkıları ile kuark kondensatları, gluon kondensatları gibi vakum beklenen değerlerine sahip perturbatif olmayan operatörlerin toplamı olarak ifade eder. Bir taraftan bu açılım kuark-gluon dilinde hesaplanırken, diğer taraftan aynı fonksiyon, hadronik spektrum (rezonanslar ve süreklilik) parametreleri cinsinden ifade edilir. Bu iki temsilin eşitlenmesi ve Borel dönüşümü gibi matematiksel tekniklerle süreklilik katkısının baskılanması sonucu, hadronik parametreler için sayısal tahminler sağlayan "toplam kuralları" elde edilir. Bu çalışma, SVZ toplam kurallarının metodolojisini,  $\rho$  mezonu ve nükleon gibi basit hadronlara uygulanışını özetlemekte, yöntemin gücünü ve sistematik belirsizliklerini tartışmaktadır.

*Anahtar Kelimeler - KRD toplam kuralları, operatör çarpım açılımı, kondensatlar, Borel dönüşümü, perturbatif olmayan KRD, hadron spektroskopisi*

## GİRİŞ

Kuantum Renk Dinamiği, güçlü etkileşimi tanımlayan temel kuantum alan kuramıdır (Gell-Mann, 1964). Bu kuramda kuarklar, gluonlar aracılığıyla etkileşir. Gluonlar yalnızca kuvveti iletmekle kalmaz, aynı zamanda renk yükü taşıdıkları için birbirleriyle de etkileşirler. Özetle KRD, atom çekirdeğini oluşturan hadronların yapısını, bağlanmasını ve dinamiklerini açıklayan, modern parçacık fiziğinin temel taşlarından biridir (Muta, 1998). Ancak KRD'nin düşük enerji bölgesi, perturbatif tekniklerin geçerli olmadığı non-perturbatif bir bölgedir.

KRD'nin temel özellikleri şunlardır (Gross ve Wilczek, 1973; Politzer, 1973):

- **Renk yükü:** Güçlü etkileşimin yüküdür ve üç türü vardır. Hadronlar renk açısından her zaman nötrdür.

- **Hapsolma (confinement):** Kuarklar ve gluonlar tek başlarına gözlenemez; yalnızca hadronlar (örneğin proton, nötron, pion) içinde bulunurlar.
- **Asimptotik özgürlük:** Yüksek enerjilerde (kısa mesafelerde) kuarklar zayıf etkileşir, düşük enerjilerde ise etkileşim güçlenir.
- **Kütlenin kökeni:** Görünür maddenin kütesinin büyük bölümü kuarkların çıplak kütlelerinden değil, QCD etkileşimlerinden ve gluon alanlarının dinamiğinden kaynaklanır.
- **Boşluk yapısı: KRD** boşluğu, yoğunlaşmalar (kondensatlar) gibi karmaşık yapılar içerir ve hadron özelliklerini belirlemede önemli rol oynar (Shifman vd., 1979a).

### Temel problem:

- Kuarklar ve gluonlar, deneylerde direk olarak gözlenemez (kuarklar ebediyen hadronlar içine renk yükü nedeniyle hapsolmuşlardır),
- Hadronlar ise deneyde gözlenebilir,
- KRD Lagrangiani kuark ve gluonlar cinsindendir.

KRD toplam kuralları, bu iki dünya arasında analitik bir köprü kurar (Ioffe, 2006).

### KRD Vakumu: Boşluk Gerçekten Boş mu?

KRD vakumu, kuantum alan teorisinin en zengin yapılarından biridir.

| Klasik Vakum | Kuantum Vakum                                                                                             |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alan yok     | $\langle 0   \bar{q} q   0 \rangle \neq 0,$<br>$\langle 0   G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a   0 \rangle \neq 0$ |

Bu nicelikler vakum kondensatları olarak adlandırılır (Gell-Mann, Oakes ve Renner, 1968). Bu nicelikler, vakumun pasif değil, hadron özelliklerini belirleyen aktif bir ortam olduğunu gösterir.

KRD vakumu klasik anlamda boş bir uzay değildir; dış bir alan olmaksızın kendiliğinden organize olmuş, ferromanyetik bir ortamı andıran dinamik bir yapıya sahiptir. Bu yapıda kuark ve gluon kondensatları, ferromanyetik bir maddede ortaya çıkan mıknatıslanma

gibi, sistemin makroskopik özelliklerini belirleyen düzen parametreleri rolünü üstlenir (Narison, 2004):

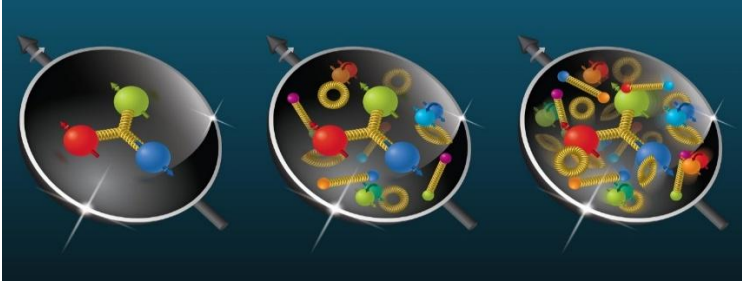
KRD vakumu  $\leftrightarrow$  ferromanyetik ortam  
kondensatlar  $\leftrightarrow$  mıknatıslanma

Benzer biçimde, süperiletkenlikte Cooper çiftlerinin oluşması enerji spektrumunda bir boşluk (gap) yaratırken, KRD’de kuark–antikark kondensatının oluşumu kuarkların dinamik olarak kütle kazanmasına yol açar; dolayısıyla hadron kütlesi, süperiletkenlikteki enerji boşluğu gibi, temel parçacıkların tekil özelliklerinden değil KRD vakumunun kolektif etkilerinden kaynaklanır (Shifman vd., 1979a):

kuark kondensatı  $\leftrightarrow$  Cooper çiftleri  
kütle oluşumu  $\leftrightarrow$  enerji boşluğu (gap).

### Protonun iç yapısı: Neden kütlesi büyük?

Proton kütlesi:  $m_p \simeq 938$  MeV. Oysa onu oluşturan üç kuarkın çıplak kütleleri toplamı, yalnızca birkaç MeV mertebesinde:  $m_u + m_u + m_d \approx 10$  MeV. Sonuç olarak, proton kütlelerinin %99’ u KRD vakumu ve gluon dinamiklerinden gelir (Reinders vd., 1985).

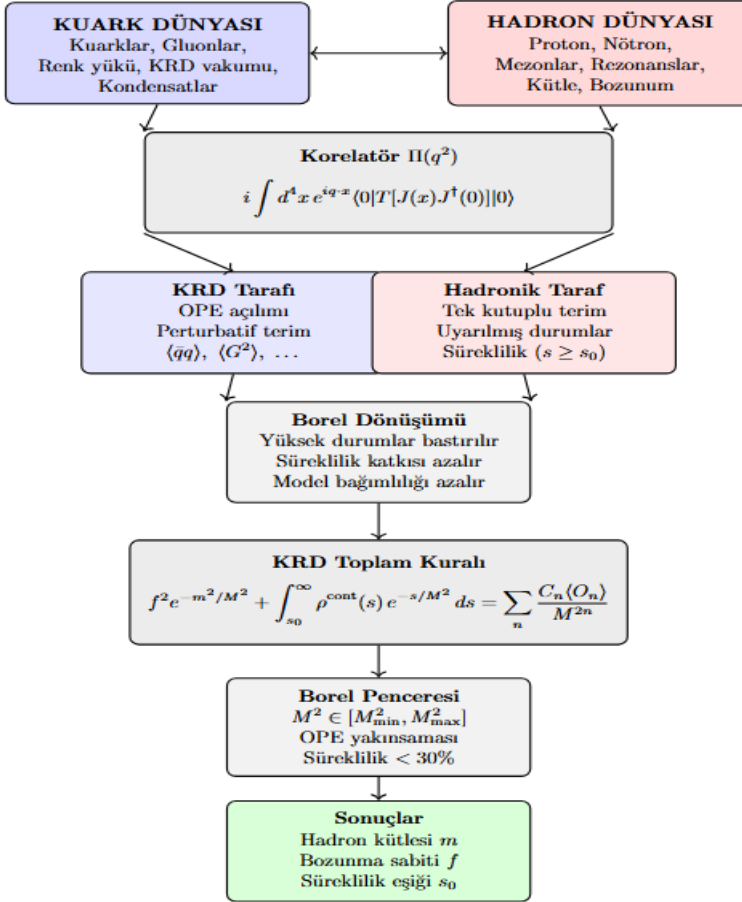


İlk dönem araştırmaları (solda), protonların gluonlar tarafından bir arada tutulan üç kuarka sahip olduğunu söylüyordu (sağda). Deneyler, daha sonra daha karmaşık bir tablo ortaya çıkardı (ortada). Karmaşık kuark-gluon çorbası (sağda), gelecekteki Elektron-İyon Çarpıştırıcısı'nda incelenecek

(Görsel: Brookhaven Ulusal Laboratuvarı)

## 1. Matematiksel Temel

KRD Toplam Kuralları, hadronların kütleleri ve bozunma sabitleri gibi özelliklerini, temel KRD parametreleri (kuark ve gluon kondensatları) cinsinden tahmin etmek için kullanılan güçlü bir analitik yöntemdir (Colangelo ve Khodjamirian, 2001). Bu yaklaşım, OPE hadronik bir temsille Borel dönüşümü altında eşleyerek, pertürbatif olmayan etkileri kontrol altında tutar. Özellikle hafif ve ağır mezonların spektroskopisi, egzotik durumlar ve hadronik bozunma süreçlerinin incelenmesinde yaygın olarak uygulanır (Shifman vd., 1979b).



## 1.1 Korelasyon Fonksiyonu

KRD toplam kurallarının temeli iki-nokta korelasyon fonksiyonudur ve hesaplamada başlangıç noktasıdır (Shifman vd., 1979a):

$$\Pi_{\mu\nu}(q) = i \int d^4x e^{iq \cdot x} \langle 0 | T [J_\mu(x) J_\nu^\dagger(0)] | 0 \rangle.$$

Burada  $J(x)$  ilgilenilen hadronun kuantum sayılarına sahip yerel bir akımdır. Bir akım operatörü, Kuantum Renk Dinamiği (KRD) Toplam Kuralları'nda, belirli bir hadronu (veya hadron ailesini) temsil eden matematiksel bir operatördür. Bu operatörler, hadronun kuantum sayılarını (spin, parite, yük eşleniği, izospin vb.) taşıyan ve kuark/gluon alanlarının bir kombinasyonu olarak yazılır.

Tablo 1: Hadron türlerine göre akımlar (Reinders vd., 1985).

| Hadron Türü       | Akım Operatörü                                       | $J^{PC}$        | Örnek Hadronlar                       |
|-------------------|------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| Skaler Mezon      | $\bar{q}q$                                           | $0^{++}$        | $f_0(500)$ , $f_0(980)$               |
| Psödoskaler Mezon | $i\bar{q}\gamma_5 q$                                 | $0^{-+}$        | $\pi$ , $K$ , $\eta$ , $\eta'$        |
| Vektör Mezon      | $\bar{q}\gamma^\mu q$                                | $1^{--}$        | $\rho$ , $\omega$ , $\phi$ , $J/\psi$ |
| Eksenel Vektör    | $\bar{q}\gamma^\mu\gamma_5 q$                        | $1^{++}$        | $a_1(1260)$                           |
| Tensor Mezon      | $\bar{q}\sigma^{\mu\nu} q$                           | $1^{+-}$        | $f_2(1270)$                           |
| Nükleon           | $\epsilon[u^T C \gamma_\mu u] \gamma^\mu \gamma_5 d$ | $\frac{1}{2}^+$ | Proton, Nötron                        |
| Delta             | $\epsilon[u^T C \gamma^\mu u] u$                     | $\frac{3}{2}^+$ | $\Delta^{++}(1232)$                   |
| Tetrakuark        | $[\bar{q}\Gamma q][\bar{q}\Gamma' q]$                | Çeşitli         | $Z_c(3900)$ , $X(3872)$               |
| Hibrit            | $\bar{q}\gamma_\nu q G^{\mu\nu}$                     | $1^{+-}$        | $\pi_1(1400)$                         |

Bu akım ifadelerinde görülen  $\Gamma = 1, \gamma_\mu, \gamma_5, \gamma_\mu \gamma_5$  gibi Dirac matrislerini,  $q$  kuark alanlarını belirtir. Her akım belli  $J, P$  ve  $C$  kuantum sayılarına sahiptir. Mezonun toplam açısal momentumu,  $|l - s| < J < |l + s|$  genel bağıntısı ile verilir. Burada  $s$ , sıfır (antiparalel kuark spinleri) ya da bir (paralel kuark spinleri) değerini alır ve spin olarak

adlandırılır,  $l$  ise yörüngesel açısal momentumdur. Mezonlar için paritenin tanımı  $P = (-1)^{l+1}$ , yük eşleniğinin tanımı ise  $C = (-1)^{l+s}$  ile verilir. Böylece mezonlar  $J$ ,  $P$  ve  $C$  kuantum sayıları kullanılarak sınıflandırılır.

## 1.2 İkili Temsil

### 1.2.1 KRD/OPE Tarafı (Kısa Mesafe)

OPE kullanılarak:

$$\Pi_{QCD}(Q^2) = \sum_n \frac{C_n(Q^2)}{Q^{2n}} \langle O_n \rangle$$

Burada:

- $C_n$  = Wilson katsayıları (pertürbatif QCD' de hesaplanabilir)
- $\langle O_n \rangle$  = Vakum kondensatları (pertürbatif değil)
- $Q^2 = -q^2 > 0$

### 1.2.2 Hadronik Taraf (Spektral Temsil)

Hadronik taraf, korelatörün hadronların fiziksel durumları üzerinden spektral yoğunluk ile ifade edildiği temsildir. Bu yaklaşım, dispersiyon ilişkisi kullanılarak matematiksel olarak kurulur:

$$\Pi^{\text{Had}}(q^2) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty ds \frac{\text{Im } \Pi(s)}{s - q^2 - i\epsilon} + \text{çıkarılan terimler}$$

Burada spektral fonksiyon  $\text{Im } \Pi(s)$ , fiziksel hadron durumlarının katkılarını içerir. Bu fonksiyon genellikle iki bileşene ayrılır: temel hadrona karşılık gelen tek kutuplu terim ve uyarılmış durumlar ile çok-parçacıklı sürekliliği temsil eden süreklilik katkısı. Bu, "kutup + süreklilik" modeli olarak bilinir:

$$\frac{1}{\pi} \text{Im } \Pi(s) = f_H^2 \delta(s - m_H^2) + \theta(s - s_0).$$

Burada:

- $f_H$  = Akımın hadrona kuplajı  $c$
- $m_H$  = Hadron kütlesi
- $s_0$  = Süreklilik eşik parametresi.

Süreklilik katkısı genellikle pertürbatif KRD hesaplamaları ile modellenir veya yarı-deneyssel yöntemlerle parametrize edilir. Bu spektral parametrizasyon, hadronik tarafı fiziksel olarak yorumlanabilir parametrelerle ifade etmemizi sağlar. Daha sonra “Borel dönüşümü” uygulanarak bu ifade, KRD tarafındaki operatör ürün açılımı ile karşılaştırılabilir hale getirilir. Böylece hadronik özellikler (kütle ve bozunma sabiti) ile KRD'nin temel parametreleri (kondensatlar) arasında nicel bir ilişki kurulmuş olur. Bu yöntem, özellikle hafif ve ağır hadronların spektroskopik özelliklerinin incelenmesinde güçlü bir araç sunar.

## 2. Borel Dönüşümü

Yakınsamayı iyileştirmek ve sürekliliği bastırmak için, Borel dönüşümü tanımlanır:

$$\hat{B}_{M^2} [\Pi(Q^2)] = \lim_{Q^2, n \rightarrow \infty} \frac{1}{n!} (Q^2)^{n+1} \left(-\frac{d}{dQ^2}\right)^n \Pi(Q^2).$$

Burada:

- $Q^2 = -q^2$  (Öklid uzayında dört-momentum karesi),
- $n$  türev mertebesi,
- $M^2$  Borel kütle parametresidir.

Bu dönüşüm:

1. **Yüksek dereceli kondensat terimlerini**  $1/(M^2)^k$  ile bastırır,
2. **Süreklilik katkısını** üstel bir faktör  $e^{-s/M^2}$  ile bastırır,
3. **Kutuplu yapıyı** ise  $e^{-m_H^2/M^2}$  ile korur,
4. **Operator çarpım açılımının** daha hızlı yakınsamasını sağlar.

Borel dönüşümünün uygulanmış hâli:

$$\hat{B}_{M^2} \left[ \frac{1}{s-Q^2} \right] = e^{-s/M^2}.$$

Bu sayede:

- **Hadronik taraf:**

$$f_H^2 e^{-m_H^2/M^2} + \int_{s_0}^{\infty} ds \rho^{cont}(s) e^{-s/M^2}$$

- **KRD tarafı (OPE):**

$$\sum_n \frac{C_n(Q^2)}{(M^2)^n} \langle O_n \rangle$$

şeklinde ifade edilir ve iki taraf Borel penceresinde karşılaştırılabilir.

### **KRD Toplam Kurallarında Borel Penceresi ( $M_{\min}^2$ ve $M_{\max}^2$ ) Belirleme Kriterleri**

Borel penceresi, KRD Toplam Kuralları analizinin en kritik adımıdır.  $M_{\min}^2$  ve  $M_{\max}^2$  değerleri aşağıdaki üç temel kriterle belirlenir:

#### **1. OPE Yakınsaklığı Kriteri (Alt Sınır: $M_{\min}^2$ )**

OPE' nin belirli bir Borel parametresi  $M^2$ ' den itibaren yakınsak kabul edilmesi için, yüksek boyutlu kondensat katkılarının toplam katkıya oranı küçük olmalıdır.

Matematiksel Kriter:

$$R_{OPE}(M^2) \equiv \frac{|\Pi_{\text{Dim}>d}(M^2)|}{|\Pi_{\text{Toplam}}(M^2)|} \leq 0.10 - 0.15$$

Yani, en yüksek boyutlu terimin mutlak katkısı, toplam korelatörün %10-15' ini geçmemelidir.

- Genellikle boyut-6 kondensatın (ör. dört-kuark) katkısı izlenir.
- $M^2$  değeri küçüldükçe, yüksek boyutlu terimlerin katkısı  $1/(M^2)^n$  ile hızla artar.
- $M^2_{\min}$ , yüksek boyutlu katkıların kontrol altına alındığı en küçük  $M^2$  değeri olarak seçilir.
- Tipik aralık: Hafif kuark sistemleri için  $\sim 0.8 - 1.2 \text{ GeV}^2$ , ağır kuark sistemleri için  $\sim 4 - 10 \text{ GeV}^2$ .

## 2. Süreklilik Katkısı Kriteri (Üst Sınır: $M^2_{\max}$ )

Hadronik taraftaki süreklilik katkısının (uyarılmış durumlar ve çok-parçacıklı durumlar) toplam katkıya oranı belirli bir eşiğin altında olmalıdır.

Matematiksel Kriter:

Süreklilik katkısının oranı ( $R_C$ ):

$$R_C(M^2) \equiv \frac{\int_{s_0}^{\infty} ds \rho^{cont}(s) e^{-s/M^2}}{f_H^2 e^{-m_H^2/M^2} + \int_{s_0}^{\infty} ds \rho^{cont}(s) e^{-s/M^2}} \leq 0.30 - 0.50$$

Yani, süreklilik katkısı toplam hadronik katkının %30-50' sini geçmemelidir.

- $M^2$  arttıkça, üstel faktör  $e^{-s/M^2}$  daha yavaş azalır ve süreklilik katkısı nispeten daha büyük hale gelir.
- $M^2_{\max}$ , süreklilik katkısının kabul edilebilir sınıra ulaştığı en büyük  $M^2$  değeridir.
- Bu kriter, **temel kutuplu terimin (ilgilenilen hadron) baskınlığını** garanti eder.

### 3. Kutup Baskınlığı Kriteri (Ek Kontrol)

Temel hadronun (kutuplu terim) katkısının, toplam hadronik katkı içindeki payı yeterince büyük olmalıdır.

$$R_C(M^2) \equiv \frac{f_H^2 e^{-m_H^2/M^2}}{f_H^2 e^{-m_H^2/M^2} + \int_{s_0}^{\infty} ds \rho^{cont}(s) e^{-s/M^2}} \leq 0.50 - 0.70$$

Bu, aslında süreklilik kriterinin diğer yüzüdür.

Kutup baskınlığı kriteri, Borel penceresinin doğru seçildiğini teyit eden önemli bir kontrol mekanizmasıdır. Bu üç kriter (OPE yakınsaması, süreklilik bastırma ve kutup baskınlığı) birlikte, toplam kurallarının güvenilir sonuçlar verdiği optimal çalışma bölgesini tanımlar.

OPE açılımında yer alan vakum kondensatları, KRD' nin non-pertürbatif yapısını karakterize eden temel parametrelerdir. Bu kondensatların doğru değerleri, toplam kurallarından elde edilen hadron özelliklerinin (kütle, bozunma sabitleri vb.) hassasiyetini doğrudan etkiler. Kondensat değerleri, farklı fenomenolojik analizlerden, Örgü KRD hesaplamalarından ve teorik modellerden belirlenmektedir.

Tablo 2, literatürde yaygın olarak kullanılan vakum kondensatlarının nümerik değerlerini ve bu değerlerin belirlendiği temel kaynakları göstermektedir (Gell-Mann, Oakes ve Renner (1968); Shifman vd. (1979a), Shifman vd. (1979a); Novikov vd. (1979), Belyaev ve Ioffe (1982); Dosch ve Narison (1998), Shifman vd. (1979a); Latorre vd. (1985), Novikov vd. (1979); Pivovarov (1991)).

Tablo 2: Kondensat değerleri.

| Kondensat                                  | Boyut | Yaklaşık Değer                                    | Fiziksel Yorum          |
|--------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------|-------------------------|
| $\langle \bar{q}q \rangle$                 | 3     | $\sim (240 \text{ MeV})^3$                        | Kiral simetri kırılması |
| $\langle \frac{\alpha_s}{\pi} G^2 \rangle$ | 4     | $\sim 0.012 \text{ GeV}^4$                        | Gluon vakum enerjisi    |
| $\langle \bar{q}g_s \sigma G q \rangle$    | 5     | $\sim 0.8 \text{ GeV}^2 \langle \bar{q}q \rangle$ | Kuark-gluon korelasyonu |
| $\langle (\bar{q}\Gamma q)^2 \rangle$      | 6     | $\rho(\bar{q}q)^2$ ( $\rho \approx 3-5$ )         | Dört kuark vakum etkisi |
| $\langle g_s^3 G^3 \rangle$                | 6     | $\sim 0.045 \text{ GeV}^6$                        | Gluon öz-etkileşimi     |

## SONUÇ

Kuantum Renk Dinamiği Toplam Kuralları, hadron fiziğinin pertürbatif olmayan rejimini araştırmak için geliştirilmiş matematiksel olarak titiz ve kavramsal olarak derin bir çerçeve sunmaktadır. Bu yöntem, temel KRD parametreleri ile hadronların gözlemlenebilir özellikleri arasında doğrudan bir köprü kurarak, kuark ve gluonların hapsolme mekanizmasını nicel olarak incelememize olanak tanır.

### Metodolojik Güçlü Yönler

1. **Sistematik Yaklaşım:** OPE ile hadronik spektral yoğunluğu Borel dönüşümü altında eşleştirilerek, pertürbatif olmayan etkileri kontrollü bir şekilde hesaba katar.
2. **Çok Yönlü Uygulama Alanı:**
  - o Geleneksel mezon ve baryon spektroskopisi
  - o Egzotik durumların (tetrakuarklar, pentakuarklar, melekler) incelenmesi
  - o Hadron özelliklerinin sonlu sıcaklık ve yoğunluktaki davranışı
  - o Nükleer madde içindeki hadron modifikasyonları
3. **Parametre Bağımsızlığı:** Hadronik özellikler, temel KRD parametrelerinden (kondensatlar,  $\alpha_s$ ) türetilir ve bu parametreler literatürde iyi belirlenmiştir.

### Metodolojik Zorluklar ve Sınırlamalar

1. **Model Bağımlılıkları:**
  - o Süreklilik katkısının parametrizasyonu
  - o Faktörizasyon varsayımı (dört-kuark kondensatları için)
  - o Yüksek boyutlu kondensatların belirsizliği
2. **Sistematik Hatalar:**
  - o Borel penceresi seçimindeki keyfilik
  - o OPE' nin yüksek mertebe terimlerinin ihmal edilmesi
  - o Kuark-hadron ikiliği varsayımının geçerlilik sınırları
3. **Sayısal Hassasiyet:** Kondensat değerlerindeki %10-20'lik belirsizlikler, nihai sonuçlara yansımaktadır.

## Gelecek Perspektifi ve Güncel Gelişmeler

1. **Yüksek Hassasiyet Hesaplamaları:** Kafes KRD' den elde edilen daha kesin kondensat değerleri
2. **Yeni Akım Yapıları:** Egzotik durumlar için daha sofistike akım operatörleri
3. **Çevresel Etkiler:** Sonlu sıcaklık, yoğunluk ve manyetik alandaki toplam kurallar
4. **Nöral Ağ Entegrasyonu:** Toplam kural analizlerinde makine öğrenimi tekniklerinin uygulanması

KRD Toplam Kuralları, pertürbatif olmayan KRD'nin analitik olarak incelenebildiği en sistematik yaklaşımlardan biridir. Yöntem, yaklaşık 50 yıldır hadron fiziğinde sayısız başarılı uygulama ile kendini kanıtlamıştır. Özellikle hafif ve ağır hadronların spektroskopik özelliklerinin tahmininde, deneysel verilerle dikkat çekici bir uyum sergilemektedir.

Ancak, yöntemin güvenilirliği, uygun akım seçimine, doğru kondensat değerlerine ve titiz bir Borel analizine bağlıdır. Son yıllarda, egzotik hadronların keşfiyle birlikte, toplam kuralların bu yeni durumları açıklama potansiyeli yeniden ilgi odağı haline gelmiştir.

Sonuç olarak, KRD Toplam Kuralları, hadron fiziğinin temel problemlerine ışık tutmaya devam eden ve teorik gelişmelerle sürekli zenginleşen dinamik bir araştırma alanı olarak önemini korumaktadır. Yöntem, temel parçacık fiziğinde pertürbatif olmayan olaya dair kavrayışımızı derinleştiren vazgeçilmez bir araçtır.

## KAYNAKLAR

1. Belyaev, V.M., & Ioffe, B.L. (1982). *Determination of baryon masses by QCD sum rules*. Soviet Physics JETP, 56(3), 493-501.
2. Colangelo, P., ve Khodjamirian, A. (2001). QCD sum rules, a modern perspective. At the frontier of particle physics. Handbook of QCD. Vol. 1-3, 1495-1576.
3. Dosch, H.G., & Narison, S. (1998). *Light quark masses from QCD sum rules*. Physics Letters B, 417(1-2), 173-179.
4. Gell-Mann, M. (1964). A schematic model of baryons and mesons. *Physics Letters*, 8(3), 214-215.
5. Gell-Mann, M., Oakes, R.J., & Renner, B. (1968). *Behavior of current divergences under  $SU(3) \times SU(3)$* . Physical Review, 175(5), 2195-2199.

6. Gross, D. J. and Wilczek, F. (1973). Asymptotic freedom in non-Abelian gauge theories. *Physical Review Letters*, 30, 1343–1346.
7. Ioffe, B.L. (2006). QCD sum rules: A personal view. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 157(1), 131-135.
8. Latorre, J.I., Pascual, P., & Tarrach, R. (1985). *Short-distance behaviour of the four-quark condensate in QCD*. Nuclear Physics B, 250(1-4), 309-326.
9. Muta, T. (1998). Foundations of Quantum Chromodynamics. Singapore: World Scientific Publishing.
10. Narison, S. (2004). QCD as a theory of hadrons: From partons to confinement. *Cambridge University Press*.
11. Novikov, V.A., Shifman, M.A., Vainshtein, A.I., & Zakharov, V.I. (1979). *Operator product expansion and quark masses*. Nuclear Physics B, 149(3), 420-444.
12. Pivovarov, A.A. (1991). *Renormalization group analysis of the gluon condensate in QCD*. Physics Letters B, 255(2), 254-258.
13. Politzer, H.D. (1973). Reliable perturbative results for strong interactions? *Physical Review Letters*, 30(26), 1346-1349.
14. Reinders, L.J., Rubinstein, H., and Yazaki, S. (1985). Hadron properties from QCD sum rules. *Physics Reports*, 127(1), 1-97.
15. Shifman, M.A., Vainshtein, A.I., and Zakharov, V.I. (1979). QCD and resonance physics. Theoretical foundations. *Nuclear Physics B*, 147(5), 385-447.
16. Shifman, M.A., Vainshtein, A.I., and Zakharov, V.I. (1979). QCD and resonance physics. Applications. *Nuclear Physics B*, 147(5), 448-518.



# **En Küçük Kartezyen Grup Düzleminde Pappus Teoremi Üzerine**

**Sümeyye Büşra YAMAN<sup>1</sup>**

**Ziya AKÇA<sup>2</sup>**

1- Doktora Öğrencisi; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, 26480 Eskişehir, Türkiye. [kbsumeyye@gmail.com](mailto:kbsumeyye@gmail.com) ORCID No: 0000-0002-5148-0767

2- Prof. Dr.; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, 26480 Eskişehir, Türkiye. [zakca@ogu.edu.tr](mailto:zakca@ogu.edu.tr) ORCID No: 0000-0001-6379-0546

## ÖZET

Bu çalışma, en küçük kartezyen grup düzlemi üzerinde Pappus Teoreminin geçerliliğini incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmada, projektif düzlemler ve temel kavramlar tanımlanarak, Öklid geometrisinden projektif geometriye geçiş açıklanmıştır. En küçük kartezyen grup kullanılarak oluşturulan 25. mertebeden en küçük kartezyen grup düzleminin 5. mertebeden alt düzleminin noktalar ve doğrular sistematik olarak belirlenmiş, üzerlerinde bulunma bağıntısı ile geometrik ilişkiler ortaya konmuştur.

Pappus konfigürasyonu iki doğru üzerinde seçilen üçer noktanın karşılıklı doğrularının kesişim noktalarının doğrudan olduğu gösterilmiştir. Geometrik ve cebirsel analizler, tablo temelli gösterim ve Python programlama dili ile algoritmik doğrulama ile desteklenmiştir. Çalışma, bu sonlu projektif alt düzlemde Pappus Teoreminin geçerliliğini somut olarak göstermekte ve geometrik yapının cebirsel ilişkilerle birlikte incelenmesine olanak sağlamaktadır. Tablo ve algoritmik doğrulama yöntemi, kartezyen grup düzleminin bütün noktaları kullanılarak Dezarg ve Pappus teoremlerinin geçerli olacağını koşulları belirlemek için temel bir model sunacaktır.

*Anahtar Kelimeler: Pappus Teoremi, Kartezyen Grup Düzlemi, Projektif Geometri, Galois Cismi, SonluProjektif Düzlemler, Algoritmik Doğrulama*

---

## GİRİŞ

Projektif geometri, klasik Öklid geometrisinin paralellik kavramını ortadan kaldırarak daha genel ve simetrik bir yapı sunar. Bu yaklaşım, hem cebirsel hem de geometrik yöntemlerin birlikte kullanılabildiği güçlü bir kuramsal çerçeve oluşturur. Özellikle sonlu projektif düzlemler, kombinatorik geometri, cebirsel geometri ve hesaplamalı geometri açısından önemli örnekler sunmaktadır.

Sonlu projektif düzlemler ve bu düzlemlerde ortaya çıkan geometrik yapılar, sonlu geometrinin temel çalışma alanlarından birini oluşturur. Özellikle, sonlu cebirsel yapılarla koordinatlanan projektif düzlemlerde alt düzlemler, konikler, özel doğrular, konfigürasyonlar ve ark yapıları üzerine yapılan çalışmalar literatürde önemli bir yer tutmaktadır [1], [2], [4], [6], [8], [9].

Projektif düzlemlerin sınıflandırmasında, konfigürasyonların inşası, farklı projektif uzaylara gömme çalışmaları ve özel düzlemlerin analizi önemli rol oynar [3], [5], [7].

Projektif düzlemlerin en dikkat çekici özelliklerinden biri, belirli teoremlerin her projektif düzlemde geçerli olmamasıdır. Bu bağlamda Pappus teoremi, projektif düzlemlerin sınıflandırılmasında temel bir rol oynar. Bir projektif düzlemin Pappus Teoremini sağlaması, altta yatan cebirsel yapının değişmeli bir cisimle ilişkilendirilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmanın amacı, en küçük kartezyen grup düzlemi olarak adlandırılan yapıyı ayrıntılı biçimde tanımlamak ve bu düzlemin bir alt düzleminde Pappus teoreminin bir konfigürasyon üzerinden geçerli olduğunu hem geometrik hem de algoritmik olarak göstermektir. Ayrıca, Python programlama dili kullanılarak Pappus konfigürasyonunun hesaplamalı doğrulaması yapılacak ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı biçimde açıklanacaktır.

## 2. PROJEKTİF DÜZLEMLER VE TEMEL KAVRAMLAR

### 2.1. Projektif Düzlem

$\mathcal{N}$  elemanları noktalar,  $\mathcal{D}$  elemanları doğrular olan birer küme ve  $\mathcal{N} \cap \mathcal{D} \neq \emptyset$  olsun.  $\circ$ ,  $\mathcal{N} \times \mathcal{D}$  kümesinde üzerinde bulunma bağıntısı iken  $\mathbb{P} = (\mathcal{N}, \mathcal{D}, \circ)$  geometrik yapısı aşağıdaki aksiyomları sağlıyor ise bu sisteme *projektif düzlem* denir.

**P1)**  $\forall M, N \in \mathcal{N}, M \neq N$  için  $\exists_1 d \in \mathcal{D} \ni d \circ M$  ve  $d \circ N$  dir. Yani, Her iki noktadan bir doğru geçer.

**P2)**  $\forall c, d \in \mathcal{D}$  için  $\exists N \in \mathcal{N} \ni N \circ c$  ve  $N \circ d$  dir. Yani, Her iki doğrunun kesiştiği en az bir nokta vardır.

**P3)**  $\mathcal{N}$  de herhangi üçü doğrudan olmayan 4 nokta vardır.

**Teorem 2.1.1:** Bir  $\mathbb{P} = (\mathcal{N}, \mathcal{D}, \circ)$  projektif düzleminde farklı iki doğru tek bir noktada kesişirler.  $\forall c, d \in \mathcal{D}, c \neq d$  için  $\exists_1 N \in \mathcal{N} \ni N \circ c$  ve  $N \circ d$  dir.

**Teorem 2.1.2:** Bir  $\mathbb{P} = (\mathcal{N}, \mathcal{D}, \circ)$  projektif düzleminde herhangi farklı iki doğrunun dışında (üzerinde olmayan) en az bir nokta vardır.

**Teorem 2.1.3:** Her sonlu  $\mathbb{P} = (\mathcal{N}, \mathcal{D}, \circ)$  projektif düzlemi için  $\exists n \in \mathbb{N} \ni$

- 1)  $\mathbb{P}$  nin her doğrusu üzerinde  $n + 1$  nokta vardır
- 2)  $\mathbb{P}$  nin her noktasından  $n + 1$  doğru geçer
- 3)  $|\mathcal{N}| = n^2 + n + 1$
- 4)  $|\mathcal{D}| = n^2 + n + 1$

dir ve bu koşulları sağlayan  $n \in \mathbb{N}$  ye  $\mathbb{P}$  nin mertebesi denir.

**Teorem 2.1.4:** Verilen bir  $F$  cismi için nokta ve doğruları bu cismin elemanlarıyla cebirsel olarak belirtilebilen bir projektif düzlem vardır.

Bu düzlem  $x_1, x_2, x_3 \in F$ ,  $x_1, x_2, x_3$  lerin hepsi birden sıfır olmamak koşuluyla  $(x_1, x_2, x_3)$  sıralı üçlüsü bir nokta gösterebilir. Üstelik her  $\lambda \in F, \lambda \neq 0$  için  $\lambda(x_1, x_2, x_3) = (\lambda x_1, \lambda x_2, \lambda x_3)$  üçlüsü ile  $(x_1, x_2, x_3)$  üçlüsü aynı noktayı gösterebilir.  $F$  cismi sonlu ve eleman sayısı  $n$  ise  $(n-1)$  tane üçlü aynı nokta olarak düşünülecektir. Yani;

$$\lambda(x_1, x_2, x_3) \equiv (x_1, x_2, x_3), \lambda \in F, \lambda \neq 0 \text{ iken}$$

$\mathcal{N}$  noktalar kümesi:

$$\{(x_1, x_2, x_3) : x_1, x_2, x_3 \in F, (x_1, x_2, x_3) \neq (0, 0, 0), \lambda(x_1, x_2, x_3) \equiv (x_1, x_2, x_3), \lambda \in F, \lambda \neq 0\} \text{ ve}$$

$\mathcal{D}$  doğrular kümesi:

$$D = \{[a_1, a_2, a_3] : a_1, a_2, a_3 \in F, [a_1, a_2, a_3] \neq [0, 0, 0], [a_1, a_2, a_3] \equiv \mu[a_1, a_2, a_3], \mu \in F, \mu \neq 0\}$$

şeklindeki koordinatlamaya Homogen koordinatlama denir. Burada  $\mathcal{N}$  ve  $\mathcal{D}$  ayrık kümelerdir. Bu kümelerin elemanları arasında

$$\circ : (x_1, x_2, x_3) \circ [a_1, a_2, a_3] \Leftrightarrow a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 = 0$$

şeklinde bir üzerinde bulunma bağıntısı verilirse  $(\mathcal{N}, \mathcal{D}, \circ)$  sistemi bir projektif düzlemdir.

**Örnek 2.1.1:**  $F = GF(2)$  olmak üzere  $\mathbb{P}_2 F$  projektif düzlemi oluşturalım.

$$\mathcal{N} = \{(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), (1, 1, 0), (1, 0, 1), (0, 1, 1), (1, 1, 1)\},$$

$$\mathcal{D} = \{[1, 0, 0], [0, 1, 0], [0, 0, 1], [1, 1, 0], [1, 0, 1], [0, 1, 1], [1, 1, 1]\},$$

$$a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 = 0. [0, 0, 1] \text{ doğrusu üzerindeki noktaları bulalım.}$$

$$(x_1, x_2, x_3) \circ [0, 0, 1] \Leftrightarrow 0x_1 + 0x_2 + 1x_3 = 0 \Rightarrow x_3 = 0$$

$$\Rightarrow x_1, x_2 \text{ keyfi } (x_1, x_2 \in F), x_3 = 0$$

Diğer doğrular üzerindeki noktalar benzer şekilde bulunur. Bu cisim için diğer doğrular göz önüne alındığında P1, P2, P3 aksiyomlarının sağlandığı görülür.

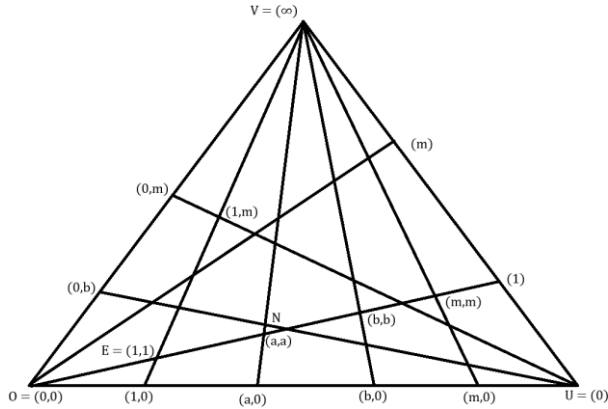
## 2.2. Projektif Düzlemlerin Koordinatlanması

Her projektif düzlem uygun bir  $S$  kümesinin elemanlarıyla koordinatlanabilir.

**Tanım 2.2.1:**  $\mathbb{P}$  mertebesi  $n$  olan bir projektif düzlem,  $S$  de 0 ve 1 ile gösterilen iki özel elemanı bulunan ve kardinalitesi  $n \geq 2$  olan bir küme olsun.  $\mathbb{P}$  de herhangi üçü doğrudan olmayan  $O, E, U, V$  noktalarından oluşan seçimli  $\{O, E, U, V\}$  koordinatlama dörtgeni ve  $S$  kümesini kullanarak  $\mathbb{P}$  nin noktalarını, doğrularını ve üzerinde bulunma bağıntısını belirleyelim.

### 2.2.1. Noktaların Koordinatlanması

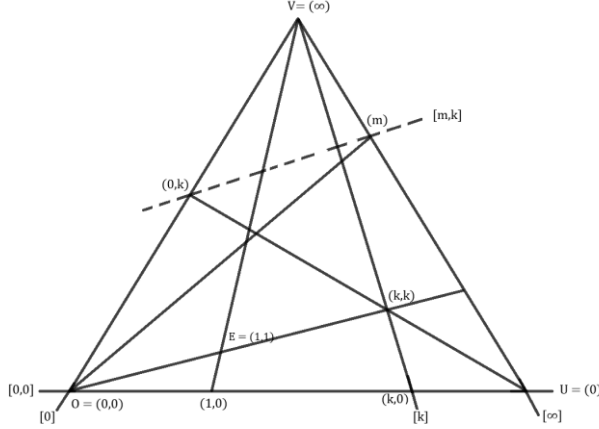
OE doğrusu üzerinde OE  $\wedge$  UV den başka her bir noktaya  $S^2$  nin  $(a, a)$  biçimindeki bir tek elemanını eşleyelim. Özel olarak,  $O = (0, 0)$ ,  $E = (1, 1)$  olsun. UV doğrusu üzerinde bulunmayan seçimli her bir  $N$  noktası için eğer  $NU \wedge OE = (b, b)$  ve  $NV \wedge OE = (a, a)$  ise  $N = (a, b)$  diyelim. Özel olarak OU doğrusu üzerindeki noktalar  $(a, 0)$  ve OV doğrusu üzerindeki noktalar  $(0, b)$  biçiminde koordinatlara sahip olur. UV nin  $[(0, 0) \vee (1, m)] \wedge UV$  olduğundan  $U = (0)$  dır.  $OE \wedge UV = [(0, 0) \vee (1, 1)] \wedge UV$  olup  $OE \wedge UV = (1)$  dir.  $\infty \notin S$  olmak üzere UV nin  $V$  noktası için  $V = (\infty)$  olsun.



Şekil 2.2.1.1

### 2.2.2. Doğruların Koordinatlanması

$V = (\infty)$  noktasından geçmeyen ve dolayısıyla UV ile bir  $(m)$  ortak noktasına ve OV ile bir  $(0, k)$  ortak noktasına sahip olan doğruya  $[m, k]$  koordinatını;  $V = (\infty)$  dan geçen ve  $OU = [0, 0]$  doğrusuyla bir  $(k, 0)$  ortak noktasına sahip olan doğruya  $[k]$  koordinatını ve UV doğrusuna da  $[\infty]$  koordinatını tayin edelim.



Şekil 2.2.2.1

Burada dikkat edilmesi gereken önemli husus, bu koordinatlamanın seçilen  $\{O, E, U, V\}$  dörtgenine bağlı olmasıdır.

### 2.2.3. Üzerinde Bulunma Bağıntısı:

Her  $m, k, x, y \in S$  için,

$$(\infty) \circ [\infty], (\infty) \circ [k], (\infty) \circ [\infty], (\infty) \not\circ [m, k]$$

$$(x) \circ [\infty], (x) \not\circ [k], (x) \circ [m, k] \Leftrightarrow x = m$$

$$(x, y) \not\circ [\infty], (x, y) \circ [k] \Leftrightarrow x = k, (x, y) \circ [m, k] \Leftrightarrow y = T(m, x, k)$$

$S$  kümesi ve “ $T: S^3 \rightarrow S \ni T(m, x, k) = y \Leftrightarrow (x, y) \circ [m, k]$ ” olacak biçimde  $T$  üçlü işleminin birlikte düşünülmesiyle yeni bazı kavramlar tanımlanabilir.

### 2.2.4. En Küçük Kartezyen Grup

$F_5 = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ , 5 in kalanlarından oluşan küme olmak üzere  $F_5$  üzerinde  $+$  ve  $\cdot$  işlemleri sırasıyla 5 modülüne göre toplama ve çarpma işlemleri iken  $(F_5, +, \cdot)$  bir cisimdir.

$S = F_5 \times F_5 = \{(x, y) \mid x, y \in F_5\}$  üzerinde  $\oplus$  ve  $\otimes$  işlemleri aşağıdaki biçimde tanımlanıyor.

$$(a, b) \oplus (c, d) = (a + c, b + d)$$

ve

$$(a, b) \otimes (c, d) = \begin{cases} (a, b) * (c, d), & b = 0 \text{ veya } (bc - ad)^2 - 2d^2 = 0, 1, 4 \text{ iken} \\ -(a, b) * (c, d) & , \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$(a, b) * (c, d) = \begin{cases} (a.c, a.d), & b = 0 \text{ iken} \\ (a.c - b^{-1}.d(a^2 - 2), b.c - a.d), & b \neq 0 \text{ iken} \end{cases}$$

ile belirli olsun. Böyle belirlenen  $(S, \oplus, \otimes)$  sistemi bir kartezyen gruptur. Bu sistemdeki çarpma işlemi aşağıdaki tablodaki hesaplanır.

| $\otimes$ | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 00        | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 01        | 00 | 30 | 10 | 40 | 20 | 01 | 21 | 14 | 44 | 31 | 02 | 33 | 42 | 12 | 23 | 03 | 32 | 43 | 13 | 22 | 04 | 24 | 11 | 41 | 34 |
| 02        | 00 | 40 | 30 | 20 | 10 | 02 | 43 | 22 | 32 | 13 | 04 | 14 | 31 | 21 | 44 | 01 | 11 | 34 | 24 | 41 | 03 | 42 | 23 | 33 | 12 |
| 03        | 00 | 10 | 20 | 30 | 40 | 03 | 12 | 33 | 23 | 42 | 01 | 41 | 24 | 34 | 11 | 04 | 44 | 21 | 31 | 14 | 02 | 13 | 32 | 22 | 43 |
| 04        | 00 | 20 | 40 | 10 | 30 | 04 | 34 | 41 | 11 | 24 | 03 | 22 | 13 | 43 | 32 | 02 | 23 | 12 | 42 | 33 | 01 | 31 | 44 | 14 | 21 |
| 10        | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 |
| 11        | 00 | 14 | 23 | 32 | 41 | 11 | 30 | 21 | 43 | 03 | 22 | 31 | 10 | 01 | 42 | 33 | 13 | 04 | 40 | 24 | 44 | 02 | 12 | 34 | 20 |
| 12        | 00 | 34 | 13 | 42 | 21 | 12 | 41 | 30 | 01 | 22 | 24 | 02 | 32 | 44 | 10 | 31 | 40 | 11 | 23 | 03 | 43 | 33 | 04 | 20 | 14 |
| 13        | 00 | 24 | 43 | 12 | 31 | 13 | 23 | 04 | 30 | 44 | 21 | 10 | 41 | 33 | 03 | 34 | 02 | 22 | 14 | 40 | 42 | 11 | 20 | 01 | 32 |
| 14        | 00 | 44 | 33 | 22 | 11 | 14 | 02 | 42 | 24 | 30 | 23 | 43 | 04 | 10 | 34 | 32 | 21 | 40 | 01 | 12 | 41 | 20 | 31 | 13 | 03 |
| 20        | 00 | 02 | 04 | 01 | 03 | 20 | 22 | 24 | 21 | 23 | 40 | 42 | 44 | 41 | 43 | 10 | 12 | 14 | 11 | 13 | 30 | 32 | 34 | 31 | 33 |
| 21        | 00 | 22 | 44 | 11 | 33 | 21 | 04 | 32 | 40 | 12 | 42 | 30 | 03 | 24 | 14 | 13 | 41 | 31 | 02 | 20 | 34 | 43 | 10 | 23 | 01 |
| 22        | 00 | 12 | 24 | 31 | 43 | 22 | 40 | 03 | 14 | 34 | 44 | 23 | 30 | 13 | 01 | 11 | 04 | 42 | 20 | 32 | 33 | 21 | 41 | 02 | 10 |
| 23        | 00 | 42 | 34 | 21 | 13 | 23 | 31 | 11 | 02 | 40 | 41 | 04 | 12 | 30 | 22 | 14 | 33 | 20 | 43 | 01 | 32 | 10 | 03 | 44 | 24 |
| 24        | 00 | 32 | 14 | 41 | 23 | 24 | 13 | 40 | 33 | 01 | 43 | 11 | 21 | 02 | 30 | 12 | 20 | 03 | 34 | 44 | 31 | 04 | 22 | 10 | 42 |
| 30        | 00 | 03 | 01 | 04 | 02 | 30 | 33 | 31 | 34 | 32 | 10 | 13 | 11 | 14 | 12 | 40 | 43 | 41 | 44 | 42 | 20 | 23 | 21 | 24 | 22 |

|    |                                                                            |
|----|----------------------------------------------------------------------------|
| 31 | 00 23 41 14 32 31 42 10 22 04 12 44 34 03 20 43 30 02 21 11 24 01 33 40 13 |
| 32 | 00 13 21 34 42 32 24 44 03 10 14 01 43 20 33 41 22 30 12 04 23 40 02 11 31 |
| 33 | 00 43 31 24 12 33 10 02 41 21 11 32 20 42 04 44 01 13 30 23 22 34 14 03 40 |
| 34 | 00 33 11 44 22 34 01 23 10 43 13 20 02 31 41 42 14 24 03 30 21 12 40 32 04 |
| 40 | 00 04 03 02 01 40 44 43 42 41 30 34 33 32 31 20 24 23 22 21 10 14 13 12 11 |
| 41 | 00 11 22 33 44 41 03 13 31 20 32 12 01 40 21 23 34 10 04 43 14 30 24 42 02 |
| 42 | 00 31 12 43 24 42 32 01 20 11 34 40 14 22 02 21 03 33 41 10 13 44 30 04 23 |
| 43 | 00 21 42 13 34 43 14 20 04 33 31 03 23 11 40 24 10 44 32 02 12 22 01 30 41 |
| 44 | 00 41 32 23 14 44 20 34 12 02 33 24 40 04 13 22 42 01 10 31 11 03 43 21 30 |

### 2.3. P<sub>2</sub>S nin 5. Mertebeden Bir Alt Düzleminin İnşası:

#### I) Düzlemin Noktaları

$((0, 0), (0, 0)), ((0, 0), (1, 0)), ((0, 0), (2, 0)), ((0, 0), (3, 0)), ((0, 0), (4, 0)), ((0, 0))$   
 $((1, 0), (0, 0)), ((1, 0), (1, 0)), ((1, 0), (2, 0)), ((1, 0), (3, 0)), ((1, 0), (4, 0)), ((1, 0))$   
 $((2, 0), (0, 0)), ((2, 0), (1, 0)), ((2, 0), (2, 0)), ((2, 0), (3, 0)), ((2, 0), (4, 0)), ((2, 0))$   
 $((3, 0), (0, 0)), ((3, 0), (1, 0)), ((3, 0), (2, 0)), ((3, 0), (3, 0)), ((3, 0), (4, 0)), ((3, 0))$   
 $((4, 0), (0, 0)), ((4, 0), (1, 0)), ((4, 0), (2, 0)), ((4, 0), (3, 0)), ((4, 0), (4, 0)), ((4, 0))$   
 $(\infty)$

#### II) Düzlemin Doğruları

$[(0, 0), (0, 0)], [(0, 0), (1, 0)], [(0, 0), (2, 0)], [(0, 0), (3, 0)], [(0, 0), (4, 0)], [(0, 0)]$   
 $[(1, 0), (0, 0)], [(1, 0), (1, 0)], [(1, 0), (2, 0)], [(1, 0), (3, 0)], [(1, 0), (4, 0)], [(1, 0)]$   
 $[(2, 0), (0, 0)], [(2, 0), (1, 0)], [(2, 0), (2, 0)], [(2, 0), (3, 0)], [(2, 0), (4, 0)], [(2, 0)]$   
 $[(3, 0), (0, 0)], [(3, 0), (1, 0)], [(3, 0), (2, 0)], [(3, 0), (3, 0)], [(3, 0), (4, 0)], [(3, 0)]$   
 $[(4, 0), (0, 0)], [(4, 0), (1, 0)], [(4, 0), (2, 0)], [(4, 0), (3, 0)], [(4, 0), (4, 0)], [(4, 0)]$   
 $[(\infty)]$

### III) Üzerinde Olma Yapısı

|                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $[(0, 0), (0, 0)]: ((0, 0), (0, 0)), ((1, 0), (0, 0)), ((2, 0), (0, 0)), ((3, 0), (0, 0)), ((4, 0), (0, 0)), ((0, 0))$ |
| $[(0, 0), (1, 0)]: ((0, 0), (1, 0)), ((1, 0), (1, 0)), ((2, 0), (1, 0)), ((3, 0), (1, 0)), ((4, 0), (1, 0)), ((0, 0))$ |
| $[(0, 0), (2, 0)]: ((0, 0), (2, 0)), ((1, 0), (2, 0)), ((2, 0), (2, 0)), ((3, 0), (2, 0)), ((4, 0), (2, 0)), ((0, 0))$ |
| $[(0, 0), (3, 0)]: ((0, 0), (3, 0)), ((1, 0), (3, 0)), ((2, 0), (3, 0)), ((3, 0), (3, 0)), ((4, 0), (3, 0)), ((0, 0))$ |
| $[(0, 0), (4, 0)]: ((0, 0), (4, 0)), ((1, 0), (4, 0)), ((2, 0), (4, 0)), ((3, 0), (4, 0)), ((4, 0), (4, 0)), ((0, 0))$ |
| $[(1, 0), (0, 0)]: ((0, 0), (0, 0)), ((1, 0), (1, 0)), ((2, 0), (2, 0)), ((3, 0), (3, 0)), ((4, 0), (4, 0)), ((1, 0))$ |
| $[(1, 0), (1, 0)]: ((0, 0), (1, 0)), ((1, 0), (2, 0)), ((2, 0), (3, 0)), ((3, 0), (4, 0)), ((4, 0), (0, 0)), ((1, 0))$ |
| $[(1, 0), (2, 0)]: ((0, 0), (2, 0)), ((1, 0), (3, 0)), ((2, 0), (4, 0)), ((3, 0), (0, 0)), ((4, 0), (1, 0)), ((1, 0))$ |
| $[(1, 0), (3, 0)]: ((0, 0), (3, 0)), ((1, 0), (4, 0)), ((2, 0), (0, 0)), ((3, 0), (1, 0)), ((4, 0), (2, 0)), ((1, 0))$ |
| $[(1, 0), (4, 0)]: ((0, 0), (4, 0)), ((1, 0), (0, 0)), ((2, 0), (1, 0)), ((3, 0), (2, 0)), ((4, 0), (3, 0)), ((1, 0))$ |
| $[(2, 0), (0, 0)]: ((0, 0), (0, 0)), ((1, 0), (2, 0)), ((3, 0), (1, 0)), ((2, 0), (4, 0)), ((4, 0), (3, 0)), ((2, 0))$ |
| $[(2, 0), (1, 0)]: ((0, 0), (1, 0)), ((1, 0), (3, 0)), ((2, 0), (0, 0)), ((3, 0), (2, 0)), ((4, 0), (4, 0)), ((2, 0))$ |
| $[(2, 0), (2, 0)]: ((0, 0), (2, 0)), ((1, 0), (4, 0)), ((2, 0), (1, 0)), ((3, 0), (3, 0)), ((4, 0), (0, 0)), ((2, 0))$ |
| $[(2, 0), (3, 0)]: ((0, 0), (3, 0)), ((1, 0), (0, 0)), ((2, 0), (2, 0)), ((3, 0), (4, 0)), ((4, 0), (1, 0)), ((2, 0))$ |
| $[(2, 0), (4, 0)]: ((0, 0), (4, 0)), ((1, 0), (1, 0)), ((2, 0), (3, 0)), ((3, 0), (0, 0)), ((4, 0), (2, 0)), ((2, 0))$ |
| $[(3, 0), (0, 0)]: ((0, 0), (0, 0)), ((3, 0), (4, 0)), ((2, 0), (1, 0)), ((4, 0), (2, 0)), ((4, 0), (3, 0)), ((3, 0))$ |
| $[(3, 0), (1, 0)]: ((0, 0), (1, 0)), ((1, 0), (4, 0)), ((2, 0), (2, 0)), ((3, 0), (0, 0)), ((4, 0), (3, 0)), ((3, 0))$ |
| $[(3, 0), (2, 0)]: ((0, 0), (2, 0)), ((1, 0), (0, 0)), ((2, 0), (3, 0)), ((3, 0), (1, 0)), ((4, 0), (4, 0)), ((3, 0))$ |
| $[(3, 0), (3, 0)]: ((0, 0), (3, 0)), ((1, 0), (1, 0)), ((2, 0), (4, 0)), ((3, 0), (2, 0)), ((4, 0), (0, 0)), ((3, 0))$ |
| $[(3, 0), (4, 0)]: ((0, 0), (4, 0)), ((1, 0), (2, 0)), ((2, 0), (0, 0)), ((3, 0), (3, 0)), ((4, 0), (1, 0)), ((3, 0))$ |
| $[(4, 0), (0, 0)]: ((0, 0), (0, 0)), ((1, 0), (4, 0)), ((2, 0), (3, 0)), ((3, 0), (2, 0)), ((4, 0), (1, 0)), ((4, 0))$ |
| $[(4, 0), (1, 0)]: ((0, 0), (1, 0)), ((1, 0), (0, 0)), ((2, 0), (4, 0)), ((3, 0), (3, 0)), ((4, 0), (2, 0)), ((4, 0))$ |
| $[(4, 0), (2, 0)]: ((0, 0), (2, 0)), ((1, 0), (1, 0)), ((2, 0), (0, 0)), ((3, 0), (4, 0)), ((4, 0), (3, 0)), ((4, 0))$ |
| $[(4, 0), (3, 0)]: ((0, 0), (3, 0)), ((1, 0), (2, 0)), ((2, 0), (1, 0)), ((3, 0), (0, 0)), ((4, 0), (4, 0)), ((4, 0))$ |
| $[(4, 0), (4, 0)]: ((0, 0), (4, 0)), ((1, 0), (3, 0)), ((2, 0), (2, 0)), ((3, 0), (1, 0)), ((4, 0), (0, 0)), ((4, 0))$ |
| $[(0, 0)]: ((0, 0), (0, 0)), ((0, 0), (1, 0)), ((0, 0), (2, 0)), ((0, 0), (3, 0)), ((0, 0), (4, 0)), (\infty)$         |
| $[(1, 0)]: ((1, 0), (0, 0)), ((1, 0), (1, 0)), ((1, 0), (2, 0)), ((1, 0), (3, 0)), ((1, 0), (4, 0)), (\infty)$         |

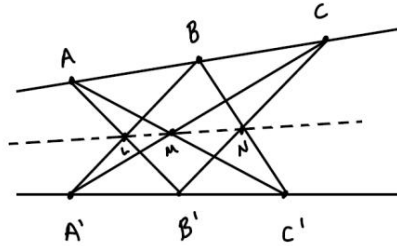
|                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $[(2, 0)]: ((2, 0), (0, 0)), ((2, 0), (1, 0)), ((2, 0), (2, 0)), ((2, 0), (3, 0)), ((2, 0), (4, 0)), (\infty)$ |
| $[(3, 0)]: ((3, 0), (0, 0)), ((3, 0), (1, 0)), ((3, 0), (2, 0)), ((3, 0), (3, 0)), ((3, 0), (4, 0)), (\infty)$ |
| $[(4, 0)]: ((4, 0), (0, 0)), ((4, 0), (1, 0)), ((4, 0), (2, 0)), ((4, 0), (3, 0)), ((4, 0), (4, 0)), (\infty)$ |
| $[\infty]: ((0, 0)), ((1, 0)), ((2, 0)), ((3, 0)), ((4, 0)), (\infty)$                                         |

### 3. PAPPUS TEOREMİ

Pappus teoremi, bir doğru üzerinde bulunan üç nokta ile başka bir doğru üzerinde bulunan üç noktanın belirli bir kurala göre eşleştirilmesi sonucu elde edilen doğruların kesişim noktalarının doğrudan doğruya olduğunu ifade eder.

**Pappus Teoremi:**  $A, B, C$  ve  $A', B', C'$  bir projektif düzlemde sırasıyla  $d$  ve  $d'$  gibi farklı iki doğru üzerinde bulunan,  $d \wedge d'$  den ve birbirinden farklı altı nokta ise  $L = AB' \wedge A'B$ ,  $M = AC' \wedge A'C$ ,  $N = BC' \wedge B'C$  noktaları doğrudan doğruya.

Görüldüğü gibi Pappus aksiyomuna ilişkin herhangi bir konfigürasyon 9 nokta ve 9 doğrudan oluşur. Böyle bir konfigürasyonda  $L, M, N$  noktalarını üzerinde bulunduran doğruya Pappus doğrusu denir. (Bkz. Şekil 3.1). Aşkar olarak Pappus teoremi projektif bir teoremdir, yani projektif olarak değişmez kavramlar cinsinden ifade edilen bir teoremdir.



Şekil 3.1

### 4. KARTEZYEN GRUP DÜZLEMİNDE PAPPUS TEOREMİNİN GÖSTERİMİ

Bu bölümde, önceki bölümde tanımlanan Pappus konfigürasyonu, en küçük kartezyen grup düzleminin 5. mertebeden alt düzlemi üzerinde somutlaştırılacaktır. Düzlemde kullanılacak noktalar ve doğrular, sistematik bir biçimde seçilir ve tablo yöntemi ile organize edilir. Tablo, her bir nokta ve doğruyu kartezyen grup elemanlarıyla ilişkilendirerek, konfigürasyonun

yapısını ve ilişkilerini açık ve sistematik bir biçimde ortaya koyar. Seçilen noktalar üzerinden, Pappus teoremine göre karşılıklı doğruların kesişim noktaları belirlenir:

$$L=AB'\cap A'B, M=AC'\cap A'C, N=BC'\cap B'C$$

Bu kesişim noktaları tablodaki koordinatlar kullanılarak adım adım hesaplanır. Elde edilen  $L, M, N$  noktalarının doğrudaş olduğu gösterildiğinde, düzlemin Pappus teoremini sağladığı sonucuna ulaşılır

Sonuç olarak tablo temelli adım adım kesişim analizi, Pappus konfigürasyonunun en küçük kartezyen grup düzleminin bir alt düzleminde de açık ve anlaşılır biçimde ortaya konmasını sağlamaktadır. Benzer yöntemler, diğer kartezyen düzlemler ve farklı grup yapıları üzerinde de uygulanabilir; özellikle daha büyük veya karmaşık gruplarda tablo analizi kullanılarak Pappus teoreminin geçerliliği araştırılabilir. Bu yaklaşım hem geometrik yapıların hem de altta yatan cebirsel ilişkilerin incelenmesinde rehberlik eden bir yöntem sunar ve ileri düzey çalışmalar için temel bir model oluşturur.

## 5. ALGORİTMİK DOĞRULAMA: PYTHON KODLARI

Bu bölümde, Pappus konfigürasyonunun 25. mertebeden en küçük kartezyen grup düzleminin 5. mertebeden bir alt düzleminde doğrulanması amacıyla iki farklı Python uygulaması sunulmuştur. Kodlar, hem olası tüm durumları hem de kullanıcı etkileşimli kontrolleri sistematik olarak incelemektedir.

### 5.1. Olası Durumları Yazdıran Kod

İlk Python uygulaması, en küçük kartezyen grup düzleminin 5. mertebeden bir alt düzleminde P2S nin 5. mertebeden bir alt düzleminin inşası için oluşturduğumuz tablodaki tüm olası Pappus konfigürasyonlarını otomatik olarak taramak ve yazdırmak için geliştirilmiştir. Kod, tekli noktaları ve bunların oluşturduğu doğruları tablo haline getirir. Her bir nokta ve doğru, kartezyen grup elemanlarıyla ilişkilendirilir ve tüm kombinasyonlar sistematik olarak incelenir. Karşılıklı doğruların kesişim noktaları hesaplanır ve bu noktaların doğrudaşlığı kontrol edilir. Ortak satırın “[ $\infty$ ]” olup olmadığı incelenerek Pappus konfigürasyonunun geçerliliği doğrulanır. Kod aşağıda verilmiştir:

# --- Tekli noktalar ---

tekli\_noktalar = [((0,0)), ((1,0)), ((2,0)), ((3,0)), ((4,0))]

# Tablo

tablo = {

"((0,0),(0,0))": [((0,0),(0,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(0,0)), ((4,0),(0,0)), ((0,0)),  
"((0,0),(1,0))": [((0,0),(1,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(1,0)), ((3,0),(1,0)), ((4,0),(1,0)), ((0,0)),  
"((0,0),(2,0))": [((0,0),(2,0)), ((1,0),(2,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(2,0)), ((4,0),(2,0)), ((0,0)),  
"((0,0),(3,0))": [((0,0),(3,0)), ((1,0),(3,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(3,0)), ((4,0),(3,0)), ((0,0)),  
"((0,0),(4,0))": [((0,0),(4,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(4,0)), ((3,0),(4,0)), ((4,0),(4,0)), ((0,0)),  
"((1,0),(0,0))": [((0,0),(0,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(3,0)), ((4,0),(4,0)), ((1,0)),  
"((1,0),(1,0))": [((0,0),(1,0)), ((1,0),(2,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(4,0)), ((4,0),(0,0)), ((1,0)),  
"((1,0),(2,0))": [((0,0),(2,0)), ((1,0),(3,0)), ((2,0),(4,0)), ((3,0),(0,0)), ((4,0),(1,0)), ((1,0)),  
"((1,0),(3,0))": [((0,0),(3,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(1,0)), ((4,0),(2,0)), ((1,0)),  
"((1,0),(4,0))": [((0,0),(4,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(1,0)), ((3,0),(2,0)), ((4,0),(3,0)), ((1,0)),  
"((2,0),(0,0))": [((0,0),(0,0)), ((1,0),(2,0)), ((3,0),(1,0)), ((2,0),(4,0)), ((4,0),(3,0)), ((2,0)),  
"((2,0),(1,0))": [((0,0),(1,0)), ((1,0),(3,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(2,0)), ((4,0),(4,0)), ((2,0)),  
"((2,0),(2,0))": [((0,0),(2,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(1,0)), ((3,0),(3,0)), ((4,0),(0,0)), ((2,0)),  
"((2,0),(3,0))": [((0,0),(3,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(4,0)), ((4,0),(1,0)), ((2,0)),  
"((2,0),(4,0))": [((0,0),(4,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(0,0)), ((4,0),(2,0)), ((2,0)),  
"((3,0),(0,0))": [((0,0),(0,0)), ((3,0),(4,0)), ((2,0),(1,0)), ((4,0),(2,0)), ((4,0),(3,0)), ((3,0)),  
"((3,0),(1,0))": [((0,0),(1,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(0,0)), ((4,0),(3,0)), ((3,0)),  
"((3,0),(2,0))": [((0,0),(2,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(1,0)), ((4,0),(4,0)), ((3,0)),  
"((3,0),(3,0))": [((0,0),(3,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(4,0)), ((3,0),(2,0)), ((4,0),(0,0)), ((3,0)),  
"((3,0),(4,0))": [((0,0),(4,0)), ((1,0),(2,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(3,0)), ((4,0),(1,0)), ((3,0)),  
"((4,0),(0,0))": [((0,0),(0,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(2,0)), ((4,0),(1,0)), ((4,0)),  
"((4,0),(1,0))": [((0,0),(1,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(4,0)), ((3,0),(3,0)), ((4,0),(2,0)), ((4,0)),  
"((4,0),(2,0))": [((0,0),(2,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(4,0)), ((4,0),(3,0)), ((4,0)),  
"((4,0),(3,0))": [((0,0),(3,0)), ((1,0),(2,0)), ((2,0),(1,0)), ((3,0),(0,0)), ((4,0),(4,0)), ((4,0)),  
"((4,0),(4,0))": [((0,0),(4,0)), ((1,0),(3,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(1,0)), ((4,0),(0,0)), ((4,0)),  
"((0,0))": [((0,0),(0,0)), ((0,0),(1,0)), ((0,0),(2,0)), ((0,0),(3,0)), ((0,0),(4,0)), float('inf')],

```

"[(1,0)"]': [((1,0),(0,0)), ((1,0),(1,0)), ((1,0),(2,0)), ((1,0),(3,0)), ((1,0),(4,0)), float('inf')],
"[(2,0)"]': [((2,0),(0,0)), ((2,0),(1,0)), ((2,0),(2,0)), ((2,0),(3,0)), ((2,0),(4,0)), float('inf')],
"[(3,0)"]': [((3,0),(0,0)), ((3,0),(1,0)), ((3,0),(2,0)), ((3,0),(3,0)), ((3,0),(4,0)), float('inf')],
"[(4,0)"]': [((4,0),(0,0)), ((4,0),(1,0)), ((4,0),(2,0)), ((4,0),(3,0)), ((4,0),(4,0)), float('inf')],
"[∞]": [((0,0)), ((1,0)), ((2,0)), ((3,0)), ((4,0)), float('inf')]
# Ortak satırı bulma
def ortak_satir(nokta1, nokta2):
    for satir, noktalar in tablo.items():
        if nokta1 in noktalar and nokta2 in noktalar:
            return satir
    return None
# Kesişim noktalarını bulma
def intersection_points_from_lines(line1, line2):
    if not line1 or not line2:
        return []
    pts1 = [p for p in tablo.get(line1, []) if p != float('inf')]
    pts2 = [p for p in tablo.get(line2, []) if p != float('inf')]
    return [p for p in pts1 if p in pts2]
# Noktaları uygun formatta yazma
def format_point_list(plist):
    if not plist:
        return None
    if len(plist) == 1:
        p = plist[0]
        if isinstance(p, tuple) and len(p) == 2 and isinstance(p[0], tuple):
            return f'(({p[0][0]},{p[0][1]}),({p[1][0]},{p[1][1]}))'
        return f'(({p[0]},{p[1]}))'
    inner = ", ".join(f'({pt[0]},{pt[1]})' for pt in plist)
    return f'({inner})'

```

# Kombinasyonları yazdır

def kombinasyonlari\_yaz():

# Başlangıç noktaları manuel olarak belirleniyor

A\_noktalari =

[((0,0),(0,0)),((0,0),(1,0)),((0,0),(2,0)),((0,0),(3,0)),((0,0),(4,0)),((1,0),(0,0)),((1,0),(1,0)),((1,0),(2,0)),((1,0),(3,0)),((1,0),(4,0)),((2,0),(0,0)),((2,0),(1,0)),((2,0),(2,0)),((2,0),(3,0)),((2,0),(4,0)),((3,0),(0,0)),((3,0),(1,0)),((3,0),(2,0)),((3,0),(3,0)),((3,0),(4,0)),((4,0),(0,0)),((4,0),(1,0)),((4,0),(2,0)),((4,0),(3,0)),((4,0),(4,0))]

B\_noktalari =

[((1,0),(0,0)),((1,0),(1,0)),((1,0),(2,0)),((1,0),(3,0)),((1,0),(4,0)),((2,0),(0,0)),((2,0),(1,0)),((2,0),(2,0)),((2,0),(3,0)),((2,0),(4,0)),((3,0),(0,0)),((3,0),(1,0)),((3,0),(2,0)),((3,0),(3,0)),((3,0),(4,0)),((4,0),(0,0)),((4,0),(1,0)),((4,0),(2,0)),((4,0),(3,0)),((4,0),(4,0))]

C\_noktalari = [((2,0),(0,0)),

((2,0),(1,0)),((2,0),(2,0)),((2,0),(3,0)),((2,0),(4,0)),((3,0),(0,0)),((3,0),(1,0)),((3,0),(2,0)),((3,0),(3,0)),((3,0),(4,0)),((4,0),(0,0)),((4,0),(1,0)),((4,0),(2,0)),((4,0),(3,0)),((4,0),(4,0))]

# Kombinasyonları oluştur

for A in A\_noktalari:

# A' = aynı ilk koordinat, kendisi hariç

A\_adaylar = [pt for pt in A\_noktalari if pt[0][0] == A[0][0] and pt != A]

for A\_ in A\_adaylar:

for B in B\_noktalari:

B\_adaylar = [pt for pt in B\_noktalari if pt[0][0] == B[0][0] and pt != B]

for B\_ in B\_adaylar:

for C in C\_noktalari:

C\_adaylar = [pt for pt in C\_noktalari if pt[0][0] == C[0][0] and pt != C]

for C\_ in C\_adaylar:

# Doğrular

AB\_ = ortak\_satir(A, B\_)

```

A_B = ortak_satir(A_, B)
AC_ = ortak_satir(A, C_)
A_C = ortak_satir(A_, C)
BC_ = ortak_satir(B, C_)
B_C = ortak_satir(B_, C)
if not all([AB_, A_B, AC_, A_C, BC_, B_C]):
    continue
# Kesişim noktaları
L_list = intersection_points_from_lines(AB_, A_B) if AB_
and A_B else []
M_list = intersection_points_from_lines(AC_, A_C) if
AC_ and A_C else []
N_list = intersection_points_from_lines(BC_, B_C) if BC_
and B_C else []
# Tüm listeler doluysa ve kesişim satırı [∞] ise yazdır
if L_list and M_list and N_list:
    ortak_satirlar = []
    for satir, noktalar in tablo.items():
        if all(pt in noktalar for pt in (L_list + M_list +
N_list)):
            ortak_satirlar.append(satir)
    if ortak_satirlar == ["[∞]"]:
        L = format_point_list(L_list)
        M = format_point_list(M_list)
        N = format_point_list(N_list)
        print("A:", A, "A':", A_, "B:", B, "B':", B_, "C:", C,
"C':", C_)
        print("AB'", AB_)
        print("A'B'", A_B)

```

```

print("AC'", AC_)
print("A'C'", A_C)
print("BC'", BC_)
print("B'C'", B_C)
print("L (AB'  $\cap$  A'B):", L)
print("M (AC'  $\cap$  A'C):", M)
print("N (BC'  $\cap$  B'C):", N)
print("L, M, N kesişim satırları: '['[ $\infty$ ']")
print("-----")

```

# Çalıştır

kombinasyonlari\_yaz()

### Örnek 5.1.1:

A: ((0, 0), (0, 0)) A': ((0, 0), (2, 0)) B: ((3, 0), (4, 0)) B': ((3, 0), (2, 0)) C: ((4, 0), (0, 0)) C': ((4, 0), (3, 0))

AB': [(4,0),(0,0)], A'B: [(4,0),(2,0)], AC': [(2,0),(0,0)], A'C: [(2,0),(2,0)], BC': [(3,0),(0,0)], B'C: [(3,0),(3,0)]

L (AB'  $\cap$  A'B): ((4,0)), M (AC'  $\cap$  A'C): ((2,0)), N (BC'  $\cap$  B'C): ((3,0))

L, M, N kesişim satırları: '['[ $\infty$ ']

### 5.2. Pappus Teoremi İçin Kullanıcı Etkileşimli Kod

İkinci Python uygulaması, kullanıcı tarafından girilen noktalar üzerinden Pappus teoreminin doğrulanmasını sağlayan interaktif bir kontrol mekanizması sunar. Kullanıcıdan  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  noktaları alınır. İlgili doğrular tablo kullanılarak belirlenir ve kesişim noktaları hesaplanır.  $L$ ,  $M$ ,  $N$  noktalarının doğrudanlığı kontrol edilir ve ortak satırlar kullanıcıya gösterilir. Kod, hem tek bir konfigürasyonu hem de olası tüm kombinasyonları dikkate alarak Pappus teoreminin geçerliliğini sistematik olarak doğrular. Bu interaktif yaklaşım hem eğitim hem araştırma amaçlı olarak Pappus teoreminin anlaşılmasını ve test edilmesini kolaylaştırır. Ayrıca benzer yöntemler, daha karmaşık kartezyen düzlemler ve farklı grup yapılarında da uygulanabilir. Kod aşağıda verilmiştir:

```
from ast import literal_eval
```

```
# Table
```

```
table = {
```

```
    "[ (0,0),(0,0) ]": [ ((0,0),(0,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(0,0)),  
    ((4,0),(0,0)), ((0,0)) ],
```

```
    "[ (0,0),(1,0) ]": [ ((0,0),(1,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(1,0)), ((3,0),(1,0)),  
    ((4,0),(1,0)), ((0,0)) ],
```

```
    "[ (0,0),(2,0) ]": [ ((0,0),(2,0)), ((1,0),(2,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(2,0)),  
    ((4,0),(2,0)), ((0,0)) ],
```

```
    "[ (0,0),(3,0) ]": [ ((0,0),(3,0)), ((1,0),(3,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(3,0)),  
    ((4,0),(3,0)), ((0,0)) ],
```

```
    "[ (0,0),(4,0) ]": [ ((0,0),(4,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(4,0)), ((3,0),(4,0)),  
    ((4,0),(4,0)), ((0,0)) ],
```

```
    "[ (1,0),(0,0) ]": [ ((0,0),(0,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(3,0)),  
    ((4,0),(4,0)), ((1,0)) ],
```

```
    "[ (1,0),(1,0) ]": [ ((0,0),(1,0)), ((1,0),(2,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(4,0)),  
    ((4,0),(0,0)), ((1,0)) ],
```

```
    "[ (1,0),(2,0) ]": [ ((0,0),(2,0)), ((1,0),(3,0)), ((2,0),(4,0)), ((3,0),(0,0)),  
    ((4,0),(1,0)), ((1,0)) ],
```

```
    "[ (1,0),(3,0) ]": [ ((0,0),(3,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(1,0)),  
    ((4,0),(2,0)), ((1,0)) ],
```

```
    "[ (1,0),(4,0) ]": [ ((0,0),(4,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(1,0)), ((3,0),(2,0)),  
    ((4,0),(3,0)), ((1,0)) ],
```

```
    "[ (2,0),(0,0) ]": [ ((0,0),(0,0)), ((1,0),(2,0)), ((3,0),(1,0)), ((2,0),(4,0)),  
    ((4,0),(3,0)), ((2,0)) ],
```

```
    "[ (2,0),(1,0) ]": [ ((0,0),(1,0)), ((1,0),(3,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(2,0)),  
    ((4,0),(4,0)), ((2,0)) ],
```

```
    "[ (2,0),(2,0) ]": [ ((0,0),(2,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(1,0)), ((3,0),(3,0)),  
    ((4,0),(0,0)), ((2,0)) ],
```

```
    "[ (2,0),(3,0) ]": [ ((0,0),(3,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(4,0)),  
    ((4,0),(1,0)), ((2,0)) ],
```

```
    "[ (2,0),(4,0) ]": [ ((0,0),(4,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(0,0)),  
    ((4,0),(2,0)), ((2,0)) ],
```

"[(3,0),(0,0)]": [((0,0),(0,0)), ((3,0),(4,0)), ((2,0),(1,0)), ((4,0),(2,0)), ((4,0),(3,0)), ((3,0))],

"[(3,0),(1,0)]": [((0,0),(1,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(0,0)), ((4,0),(3,0)), ((3,0))],

"[(3,0),(2,0)]": [((0,0),(2,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(1,0)), ((4,0),(4,0)), ((3,0))],

"[(3,0),(3,0)]": [((0,0),(3,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(4,0)), ((3,0),(2,0)), ((4,0),(0,0)), ((3,0))],

"[(3,0),(4,0)]": [((0,0),(4,0)), ((1,0),(2,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(3,0)), ((4,0),(1,0)), ((3,0))],

"[(4,0),(0,0)]": [((0,0),(0,0)), ((1,0),(4,0)), ((2,0),(3,0)), ((3,0),(2,0)), ((4,0),(1,0)), ((4,0))],

"[(4,0),(1,0)]": [((0,0),(1,0)), ((1,0),(0,0)), ((2,0),(4,0)), ((3,0),(3,0)), ((4,0),(2,0)), ((4,0))],

"[(4,0),(2,0)]": [((0,0),(2,0)), ((1,0),(1,0)), ((2,0),(0,0)), ((3,0),(4,0)), ((4,0),(3,0)), ((4,0))],

"[(4,0),(3,0)]": [((0,0),(3,0)), ((1,0),(2,0)), ((2,0),(1,0)), ((3,0),(0,0)), ((4,0),(4,0)), ((4,0))],

"[(4,0),(4,0)]": [((0,0),(4,0)), ((1,0),(3,0)), ((2,0),(2,0)), ((3,0),(1,0)), ((4,0),(0,0)), ((4,0))],

"[(0,0)]": [((0,0),(0,0)), ((0,0),(1,0)), ((0,0),(2,0)), ((0,0),(3,0)), ((0,0),(4,0)), float('inf')],

"[(1,0)]": [((1,0),(0,0)), ((1,0),(1,0)), ((1,0),(2,0)), ((1,0),(3,0)), ((1,0),(4,0)), float('inf')],

"[(2,0)]": [((2,0),(0,0)), ((2,0),(1,0)), ((2,0),(2,0)), ((2,0),(3,0)), ((2,0),(4,0)), float('inf')],

"[(3,0)]": [((3,0),(0,0)), ((3,0),(1,0)), ((3,0),(2,0)), ((3,0),(3,0)), ((3,0),(4,0)), float('inf')],

"[(4,0)]": [((4,0),(0,0)), ((4,0),(1,0)), ((4,0),(2,0)), ((4,0),(3,0)), ((4,0),(4,0)), float('inf')],

"[∞]": [((0,0)), ((1,0)), ((2,0)), ((3,0)), ((4,0)), float('inf')]

# Safe function for parsing point input

def parse\_input(point\_str):

```

    point_str = point_str.replace(" ", "")
    return literal_eval(point_str)
# Check if a point exists in a table row
def point_exists(point, row_points):
    for n in row_points:
        if n != float('inf') and n == point:
            return True
    return False
# Get points from user
A = parse_input(input("Point A: "))
B = parse_input(input("Point B: "))
C = parse_input(input("Point C: "))
A_ = parse_input(input("Point A': "))
B_ = parse_input(input("Point B': "))
C_ = parse_input(input("Point C': "))
# Find line pairs
line_pairs = [("AB", A, B_), ("A'B", A_, B), ("AC", A, C_), ("A'C", A_, C),
              ("BC", B, C_), ("B'C", B_, C)]
rows = {}
for name, point1, point2 in line_pairs:
    found = False
    for row, points in table.items():
        if point_exists(point1, points) and point_exists(point2, points):
            rows[name] = row
            print(f"Line {name}: {row}")
            found = True
            break

```

```

if not found:
    print(f'Line {name} not found.')

# Find common points
def all_common_points(points1, points2):
    return tuple(point for point in points1 if point_exists(point, points2))

L_list = all_common_points(table[rows["AB"]], table[rows["A'B"]])
M_list = all_common_points(table[rows["A'C"]], table[rows["AC'"]])
N_list = all_common_points(table[rows["B'C"]], table[rows["BC'"]])

# Find intersection rows of P, Q, R
def intersection_rows(L_list, M_list, N_list):
    result_rows = []

    if L_list == M_list and L_list != N_list:
        for row, points in table.items():
            if any(point_exists(n, points) for n in L_list) and any(point_exists(n,
points) for n in N_list):
                result_rows.append(row)

    elif L_list == N_list and L_list != M_list:
        for row, points in table.items():
            if any(point_exists(n, points) for n in L_list) and any(point_exists(n,
points) for n in M_list):
                result_rows.append(row)

    elif M_list == N_list and M_list != L_list:
        for row, points in table.items():
            if any(point_exists(n, points) for n in M_list) and any(point_exists(n,
points) for n in L_list):
                result_rows.append(row)

    elif L_list == M_list == N_list:
        for row, points in table.items():

```

```

        if all(point_exists(n, points) for n in L_list):
            result_rows.append(row)
    else:
        for row, points in table.items():
            if (any(point_exists(n, points) for n in L_list) and
                any(point_exists(n, points) for n in M_list) and
                any(point_exists(n, points) for n in N_list)):
                result_rows.append(row)

    return result_rows

common_rows = intersection_rows(L_list, M_list, N_list)

# Print common points

def print_commons(label, commons):
    if len(commons) == 1:
        print(f"{label} common points: {commons[0]}")
    else:
        print(f"{label} common points: {commons}")

print_commons("L", L_list)
print_commons("M", M_list)
print_commons("N", N_list)

if common_rows:
    print(f"Intersection rows of L, M, N: {common_rows}")
else:
    print("No intersection of L, M, N")

Örnek 5.2.1: A: ((0, 0), (0, 0)), A': ((0, 0), (2, 0)), B: ((4, 0), (0, 0)),
B': ((4, 0), (3, 0)), C: ((3, 0), (4, 0)), C': ((3, 0), (2, 0)) iken
AB': [(2,0),(0,0)], A'B: [(2,0),(2,0)], AC': [(4,0),(0,0)], A'C: [(4,0),(2,0)],

```

$BC': [(3,0),(3,0)]$ ,  $B'C: [(3,0),(0,0)]$  elde edilir. Buradan

$L (AB' \cap A'B): ((2,0))$ ,  $M (AC' \cap A'C): ((4,0))$ ,  $N (BC' \cap B'C): ((3,0))$

L, M, N kesişim satırları:  $['[\infty]']$  olduğundan L, M, N doğrudadır. Yani alt düzlem Pappusseldir.

**Örnek 5.2.2:**  $A: ((0, 0), (0, 0))$ ,  $A': ((0, 0), (3, 0))$ ,  $B: ((3, 0), (2, 0))$ ,

$B': ((3, 0), (4, 0))$ ,  $C: ((4, 0), (3, 0))$ ,  $C': ((4, 0), (0, 0))$  iken

$AB': [(3,0),(0,0)]$ ,  $A'B: [(3,0),(3,0)]$ ,  $AC': [(0,0),(0,0)]$ ,  $A'C: [(0,0),(3,0)]$

$BC': [(3,0),(3,0)]$ ,  $B'C: [(3,0),(0,0)]$  elde edilir. Buradan

$L (AB' \cap A'B): ((3,0))$ ,  $M (AC' \cap A'C): ((0,0))$ ,  $N (BC' \cap B'C): ((3,0))$

L, M, N kesişim satırları:  $['[\infty]']$  olduğundan L, M, N doğrudadır. Yani alt düzlem Pappusseldir.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, cebirsel yapısı en küçük kartezyen grup olan 25. mertebeden projektif düzlemin 5. Mertebeden alt düzlemi üzerinde kapsamlı bir inceleme yapılmış ve Pappus teoreminin geçerliliği incelenmiştir. Geometrik yaklaşım kullanılarak Pappus konfigürasyonu için noktaların ve doğruların seçimi, tablo temelli düzenlemeler ve kesişim noktalarının analizi ile doğrudalık ilişkisi adım adım ortaya konmuştur.

Algoritmik doğrulama yöntemiyle tüm olası kombinasyonlar ve kullanıcı örnekleri üzerinden teoremin geçerliliği test edilmiştir. Python tabanlı uygulama, tablo temelli tarama ve kesişim noktalarının hesaplanmasını sağlayarak teorik sonuçların programatik olarak doğrulanmasına imkân tanımıştır.

Elde edilen sonuçlar, sonlu projektif düzlemlerin sınıflandırılmasında Pappus teoreminin belirleyici rolünü vurgulamaktadır. En küçük kartezyen grup düzlemi üzerinden yapılan analizler, daha karmaşık grup yapıları ve düzlemler için temel bir model sunmaktadır. Çalışma, geometrik sezgi, cebirsel yapı ve algoritmik doğrulamanın birlikte kullanılmasının önemini göstermiş ve çok boyutlu bir yaklaşımın etkinliğini ortaya koymuştur. Gelecek çalışmalar, bu yöntemlerin farklı cebirsel yapılarla koordinatlanan düzlemler için bir perspektifler sağlayabilir.

## REFERANSLAR

- [1] Akça Z. (1991). The construction of the cartesian group plane of order 25. MSc, University of Anadolu, Eskişehir, Turkey.
- [2] Akça Z, Güneltili İ. (2012). On the  $(k,3)$ -arcs of  $CPG(2,25,5)$ . Anadolu University Journal of Science and-B Theoretical Sciences, 2 - 1 : 21-27.
- [3] Akça Z, Ekmekçi S, Bayar A,. (2016). On Fano Configurations of the Left Hall Plane of order 9. Konuralp journal of mathematics 4 (2), 124-131.
- [4] Bayar A, Akça Z, Ekmekçi S. (2022). On Embedding the Projective Plane  $PG(2,4)$  to the Projective Space  $P(4,4)$ . New Trends in Mathematical Sciences, 10- 4: 142–150.
- [5] Bayar A, Akça Z, Ekmekçi S. (2016). On the complete arcs containing the quadrangles constructing the Fano planes of the left near field plane of order 9. New trends in mathematical sciences 4 (4), 266-275.
- [6] Ekmekçi S, Bayar A, Akça Z. (2022). On The Projective Planes in Projective Space  $PG(4,4)$ . Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 38- 3: 519–524.
- [7] Ekmekçi S, Bayar A, Altıntaş Kahrman E, Akça Z. (2016). On the Complete  $(k,2)$ -arcs of the Hall plane of order 9. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 6-10: 282–288.
- [8] Ekmekçi S, Bayar A, Akça Z. (2009). On the classification of Fuzzy projective planes of Fuzzy 3-dimensional projective spaces. Chaos, Solitons and Fractals 40, s. 2146-2151.
- [9] Hirschfeld, J, Thas J. (2016). General Galois Geometries. Springer Monographs in Mathematics.



# Genelleştirilmiş $q$ -Picard Operatörlerinin Ağırlıklı Yaklaşım Özellikleri

**BAŞAR YILMAZ**

- 1- Doç. Dr.; Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Bölümü. Matematik Bölümü [basariyilmaz77@yahoo.com](mailto:basariyilmaz77@yahoo.com) <https://orcid.org/0000-0003-3937-992X>

Dipnot : ^ Bu çalışma Doktora Tezinden üretilmiştir.

## ÖZET

Bu çalışmada önce nonizotrop  $\beta$  – uzaklığına bağlı olan bir ağırlık fonksiyonu ile  $n$  boyutlu  $L_{p,\beta}$  uzayı tanımlanacaktır ve  $\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}$  operatörünün  $L_{p,\beta}$  uzayından  $L_{p,\beta}$  uzayına dönüşüm yaptığı gösterilecektir. Ardından  $L_{p,\beta}$  normunda  $\{\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}(f; \cdot)\}_{\gamma>0}$  Picard integral operatör ailesinin bir fonksiyona ağırlıklı yaklaşımı incelenecektir.

## GİRİŞ

Yaklaşım teori; analizin, fonksiyonlara, daha basit ve değerleri daha kolay hesaplanabilen fonksiyonlar ile yaklaşabilme düşüncesi ile ilgili bir alandır. Analizin diğer birçok dallar gibi bu alanın da matematikteki ilk temelleri 19. yüzyılda kurulmuştur. Yaklaşım teorisinin ilk sonuçlarından bazıları Fourier serileri teorisinde görülmektedir. Bunlar, örneğin  $L_2$  yakınsaklıkta olduğu gibi, bir fonksiyonun Fourier serisinin noktasal veya düzgün yakınsaklığını garantileyen koşullar içerir. Fourier serileri teorisinde, Fourier serisinin kısmi toplamlarının fonksiyona yakınsayıp yakınsamadığı bilinmek istenir. İlk önemli yoğunluk sonuçlar Weierstrass (1885) tarafından ispatlanmıştır. Bunlar; cebirsel polinomların kompakt bir aralıkta sürekli, reel değerli fonksiyonların sınıfında yoğunluğu ve trigonometrik polinomların  $2\mathcal{V}_2$  periyotlu sürekli, reel değerli fonksiyonların sınıfında yoğunluğudur (Bu iki sonuç birbirine denktir). Weierstrass, ikinci sonucunun ispatında normalize çekirdeği (Gauss) ile  $f$  fonksiyonunun konvolüsyonunu dikkate almıştır. Sonraki yıllarda Weierstrass teoreminin değişik ispatlar dönemin en iyi analizcileri tarafından yapılmıştır. Weierstrass, Picard, Fejér, Landau ve de la Vallée Poussin tarafından yapılan ispatlarda singüler integraller kullanmıştır. Biz bu integrallerden Picard Singüler integralini ele alacağız.

### 1. Temel Tanım ve Kavramlar

**Tanım 1.1:**  $g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $\mathbb{R}^n$  veya  $\mathbb{R}^n$  nin bir alt kümesinde tanımlı bir fonksiyon ve  $[0, \infty)$  da hemen hemen her yerde tanımlı tek değişkenli bir fonksiyon olsun. Eğer  $n$  değişkenli  $g(x)$  fonksiyonu herhangi bir tek değişkenli  $f(x)$  fonksiyonu yardımıyla  $g(x) = f(|x|)$  yani,

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = f\left(\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}\right)$$

Şeklinde gösterilebiliyorsa  $g$  ye radyal fonksiyon denir. (Neri 1971)

Radyal fonksiyonların integrali hesaplanırken en iyi yöntem küresel koordinatlara geçmektir.

**Tanım 1.2:**  $\Sigma = \Sigma_n$  ile  $\mathbb{R}^n$  de birim küre gösterilsin.  $\omega_n$  Birim kürenin yüzey alanını belirtsin.  $x \in \mathbb{R}^n$  ve  $n > 1$  için aşağıdaki dönüşümlere geçilirse

$$x_1(r, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}) = r \cos \theta_1$$

$$x_2(r, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}) = r \sin \theta_1 \cos \theta_2$$

$$\begin{aligned} & \vdots \\ x_k(r, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}) \\ &= r \sin \theta_1 \sin \theta_2 \dots \sin \theta_{k-1} \cos \theta_k, \quad 2 \leq k \\ &\leq n-2 \end{aligned}$$

$$x_n(r, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}) = r \sin \theta_1 \sin \theta_2 \dots \sin \theta_{n-1}$$

yazılabilir.

elde edilir. Yukarıda  $k = 1, \dots, n-2$ , olmak üzere  $0 \leq \theta_k \leq \pi, 0 \leq \theta_{n-1} \leq 2\pi$ ,  $|r| = |x|$  ve  $x' = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}) \in \Sigma$  dir ve dönüşümün jakobiyesi

$$J = r^{n-1} (\sin \theta_1)^{n-2} (\sin \theta_2)^{n-3} \dots \sin \theta_{n-2}$$

dır. Böylece eğer  $f, \mathbb{R}^n$  de integrallenebiliyorsa

$$\begin{aligned} & \int_{\mathbb{R}^n} f(x) dx \\ &= \int_0^\infty \int_0^\pi \dots \int_0^\pi r^{n-1} (\sin \theta_1)^{n-2} (\sin \theta_2)^{n-3} \dots \sin \theta_{n-2} f(rx') dr d\theta_1 \dots d\theta_{n-1} \\ & \int_0^\pi \int_0^\pi \dots \int_0^{2\pi} r^{n-1} (\sin \theta_1)^{n-2} (\sin \theta_2)^{n-3} \dots \sin \theta_{n-2} d\theta_1 \dots d\theta_{n-1} = \int_\Sigma dx' \end{aligned}$$

denirse

$$\int_{\mathbb{R}^n} f(x) dx = \int_\Sigma \int_0^\infty r^{n-1} f(rx') dr dx'$$

elde edilir (Sadosky 1979).

**Tanım 1.3:**  $n > 2, n \in \mathbb{N}$  için,  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n), \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n), d\mathbf{y} = dy_1 \dots dy_n$  ve  $f \in L_1(\mathbb{R}^n), K_\gamma \in L_1(\mathbb{R}^n)$  olmak üzere,  $n$ -boyutlu durumda konvolüsyon operatör

$$L_\gamma(f, \mathbf{x}) = \int_{\mathbb{R}^n} f(\mathbf{y}) K_\gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}) d\mathbf{y}$$

şeklinde dir. Tanım 2.1 dikkate alınırsa

$$K_\gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}) = \widehat{K}_\gamma(|\mathbf{x} - \mathbf{y}|)$$

$$= \widehat{K}_\gamma \left( \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \right)$$

Şeklindeki  $K_\gamma$  radyal fonksiyonuna radyal çekirdek denir. Buradaki

$$|\mathbf{x}| = \left( \sqrt{(x_1)^2 + (x_2)^2 + \dots + (x_n)^2} \right)$$

Euclid uzaklığında her değişken aynı homogenlik derecesine sahiptir. Bu şekildeki uzaklığa izotrop uzaklık denir.

**Tanım 1.4 :**  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  pozitif reel sayılar ve  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$  için  $|\beta| = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n$  olmak üzere  $\mathbf{x}$  ile  $\mathbf{0}$  noktaları arasındaki nonizotrop  $\beta$  - uzaklık

$$\|\mathbf{x}\|_\beta = \left( |x_1|^{\frac{1}{\beta_1}} + |x_2|^{\frac{1}{\beta_2}} + \dots + |x_n|^{\frac{1}{\beta_n}} \right)^{\frac{|\beta|}{n}}$$

Nonizotrop  $\beta$  -uzaklık,  $t > 0$  için

$$\left( |t^{\beta_1} x_1|^{\frac{1}{\beta_1}} + |t^{\beta_2} x_2|^{\frac{1}{\beta_2}} + \dots + |t^{\beta_n} x_n|^{\frac{1}{\beta_n}} \right)^{\frac{|\beta|}{n}} = t^{\frac{|\beta|}{n}} \|\mathbf{x}\|_\beta$$

Şeklinde homogenlik özelliğine sahiptir ve aşağıdaki özellikleri gerçekler.

$$a) \|\mathbf{x}\|_\beta = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{0}$$

$$b) \|t^\beta \mathbf{x}\|_\beta = t^{\frac{|\beta|}{n}} \|\mathbf{x}\|_\beta$$

$$c) \|\mathbf{x} + \mathbf{y}\|_\beta \leq M_\beta (\|\mathbf{x}\|_\beta + \|\mathbf{y}\|_\beta)$$

Burada  $\beta_{min} = \min\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$  şeklinde seçilirse  $M_\beta = 2^{\left(1+\frac{1}{\beta_{min}}\right)\frac{|\beta|}{n}}$  elde edilir (Besov ve Nikolsky 1975). Nonizotrop  $\beta$  – uzaklık  $\beta_i = \frac{1}{2}$  için ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) alışılmış Euclid uzaklığını verir. Aşağıda nonizotrop  $\beta$  –küresel koordinatların tanımı verilecektir.

**Tanım 1.5 :**  $k = 1, \dots, n-2$ ,  $0 \leq \theta_k \leq \pi, 0 \leq \theta_{n-1} \leq 2\pi, u \geq 0$  olmak üzere  $\beta$  –küresel kordinatlar

$$\begin{aligned}x_1 &= (ucos\theta_1)^{2\beta_1} \\x_2 &= (usin\theta_1cos\theta_2)^{2\beta_2} \\&\vdots \\x_{n-1} &= (usin\theta_1sin\theta_2 \dots sin\theta_{k-1}cos\theta_{n-1},)^{2\beta_{n-1}} \\x_n &= (usin\theta_1sin\theta_2 \dots sin\theta_{n-1})^{2\beta_n}\end{aligned}$$

şeklindedir. Bu dönüşümün Jakobiyeni  $J_\beta(u, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1})$  ile gösterilirse

$$\Omega_\beta(\theta) := 2^n \beta_1 \dots \beta_n \prod_{j=1}^{n-1} (cos\theta_j)^{2\beta_j-1} (sin\theta_j)^{\sum_{k=j}^{j+1} 2\beta_k-1}$$

olmak üzere

$$J_\beta(u, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}) = u^{2|\beta|-1} \Omega_\beta(\theta)$$

bulunur. Ayrıca  $S^{n-1}, \mathbb{R}^n$  de birim küre olmak üzere

$$w_{\beta, n-1} = \int_{S^{n-1}} \Omega_\beta(\theta) d\theta$$

İntegrali sonlu olur (Aral ve Anastassiou 2009)

## 2. q -Analizin Temel Kavramları

**Tanım 2.1:**  $0 < q < 1$  ve  $\gamma$  negatif olmayan bir reel sayı olsun.  $[\gamma]_q$ ,

$$[\gamma]_q = \frac{1 - q^\gamma}{1 - q}$$

şeklinde tanımlanan  $q$ -sayısını gösterir. Eğer  $\gamma = n$  negatif olmayan bir tamsayı ise  $[n]_q$ ,  $q$ -tamsayısını gösterir (Phillips 2003).

**Tanım 2.2:**  $n$  negatif olmayan bir tamsayı olmak üzere  $[n]_q$   $q$ -tamsayısının faktöriyeli

$$[n]_q! = \begin{cases} [n]_q [n-1]_q \cdots [1]_q, & n \in \mathbb{N} \\ 1, & n = 0 \end{cases}$$

şeklinde tanımlanır ve  $n$  nin  $q$ -faktöriyeli denir (Phillips 2003).  
Pochhammer sembolünün  $q$ -genişlemesi

$$(a; q)_0 = 1, (a; q)_n := \prod_{k=0}^{n-1} (1 - aq^k), n \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}, a \in \mathbb{R}$$

olarak tanımlanır (Kac and Cheung 2002).

**Tanım 2.3:**  $(x; q)_\infty = \prod_{k=1}^{\infty} (1 - xq^{k-1})$  olmak üzere,  $e^x$  fonksiyonunun bir  $q$ -genişlemesi,

$$E_q(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{\frac{n(n-1)}{2}}}{(q; q)_n} x^n = (-x; q)_\infty, x \in \mathbb{R}, |q| < 1$$

şeklinde tanımlanır (Kac and Cheung 2002).

**Tanım 2.4**  $0 < q < 1$  ve  $x > 0$  için  $q$  - gamma fonksiyonu

$$\Gamma_q(x) = \frac{(q; q)_\infty}{(q^x; q)_\infty} (1 - q)^{1-x}$$

şeklinde tanımlanır. Euler-Gamma fonksiyonunun  $q$ -genişlemesi,  $E_q$ , Tanım 2.3 de verilen fonksiyon olmak üzere,

$$c_q(x) \Gamma_q(x) = \frac{1 - q}{\ln q^{-1}} q^{\frac{x(x-1)}{2}} \int_0^\infty \frac{t^{x-1}}{E_q((1 - q)t)} dt, x > 0$$

formülü ile tanımlanır, buradaki  $c_q(x)$  aşağıdaki şartları sağlar :

- a)  $c_q(x + 1) = c_q(x)$ ,
- b)  $c_q(n) = 1, n = 0, 1, 2, \dots$ ,
- c)  $\lim_{q \rightarrow 1^-} c_q(x) = 1$ ,

Ayrıca, negatif olmayan  $n$  tamsayıları için  $x = n + 1$  olduğunda

$$\Gamma_q(n + 1) = [n]_q!$$

eşitliği gerçekleşir (Atakishiyev and Atakishiyeva 2001).

Tek değişkenli Picard singüler integralinin  $q$ -sayılara dayalı genelleştirilmesi Aral tarafından aşağıdaki şekilde inşa edilmiştir:

**Tanım 2.5:**  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  bir fonksiyon olsun.  $\gamma > 0$  ve  $0 < q < 1$  için Picard Singüler İntegral operatörlerinin  $q$  – genelleştirilmesi

$$\mathfrak{R}_\gamma(f; q, x) \equiv \mathfrak{R}_\gamma(f; x) := \frac{1-q}{2[\gamma]_q \ln q^{-1}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x+t)}{E_q\left(\frac{(1-q)|t|}{[\gamma]_q}\right)} dt$$

şeklinde tanımlanmıştır (Aral 2006).

### 3. $\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}$ operatörlerinin Yaklaşım özellikleri

Çok değişkenli radyal çekirdeğe sahip bazı singüler integral operatörlerin nonizotrop  $\beta$  –uzaklığa bağlı genelleştirilmeleri Aral (2001, 2005) tarafından çalışılmıştır. Bu bölümde, Anastassiou ve Aral tarafından inşa edilen  $q$  –Picard operatörünün nonizotrop  $\beta$  –uzaklığa bağlı genelleştirilmesi tanıtılıp elde edilen sonuçlar verilecektir. Nonizotrop  $\beta$  –uzaklığa bağlı  $q$  –Picard operatörünün çekirdeği Anastassiou ve Aral tarafından aşağıdaki formda inşa edilmiştir.

**Lemma 3.1:**  $\gamma > 0, n \in \mathbb{N}, \beta_i \in (0, \infty), (i = 1, 2, \dots, n)$  için  $|\beta| = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n$  olsun.  $E_q$  ve  $\Gamma_q$  sırasıyla tanım 2.3 ve tanım 2.4 ile verilen fonksiyonlar,

$$P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) := 1/E_q \left( \frac{(1-q)\|\mathbf{t}\|_\beta}{[\gamma]_q^{\frac{|\beta|}{n}}} \right)$$

Ve

$$c(n, \beta, q)^{-1} := \frac{n}{2|\beta|} c(n, \beta, q) w_{\beta, n-1} \Gamma(n) \frac{\ln q^{-1}}{1-q} q^{-\frac{n(n+1)}{2}}$$

olmak üzere

$$\frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\mathbb{R}^n} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t} = \mathbf{1}$$

gerçeklenir.

**İspat :**

$$\mathbf{t} = [\gamma]_q^{|\beta|} \mathbf{x}, \quad d\mathbf{t} = [\gamma]_q^{|\beta|} d\mathbf{x}$$

değişken değıştirmesi yapılırsa

$$\frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\mathbb{R}^n} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t} = c(n, \beta, q) \int_{\mathbb{R}^n} \frac{d\mathbf{x}}{E_q((1-q)\|\mathbf{x}\|_\beta)}$$

Elde edilir (Besov ve Nikolsky 1975). Tanım 1.5 teki  $\beta$  –küresel koordinatlara geçilip dönüşüm hesaplanırsa

$$c(n, \beta, q) \int_{\mathbb{R}^n} \frac{d\mathbf{x}}{E_q((1-q)\|\mathbf{x}\|_\beta)} = c(n, \beta, q) \int_0^\infty \int_{S^{n-1}} \frac{u^{2|\beta|-1} \Omega_\beta(\theta) d\theta du}{E_q((1-q)\|u\|_\beta)}$$

bulunur.  $w_{\beta, n-1}$  ifadesi kullanılıp  $u = t^{\frac{n}{2|\beta|}}$  değışken değıştirmesi yapılırsa

$$\int_{\mathbb{R}^n} \frac{d\mathbf{x}}{E_q((1-q)\|\mathbf{x}\|_\beta)} = \frac{n}{2|\beta|} c(n, \beta, q) w_{\beta, n-1} \int_0^\infty \frac{u^{n-1} du}{E_q((1-q)u)}$$

bulunur. Eğer tanım 2.4 kullanılıp

$$c(n, \beta, q)^{-1} = \frac{n}{2|\beta|} w_{\beta, n-1} \Gamma(n) \frac{\ln q^{-1}}{1-q} q^{-\frac{n(n+1)}{2}}$$

seçilirse istenilen sonuç bulunup lemma ispatlanmış olur.

**Lemma 3.2:**  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  bir fonksiyon olsun.  $0 < q < 1, \gamma > 0, n \in \mathbb{N}, \beta_i \in (0, \infty), (i = 1, 2, \dots, n)$  için  $|\beta| = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n$  olsun.  $f$  in  $\beta$  –uzaklığa bağılı  $q$ -picard integral operatörleri

$$\mathfrak{R}_{\gamma, \beta}(f; q, \mathbf{x}) \equiv \mathfrak{R}_{\gamma, \beta}(f; \mathbf{x})$$

$$:= \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\mathbb{R}^n} f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t}$$

şeklindedir. Eğer  $\beta_i = \frac{1}{2}, (i = 1, 2, \dots, n)$  seçilirse  $\mathfrak{R}_{\gamma, \frac{1}{2}}(f; q, \mathbf{x})$  operatörleri

Aral'ın 2006 daki makalesindeki operatörlere dönüşmektedir. Eğer  $q \rightarrow 1$  alınırsa  $\mathfrak{R}_{\gamma, \frac{1}{2}}(f; 1, \mathbf{x})$  operatörleri Anastassiou ve Gal'ın (2000) makalesindeki klasik Picard singüler integral operatörlerine indirgenir.

Aşağıda, nonizotrop uzaklığa bağlı ağırlıklı  $L_{p,\beta}$  uzayları tanımlanacaktır.

**Tanım 3.1:**  $1 \leq p < \infty$  olmak üzere nonizotrop uzaklığa bağlı  $L_{p,\beta}(\mathbb{R}^n)$  uzayı

$$L_{p,\beta}(\mathbb{R}^n) = \left\{ f; f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \quad \text{ölçülebilir, } \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{f(\mathbf{x})}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right|^p d\mathbf{x} < \infty \right\}$$

şeklinde ve bu uzaylarda norm

$$\|f\|_{p,\beta} = \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{f(\mathbf{x})}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right|^p d\mathbf{x} \right)^{1/p} < \infty$$

ile ve  $p = \infty$  durumunda

$$\|f\|_{\infty,\beta} = \sup_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} \left| \frac{f(\mathbf{x})}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right| < \infty$$

ile tanımlanır.

**Teorem 3.1:**  $\gamma > 0, n \in \mathbb{N}$  ve  $\beta_i \in (0, \infty)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) için  $|\beta| = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n$  olsun.  $\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}(f)$ ,  $L_{p,\beta}(\mathbb{R}^n)$  uzayından  $L_{p,\beta}(\mathbb{R}^n)$  uzayına dönüşüm yapan lineer pozitif bir operatördür. Yani

$$\|\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}(f)\|_{p,\beta} \leq K(n, \beta, q) \|f\|_{p,\beta}$$

eşitsizliği sağlanır. Buradaki  $K$  sabiti

$$K(n, \beta, q) = \max\{1, M_\beta\} \left( 1 + \frac{n}{2|\beta|} c(n, \beta, q) [\gamma]_q^{\frac{|\beta|}{q}} w_{\beta, n-1} \Gamma(n + 1) \frac{\ln q^{-1}}{1 - q} q^{-\frac{n(n+1)}{2}} \right)$$

Şeklindedir.

**İspat :** Genelleştirilmiş Minkowsky eşitsizliğini kullanarak

$$\|\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}(f; \mathbf{x})\|_{p,\beta} = \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}(f; \mathbf{x})}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right|^p d\mathbf{x} \right)^{\frac{1}{p}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{1}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \int_{\mathbb{R}^n} f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t} \right|^p d\mathbf{x} \right)^{\frac{1}{p}} \\
&\leq \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\mathbb{R}^n} \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{f(\mathbf{x} + \mathbf{t})}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right|^p d\mathbf{x} \right)^{\frac{1}{p}} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t}
\end{aligned}$$

elde edilir. Nonizotrop  $\beta$  – uzaklığının 3. Özelliğinden

$$\begin{aligned}
\frac{1 + \|\mathbf{x} + \mathbf{t}\|_\beta}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} &\leq \frac{1 + M_\beta(\|\mathbf{x}\|_\beta + \|\mathbf{t}\|_\beta)}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \\
&\leq \text{Max}\{1, M_\beta\} \frac{(1 + \|\mathbf{x}\|_\beta)(1 + \|\mathbf{t}\|_\beta)}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta}
\end{aligned}$$

Bulunur. (2) eşitsizliğini (1) de dikkate alırsak

$$\begin{aligned}
&\|\mathfrak{R}_{\gamma, \beta}(f; \mathbf{x})\|_{p, \beta} \\
&\leq \text{Max}\{1, M_\beta\} \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\mathbb{R}^n} \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{f(\mathbf{x} + \mathbf{t})}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right|^p d\mathbf{x} \right)^{1/p} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) (1 \\
&\quad + \|\mathbf{t}\|_\beta) d\mathbf{t} \\
&\leq \|f\|_{p, \beta} \text{Max}\{1, M_\beta\} \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \left( 1 + \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\mathbb{R}^n} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) \|\mathbf{t}\|_\beta d\mathbf{t} \right)
\end{aligned}$$

elde edilir.  $\mathbf{t} = [\gamma]_q^{|\beta|}$  değişken değiştirmesi yapılırsa  $d\mathbf{t} = [\gamma]_q^{|\beta|} d\mathbf{x}$  olur ve yukarıdaki eşitsizlik

$$\begin{aligned}
&\|\mathfrak{R}_{\gamma, \beta}(f; \mathbf{x})\|_{p, \beta} \\
&\leq \|f\|_{p, \beta} \text{Max}\{1, M_\beta\} \left( 1 \right. \\
&\quad \left. + c(n, \beta, q) [\gamma]_q^{\frac{|\beta|}{n}} \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\|\mathbf{x}\|_\beta d\mathbf{x}}{E_q((1 - q)\|\mathbf{x}\|_\beta)} d\mathbf{x} \right)
\end{aligned}$$

biçimine indirgenir.  $\beta$  – küresel kordinatlara geçerek,

$$\begin{aligned}
& \|\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}(f; \mathbf{x})\|_{p,\beta} \\
& \leq \|f\|_{p,\beta} \text{Max}\{1, M_\beta\} \left( 1 \right. \\
& \quad \left. + c(n, \beta, q) [\gamma]_q^{\frac{|\beta|}{n}} \int_0^\infty \int_{S^{n-1}} \frac{u^{2|\beta| + \frac{2|\beta|}{n} - 1} \Omega_\beta(\theta) d\theta}{E_q\left((1-q)u^{\frac{2|\beta|}{n}}\right)} du \right) \\
& \leq \|f\|_{p,\beta} \text{Max}\{1, M_\beta\} \left( 1 + \frac{n}{2|\beta|} c(n, \beta, q) [\gamma]_q^{\frac{|\beta|}{n}} w_{\beta,n-1} \int_0^\infty \frac{u^n du}{E_q((1-q)u)} \right) \\
& \leq \|f\|_{p,\beta} \text{Max}\{1, M_\beta\} \left( 1 + \frac{n}{2|\beta|} c(n, \beta, q) [\gamma]_q^{\frac{|\beta|}{n}} w_{\beta,n-1} \Gamma_q(n \right. \\
& \quad \left. + 1) \frac{\ln q^{-1}}{1-q} q^{\frac{n(n+1)}{2}} \right)
\end{aligned}$$

elde edilir ve ispat tamamlanır.

**Teorem 3.2:**  $f \in L_{p,\beta}(\mathbb{R}^n)$ ,  $1 \leq p < \infty$ , ve  $\beta_i \in (0, \infty)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) için  $|\beta| = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n$  olsun. Eğer  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  noktasında  $f$  fonksiyonu

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^{2|\beta|}} \int_{\|\mathbf{t}\|_\beta^{\frac{n}{2|\beta|}} < h} \|f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) - f(\mathbf{x})\|_{p,\beta} d\mathbf{t} = 0$$

şartını sağlıyorsa

$$\lim_{h \rightarrow 0} \|\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}(f) - f\|_{p,\beta} = 0.$$

gerçeklenir.

**İspat:**  $\varepsilon > 0$  verilsin. Yukarıdaki tanımdan  $h < \delta$  iken

$$\int_{\|t\|_{\beta^{\frac{n}{2|\beta|}}} < h} \|f(x+t) - f(x)\|_{p,\beta} dt < \varepsilon h^{2|\beta|}$$

olacak şekilde bir  $\delta > 0$  sayısı vardır. Buradan,  $\beta$  – küresel kordinatlara geçilirse  $h < \mu$  için

$$\begin{aligned} & \int_{\|t\|_{\beta^{\frac{n}{2|\beta|}}} < h} \|f(x+t) - f(x)\|_{p,\beta} dt \\ &= \int_0^h \int_{S^{n-1}} \|f(x + (u\theta)^\beta) - f(x)\|_{p,\beta} u^{2|\beta|-1} \Omega_\beta(\theta) d\theta du \\ &< \varepsilon h^{2|\beta|} \end{aligned}$$

yazılabilir.

$$k(u) := \int_{S^{n-1}} \|f(x + (u\theta)^\beta) - f(x)\|_{p,\beta} \Omega_\beta(\theta) d\theta$$

olarak tanımlanırsa

$$\int_{\|t\|_{\beta^{\frac{n}{2|\beta|}}} < h} \|f(x+t) - f(x)\|_{p,\beta} dt = \int_0^h u^{2|\beta|-1} k(u) du < \varepsilon h^{2|\beta|}$$

elde edilir. Diğer yandan genelleştirilmiş Minkowsky eşitsizliği kullanarak

$$\begin{aligned} \|\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}(f) - f\|_{p,\beta} &= \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{\mathfrak{R}_{\gamma,\beta}(f, x) - f(x)}{1 + \|x\|_\beta} \right|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \\ &= \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{1}{1 + \|x\|_\beta} \int_{\mathbb{R}^n} (f(x+t) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - f(x)) P_\gamma(\beta; t) dt \right|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\leq \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\mathbb{R}^n} \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{(f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) - f(\mathbf{x}))}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right|^p d\mathbf{x} \right)^{\frac{1}{p}} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t} \\
&= \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\mathbb{R}^n} \|f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) - f(\mathbf{x})\|_{p, \beta} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t} \\
&= \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\|\mathbf{t}\|_\beta^{\frac{n}{2|\beta|}} < h} \|f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) - f(\mathbf{x})\|_{p, \beta} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t} \\
&\quad + \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\|\mathbf{t}\|_\beta^{\frac{n}{2|\beta|}} \geq h} \|f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) - f(\mathbf{x})\|_{p, \beta} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t} \\
&= I_1 + I_2
\end{aligned}$$

elde edilir.  $I_1$  için,  $\beta$  – küresel kordinatlara geçerek

$$\begin{aligned}
I_1 &= \frac{c(n, \beta, q)}{[\gamma]_q^{|\beta|}} \int_{\|\mathbf{t}\|_\beta^{\frac{n}{2|\beta|}} < h} \|f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) - f(\mathbf{x})\|_{p, \beta} P_\gamma(\beta; \mathbf{t}) d\mathbf{t} \\
&\leq \int_0^h u^{2|\beta|-1} k(u) P_\gamma(\beta; \mathbf{u}) du
\end{aligned}$$

bulunur. İki kez kısmi İntegrasyon yöntemi uygularsak  $D$  bir sabit olmak üzere  $I_1 \leq \varepsilon D$  elde edilir. Diğer taraftan

$$\begin{aligned}
\|f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) - f(\mathbf{x})\|_{p, \beta} &\leq \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{(f(\mathbf{x} + \mathbf{t}) - f(\mathbf{x}))}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right|^p d\mathbf{x} \right)^{\frac{1}{p}} \\
&\leq \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{(f(\mathbf{x} + \mathbf{t}))}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right|^p d\mathbf{x} \right)^{\frac{1}{p}} + \left( \int_{\mathbb{R}^n} \left| \frac{f(\mathbf{x})}{1 + \|\mathbf{x}\|_\beta} \right|^p d\mathbf{x} \right)^{\frac{1}{p}} \\
&\leq \|f\|_{p, \beta} \text{Max}\{1, M_\beta\} (1 + \|\mathbf{t}\|_\beta) + \|f\|_{p, \beta}
\end{aligned}$$

olduğundan  $\gamma \rightarrow 0$  iken  $I_2$  ninde sıfıra gittiği gösterilebilir.

## SONUÇ

Mevcut uzaylardan farklı yeni bir uzay tanımlanmıştır. Ve bu uzayın daha geniş bir uzay olduğu görülmüştür. Bu geniş uzayda Picard operatörlerinin yaklaşım özellikleri verilmiştir.

## REFERANSLAR

- Anastassiou, G. A. and Aral, A. 2009. Generalized Picard singular integrals. Comput. Math. Appl., 57, (5), pp. 821.830.
- Anastassiou, G. A. 2000. Convergence of generalized singular integrals to the unit, univariate case Math. Inequal. Appl., 3, (4) pp. 511.518.
- Anastassiou, G. A. and Gal, S.G. 2000. Approximation Theory: Moduli of Continuity and Global Smoothness Preservation. Birkhäuser, Boston.
- Aral, A. 2001. On convergence of singular integrals with non-isotropic kernels. Commun. Fac. Sci. Univ. Ank. Ser. A1, 50 pp. 88.98.
- Aral, A. 2005. On a generalized Gauss-Weierstrass singular integrals. Fasc. Math., 35 pp. 23.33.
- Atakishiyev, N.M. and Atakishiyeva, M.K. 2001. q-Analog of the Euler gamma integral. Theoret. Math. Phys., 129, (1), pp. 1325.1334.
- Bardaro, C. 1984. On approximation properties for some classes of linear operators of convolution type. Atti sem. Mat. Fis. Üniv. Modena, 33, 329-356.
- Besov, O. V., Nikolsky, S. M. and V.P Il'in. 1975. The Integral Representation of Functions and Embedding Theorems. Nauka (in Russian).
- Kac, V. and Cheung, P. 2002. Quantum Calculus (Universitext). Springer
- Neri, U. 1971. Singular Integrals. Springer-Verlag.
- Phillips, G. M. 2003. Interpolation and Approximation by Polynomials. CMS Books Math. /Ouvrages Math. SMC 14, Springer, Berlin, 2003.



# **Yanma Sürecinde Alev Geciktiricilerin Etki Mekanizmaları**

**Cumali ÇELİK<sup>1</sup>**

1- Doç.Dr.; Yalova Üniversitesi, Yalova MYO, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü  
cumali.celik@yalova.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-7788-5703

## ÖZET

Alev geciktiriciler, bir malzemenin üretimi sırasında veya sonrasında ortama eklendiğinde yanma sürecini engelleyen veya bastıran bileşiklerdir. Isıtma, ayrışma, tutuşma veya alev yayılması gibi sürecin çeşitli aşamalarında yanmayı hedef alarak döngüyü bozarlar. Alev geciktiriciler, gaz fazında, yoğun fazda veya her ikisinde de serbest radikalleri söndürme, yanıcı gazları seyreltme, ısıyı uzaklaştırma, oksijeni izole etme veya fiziksel etkiler yoluyla alevleri söndürme rollerini üstlenebilirler. Bu kitap bölümünde alevlerin yayıldığı buhar fazında etki ederek yanmayı kesintiye uğratmada kritik bir rol oynayan çeşitli alev geciktirici mekanizmaları son yıllarda yapılan çalışmalarla açıklanacaktır.

*Anahtar Kelimeler – Yanma süreci, Alev Geciktirici, Alev Geciktirici Mekanizma*

---

## GİRİŞ

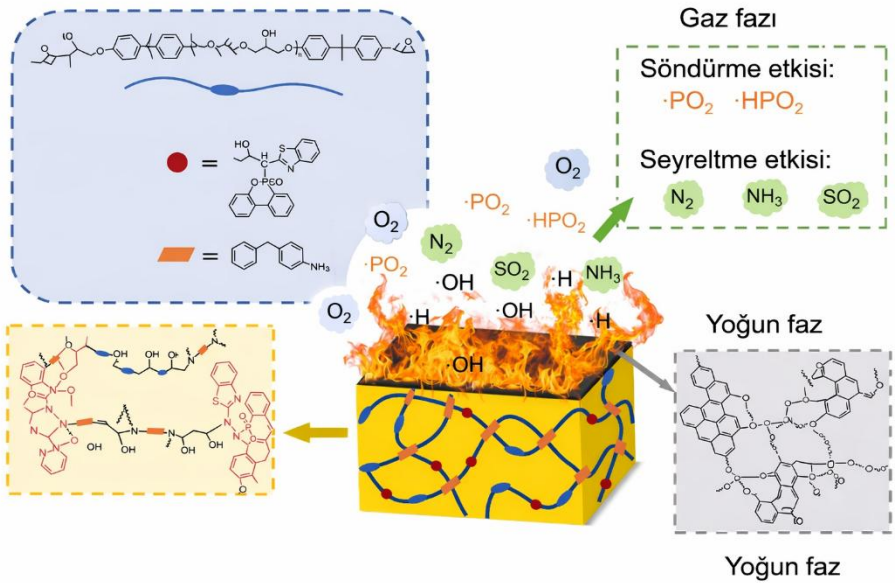
Yanma, üç temel unsuru (yakıt, oksijen ve ısı) içeren bir kimyasal reaksiyondur. Bu unsurlardan herhangi birisinin bulunmaması veya yeterli miktarda olmaması halinde yanma olayı meydana gelmez. Bir madde ısıtıldığında, termal ayrışmaya uğrar ve yanıcı gazları açığa çıkarır. Yüzey sıcaklığı belirli bir noktaya ulaştığında yanıcı gaz karışımı meydana gelmezken, artan sıcaklığın etkisiyle yanıcı gaz karışımı meydana gelmektedir. Bu gazlar, yeterli oksijen ve bir kıvılcım kaynağının varlığında kendiliğinden tutuşarak ısı üretir. Yanıcı gazlar tutuşmaya devam ederken, ısı ayrışmayı daha da hızlandırarak yanma döngüsünün devamını sağlar.

### Alev Geciktirici Mekanizmalar

Alev geciktirme mekanizması, malzemenin yanıcılığını azaltmayı ve alevin yayılmasını yavaşlatmayı amaçlar. Yanma, sıcaklık ısıtılmış yanıcı bir malzemenin tutuşma noktasına ulaştığında meydana gelir. Alev geciktirici malzeme, yanan malzemenin açığa çıkardığı ısının bir kısmını emerek, bir gaz izolasyon tabakası oluşturur, oksijen ve diğer yanıcı gazları seyreltir böylece güçlü bir endotermik reaksiyona neden olur. Yanan malzemenin yüzey sıcaklığını bir miktar düşürerek duman oluşumunu etkili bir şekilde azaltır ve yangının yayılmasını önler. Yanma esnasında yanıcı malzemenin yüzeyinde kararlı bir köpük örtü tabakası oluşturur. Bu tabaka, yanma malzemesinin yüzeyini havadan izole eder ve yanma gazının dışarı kaçmasını önleyerek yangının daha fazla büyümesini engeller.



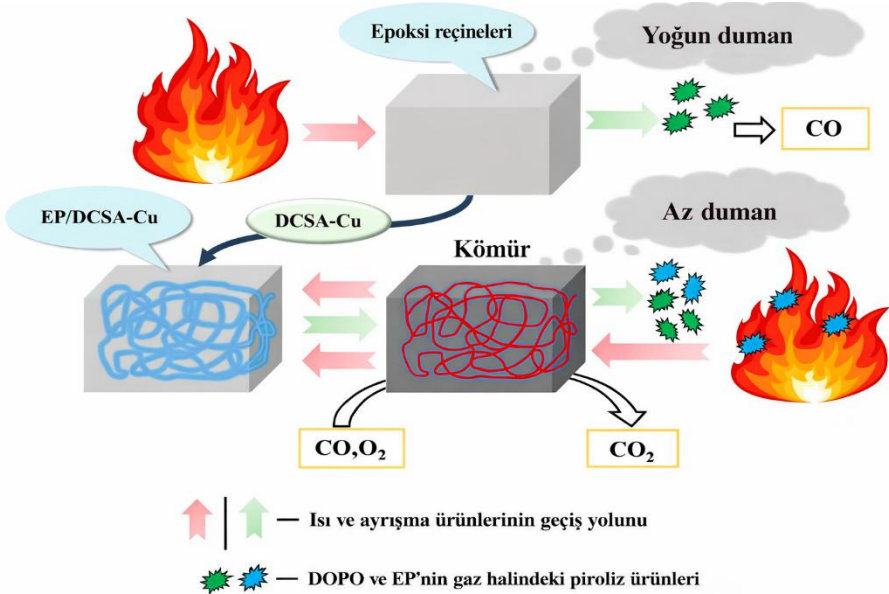
Xiaohan ve arkadaşları 2022 yılında, vanilin, 2-aminobenzotiyazol ve 9,10-dihidro-9-oksa-10-fosfafenantren-10-oksit (DOPO) kullanarak kolay tek aşamalı bir yöntemle yüksek verimli P/N/S içeren reaktif bir alev geciktirici (VTZD) sentezlemişlerdir. Hem yoğunlaştırılmış hem de gaz fazlarında önemli bir alev geciktirici etkiye sahip olan VTZD'nin mekanizma şeması Şekil 2'de gösterilmiştir. Gaz fazında, VTZD,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  ve  $\text{N}_2$  gibi kükürt ve azot içeren yanıcı olmayan gaz ürünlerini oluşturmak üzere ayrılmış ve substratın yanmasıyla oluşan yanıcı gazları ve ortamdaki oksijeni seyreltmıştır. DOPO'nun ayrışmasıyla ortama bazı fosfor içeren radikaller salınmış ve bu radikaller, söndürme etkisiyle aktif radikalleri ( $\text{H}\cdot$  ve  $\text{HO}\cdot$ ) yakalayarak yanma sürecindeki zincir reaksiyonunu kesintiye uğratmıştır. Yoğunlaştırılmış fazda, oluşan fosforik asit, oksijen ve ısı alışverişini etkili bir şekilde sınırlayan fiziksel bir koruyucu tabaka görevi gören kararlı bir kömür oluşumuna sebep olmuş, VTZD'nin gaz ve yoğun fazlardaki sinerjik etkisi, epoksi reçineye mükemmel alev geciktirici özellikler kazandırmıştır.



Şekil 2. Alev geciktirici mekanizmanın şematik diyagramı (Xiaohan vd., 2022:139).

Junwei ve ekibi 2023 yılında, DOPO ve  $\text{Cu}^{2+}$  işbirliği ile bir P/N/S- $\text{Cu}^{2+}$  tipi çapraz bağlı özelliklere sahip kompozit epoksi reçine alev geciktirici bileşimini başarıyla sentezlemişlerdir. EP/DCSA-Cu kompozitlerinin alev geciktirici mekanizması Şekil 3'te gösterilmiştir. EP'nin ısı kaynağının varlığında, çok sayıda bozunma ürünü açığa çıkardığı sürekli olarak üretilen büyük miktarda ısı, duman ve zehirli CO, EP'nin potansiyel yangın tehlikesini artırdığı bilinmektedir. DCSA-Cu ilavesi, ısı,

duman ve karbondioksit emisyonlarını bastırmıştır; bu durum aşağıdaki nedenlere bağlanmıştır. DOPO tarafından üretilen fosfor bileşiklerinin, aktif serbest radikallerle reaksiyona girerek alevin büyümesi engellenmiş ve bu nedenle bozunma bölgesine daha az ısı iletilmiştir.  $\text{Cu}^{2+}$  tarafından üretilen  $\text{CuO}$ , karbon tabakasının yüzeyini kaplayarak ve çift bağların çapraz bağlanma reaksiyonu, makromoleküler zinciri EP'yi daha yoğun hale getirmiş; bu da iyi bir blok olarak ısı ve bozunma ürünlerinin transferini önlemiştir. EP/DCSACu'nun ısı, organik ürünler ve  $\text{CO}$  salınımı engellemiş, böylece alev geciktirici özellik artmış ve duman emisyonu bastırılmıştır.



Şekil 3. Alev geciktirme mekanizmalarının şematik gösterimi (Junwei, 2023:8).

Chen ve arkadaşları 2023 yılında, sentezledikleri DOPO türevi bir alev geciktirici olan PAHDOPO'nun olası bir alev geciktirici mekanizmasını önermişlerdir Şekil 4. PAHDOPO gaz fazında etkisi, yanma işlemi sırasında, PAHDOPO'daki DOPO grubunun ayrışması ve gaz fazında  $\text{PO}_2\cdot$  ve  $\text{PO}\cdot$  radikalleri üreterek bu radikaller  $\text{HO}\cdot$  ve  $\text{H}\cdot$  serbest radikallerini söndürerek EP'nin yanma sürecini sonlandırdığı (Zhao vd., 2021:273) yaptıkları araştırma sonuçlarına göre rapor edilmiştir. Aynı zamanda, PAHDOPO'daki piperazin grubunun ayrışmasıyla üretilen  $\text{NH}_3$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  gibi yanmaz gazlar, yanıcı uçucu maddelerin ve  $\text{O}_2$ 'nin konsantrasyonunu seyrelterek PAHDOPO'nun yüksek performansını sağlayabildiği (Zhang vd., 2019:27) gözlemlenmiştir. PAHDOPO yoğun fazdaki etkisi, PAHDOPO'nun ayrışması sırasında oluşan fosforik asit türevleri, EP'nin yoğun fazda C-O-P yapısını içeren sürekli ve yoğun bir kömür tabakası oluşturmasını

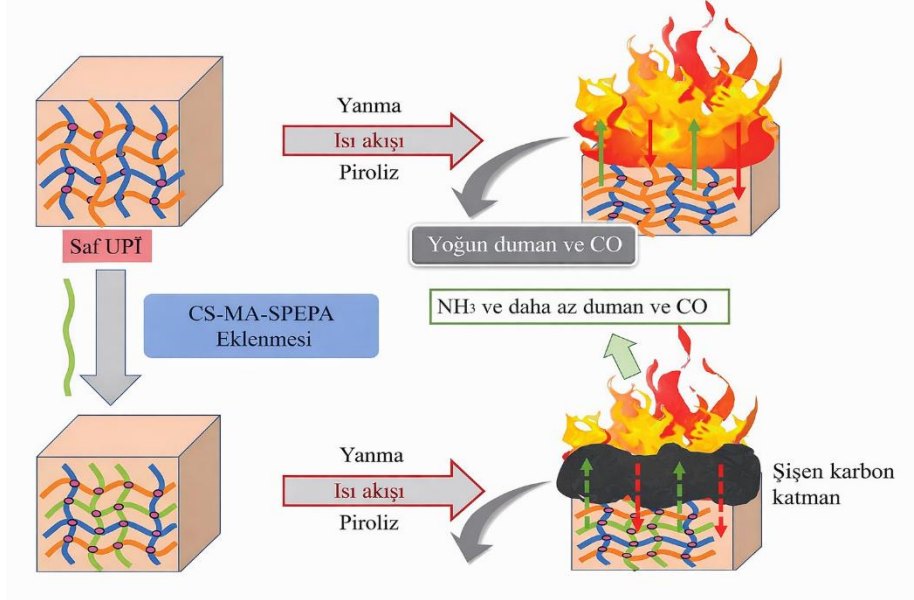
katalizlemiştir (Chen vd., 2019:166, Chen vd., 2022:402). PAHDOPO'daki piperazin grubunun ayrışmasıyla, P-N-C ve C=C gibi bazı bağlar oluşarak ve bu da sürekli ve yoğun bir tabakanın oluşmasına yardımcı olmuştur (Tan vd., 2016:17). Böylece, oluşan sürekli ve yoğun kömür kalıntısı tabakası, yanma bölgesi ile EP matrisi arasındaki termal ve kütle değişimini geciktirerek EP'yi yanmadan koruyabilmiş, böylece PAHDOPO iyi bir alev geciktirme performansı göstermiştir.



Şekil 4. Önerilen alev geciktirici mekanizmanın şematik diyagramı (Chen vd., 2023:30).

Zicheng ve arkadaşları tarafından 2022 yılında, kafes yapıları kitosan bazlı bir alev geciktirici olan kitosan maleik asit mono (1-tiyofosfor-4-hidroksimetil-2,6,7-trioks-bisiklik [2.2.2] oktan-4-metilen) ester tuzu (CS-MA-SPEPA) sentezlenmiş ve CS-MA-SPEPA'nın olası alev geciktirme ve duman bastırma mekanizmaları Şekil 5'de şematik olarak gösterilmiştir. Saf doymamış poliestere UPB matrisine eklenen alev geciktirici birlikte UPB sürekli olarak bozunmuş ve yanma sırasında zehirli gaz (CO) ve yan ürünler gibi piroliz ürünleri salmıştır. Baca gazı ve duman, UPB yüzeyine taşınmış ve çevredeki ortama yayılmıştır. Bununla birlikte, CS-MA-SPEPA'nın UPB matrisine eklenmesi, ısı alışverişini kısıtlamış ve zehirli gazların ve dumanın salınımını azaltmıştır. CS-MA-SPEPA tarafından termal bozunma sırasında azot içeren yanıcı olmayan  $\text{NH}_3$  gazı üretilmiş, bu da oksijen konsantrasyonunu daha da azaltmış ve UPB kompozitlerini içeren yanabilirlik özelliğini zayıflatmıştır. CS-MA-SPEPA'daki fosfor içeren

kafeslenmiş kısım parçalanarak fosfor polimerleri (örneğin polifosfatlar) üretmiş; bu polimerler UPR yüzeyini kaplayarak matrisi grafitlenmiş, şişen, yoğun bir koruyucu kömür tabakası oluşturmaya teşvik etmiştir. Bu kömür tabakası, yanma sırasında kütle, ısı ve oksijen transferini engellemeye önemli bir rol oynamıştır.



Şekil 5. UPR/CS-MA-SPEPA kompozitleri için olası alev geciktirici mekanizmanın şematik gösterimi (Zicheng vd., 2022:61).

Juan ve ekibi 2021 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, ATMP ve adenin arasındaki iyon değişimiyle yeni bir biyolojik bazlı alev geciktirici (ATMP-A) sentezlemişlerdir. Bu alev geciktirici polilaktik asit (PLA)/polibütilen adipat-ko-tereftalat (PBAT)/termoplastik nişasta (TPS) üçlü karışımlarına eklenmiş ve biyolojik bozunabilirliği olumsuz etkilemeden, yangın güvenliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Uçucu gaz ve kömür kalıntılarının analizine dayanarak, olası bir alev geciktirici mekanizma önerilmiş ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Yanmanın ilk aşamasında, adeninin dehidrasyonu ve iyonik bağların kırılması, oksijeni ve ısıyı seyretebilen bazı yanıcı olmayan gazların ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  ve su buharı) salınmasına yol açtığı (Chen vd.2021:175) rapor edilmiştir. Sıcaklık yükseldikçe, ATMP-A, termal olarak TPS ile esterleşebilir ve çapraz bağlanabilir, polifosforik asit, pirofosforik asit ve metafosforik aside ayrışmıştır.

Bu arada, fosfat ester radikalleri ve pirofosfat radikalleri  $\text{O}^\cdot$ ,  $\text{HO}^\cdot$  ve  $\text{H}^\cdot$  radikallerini kolayca söndürerek zincir reaksiyonunu kesintiye uğratarak,

**PLA**  
Polilaktik Asit

**PBAT**  
Polibütilen Adipattan Tereftalat

**Termoplastik Nişasta**

**Atimortritimetilifosfonik Asit Amonyum Tuzu)**

**Pyrolysis Reactions:**

$$PO^{\bullet} + HO^{\bullet} \rightarrow PO_2^{\bullet} \rightarrow O_2^{\bullet -M}$$

$$HPO^{\bullet} \rightarrow PHO^{\bullet} + H_2$$

$$PO_2^{\bullet} + H_2O \rightarrow PO_2^{\bullet} + H_2O$$

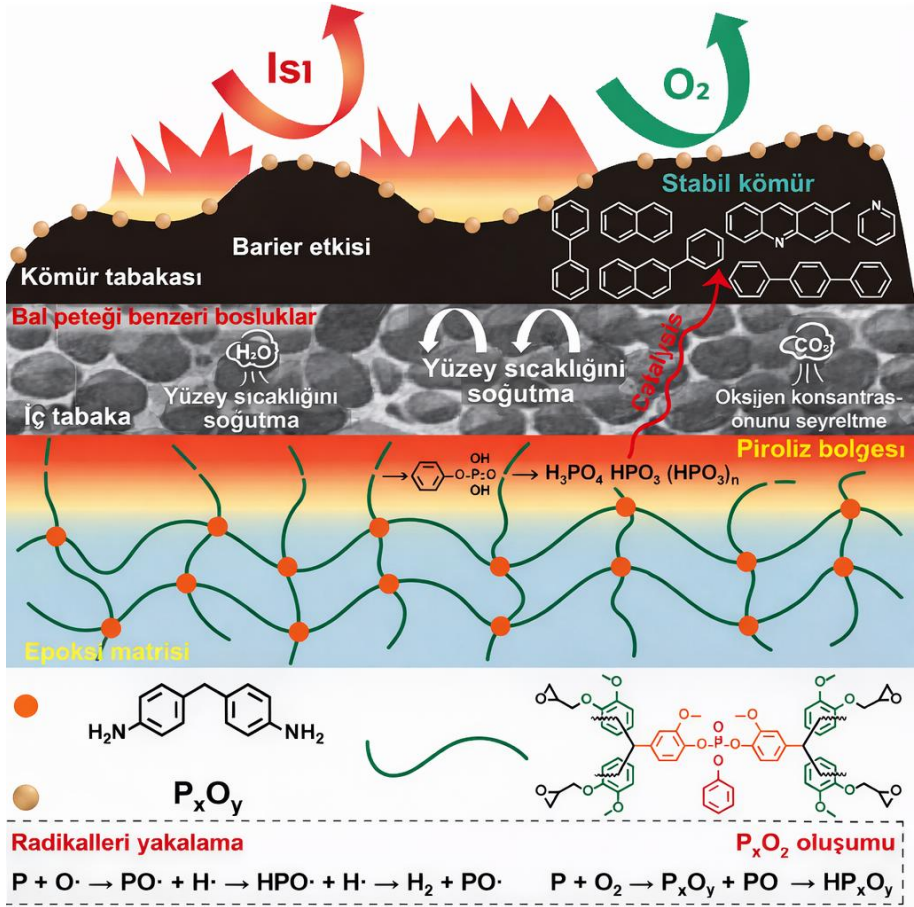
$$P_4O_6 + NH_4^+ \rightarrow HPO_2^{\bullet} + PO_2^{\bullet} + C_2O_2 + NH_3 + CO_2$$

**Legend:**

- PLA/PBAT
- TPS
- ATMP-A
- $PO_2^{\bullet} + H_2O \rightarrow PO_2^{\bullet} + H_2O$
- $P_4O_6 + NH_4^+ \rightarrow HPO_2^{\bullet} + PO_2^{\bullet} + C_2O_2 + NH_3 + CO_2$
- PLA/PBAT - TPS

Jituo ve arkadaşları 2023 yılında, yapmış oldukları analizlere göre, aşağıdaki alev geciktiricilik mekanizmaları önermişlerdir. Petrol bazlı DGEBA/DDM'ye alternatif olarak iki guaiakol bazlı novolak alev geciktirici epoksi reçine (yani GTEP/DDM ve GPEP/DDM) hazırlamışlardır. Yüksek performanslı biyobazlı bu epoksi reçineler kömür oluşturma kapasitesi ve yoğun fazlı bir alev geciktirici mekanizma sergilemiştir. GPEP/DDM'nin yoğun faz ve gaz fazı sinerjisine bağlı alev geciktirici mekanizması Şekil 7'de gösterilmiştir. Yoğun aromatiklere ve çapraz bağ ağlarında yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip olan GPEP/DDM, alev saldırısından sonra, birçok aromatik halka hızla siklizasyona uğrayarak kömür tabakası

oluşturduğu ve kömürlerin mekanik stabilitesini etkili bir şekilde artırdığı (Tian vd., 2022:428) gözlemlenmiştir. Bu arada, fosfor içeren grup, termal bozunmadan sonra hızla  $P_xO_y$ 'ye dönüşerek, kömür ve  $P_xO_y$  katmanları, ısı iletimini, yanıcı gaz salınımını ve oksijen değişimini engellemek için koruyucu bir katman oluşturmuştur. Ayrıca, su buharlaşması yüzey sıcaklığını düşürerek,  $CO_2$  gazının salınımı oksijen konsantrasyonunu seyreltip ve fosfor içeren serbest radikaller yanma radikallerini yakalayarak yanma zincirleme reaksiyonunu kesintiye uğratmıştır. Bu etkilerin alev saldırısının hasar seviyesini büyük ölçüde zayıflattığı, yüksek kömürleşme yeteneğine ve düşük ısı salınım davranışına sahip yangına dayanıklı guaiakol bazlı epoksi reçineye dönüştüğü sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. GPEP/DDM'nin olası alev geciktirici mekanizmasının şematik diyagramı (Jituo vd., 2023:140).

## SONUÇ

Alev geciktiricilerin yüksek performansı, yanma sırasında gaz fazı ve yoğunlaşmış faz üzerinde aynı anda etki gösterebilmesinden kaynaklanmaktadır. Önerilen alev geciktirici mekanizmalarda, gaz fazında etki, esas olarak serbest radikallerin söndürülmesine ve yanıcı olmayan gazların seyreltme etkisine; yoğun fazda ise oluşan kömür tabakasının bariyer etkisine dikkat çekilmiştir. Yanma esnasında yoğun ve sürekli kömür tabakaları oluşurken bazı yanmaz gazların ( $\text{NH}_3$  ve su buharı) salındığını belirtilmiştir.

Alev geciktirici etki mekanizmalarının ayrıntılı analiziyle, yoğun aromatik yapıların ve yüksek çapraz bağ yoğunluğunun kömür oluşturma kapasitesini artırabileceği ve kararlı kömür kalıntılarında oluşan koruyucu bir tabakanın hızla oluşturulabileceği ve böylece yeterli ısı ve oksijen bariyer etkisi sağlanabileceği görülmüştür. Ayrıca, gaz fazındaki su buharı,  $\text{CO}_2$  ve serbest radikaller, alev geciktirici özelliği iyileştirerek yüzey sıcaklığını düşürmede, oksijen konsantrasyonunu seyreltmede ve yanma radikallerini yakalamada önemli roller oynamıştır. Sonuç olarak, önerilen bu alev geciktirici mekanizmaların yüksek verimli alev geciktirici özelliğe sahip, yangına dayanıklı malzeme olarak kullanılabilen ve gelecekteki pratik uygulamalar için muazzam bir potansiyel olabileceği kanaatine varılmıştır.

## REFERANSLAR

- Dasari, A., Yu, Z. Z., Cai, G. P., Mai, Y. W. (2013). Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*, 38(9), 1357–1387.
- Chen R., Hu K.X., Tang H., Wang J.J., Zhu F.S., Zhou H., (2019). A novel flame retardant derived from DOPO and piperazine and its application in epoxy resin: flame retardance, thermal stability and pyrolysis behavior. *Polym Degrad Stabil.*, 166:334–343.
- Chen Y.S., Duan H.J., Ji S., Ma H.R., (2020). Novel phosphorus/nitrogen/ boron-containing carboxylic acid as co-curing agent for fire safety of epoxy resin with enhanced mechanical properties. *J. Hazard Mater.*, 402:123769.
- Jimenez, M., Duquesne, S., & Bourbigot, S. (2006). Intumescent fire protective coating: Toward a better understanding of their mechanism of action. *Thermochimica Acta*, 449(1–2), 16–26.
- Jituo Chen, Yuxiang Zhang, Feng He, Jun Ying, Shi-Neng Li, Li Peng, Qiang Wu, Zhiqiang Fan, Baiyu Jiang, (2023). Facile synthesis of intrinsically flame-retardant epoxy thermosets with high mechanical properties from lignin derivatives. *J. Appl. Polym. Sci.*, 140, 53636.
- Juan Qi, Yingtong Pan, Zhonglin Luo, Biaobing Wang, (2021). Facile and scalable fabrication of bioderived flame retardant based on adenine for enhancing fire safety of fully biodegradable PLA/PBAT/TPS ternary blends. *J. Appl. Polym. Sci.*, 138, 50877.

- Junwei Li, Penglun Zheng, Huaiyin Liu, Jichang Sun, Yawei Meng, Haihan Zhao, Jing Wu, Yun Zheng, Quanyi Liu, (2023). An Organometallic Flame Retardant Containing P/N/S–Cu<sup>2+</sup> for Epoxy Resins with Reduced Fire Hazard and Smoke Toxicity. *ACS Omega*, 8, 16080–16093.
- J. J. Zhang, H. J. Duan, J. F. Cao, J. H. Zou, H. R. Ma, (2021). A high-efficiency DOPO-based reactive flame retardant with bi-hydroxyl for low-flammability epoxy resin. *J. Appl. Polym. Sci.*, 138, 50165.
- Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J. M., & Dubois, P. (2009). New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63(3), 100–125.
- M. H. Chen, B. Liang, Y. H. Guo, C. F. Li, X. He, J. H. Hu, R. K. Li, K. Zeng, G. Yang, (2020). Pyrolysis mechanism of polyimide containing bio-molecule adenine building block. *Polym. Degrad. Stab.*, 175, 109124.
- Qi Chen, Song Wang, Sanxi Li, Ailing Zhang, (2023). Highly efficient phosphorous-containing flame retardant for transparent epoxy resin with good mechanical properties. *Journal of Polymer Research*, 30:32.
- Tan Y., Shao Z.B., Yu L.X., Long J.W., Qi M., Chen L., Wang Y.Z., (2016). Piperazine-modified ammonium polyphosphate as monocomponent flame-retardant hardener for epoxy resin: flame retardance, curing behavior and mechanical property. *Polym Chem.*, 7(17):3003–3012.
- Tian-Yu Gao, Fen-Dou Wang, Yu Xu, Chun-Xiang Wei, San-E Zhu, Wei Yang, Hong-Dian Lu, (2022). Luteolin-based epoxy resin with exceptional heat resistance, mechanical and flame retardant properties. *Chem. Eng. J.*, 428, 131173.
- Wang, X., Song, L., Pornwannchai, W., Hu, Y., & Kandola, B. (2013). The effect of graphene presence in flame retarded epoxy resin matrix on the mechanical and flammability properties of glass fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 53, 88–96.
- Xiaohan Li, Ke Zhang, Jiateng Huang, Ziyao Zhou, Kaili Xie, Xiaojie Li, Wei Wei, (2022). A vanillin derivative P/N/S-containing high-efficiency flame retardant for epoxy resin. *J. Appl. Polym. Sci.*, 139, 53105.
- Yong Guo, Zhongwei Chen, Yuan Yu, Tingting Chen, Qingwu Zhang, Changxin Li, Juncheng Jiang, (2022). A new-type terephthalonitrile derivative flame retardant of bi-DOPO compound with hydroxyl and amino groups on epoxy resin. *J. Appl. Polym. Sci.*, 139, 52209.
- Zhao P.F., Zeng W., Yang Z.W., Yang Y.X., Li J., Shi J.P., Wen N., Li H.T., Guan J., Lei Z.Q., Chen D.L., (2021). Preparation of a novel functionalized magnesium-based curing agent as an intrinsic flame retardant for epoxy resin. *Chemosphere*, 273:129658.
- Zhang Z., Dong C.H., Liu J., Kong D.Z., Sun L., Lu Z., (2019). Preparation of a synergistic reactive flame retardant based on silicon, phosphorus and nitrogen and its application to cotton fabrics. *Cellulose*, 27(3):1799–1815.
- Zicheng Jiang, Su Ma, Gang Zhang, Dongdong Song, Yanlin Wang, Fujing Lao, (2022). Effect of a chitosan-based flame retardant with a caged structure on unsaturated polyester resin. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 61, 8, 909–922.



# **Isparta Bölgesi Mermer Ocaklarında Yapısal Süreksizliklerin ve Blok Verimliliğinin Yer Radarı (GPR) Yöntemiyle Değerlendirilmesi**

**Olcay ÇAKMAK<sup>1</sup>**

1- Dr. Öğr. Gör.; Süleyman Demirel Üniversitesi Deprem Ve Jeoteknik Araştırma Merkezi.  
[olcay.cakmak@gmail.com](mailto:olcay.cakmak@gmail.com) olcay.cakmak@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-4282-4481

## ÖZET

Doğal taş endüstrisinde düşük verimlilik ve yüksek fire oranları, özellikle mermer ocakçılığında en temel ekonomik ve operasyonel sorunlardan biridir. Bu çalışma, Isparta bölgesindeki bazı mermer ocaklarında yer radarı (ground-penetrating radar, GPR) yönteminin yapısal süreksizliklerin saptanması ve blok verimliliği kestirimindeki etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, basamak aynaları üzerinde 100 MHz ve 500 MHz frekanslı antenler kullanılarak GPR ölçümleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen dijital radargramlar, saha gözlemleri ve ayna fotoğraflarıyla mekânsal olarak ilişkilendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, GPR yönteminin yüzeydeki alterasyon nedeniyle makroskopik olarak seçilemeyen "gizli" süreksizlikleri yüksek hassasiyetle belirleyebildiğini ortaya koymuştur. Frekans karşılaştırmalı analizlerde, 100 MHz antenin onlarca metre derinliğe kadar olan ana yapısal iskeleti sunabileceği, 500 MHz antenin ise ilk 5-10 metredeki mikro-çatlak sistemlerini ve süreksizlik detaylarını saptamada önemli olduğu gözlenmiştir. Özellikle radargramlarda izlenen diyagonal "X" tipi kesişmeler ve yoğun sinyal saçılması (scattering) zonlarının, ticari blok verimliliğini teorik hacmin çok altındaki seviyelere çeken temel unsurlar olduğu saptanmıştır. Ayrıca, yüzeydeki mineralojik renk dalgalanmalarının elektromanyetik verilerde yüksek genlikli yansıma karmaşasıyla karşılık bulduğu, bunun da renk bütünlüğü açısından kritik bir risk göstergesi olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak GPR teknolojisi, mermer işletmeciliğinde kazı öncesi yapısal risklerin öngörülmesini sağlayarak, üretim planlamasını bilimsel bir temele oturtan ve işletme firesini minimize etmeye yarayacak stratejik bir karar destek mekanizması olarak konumlandırılmaktadır.

*Anahtar Kelimeler – GPR, Mermer ocakçılığı, Isparta beji, Süreksizlik analizi, Blok verimliliği*

---

## GİRİŞ

Doğal taş endüstrisi, günümüzde küresel ölçekte yıllık yaklaşık 316 milyon tonluk bir brüt üretim hacmine ulaşarak devasa bir ekonomik büyüklüğü temsil etmektedir. Ancak bu büyük hacmin ardında, sektörün ve özellikle ülkemizdeki ocakların en temel ve kronik sorunu olan "düşük verimlilik" gerçeği yatmaktadır. Maden ekonomisi ve jeofizik mühendisliği perspektifinden bakıldığında dünya genelinde, mermer ve karbonatlı kayaç ocaklarında çıkarılan toplam kütlenin yaklaşık %71'inin doğrudan atığa (pasa) dönüştüğü görülmektedir (Montani, 2021; Elkarmoty vd., 2020). Ülkemizde ise bu durum çok daha düşündürücüdür. Bu denli yüksek bir kaynak kaybının ana nedeni, kayaç kütlesi içindeki süreksizliklerin (kırıklar, çatlaklar, faylar ve kil dolgulu zonlar) üretim aşamasından önce tam olarak tanımlanamamasıdır. Blok verimindeki bu belirsizlik, mermer ocakçılığını bilimsel bir planlamadan ziyade, tecrübeye dayalı ancak yüksek riskli bir işletme modeline hapsedmektedir.

### Blok Verimi Problemi ve Ekonomik Etki

Mermer, dolomit ve dolomitik kireçtaşı gibi ticari değeri olan kayaçlarda karlılığı belirleyen yegâne unsur, ocak aynasından standart boyutlarda, bütünlüğü bozulmamış "ticari blok" elde edebilme kapasitesidir. Kaya kütlesinin oluşum süreçlerinden ve tektonik rejimden miras aldığı kırık-çatlak sistemleri, bu blokların geometrik sınırlarını çizer. Eğer bu süreksizlik sistemleri hâkim üretim yönüyle uyumsuzsa veya çok yoğunsa, kesim sonrası bloklar parçalanmakta, bu da işçilikten enerjiye, elmas tel sarfiyatından makine amortismanına kadar tüm maliyet kalemlerinin boşa gitmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla, bir ocağın sürdürülebilirliği, sadece rezervin kalitesine değil, o rezervin ne kadar "bloklanabilir" olduğuna bağlıdır. Mevcut piyasa koşullarında, tespit edilemeyen bir çatlak sistemi nedeniyle kaybedilen bir basamak, bir işletmenin yıllık kâr marjını ciddi oranda aşağı çekebilmektedir.

### Geleneksel Yöntemlerin Sınırlılıkları ve Bilgi Boşluğu

Sektörde süreksizliklerin belirlenmesi amacıyla geleneksel olarak gözlemsel haritalama, karotlu sondajlar ve deneme kesimleri kullanılmaktadır. Hatta birçok ocakta çalışan ustabaşı ve çavuşların bilgi ve tecrübesi en ön plandadır. Ancak bu yöntemlerin her biri, içsel yapıyı tam olarak anlamlandırmada "yetersiz çözünürlük" veya "temsil kabiliyeti düşüklüğü" sorunlarıyla maluldür. Gözlemsel haritalama sadece yüzeydeki (ayna önündeki) veriyi sunar; aynanın 1-2 metre gerisindeki yapı tam bir kara kutudur. Karotlu sondajlar ise noktasal veri sağlar ve karmaşık kırık sistemlerine sahip karbonatlı kayaçlarda, iki sondaj arasındaki yapıyı tahmin etmek çoğu zaman yanıltıcı olmaktadır. Ustabaşı ve çavuş gözlemleri ise tamamen subjektif ve hataya açıktır. En yaygın ancak en maliyetli yöntem

olan "deneme kesimleri" ise, verimsiz bir alanda yapıldığında geri dönüşü olmayan bir ekonomik kayıp ve zaman israfı yaratmaktadır. İşte tam bu noktada, yüzey gözlemlerinin ötesine geçen, aynanın içini yüksek çözünürlükle görebilen tahribatsız yöntemlere duyulan ihtiyaç, modern madenciliğin bir gerekliliği haline gelmektedir.

### **Yer Radarı Yönteminin Stratejik Rolü**

Yer Radarı (*ground-penetrating radar, GPR*), son yıllarda kayaç ortamlarında süreksizliklerin haritalanması için en güçlü aday olarak öne çıkmaktadır. Elektromanyetik (EM) dalgaların ortamdaki yayılım dinamiklerine dayanan bu teknoloji, özellikle mermer ve dolomit gibi düşük elektriksel iletkenliğe sahip kayaçlarda benzersiz bir performans sergiler. Karbonat kayaçların sahip olduğu düşük iletkenlik, sinyallerin daha derinlere nüfuz etmesine; kırıkların içindeki hava, su veya kil dolgusu ile ana kayaç arasındaki dielektrik kontrast ise bu yapıların kesitlerde net bir şekilde izlenmesine olanak tanır. GPR, ocağın sadece görünen yüzünü değil, basamak gerisindeki yapısal karmaşıklığı da bir "röntgen" gibi ortaya koyarak, geleneksel yöntemlerin bıraktığı bilgi boşluğunu doldurmaktadır.

### **Amaç ve Özgün Katkı**

Literatürde GPR'nin genel jeofizik prensiplerine dair çok sayıda çalışma olsa da bu verilerin doğrudan mermer ocaklarında bir "karar destek mekanizması" olarak kullanılmasına yönelik pratik yaklaşımlar halen sınırlıdır. Bu çalışma, yalnızca teorik bir anlatım sunmayı değil, aktif birkaç mermer ocağındaki saha deneyimlerini, verilerin işlenişini ve bu verilerin üretim planlamasına (blok verimi, kırık yönelimleri hâkim kırık sistemleri vb.) nasıl entegre edileceğini somutlaştırmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmanın özgün katkısı, GPR yöntemini mermer ocaklarında sadece bir "görüntüleme aracı" olmaktan çıkarıp, blok verimliliğini artıran ve pasa oranını minimize eden bir "mühendislik aracı" olarak konumlandırmasıdır. Çalışma kapsamında; karbonatlı kayaçlardaki dielektrik karakterizasyon, saha ölçüm parametrelerinin optimizasyonu ve GPR kesitlerinin sahadaki gerçek kırık sistemleriyle olan korelasyonu ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Bu yönüyle bölüm, hem akademik araştırmacılar için metodolojik bir rehber, hem de ocak işletmecileri için operasyonel maliyetleri düşürecek pratik bir yol haritası niteliği taşımaktadır.

## **ISPARTA CİVARININ GENEL JEOLJİSİ**

Batı Toroslar'ın tektonik evriminde bir düğüm noktası teşkil eden Isparta ve yakın çevresi, Alp-Himalaya orojenik kuşağının en karmaşık yapısal unsurlarından biri olan "Isparta Büklümü" (Isparta Angle) içerisinde yer almaktadır. Bölgenin jeolojik mimarisi, Tetis Okyanusu'nun kuzey ve güney kollarının kapanma süreçleri, bu süreçlere bağlı olarak gelişen nap

yerleşimleri ve Neotetik evrimin bir sonucudur. Bu makro ölçekli tektonik hareketlilik, mermer ve doğal taş endüstrisi için kritik öneme sahip olan devasa karbonat platformlarının oluşumuna, dikey yönde kalınlaşmasına ve ardından gelen kırılma-faylanma mekanizmalarıyla günümüzdeki işletilebilir yatakların ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Isparta ve civarının mermer potansiyeli, özellikle Eğirdir, Sütçüler ve Aksu ilçeleri odağında yoğunlaşmakta olup, bu yataklar Mesozoik ve Tersiyer yaşlı kireçtaşları ile karakterize edilmektedir.

### **Bölgesel Jeoloji ve Isparta Büklümü**

Isparta bölgesi, Batı Toroslar'ın en karakteristik yapısal özelliği olan ve literatürde Isparta Büklümü (Isparta Angle) olarak bilinen ters "V" şeklindeki oroklinal bükülmenin merkezinde yer alır (Poisson vd., 2003). Bu yapı, Neotetis Okyanusu'nun kapanma sürecinde Afrika ve Avrasya levhalarının karmaşık etkileşimleri sonucunda şekillenmiştir (Robertson vd., 2003). Büklümün batısı kuzey-güney, doğu kanadı ise kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu bir hat izleyerek Isparta kuzeyinde birleşir. Bu devasa tektonik düğüm noktası, bölgedeki mermer olarak işletilen karbonat platformlarının hem çökeltme ortamlarını hem de bugünkü yapısal konumlarını belirleyen temel unsurdur (Poisson vd., 2003).

Büklümün gelişimi, Mesozoyik'ten Tersiyer'e kadar uzanan bir dizi jeodinamik olayın ürünüdür. Bu süreçte, başlangıçta geniş bir alana yayılan karbonat platformları, nap yerleşimleri ve tektonik birçok yoğun kuvvetlere maruz kalmıştır (Robertson, 1993). Bu kuvvetler, mermer yataklarında sadece kütle bütünlüğünü etkilemekle kalmamış, aynı zamanda kayacın kristalizasyon derecesini ve dolayısıyla kalite ve özelliklerini de doğrudan şekillendirmiştir (Ozcelik ve Leventeli, 2019).

### **Stratigrafik Birimler ve Karbonat Platformları**

Isparta ve çevresindeki mermer yatakları temel olarak iki ana tektono-stratigrafik grup altında incelenir: Otokton (yerli) ve Allohton (taşınmış) birimler (Waldron, 1981).

- **Otokton Birimler:** Bölgenin temelini oluşturan otokton birimler, özellikle Bey Dağları ve Akseki-Anamas platformları ile temsil edilir. Mesozoyik yaşlı bu platformlar, kalın karbonat istiflerinden oluşur ve bölgedeki en kaliteli bej mermerlerin ana kaynağını teşkil eder (Ozcelik ve Leventeli, 2019). Bey Dağları platformu üzerindeki kireçtaşları, homojen dokusu ve blok verimliliği ile bilinir. Bu birimlerin jeolojik sürekliliği, geniş alanlarda benzer kalitede hammadde üretimine olanak tanır.
- **Allohton Birimler (Nap Sistemleri):** Bölgede otokton birimlerin üzerine yerleşmiş Antalya Napları, Likya Napları ve Hoyran-Beyşehir Napları gibi karmaşık yapısal birimler bulunur (Poisson vd., 2003). Bu birimler içerisinde yer alan karbonatlı kayaçlar, taşınma süreçleri sırasında yoğun

deformasyona uğramıştır. Örneğin, Yarışlı Gölü çevresinde gözlenen Likya Napları bünyesindeki Dutdere Kireçtaşı, bölgenin en önemli ticari mermerlerinden biri olan "Burdur Beji" olarak işletilmektedir (Yılmaz ve Caran, 2019). Bu birimler, tektonik hareketler nedeniyle daha fazla çatlak ve kırık sistemine sahip olabilmektedir, bu da ocak işletmeciliğinde blok verimliliğini doğrudan etkileyen bir parametredir.

### **Tektonik ve Deformasyonun Mermer Kalitesine Etkisi**

Isparta Büklümü'nün evrimi sırasında meydana gelen çok evreli deformasyon, mermer yatakları üzerinde hem pozitif hem de negatif etkiler yaratmıştır.

- **Kristalizasyon ve Doku:** Sıkışma tektoniği altında gelişen gömülme ve dinamik metamorfizma, kireçtaşlarının mermerleşme derecesini artırarak daha yoğun ve cila kabulü yüksek bir doku kazandırmıştır (Ozcelik ve Leventeli, 2019).
- **Çatlak ve Kırık Sistemleri:** Yoğun tektonik stres, kayalarda ikincil kırık sistemlerinin gelişmesine neden olmuştur. Ocak verimliliği açısından bu durum, büyük boyutlu blok eldesini zorlaştırabilmekte ancak mermerin dokusunda estetik açıdan aranan desen ve damar yapılarının oluşmasını sağlamaktadır (Yılmaz ve Caran, 2019).
- **Faylanma ve Ocak Geometrisi:** Bölgedeki kuzey-güney doğrultulu normal faylar ve doğrultu atımlı sistemler, mermer yataklarının sürekliliğini kesintiye uğratmakta ve ocak tasarımında dikkate alınması gereken yapısal sınırlar oluşturmaktadır (Poisson vd., 2003).

### **Mermer Ocaklarının Jeolojik ve Ekonomik Karakterizasyonu**

Isparta ve komşu Burdur illeri, Türkiye'nin doğal taş ihracatında kritik bir paya sahiptir. Bölgede üretilen mermerlerin başında "Isparta Beji", "Burdur Beji", "Ottoman" ve "Sandia" gibi ticari isimlerle anılan sedimenter kökenli mermerler gelmektedir (Caran, 2014).

Yarışlı Gölü ve Sütçüler gibi bölgelerde yoğunlaşan ocak faaliyetleri, jeolojik olarak Dutdere ve benzeri Mesozoyik platform kireçtaşlarına dayanmaktadır. Yapılan rezerv çalışmalarına göre, sadece Yarışlı Gölü çevresindeki Dutdere kireçtaşlarının yaklaşık 94.500.000 tonluk bir mermer potansiyeli olduğu tahmin edilmektedir (Yılmaz ve Caran, 2019). Ancak bu rezervlerin işletilebilirliği, %5 ile %20 arasında değişen blok verimliliği oranlarına bağlıdır (Ozcelik ve Leventeli, 2019). Blok verimliliğini belirleyen temel faktör ise sahanın maruz kaldığı tektonik stresin yoğunluğu ve buna bağlı gelişen eklem (joint) aralıklarıdır.

## Hidrojeolojik ve Çevresel Etkiler

Isparta'nın karstik jeolojisi, mermer ocakçılığı ile yeraltı su kaynakları arasında hassas bir denge gerektirmektedir. Karbonatlı kayalarındaki erime boşlukları (karstlaşma), hem blok verimliliğini düşürmekte hem de ocak atıklarının yeraltı sularına karışma riskini artırmaktadır (Ozcelik, 2016). Bu nedenle, mermer ocaklarının planlanması ve işletilmesi süreçlerinde karstik yapıların ve tektonik hatların hidrojeolojik etkileri titizlikle analiz edilmelidir (Ozcelik, 2023).

## METODOLOJİ VE SAHA UYGULAMASI

Mermer ocaklarında yapısal süreksizliklerin belirlenmesi, sadece bir görüntüleme işlemi değil, aynı zamanda EM dalgaların kayaç kütlesi içindeki etkileşiminin doğru analiz edilmesini gerektiren bir mühendislik sürecidir. Bu bölümde, uygulanan GPR yönteminin fiziksel temelleri ve saha verisinin niteliğini belirleyen teorik parametreler ele alınmaktadır.

### GPR Yönteminin Teorik Temelleri

GPR, yer altındaki yapıların ve süreksizliklerin belirlenmesinde yüksek frekanslı (genellikle 10 MHz - 4 GHz) EM dalgaların iletilmesi ve bu dalgaların geri yansıyan bileşenlerinin kaydedilmesi prensibiyle çalışır. Yöntemin mermer ve dolomit ocaklarındaki başarısı, bu kayaçların sahip olduğu özgül elektriksel özelliklere dayanmaktadır.

EM dalga yayılımı ve yansıma dinamikleri, GPR sinyallerinin ortam içindeki davranışı, temel EM teoriyi tanımlayan Maxwell denklemleri ile ifade edilir. Anten tarafından ortama gönderilen EM dalgalar, ilerledikleri ortamda elektriksel özelliklerin (özellikle dielektrik geçirgenlik ve iletkenlik) değiştiği bir ara yüzeyle karşılaştığında, dalga enerjisinin bir kısmı yansımaya uğrar, bir kısmı ise daha derinlere iletilir (US EPA, 2025; Oristaglio vd., 2004). Bir ara yüzeydeki yansıma katsayısı ( $R$ ), ortamların dielektrik sabitleri ( $\epsilon_r$ ) arasındaki farka bağlıdır:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

Burada  $\epsilon_{r1}$  ana kayacın,  $\epsilon_{r2}$  ise süreksizliğin (çatlak dolgusu vb.) dielektrik sabitidir. Bu denklem, mermer bloğu içindeki bir çatlağın, çevresindeki kayaçla ne kadar büyük bir elektriksel kontrast oluştursa o kadar güçlü bir sinyal yansıması vereceğini mühendislik açısından doğrular (Martinez ve Byrnes, 2010).

Karbonatlı kayaların dielektrik karakteri ise mermer, dolomit ve dolomitik kireçtaşları, GPR uygulamaları için en ideal ortamlardan biri olarak kabul edilir. Bunun temel nedeni, bu kayaçların sahip olduğu son derece düşük elektriksel iletkenliktir ( $\sigma$ ). Elektriksel iletkenliğin düşük olması, EM

dalgalarının ortamda ilerlerken sönümlenmesini (atenuasyon) minimize eder. Mermer ve sağlam kireçtaşlarında sinyal sönümü oldukça düşüktür; bu da yüksek frekanslı antenlerle dahi işletme açısından kritik olan 5-15 metre derinliklere kadar yüksek çözünürlüklü görüntü alınabilmesini sağlar (Arosio, 2016; Grasmueck vd., 2005). Bu kayaçların dielektrik sabitleri genellikle 6 ile 9 arasında değişmekte olup, sinyal hızı yaklaşık 0.1 m/ns civarındadır; bu durum zaman-derinlik dönüşümü için istikrarlı bir temel sunar (Sambuelli ve Calzoni, 2009).

Süreksizliklerin yansıması ve sinyal karakteristiği ise saha verilerinde bir kırık veya çatlağın tespit edilmesi, sadece bir çizginin görülmesi değil, sinyaldeki amplitüd (genlik) artışı ve faz değişiminin analiz edilmesidir. Mermer bloğu içindeki bir süreksizlik; hava, su veya kil ile dolu olabilir. Bu dolgu malzemelerinin dielektrik sabitleri ana kayaca göre dramatik farklar gösterir:

- Hava dolgulu çatlaklar ( $\epsilon_{r1} \approx 1$ ): Ana kayaçtan ( $\epsilon_{r1} \approx 9$ ) daha düşük bir değere sahip olduğu için yansıma katsayısı negatiftir ve sinyalde karakteristik bir faz terslenmesi (phase reversal) yaratır.
- Su dolgulu çatlaklar ( $\epsilon_{r1} \approx 80$ ): Çok yüksek bir kontrast oluşturarak çok güçlü (parlak) yansımalar üretir ve genlik artışına neden olur (Buursink ve Lane, 1999; Tsoflias vd., 2004).
- Kil dolgulu zonlar: Kilin iletken doğası gereği hem güçlü bir yansıma hem de sinyalin süreksizliğin altında hızla sönümlenmesi (shadowing effect) ile kendini belli eder (Conti vd., 2019).

Mühendislik perspektifiyle bu değişimler, ocak aynasındaki çatlağın sadece varlığını değil, içsel yapısını ve blok verimine etkisini anlamamıza olanak tanıyan en kritik verilerdir.

### **Kullanılan Ekipman ve Ölçüm Parametreleri**

Saha çalışmaları kapsamında, elektromanyetik veri toplama sürecinde MALA marka GPR sistemi kullanılmıştır. Ocak ortamındaki metalik yapılar ve EM kirliliğin sinyal üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmek amacıyla, dış gürültülere karşı izole edilmiş kapalı (shielded) tip antenler tercih edilmiştir.

Çatlak sistemlerinin tespiti ve çözünürlük analizi için iki farklı merkez frekansına sahip anten (100 MHz ve 500 MHz) seçilmiştir. Buradaki temel amaç, 100 MHz anten ile daha derinlerdeki kırık çatlak ve süreklilikleri izlemek; 500 MHz anten ile ise yüzeye yakın, düşük açıklıklı (ince) çatlakların çözünürlüğünü ve ayırım kabiliyetini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir (Adams ve Davordzie, 2023; Grasmueck vd., 2005).

Ölçüm sırasında her iki anten için örnekleme aralığı (trace interval) 5 cm olarak sabitlenmiştir. Sinyal derinliği ve kayıt süresini belirleyen zaman penceresi (time window); 500 MHz anten için 150 ns, 100 MHz anten için ise 220 ns olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, karbonatlı kayaçların düşük

iletkenlik özellikleri göz önüne alındığında, işletme açısından kritik olan derinliklere ulaşmak için yeterli kabul edilmiştir.

### **Saha Ölçüm Tasarımı ve Stratejisi**

Çalışma, Isparta bölgesinde faaliyet gösteren üç farklı mermer ocağında gerçekleştirilmiştir. Ticari gizlilik prensipleri gereği ocak isimleri belirtilmemiştir. Ölçümler, sistematik bir ağ (grid) tasarımı yerine, ocağın mevcut üretim basamakları ve aynaları boyunca tekil profiller şeklinde kurgulanmıştır. Her bir profil hattı, hem 100 MHz hem de 500 MHz antenlerle taranarak aynı süreksizliğin farklı frekanslardaki sinyal tepkisi kayıt altına alınmıştır.

Bu stratejinin temel amacı, GPR verileri ile saha gerçekliğini doğrudan ilişkilendirmektir. Ölçüm sırasında profil alınan basamak aynalarının yüksek çözünürlüklü fotoğrafları çekilmiş; böylece elde edilen radargramlardaki yansımalar ile aynada gözle görülen fiziksel kırıklar arasında birebir karşılaştırma yapma olanağı doğmuştur. Bu yöntem, GPR kesitlerindeki "belirti" olarak nitelendirilen sinyal karakterlerinin, sahadaki hangi yapısal süreksizliğe (açık çatlak, kil dolgululu kırık vb.) karşılık geldiğini doğrulamak amacıyla metodolojik bir yaklaşım olarak benimsenmiştir (Zanzi vd., 2017).

### **Veri İşleme (Data Processing) İş Akışı**

Ham verilerin yorumlanabilir bir kesite dönüştürülmesi amacıyla standart bir jeofizik veri işleme iş akışı uygulanmıştır. İşlemler sırasında şu adımlar izlenmiştir:

- **Time-Zero Correction (Sıfır Zamanı Düzeltmesi):** Anten ile yer yüzeyi arasındaki havadaki ilk geçiş süresinden kaynaklanan gecikme düzeltilerek, sinyalin başlangıç noktası gerçek yer yüzeyine hizalanmıştır.
- **Background Removal (Arka Plan Gürültüsü Giderme):** Profil boyunca devam eden yatay sinyal gürültüleri ve anten halkalanmaları (ringing), ortalama bir sinyalin tüm profilden çıkarılması yöntemiyle temizlenmiş; böylece düşük süreksizliklerin görünürlüğü artırılmıştır.
- **Bandpass Filtering (Bant Geçişli Filtreleme):** 500 MHz verilerinde sinyal-gürültü oranını iyileştirmek için 250-750 MHz, 100 MHz verilerinde sinyal-gürültü oranını iyileştirmek için 50-350 MHz aralığında bant geçişli filtre uygulanarak, hedef frekans dışındaki yüksek ve düşük frekanslı kirlilikler bastırılmıştır.
- **Velocity Analysis ve Migration (Hız Analizi ve Göç):** Radargramlardaki kırınım hiperbolleri görsel olarak analiz edilmiş ve karbonatlı kayalar için tipik olan 0.10 m/ns ile 0.13 m/ns arasındaki hız değerleri tespit edilmiştir. Bu hız verileri kullanılarak uygulanan migration (göç) işlemi ile, saçılan enerjiler odaklanmış ve süreksizliklerin gerçek geometrik konumları netleştirilmiştir (Pipan vd., 2003).
- **Time-Depth Conversion (Zaman-Derinlik Dönüşümü):** Belirlenen hızlar üzerinden kesitler zaman ortamından derinlik ortamına aktarılarak,

çatlakların aynadaki derinlikleri metre cinsinden ölçülebilir hale getirilmiştir.

## VERİ İŞLEME VE YORUMLAMA

Mermer ocaklarından elde edilen ham GPR verileri, yeraltındaki yapısal karmaşıklığın dijital bir izdüşümüdür; ancak bu ham sinyallerin üretim planlamasına doğrudan hizmet edebilecek bir "karar destek mekanizmasına" dönüşmesi için iyi yorumlanması gerekir. GPR kesitleri, sadece bir görüntüleme işlemi değil, elektromanyetik dalgaların kayaç kütlesi içindeki etkileşiminin doğru analiz edilmesini gerektiren bir mühendislik sürecidir (Jol, 2009). Bu bölüm, sahadan toplanan verilerin dijital gürültülerden arındırılarak jeolojiye nasıl yaklaştırıldığını ve elde edilen radargramlardaki yansıma desenlerinin sahadaki gerçek süreksizliklerle nasıl korele edildiğini metodolojik bir çerçevede sunmaktadır.

Sahada 100 MHz ve 500 MHz antenlerle toplanan veriler hem cihaz kaynaklı sinyal halkalanmalarını hem de ortamdaki EM kirliliği içerir (Annan, 2005). Ham verinin temizlenmesi ve hedeflenen derinlikteki süreksizliklerin belirginleştirilmesi amacıyla uygulanan standart iş akışı şu adımlardan oluşmaktadır.

- Sıfır Zamanı Düzeltmesi (Time-Zero Correction)
- Arka Plan Gürültüsü Giderme (Background Removal).
- Kazanç (Gain) Uygulamaları.
- Bant Geçişli Filtreleme (Bandpass Filtering).
- Hız Analizi ve Göç (Velocity Analysis and Migration).

### GPR Verilerinin Yorumlanması ve Jeolojik Korelasyon Kriterleri

İşlenmiş GPR kesitlerindeki yansımaların jeolojik bir anlam kazanması, sinyaldeki genlik (amplitüd) artışlarının ve faz değişimlerinin analiz edilmesine bağlıdır (Neal, 2004). Isparta bölgesindeki ocaklarda yapılan gözlemler ışığında, süreksizliklerin GPR verisindeki yansıma karakterleri şu kriterlere göre tanımlanmıştır,

- **Süreksizlik Göstergeleri ve Genlik Analizi:** Bir mermer bloğu içindeki çatlak; hava, su veya kil ile dolu olabilir. Su dolgulu çatlaklar (dielektrik sabiti  $\epsilon_r \approx 80$ ), ana kayaçla ( $\epsilon_{r1} \approx 8 - 9$ ) çok yüksek bir kontrast oluşturarak radargramda "parlak" ve yüksek genlikli yansımalar üretir (Conyers, 2013).
- **Faz Terslenmesi (Phase Reversal):** Hava dolgulu çatlaklar ( $\epsilon_r \approx 1$ ), ana kayaca göre daha düşük bir dielektrik değerine sahip olduğu için yansıma katsayısı negatiftir ve sinyalde karakteristik bir faz terslenmesi yaratır; bu, çatlağın "açık" olduğunun en net göstergesidir (Daniels, 2004).
- **Süreklilik ve Yönelim:** Radargram boyunca izlenebilen kesintisiz yansımalar, blok verimliliğini doğrudan etkileyen ana eklem takımlarını veya fay düzlemlerini temsil eder. 100 MHz verisinde 200 ns (yaklaşık 10

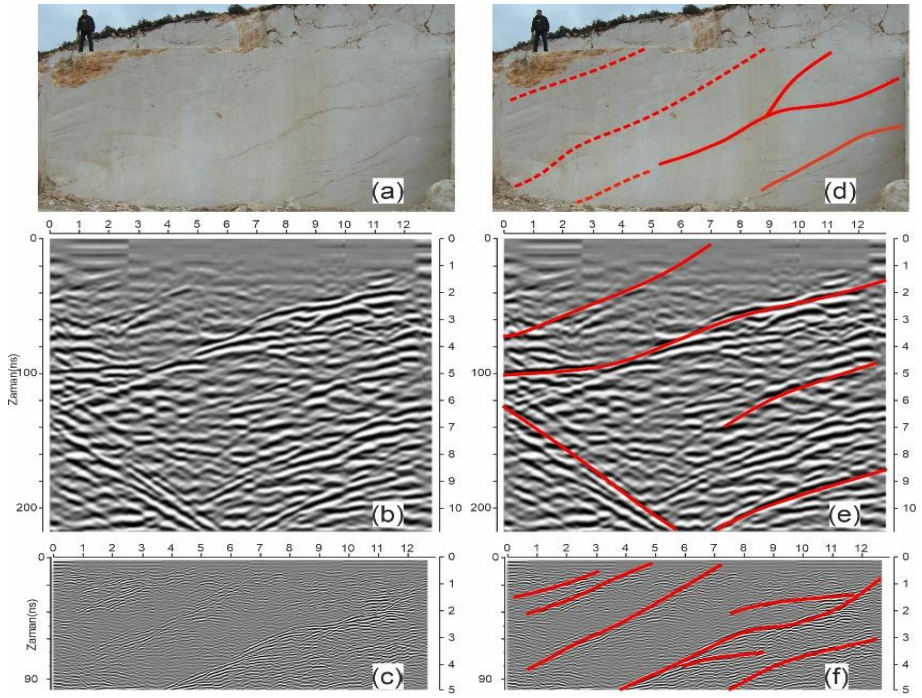
m) derinlikte gözlenen "X" tipi kesişmeler, büyük boyutlu blok eldesini zorlaştıran "kama" yapılarını deşifre etmektedir (Neal, 2004).

- **Gölgeleme Etkisi (Shadowing):** Özellikle kil dolgulu zonlar, iletken doğası gereği hem güçlü bir yansıma hem de sinyalin süreksizliğin altında hızla sönümlenmesiyle kendini belli eder; bu durum o bölgedeki mermer kalitesinin düşük olduğuna işaret eder (Conyers, 2013).

### **Saha Bulguları ve Ayna Analizi: 100 MHz ve 500 MHz Verilerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi**

Şekil 1 incelendiğinde Isparta bölgesindeki bir mermer ocağında alınan profil ölçümleri, ayna yüzeyindeki görsel süreksizlikler ile GPR kesitleri arasındaki korelasyonun frekans bağımlı olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Yapılan analizlerde, ayna yüzeyinde sağ üstten sol alta doğru uzanan diyagonal kırık sistemleri ana odak noktası olmuştur.

Ayna fotoğrafının sağ üstünden sol altına uzanan iki adet paralel diyagonal çatlak sistemi mevcuttur. 100 MHz anten kesitinde, üstteki ana çatlak çok belirgin bir yansıma verirken, hemen altındaki paralel hat sadece zayıf bir iz olarak kalmıştır. Bunun temel sebebi, 100 MHz antenin dalga boyunun birbirine yakın bu iki hattı tek bir kırık gibi algılamasıdır. Buna karşın 500 MHz anten, yüksek çözünürlük kabiliyeti sayesinde her iki çatlağı da birbirinden bağımsız ve keskin birer hat olarak saptayabilmiştir. Çalışmanın diğer dikkat çekici bulgusu, yatayda 7. metreden başlayıp 0. metreye ilerleyen ve derine doğru 4 metre inen hattır. Bu hat, ayna yüzeyinde fiziksel bir çatlak olarak izlenemese de mermer yüzeyindeki belirgin renk dalgalanması ve mineralojik değişim bölgesiyle tam örtüşmektedir. GPR sinyalleri, yüzeyde henüz ayrışmamış olan bu bölgedeki dielektrik farkı yakalayarak, iç kısımlarda bir süreksizlik başladığını önceden haber vermiştir. Bu durum, görsel denetimin yetersiz kaldığı "latent" (gizli) çatlakların tespitinde GPR'ın kritik önemini kanıtlamaktadır. Kesitin sol tarafında (0-3 m arası) ve yaklaşık 2 metre derinlikte gözlenen yoğun sinyal saçılması (scattering effect), mermer kütlesinin bu bölgede masif yapısını yitirdiğine işaret eder. Yüzeyde masif görünse de radargramdaki bu "gürültülü" yansıma bölgesi, blok verimini düşürecek mikro-çatlakların veya karstik dokunun habercisidir.



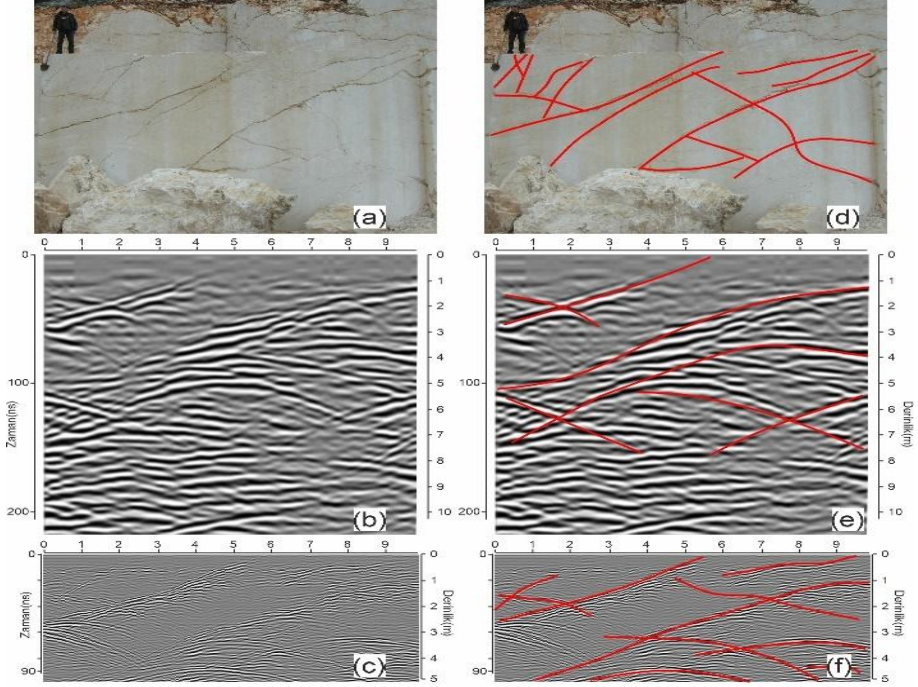
Şekil 1. Basamak aynası ve farklı frekanslardaki GPR kesitlerinin yapısal korelasyonu. (a) Ayna yüzeyindeki süreksizlikler ve mineralojik renk değişimleri; (b) 100 MHz anten verisinde (200 ns) derin yapısal süreklilik ve ana eklem takımlarının (diyagonal sistemler) 10 metre derinliğe görünüm; (c) 500 MHz anten verisinde (90 ns) yüzey yakınındaki yüksek çözünürlüklü yapısal detaylar, (d), (e), (f) aynı görüntülerin yorumlanmış gösterimi.

## ARAZİ BULGULARI

Bu bölüm, Isparta bölgesindeki karbonatlı kayaç istiflerinde faaliyet gösteren mermer ocaklarında gerçekleştirilen GPR ölçümlerinden elde edilen verileri ve bu verilerin basamak aynalarındaki yapısal unsurlarla olan mekânsal korelasyonunu ele almaktadır. Saha genelinde yürütülen kapsamlı ölçüm çalışmaları; karşılaşılan jeolojik süreksizliklerin karakterine, sinyal yansıma modellerine ve blok verimliliği üzerindeki etkilerine göre sınıflandırılmıştır. GPR verilerinin jeolojik bir anlama bürünmesi ve sahadaki üretim planlamasına veri sağlaması amacıyla bulgular, tipik anomali türlerini temsil eden üç ana kategorik başlık altında örneklendirilmiştir. Söz konusu sınıflandırma, hem farklı frekanslardaki anten yanıtlarının karşılaştırılmasına hem de 'ayna arkası' kestirimlerinde kullanılan metodolojik yaklaşımın doğrulanmasına olanak sağlamaktadır:

### Örnek Saha 1: Yapısal Süreksizliklerin Karşılaştırmalı Analizi

Bu basamak aynasında gözlemlenen belirgin çatlak sistemleri ile yeraltındaki (ayna arkasındaki) sürekliliklerin saptanmasına yönelik en tipik örneği temsil etmektedir. Fotoğraf ve radargramlar Şekil 2 de görülmektedir. Buna göre elde edilen bulgular aşağıdadır:



Şekil 2. Yapısal Süreksizliklerin Karşılaştırmalı Analizine örnek. Sol sütun (Ham Veri): (a) Ayna fotoğrafı, (b) 100 MHz ve (c) 500 MHz radargramları. Sağ sütun (Yorumlanmış Veri): (d) İşaretlenmiş ayna fotoğrafı, (e) 100 MHz ve (f) 500 MHz yorumlanmış kesitleri.

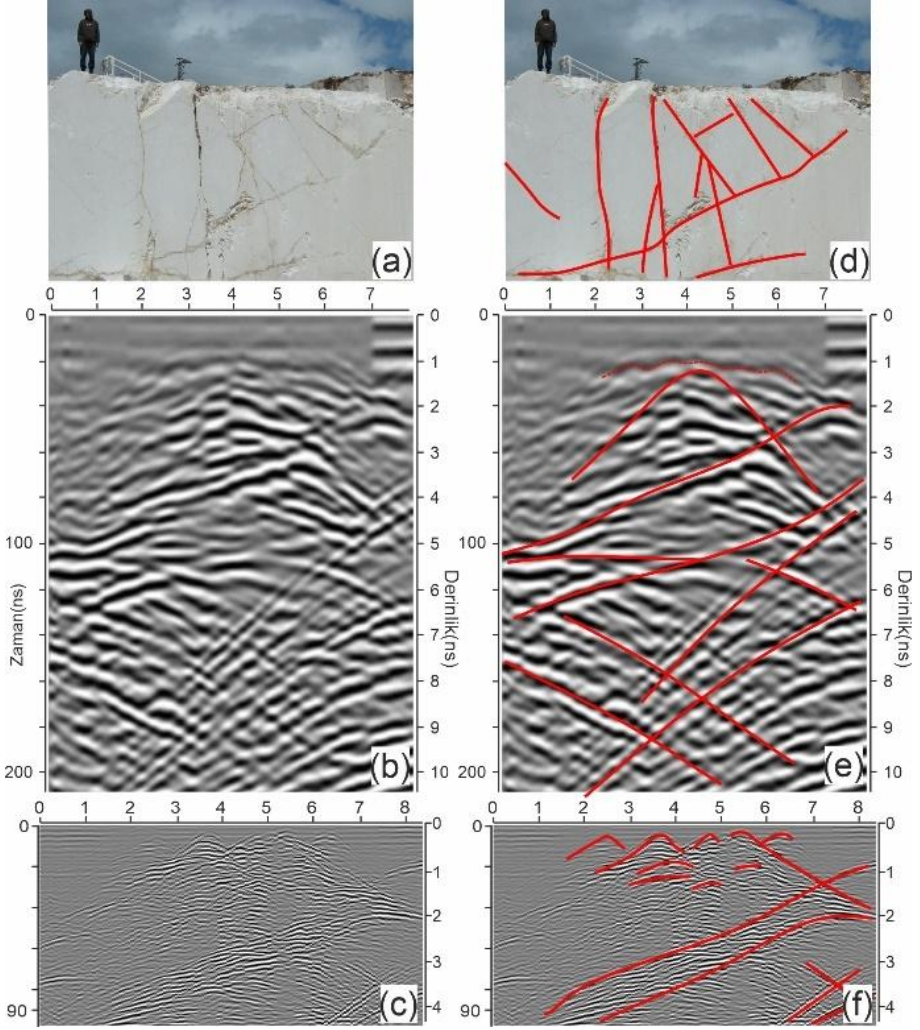
Radargramda, sağ üstten sol alta doğru eğim yapan baskın iki yansıtıcı diyagonal kırık izlenmektedir. Bunlardan soldaki kırık birbirine paralel alt alta iki kırıktan oluşmaktadır. 100 MHz anten sonucuma göre yaklaşık 5 metre derinliğe kadar inen bu kırıklar, kütlemin ana kırık takımını temsil eder. Ancak bu frekansta, yüzeyde birbirine yakın duran paralel iki çatlak hattı, düşük çözünürlük nedeniyle tek bir yansıma zonu olarak görülmektedir. 500 MHz anten sonucuna göre, çözünürlük artışıyla birlikte iki paralel diyagonal hat net bir şekilde ayrılmıştır. Ayrıca, profilin görece sağ ve sol üst köşelerinde (0-3, ve 6-9 m) 2 metre derinliğe kadar inen bölgede, sinyal enerjisinin dağıldığı yoğun bir saçılma (scattering) zonları saptanmıştır. Profilin 7. metresinden başlayıp 0. metreye doğru süzülen diyagonal hat, ayna fotoğrafında fiziksel bir yarık olarak görülmemektedir. Homojenlik Kaybı: 6-9 ve 0-3 m aralığındaki saçılmalar (scattering), mermerin bu bölgede masif yapısını

yitirdiğini, yoğun mikro-çatlak veya kılcal karstik yapılar içerdiğini göstermektedir. Diyagonal sistemlerin kütleyi "kama" şeklinde bölmeleri ve gizli çatlakların varlığı, bu aynadaki blok verimliliğinin başlangıçta hesaplanan hacmin çok altında kalacağını göstermektedir.

### **Örnek Saha 2: Yatay ve Düşey Süreksizliklerin Geometrik Analizi**

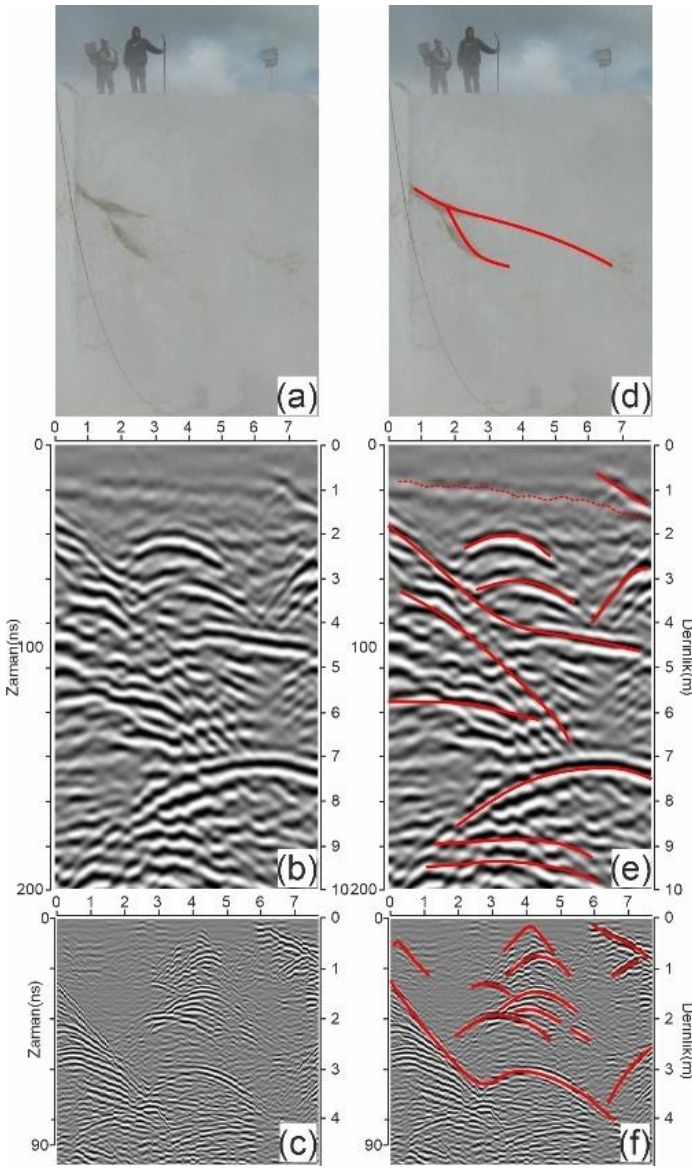
Bu çalışma alanında, basamak aynasındaki çatlak geometrisinin (yatay vs. düşey) GPR sinyal karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 3'de sunulan veriler, süreksizlik yöneliminin saptanmasında frekans ve dalga yayılım özelliklerinin önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma alanında, basamak aynasındaki çatlak geometrisinin (yatay vs. düşey) GPR sinyal karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 2'de sunulan veriler, süreksizlik yöneliminin saptanmasında frekans ve dalga yayılım özelliklerinin önemini ortaya koymaktadır. Ayna yüzeyinde 6-7 metre derinliklerde izlenen iki ana yatay süreksizlik hattı, hem 100 MHz hem de 500 MHz anten kesitlerinde yüksek genlikli ve sürekli yansımalar olarak saptanmıştır. EM dalgalar, yatay düzlemlere dik açı ile çarptığı için bu hatlar radargramda "ayna etkisi" yaratarak net birer düzlem olarak izlenmektedir. Ayna yüzeyinden başlayıp yaklaşık 6-7 metre derinliğe inen beş adet düşey/düşeye yakın çatlak sistemi, GPR kesitlerinde karakteristik bir farklılık göstermektedir. 500 MHz anten sonucu yüksek çözünürlüklü olduğundan, beş adet düşey çatlakların her biri belirgin birer kırınım hiperbolü (diffraction hyperbola) üretmiştir. Bu durum, düşey çatlakların GPR dalgaları için "noktasal saçıcı" gibi davranmasından kaynaklanmaktadır. 100 MHz anten sonucuna göre ise sadece bir ana hiperbol ve üzerinde zayıf, tam oluşmamış "hiperbol benzeri" izler saptanmıştır. Bu durum, düşük frekansın düşük yatay çözünürlüğü nedeniyle birbirine yakın düşey yapıları ayırt edememesi ile açıklanmaktadır. Kesitlerin sağ alt tarafında, yaklaşık 8-10 metre derinliklerde saptanan "X" şeklindeki yansımalar, birbirini kesen iki farklı eklem takımını temsil etmektedir. 100 MHz verisinde daha derinde bir benzer yapının daha saptanması, kütle içindeki parçalanmanın derinlere doğru sistematik olarak devam ettiğini göstermektedir. Bu "X" tipi kesişmeler, mermer bloğunu geometrik olarak parçalayan "kama" yapılarıdır ve blok verimliliğini çok aşağıya çeken asıl yapısal unsurlardır



### Örnek Saha 3: Gizli Süreksizlikler ve Mineralojik Geçiş Zonları

Bu örnek, görsel denetimin yetersiz kaldığı durumlar ile GPR verilerinin sunduğu "ayna arkası" derinliğinin kontrastı için güzel bir örnektir (Şekil 4).



Şekil 4. Mermer basamak aynasında görsel gözlemler ile GPR verilerindeki gizli süreksizlik ve mineralojik geçiş zonlarının karşılaştırılması. Sol sütun (Ham Veri):

(a) Ayna fotoğrafı, (b) 100 MHz ve (c) 500 MHz radargramları. Sağ sütun (Yorumlanmış Veri): (d) İşaretlenmiş ayna fotoğrafı, (e) 100 MHz ve (f) 500 MHz yorumlanmış kesitleri.

Fotoğraf çekimi sırasında saha koşullarından kaynaklanan yoğun tozlanma ayna yüzeyindeki bulanıklığa sebep olmuştur. Ancak görsel olarak ayna yüzeyi incelendiğinde yaklaşık 2,5 metre derinlikten başlayıp profilin sağına doğru hafif bir eğimle (dalımla) ilerleyen tek bir ana kırık-çatlak hattı izlenmektedir. Bu hattın dışındaki bölgeler, ayna yüzeyinde masif ve süreksizliğe sahip olmayan temiz alanlar olarak görülmektedir. Yüzeydeki bu

masif görüntüye rağmen, her iki radargramda da (100 MHz ve 500 MHz) aynanın üst segmentlerinde yoğun bir sinyal saçılması (scattering pattern) görülmektedir. Görsel olarak bir çatlak içermeyen bu bölgelerdeki yansıma yoğunluğu, mermer kütlesi içindeki gizli süreksizliklerin veya mineralojik geçiş zonlarının varlığına işaret etmektedir. Sinyaldeki bu hareketlilik, mermerin kimyasal değişimlerinin (demir oksit birikimleri, killeşme başlangıcı vb.) yarattığı dielektrik kontrasttan kaynaklanmaktadır. Bu durum, fiziksel bir kırık-çatlak olmasa dahi, elektromanyetik dalgaların bu mineralojik "bariyerlere" çarparak geri dönmesiyle açıklanabilir.

Bu profil, mermer ocaklarında "ayna temiz görünse de içi karışıktır" kuralının dijital kanıtı niteliğindedir. Görünürde tek bir yatay/eğimli kırık olmasına rağmen, GPR'ın gösterdiği yoğun saçılma zonları, bloğun fabrika aşamasında içsel zayıflıklar nedeniyle parçalanma riskinin veya renk geçişlerini yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

## TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada elde edilen veriler, GPR yönteminin mermer ocakçılığı gibi belirsizliğin yüksek olduğu bir alanda ne kadar kritik bir "karar destek mekanizması" olabileceğinin kanıtlar niteliktedir. Bulgular hem metodolojik başarıları hem de sahadaki uygulama sınırlarını içerecek şekilde izleyen şekilde değerlendirilebilir.

Çalışmanın en çarpıcı başarısı, ayna yüzeyinde makroskopik olarak izlenemeyen "gizli" (latent) süreksizliklerin ve mineralojik geçiş zonlarının saptanmasıdır. Yukarıda sunulan örneklerde, sadece renk dalgalanması olarak görülen bölgelerin arkasında yatan yapısal farklılıklar GPR ile somutlaştırılmıştır. Bu, bir saha mühendisi veya mermer sahası geliştirmek isteyen uzman için önemli ve faydalı bir veri sunmaktadır. 100 MHz antenin sunduğu 220 ns lik zaman (yaklaşık 10 metrelik derinlik) kapasitesi aslında bu çalışma özelinde sınırlandırılmıştır. 100 MHz merkezi anten frekansına sahip bir anten için bu değer rahatlıkla 600~900 ns civarında tutulabilir. 500 MHz antenin sunduğu yüksek çözünürlüklü yüzey detayları birleştirildiğinde, kütlenin hem derinlik hem de kalite bazlı "röntgeni" başarıyla çekilebileceği açıkça görülebilmektedir. Özellikle düşey çatlakların hiperbolik belirtilerle yakalanması, yöntemin geometrik hassasiyetini doğrulamaktadır.

Bu pozitif yönlerine rağmen, her jeofizik yöntem gibi GPR'ın da bu tür çalışmalarda gözlenen bazı sınırlılıkları mevcuttur. Radargramlardaki anomalilerin (özellikle saçılma paternlerinin) yorumlanması, büyük oranda operatörün veya değerlendirme yapan mühendisin tecrübesine dayanmaktadır. Matematiksel kesinlik, ancak iyi bir saha deneyimi ile birleştiğinde anlamlı sonuçlar üretmektedir. Bu çalışmadaki tüm analizler iki boyutlu (2B) kesitler üzerinden yürütülmüştür. 2B verinin 3B bir kütleyi temsil etme kabiliyeti sınırlıdır; bu da "ayna arkası" kestirimlerinde küçük yanılma payları bırakmaktadır. Çalışma kapsamında saptanan gizli kusurlar görsel olarak

doğrulanmış olsa da bu verilerin sondaj karotları veya fabrikadaki net plaka verimlilik istatistikleriyle birleştirilmemesi, metodolojinin bir diğer bir eksik ve gelişim alanıdır.

Sonuç olarak GPR; Isparta bölgesinin masif ancak kırık çatlaklı mermer yataklarında, görsel denetimin bittiği yerde başlayan "akıllı bir göz" olabilir. Yöntem; %100 kesinlik iddiasında bulunmasa da mühendise sunduğu %85-90 oranındaki yapısal doğruluk payı ile hata riskini minimize etmektedir. Tecrübeli bir mühendisin sezgileriyle birleşen bu teknoloji, mermer işletmeciliğini "zar atmaktan" çıkarıp "bilimsel kestirime" dönüştürme potansiyeli bulunmaktadır.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Isparta bölgesinde mermer ocaklarında GPR yönteminin yapısal analiz ve blok verimliliği kestirimindeki etkinliğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Mermer aynasındaki mineralojik renk dalgalanmaları ve "latent" (gizli) çatlakların, GPR kesitlerinde yüksek genlikli yansımalar ve sinyal saçılması (scattering) olarak karşılık bulduğu görülmüştür. GPR, alterasyon nedeniyle görsel denetimin kısıtlı kaldığı durumlarda "birincil denetim aracı" olarak konumlandırılmalıdır. Isparta beji gibi kırık çatlak sistemlerinin bol olduğu mermer yapılarında 100 MHz antenin 10-12 metre derinliğe kadar (istenirse daha da fazla) ana yapısal iskeleti sunduğu, 500 MHz antenin ise ilk 4-5 metredeki (yine istenirse daha da fazla) "mikro-makro süreksizlikleri" saptamada önemli bir araç olduğu saptanmıştır. İki frekansın korelasyonu, hata payını minimize etmektedir. Radargramlarda saptanan "X" tipi çapraz eklemler ve yoğun saçılma zonlarının, ticari blok verimliliğini teorik hacme oranla oldukça aşağıya çeken temel yapısal unsurlar olduğu görülmüştür. GPR verisi, bu düşük verimi üretim öncesinde %85 civarında hassasiyetle öngörebileceği öngörülmektedir.

Saha ölçümlerinde sadece derinlik (100 MHz veya daha düşük frekanslı antenler) veya sadece detay (500 MHz) odaklı gidilmemelidir. Derinlerdeki ana eklem takımları ile yüzey yakınındaki kılcal süreksizliklerin etkileşimini görmek için her iki veri seti birbiri üzerine çakıştırılarak yorumlanmalıdır. Mermer ocağı gibi metalik ekipmanların (makinalar, raylar, teller, iş makinaları) yoğun olduğu ortamlarda, sinyaldeki yapay yansımaları temizlemek için "Background Removal" ve "Time-Zero" vb. düzeltmeleri standart veri işlem adımı olarak uygulanmalıdır. 2B kesitlerin sunduğu boyutsal kısıtları aşmak için, kritik aynalarda 1 m x 1 m veya 0.5 m x 0.5 m grid aralıklarıyla veriler toplanmalıdır. Bu sayede çatlakların blok içindeki sönümlenme noktaları saptanarak, en uygun kesim yönü (ekonomik kesim planı) belirlenmelidir.

## REFERANSLAR

- Adams, S. ve Davordzie, R. (2023). Measurement of depth resolutions of GPR antenna. Preprints.org. <https://doi.org/10.20944/preprints202309.1235.v1>
- Annan, A. P. (2005). GPR methods for hydrogeological studies. *Hydrogeophysics*, 185-213.
- Arosio, D. (2016). Rock fracture characterization with GPR by means of deterministic deconvolution. *Journal of Applied Geophysics*, 126, 27-34.
- Buursink, M. L. ve Lane, J. W. (1999). Characterizing fractures in a bedrock outcrop using ground-penetrating radar at Mirror Lake, Grafton County, New Hampshire. USGS Water-Resources Investigations Report, 99-4018C.
- Caran, Ş. (2014). Isparta İli Mermer Potansiyeline Bir Bakış. Ulusal Mermer ve Taş Ocakları Onarım Teknikleri Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 242-253, Isparta.
- Conti, I., de Castro, D. L., Bezerra, F. H. ve Cazarin, C. L. (2019). Porosity estimation and geometric characterization of fractured and karstified carbonate rocks using GPR data in the Salitre Formation, Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 176(1), 213-231.
- Conyers, L. B. (2013). Ground-penetrating radar for archaeology. Rowman Altamira.
- Daniels, D. J. (2004). Ground penetrating radar (Vol. 1). IET.
- Elkarmoty, M., Bonduà, S. ve Bruno, R. (2020). A 3D brute-force algorithm for the optimum cutting pattern of dimension stone quarries. *Resources Policy*, 68, 101761. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101761>
- Grasmueck, M., Weger, R. J. ve Horstmeyer, H. (2005). Full-resolution GPR imaging. *Geophysics*, 70(1), K12-K19.
- Jol, H. M. (2009). Ground penetrating radar theory and applications. Elsevier.
- Martinez, A. ve Byrnes, A. P. (2010). Modeling Dielectric-constant values of Geologic Materials: An Aid to Ground-Penetrating Radar Data Collection and Interpretation. Kansas Geological Survey.
- Montani, C. (2021). XXVI Report marmo e pietre nel mondo 2021 / XXVI World Stone Report 2021. Aldus Casa di Edizioni.
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66(1-2), 1-47.
- Oristaglio, M., Miller, D. E. ve Haldorsen, J. (2004). Ground Probing Radar. Schlumberger-Doll Research.
- Özcelik, M. (2016). Environmental pollution and its effect on water sources from marble quarries in western Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 562-570. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5627-0>
- Özcelik, M. (2023). Environmental effects of marble quarry operations in Burdur Lake Basin (Burdur-Turkey). *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 10(3), 4517-4525. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.103.4517>
- Özcelik, M. ve Leventeli, Y. (2019). Geological features and marble production qualities of Western Turkey. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 66-71. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.066>
- Pipan, M., Forte, E., Guangyou, F. ve Finetti, I. (2003). High resolution GPR imaging and joint characterization in limestone. *Near Surface Geophysics*, 1(2), 39-55.

- Poisson, A., Yağmurlu, F., Bozcu, M. ve Şentürk, M. (2003). New insights on the tectonic setting and evolution around the apex of the Isparta Angle (SW Turkey). *Geological Journal*, 38(3-4), 257-282. <https://doi.org/10.1002/gj.955>
- Robertson, A. H. F. (1993). Mesozoic–Tertiary sedimentary and tectonic evolution of Neotethyan carbonate platforms, margins and small ocean basins in the Antalya Complex, southwest Turkey. *Special Publication of International Association of Sedimentology*, 20, 415-465.
- Robertson, A. H. F., Poisson, A. ve Akinci, M. (2003). Developments in research concerning Mesozoic-Tertiary Tethys and neotectonics in the Isparta Angle, SW Turkey. *Geological Journal*, 38(3-4), 195-234. <https://doi.org/10.1002/gj.953>
- Sambuelli, L. ve Calzoni, C. (2009). Estimation of thin fracture aperture in a marble block by GPR sounding. *Journal of Applied Geophysics*, 68(2), 239-245.
- Tsoflias, G. P., Halihan, T. ve Muldoon, M. (2004). Fracture fluid flow properties investigation using GPR and hydraulic testing methods. *Proceedings of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar*.
- US EPA. (2025). Ground Penetrating Radar (GPR) Basic Concepts. *Environmental Geophysics Resources*.
- Waldron, J. W. F. (1981). Stratigraphy and sedimentary evolution of the NE Antalya Complex: Isparta Province, Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 97, 1-20.
- Yılmaz, M. ve Caran, Ş. (2019). Investigation of geological features and economical potential of commercial marble around Yarıslı lake, Burdur (SW Turkey). *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 9(1), 46-49.
- Zanzi, L., Hojat, A., Ranjbar, H., Karimi-Nasab, S., Azadi, A. ve Arosio, D. (2017). GPR measurements to detect major discontinuities at limestone quarry. *Environmental Earth Sciences*, 76(17), 616.



# **Sosyal Böceklerde Yuvalar: Yapı-İşlev-Mimari**

**Aysel KEKİLLİOĞLU<sup>1</sup>**

1- Dr. Öğr. Üyesi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü. akekillioglu@nevsehir.edu.tr ORCID No: 0000-0002-5841-9408

## ÖZET

Biyosferde milyonlarca farklı böcek türü bulunur. Böcekler hayatta kalabilmek için yuvalara ihtiyaç duyarlar. Yuva, yetişkin böceklerin yavrularına barınak sağlamak için çevrede yaptığı herhangi bir değişiklik olarak tanımlanabilir. Çoğu yuvalayan böcekte yuvalar, yumurtalar veya larvalar için geçici koruma sağlayan, yetişkin ebeveynlerin sürekli bakımıyla veya bakımı olmadan yapılan basit kazılar veya küçük yapılardır. Bu yapılar genellikle doğal malzemelerden inşa edilir ve çevreye uyum sağlayacak şekilde tasarlanır. Böcek yuvaları, böceklerin ve türlerin hayatta kalmasında önemli bir rol oynar. Ayrıca böceklerin birlikte yaşamasını ve iş birliği yapmasını sağlar. Bu, grup üyelerinin birbirlerini desteklemesini, tehlikelere karşı kendilerini savunmasını ve kaynakları paylaşmasını sağlar. Bu çalışma, yuvaları çok büyük ve mimari açıdan karmaşık olabilen ve homeostatik olarak kontrol edilen fiziksel koşullar altında koloniyi yıllarca ayakta tutabilen termitler, karıncalar, yaban ve bal arıları gibi sosyal böceklerde yuvaları, yuvalama davranışlarını ve yuva işlevlerini incelemektedir.

*Anahtar Kelimeler: Böcek, yuva, Mimari yapı, Davranış, Sosyal yaşam.*

## ABSTRACT

Millions of different insect species exist in the biosphere. Insects require nests for their survival. A nest can be defined as any modification made in the environment by adult insects to provide shelter for their young. In most nesting insects, nests are simple excavations or small structures that provide temporary protection for eggs or larvae, with or without ongoing parental care from adult parents. These structures are generally constructed from natural materials and designed to adapt to the environment. Insect nests play a crucial role in insect survival and the survival of the species. They also enable insects to live together and cooperate. This allows group members to support each other, defend themselves against dangers, and share resources. This study examines nests, nesting behavior, and nest function in eusocial insects such as termites, ants, wasps, and bees, whose nests can be very large and architecturally complex and can sustain the colony for years under homeostatically controlled physical conditions.

*Keywords: Insect, nest, Architectural structure, Behavior, Social life.*

## I. GİRİŞ

Böcek yuvaları, böceklerin yaşadığı ve ürettiği yer anlamına gelir. Böcekler genellikle doğada bulunan çeşitli materyalleri kullanarak yuvalarını yaparlar. Böceklerde yuva oluşturma davranışı türler arasında farklılık gösterir. Yuva yapımı, birçok omurgasız türü için önemli bir davranış biçimidir. Özellikle termitler, karıncalar, yaban arıları ve arılar gibi gerçek sosyal böceklerde bu davranış oldukça yaygındır (Jones ve Oldroyd, 2006). Sosyal böceklerin çoğu yuvalarını yapmak, onarmak veya orada bazı faaliyetlerde bulunmak için özel bazı malzemeyi arayıp bulurlar ve yuvalarına taşırlar.

Bazı böcekler tek başlarına yuva yaparken, bazıları koloniler halinde yaşarlar ve birlikte yuva yaparlar. Yuva yapma davranışı genellikle türün yaşam tarzı, beslenme alışkanlıkları ve üreme stratejileri ile ilgilidir.

Böcek yuvaları, doğanın karmaşıklığını ve mükemmelliğini yansıtan önemli yapılar arasında yer almaktadır. Bu küçük canlılar, kendilerine özgü yöntemlerle yuvalarını oluşturarak yaşamlarını sürdürmektedirler. Böcek yuvaları, hem korunma hem de üreme amaçlı olarak kullanılmaktadır ve çeşitli şekil ve boyutlarda olabilmektedir.

Böcekler, yuvalarını oluştururken genellikle çevrelerinde bulunan malzemeleri kullanmaktadırlar. Örneğin, karıncalar, toprak ve kum gibi doğal malzemeleri kullanarak karmaşık tüneller ve odalar oluştururlar. Arılar ise bal peteği şeklinde yuvalarını yapmaktadırlar. Böcek yuvalarının yapısında kullanılan malzemeler, böceğin türüne ve yaşadığı çevreye bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Smiseth ve ark., 2012)

Böcek yuvaları, sadece korunma amacıyla değil aynı zamanda üreme amacıyla da kullanılmaktadır. Dişi böcekler, yuvalarını yumurta bırakmak ve larvalarını büyütmek için kullanmaktadırlar. Bazı böcek türleri, yuvalarını özenle inşa ederek yumurtalarını korumakta ve larvalarının beslenmesi için gerekli ortamı sağlamaktadırlar.

Milyonlarca farklı böcek türü, barınmak ve doğadaki yaşamlarını sürdürmek için farklı davranışlar, farklı yaşam biçimleri sergiler. Böcekler türlere özgü çeşitli şekillerde yuvalar yaparlar ve toplu olarak sosyal bir ahenk içinde bu yuvaların içinde yaşarlar. Aralarında çok sıkı bir iş birliği ve çok iyi bir işbölümü vardır. Bireyler arasındaki işbirliği, işgücünün bölümlenmesi ve nesillerin birbirini izlemesi; termitler, karıncalar ve bazı arı türlerini kapsayan sosyal böcek türlerinin temel karakteristikleri arasında sayılabilir (McGavin, 2000).

Ekosferi domino eden canlılar olarak sosyal böceklerin ekolojik ve evrimsel başarısında kilit faktör ise yuva yapım süreç ve özellikleridir (Korb, 2009; Caine ve ark., 2025). Birçok sosyal böcek, koloninin yaşamsal

sürekliliği için temel öneme sahip yuvalar inşa eder. Yuvalar, yiyecek depolamak ve yavruları büyütmek için koruma ve elverişli ortamlar sağlar (Hansell, 2005; Laidre, 2021). Yuvanın yapısı, bireyler arasında iş bölümünü teşvik eder ve sosyal etkileşimi etkiler (Caine ve ark., 2025). Sosyal böcek kolonilerinde yuva inşa sürecinde bireyler arasındaki iletişim ve koordinasyon önemli olmaktadır. Burada son yıllarda öne çıkan dolaylı iletişim kavramı ilk olarak 1959 da Fransız böcek bilimci Pierre-Paul Grassé tarafından, termit yuvalarının inşa yöntemleri üzerine yaptığı araştırmalar sırasında ortaya atılmıştır (Bonabeau, 1999). Bu yapıya termit yuvaları dışında örnek olarak, yabanarısı yuvalarındaki özel bazı odaların, diğer odaların yapımını tetiklemesi gösterilmektedir (Tarasewich ve McMullen, 2002). Bal arılarındaki altıgen peteklerin yapımı da, dolaylı iletişime örnek olarak verilmektedir (Bonabeau, 1999). Yiyecek ve yeni yuva için elverişli mekan ararken iz bırakma – iz takip etme yöntemi karınca kolonileri içerisinde sık görülen bir mekanizma olarak bildirilmektedir (Theraulaz ve ark., 1999).

Sonuç olarak bu çalışmanın temel kapsam ve içeriğini, yuva yapan böcekler arasında öncelikli olarak yer alan; termitler, karıncalar, sosyal arılar ve sosyal yaban arıları gibi üst düzeyde sosyalleşmiş böcek gruplarının inşa ettiği yuvalarının yapısal özellikleri ve işlevsel durumları bakımından incelenmesi oluşturmaktadır.

## **II. SOSYAL BÖCEK YUVALARI:**

### **YAPISAL, İŞLEVSEL VE MİMARİ ÖZELLİKLERİ**

#### **2.1. Karıncalar (Ordo: Hymenoptera)**

Ekosistem mühendisi olarak adlandırılan karıncalar (Jones ve ark., 1994; Lavelle ve ark., 1997) toprağın biyolojik olarak karıştırılması, havalanması organik maddenin ayrışması ve besin maddelerinin mineralizasyonu süreçlerinde önemli katkıları bulunmaktadır (Jouquet ve ark., 2006; Domisch ve ark., 2008). Karıncalarda toprak yuvaları, odun yuvaları, yaprak yuvaları, kaya yuvaları, taş yuvaları ve su yuvaları şeklinde yuva şekillerine rastlanmaktadır. Yuvalar içerisinde karıncaların giriş ve çıkış galerileri mevcuttur. Bu galeriler toprağın ve ağaç köklerinin derinliklerine kadar uzanır. Yuvaların içerisinde çeşitli amaçlar için hazırlanmış özel odacıklar bulunur (Güzel ve ark., 2014).

Bazı karınca türleri, yeryüzüne yakın, kısa ve basit tüneller inşa eder. Tünellerde, karıncaların havalandırmasını sağlayan delikler bulunur. Diğer türler ise, derin ve karmaşık tünel sistemleri oluşturur. *Atta* cinsi yaprak kesen karıncalar, kestikleri yaprakları doğrudan yuvaya taşıyabildikleri gibi, taşıyıcılar arasında doğrudan nakil yoluyla (Bonabeau ve Meyer, 2001), ya da kümeler oluşturma yoluyla (Hart ve Ratnieks, 2001) iş bölümleme de yapabilirler. Yaprak kesen karıncalar, yiyecek kaynakları ile yuvaları arasında

yaprak kümeleri oluşturlar. Karıncalarının yuvalarının merkezinde kraliçe karınca bulunur. Yumurtlamaktan sorumlu olan kraliçe karınca, diğer karıncalara nazaran yüksek miktarda feromon salgılar. Yuvanın ortasında bulunan kraliçe karıncadan gelen kokunun yoğunluğuna göre, işçi karıncalar yuvadaki yerlerini belirleyebilirler (Sendova-Franks, 1999).

Orman ekosistemlerinde önemli karınca türlerinden biri olan Orman karıncaları (*Formica rufa* grubu) kuzey yarımkürede yaygın olarak bulunurlar (Stockan ve Robinson, 2016). Bu karıncalar genellikle orman tabanında yerde yuvalarını kurarlar ve ormanın ekolojik dengeyi korumasında önemli bir rol oynarlar. Toprak üzerinde tepecik halinde yuva yapan orman karıncalarının, toprak üstü ve toprak altı yuva hacimleri birbirine yakındır (Jurgensen ve ark., 2008). Yuvanın toprak üstü kısmı ibre, dal, ağaç kabuğu, reçine ve otsu türler kullanılarak yapılmaktadır (Jílková ve ark., 2011). Biriktirilen bu organik madde yuvanın pH'sını doğrudan ve dolaylı olarak etkilemektedir (Jílková ve ark., 2012). Orman karıncaları yuvalarında koridorlar ve odalar inşa ederler ve bu yapılar yuvaların yakınındaki toprakların gözenekliliğini ve havalanmasını etkiler (Frouz ve Jílková, 2008).

Genel olarak kütük üzerine yapılan yuvanın üstü ibre, dal, reçine, kabuk ve diğer otlar ile örtülerek yuva büyütülür (Bristow ve ark., 1992). Orman karıncaları yuvalarını ölü örtüyü oluşturan bileşenlerden meydana getirdikleri için (Bristow ve ark., 1992) zaman içerisinde yuva etrafındaki ölü örtü kalınlığının azalmasına neden olmaktadır. Genç yuvalar etrafındaki ölü örtü kalınlığı az iken yaşlı yuvalar etrafındaki ölü örtü kalınlığı daha fazla olmaktadır (Domisch ve ark., 2008).

## 2.2 Arılar: Bal Arıları ve Yaban Arıları (Ordo: Hymenoptera)

Arılar için yuva, yaşamlarının merkezindedir. Yuva, arıların güvenli bir barınak, büyüme ve beslenme alanı bulduğu özel bir yerdir. Arılar, yuva yapacakları ideal yeri dikkatle inceler. Güneş ışığı, rüzgar ve yağmur koruması önemlidir. Arılar, yuva için gereken malzemeleri toplar. Çiçek poleni, balmumu ve reçine gibi malzemeler kullanırlar. Arılar, topladıkları malzemelerle sabırla ve ustaca bir yuva inşa eder. Sonuç, düzgün ve sağlam bir yapı olur.

Arı yuvalarının simetrik, altıgen petekler şeklindeki yapısı hem estetik hem de işlevseldir. Arılar, her bir peteği mümkün olan en az malzemeyle inşa ederek, maksimum alanı kullanırlar. Arılar, yuvalarını aşırı ısı, soğuk ve yağmura karşı koruyacak şekilde yaparlar. Arılar, ağaç kovukları, kaya çatlakları gibi doğal barınaklarda yuva kurabilirler. İnsanlar, arıları desteklemek için arı kovanları, bungalov yuvalar gibi yapay yuvalar sağlar. (Sekil 1, 2)

Bazı bal arıları, tüm yaban arıları ve iğnesiz arı türleri oyuklarda yuva yaparlar. Ağırlıklı olarak ağaç oyuklarında, aynı zamanda kullanılmayan kemirgen yuvalarında, eski termit yuvalarında ve yaprak döküntülerinin

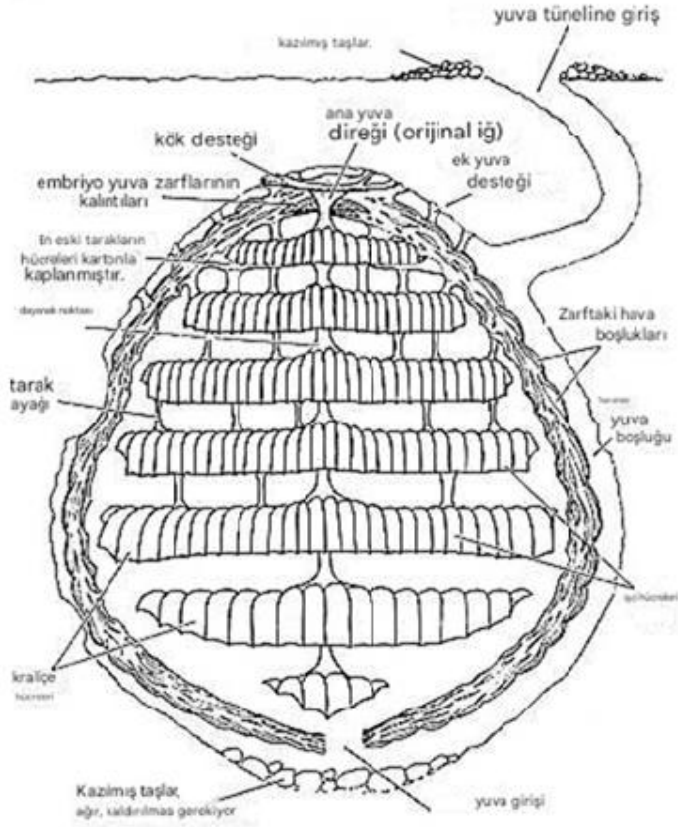
altındaki oyuklarda yuvalar yaparlar. Bu boşluklar yalıtım sağlar, böylece kolonilerin metabolik ısıyı korumasına ve çevresel sıcaklık değişimlerinden korunmasına yardımcı olur. (Wille ve Michener, 1973; Heinrich, 1979; Engels ve ark., 1995). Tropikal ortamlarda bulunan açık yuvalama yapan bal arıları, güneş radyasyon seviyeleri uygun olan yerleri seçerek açıkta bir yuva yaparlar. Açık yuvalama yapan bal arı türleri, bal arısı kabilesinin bazal sınıflarını oluşturur. (Engel ve Schultz, 1997; Arias ve Sheppard, 2005)

Oyukta yuva yapan bazı bal arılarında oyuk seçimi sürüler çeşitli niteliklere dayanmaktadır. Genel olarak tercih edilen boşluklar en az 15 litrelik bir hacme sahip olmalı, güneşli bir görünüme sahip bir girişe sahip olmalı, küçük bir giriş büyüklüğü (75 cm<sup>2</sup>'den küçük), giriş katından boşluk ve yerden birkaç metre (>3 m) yükseklikte olmalıdır. (Seeley, 1976, 1977; Avitabile ve ark., 1978; Seeley ve Morse, 1978; Jaycox ve Parise, 1980, 1981). Tüm bu özellikler, yuva termoregülasyonunu artırır. İşçiler, boşluğun içinde balmumundan dikey bir dizi petek inşa ederler; üst ve periferik alanlar polen ve bal depolamak için kullanılırken merkezde yavrular bulunur. (Seeley, 1976; Camazine, 1991).

Eşek arıları karma ağaç alanlarında, parka benzer yerlerde, daha çok meşe, kayın ve dişbudakların yer aldığı çayırarda yaşarlar. Eşek arıları bu tip alanlarda yeni nesillerini beslemek amacıyla kullandıkları böcek ve tırtılları rahatlıkla bulabilmektedirler. Eşek arıları yaşamlarını sürdürmek ve yeterli sayıda koloni büyüklüğüne ulaşmak için büyük yuvalama yerlerine gereksinim duyarlar. Bu nedenle yaşamlarını sürdürebilmeleri için kimi önlemler alınmalıdır. Örneğin; samanlık, ambar ve çatılarda onların yuvalanmalarına izin vermek gereklidir (Hunt, 1996).

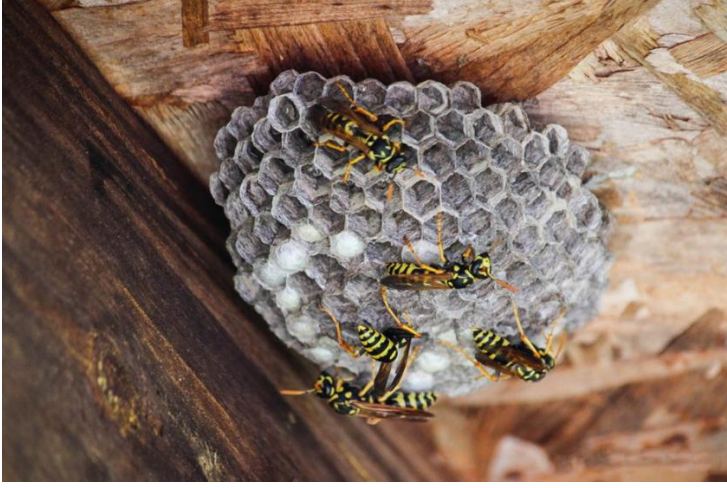
Bir önceki sezonun sonunda kraliçe olarak seçilen dişi, erkek bireyler tarafından döllendikten sonra kışı geçirmek üzere kuytu bir yere saklanır. Kışı geçiren kraliçe ilkbaharda koloniyi kurmak üzere yuva inşa etmeye başlar. Kraliçe, bitki gövdelerinden ağzı ile kazıdığı lifleri, ağız salgısı ile karıştırarak elde ettiği kağıt hamurundan küçük bir sarkıt yapar ve ilk petekleri bu sarkıtın ucuna ekler. Her peteğe bir adet yumurta bırakır. İlk işçi arıları kraliçe besler ve büyütür. Erginleşen ilk işçiler yuva yapımı ve koloninin bakımını üstlenirken kraliçe sadece yumurta bırakır (MacDonald, 1980).

İşçi arılar yuva inşasında kullanacağı lifleri toplamak için farklı materyaller kullanabilir. Yabani otlar, orman ya da bahçedeki ağaçlar, ahşap masa, sandalyeler üzerinde yürüyerek ağız parçaları ile lifleri kazır. Gövdesi ile yuvarlar, ağzı ile taşıyarak yuvaya götürür. Lifleri ağızda ağız salgısı ile çığner, kağıt hamuru elde eder. Antenlerinin yardımı ile peteğin her duvarı diğer peteğin duvarını oluşturacak biçimde altıgen şekil verir. Bu karışım kuruyarak sertleşir (Evans ve Eberhard, 1970) .



Şekil 1. Sosyal yaban arılarında yuvanın mimari yapısı (Spradbery, 1973)'den değiştirilerek alınmıştır

Altıgen petek yapımı arılar için ekonomiktir. Yapılan ilk hücrenin altı yan duvarı vardır. Daha sonra yapılanlar bir birine eklenir ve her hücre için üç yeni duvar ilave edilerek petek tamamlanır. Yan yana gelen her iki hücre duvarı arasında  $120^\circ$  açı vardır (Ishay ve ark., 1982). Burada, birçok birey yuva yapımına katılır ve yuvadaki bireylerin eylemleri zaman ve mekân boyunca koordinasyon içinde devam eder. Bireysel yapım eylemlerini tutarlı kolektif yuva yapımına dönüştürmek için kullanılan süreçler, sosyal böcek taksonları arasında benzerlikler göstermektedir (Caine ve ark., 2025). Bireyler, yuvalarını başarıyla inşa etmek için çevredeki bilgileri kullanırlar. Özellikle, bir birey tarafından bırakılan ve başka bir bireyin aktivitesini etkileyen çevresel sinyaller sosyal böceklerdeki yuva yapım davranışlarında temel öneme sahip olmaktadır.



Şekil 2. Sosyal yaban arılarında yuvanın genel yapısı ve görünümü  
(Anonim, 2025)

### 2.3. Termitler (Ordo: Isoptera)

Termitler doğal dünyanın mimarlarıdır. Metrelerce yüksekliğe ulaşabilen yuvalar, karmaşık ve ayrıntılı yapılara, etkin iletişimi sağlayan ve yuvanın içini insan mühendisleri kısıktırarak şekilde otomatik olarak havalandıran galerilere sahiptir. Termit yuvalarındaki en önemli özellik ise çok özel bir havalandırma sisteminin olması. Derileri çok ince olan termitlerin nemli havaya ihtiyaçları var. Bu nedenle de yuvalarının sıcaklığı ve nemi belli bir oranda olmalı, aksi halde termitler yaşayamazlar.

İklim koşullarına göre termit yuvalarının şekilleri değerlendirildiğinde, yağmurlu bölgelerde yaşayan bazı termitler, özel çıkıntılı çatısı olan mantar benzeri tepeciklerden oluşan yuvalar inşa ederler. Bu çatıların fonksiyonu şiddetli yağmurlarda tepeciklerin, duvarlarına zarar gelmesini engellemektir.

Termitler özellikle soğuk havalarda, gündüzleri yuvalarının doğuya bakan kısımlarında, akşamları ise batı tarafına bakan kısımlarında toplanırlar. Güneşin en sıcak olduğu öğlen vakti ışınlar, yuvaya tepeden gelecek ve küçük bir bölüme isabet edecektir. Bu şekilde termit yuvalarının ısısı gün boyunca sabit kalmaktadır (Rick, 1993).

Ayrıca baca sistemi ile havalandırılan termit yuvaları da bulunmaktadır. Bu yuvalarda yaşam toprak altında olup, toprak üstündeki bölüm sadece bacalardan oluşmaktadır. Ortamda bulunan nemli ve CO2 bakımından zengin olan hava bacadan yükselerek, tahliye edilmekte, oluşan hava akımı ile yuvanın altında, yeraltında bulunan soğuk hava yükselmektedir

(Gould, 2007).

Termitlerin yaptıkları yuvalarının tam merkezindeki odalarla, sert dış çevresel duvar arasında dar hava kanalları vardır. En altta ise, mahzen türü hava boşluğu vardır. Merkezi yapı koni şeklindedir ve bu durum tüm yuvayı destekler. Ayrıca yuva dikey kolonlarla donatılmıştır. Diğer bir hava boşluğu ise, bu koni şeklindeki yapının içinden adeta bir baca gibi yükselir. Yuvanın dışı ise, yukarıdan aşağıya doğru iç galerilere açılan kılcal kanallarla donatılmıştır. Termitlerin geçemeyeceği kadar dar olan bu kanallar yuva içindeki gazın değişimini sağlayan bir sistem görevini yapar. Aynı zamanda bu kanallar, yağmur sularının içeri girmesini önleyen ince çatılarla korunur. Bu kanallar gittikçe incelenerek üstteki hava boşluğundan aşağı doğru uzanır ve daha küçük kanalcıklara ayrılır. Bunlar daha sonra bir kanal gibi tekrar birleşir ve ilk çıktıkları hava mahzenine giden bir yol oluştururlar. Bu hava aynı zamanda depolanarak, delikli zeminler, süpürgelik havalandırmaları vasıtasıyla bir sonraki gün odacıklara dağıtılmaktadır.

Termitlerin bir anlamda gökdelen şeklinde inşa edilen yuvaları birer mimarlık harikalarıdır. Bunların inşaatları yeraltında başlar ve yüzeye doğru genişleyerek yükselir. İç yapıları sünger görüntüsündedir. Her yuva takriben 2,5 cm. genişliğinde sayısız hücreden oluşur. Bu hücreler birbirine ancak termitlerin geçebileceği genişlikteki tünellerle bağlanır. Termitlerin yaşadıkları ortam hafif nemli ve sabit sıcaklıktadır. Bu sıcaklık ve nem oranı, yuva dışındaki şartlar ne olursa olsun daima sabittir ve değişmez. Termitler bu sabit sıcaklığı elde etmek için sert betonlaşmış bir yalıtım maddesi ile yuvalarının üzerini kapatırlar (Atkinson, 1995). Bu sert maddeyle kaplı çatılar aynı zamanda kendilerini diğer saldırganlardan korurlar. Dışarıda kullanılan bu sert malzemelerin yanında iç mekanlarda çok daha yumuşak selülozik kartonumsu malzemeler kullanılır. Bu selüloz içerikli malzemeyi termitler kendileri üretirler.

Pek çok termit türü, çeşitli hassas ve karmaşık yapılardan oluşan mimariler inşa eder. Bu yapılar oldukça düzenli yapılardır. Örneğin Apicotermes termitleri yeraltında oval bir yapı oluşturur. Yaklaşık 20 cm yüksekliğinde, birbirine bağlı yatay odaların bulunduğu yuvalar sarmal merdiven olarak kullanılan, sarmal şekilli dikey geçitlerle bağlıdır. Dış kısımlarda yuvanın yüzeyi, yuvaya doğru açılan bir dizi düzenli aralıklı gözenekle kaplıdır. Yuvanın iç duvarı ise; labirent dolaşımli koridorlar bulundurur (Camazine, 1991).

Termit yuvası yapısı temelde inşaat için kullanılan malzemelerle bağlantılıdır (Benedito de Souza 2020; Fruett ve ark, 2023). Genel olarak, termitlerin kullandığı yapı malzemeleri, oldukça dayanıklı yuvaların inşasına yol açar (Francis vd. 2024). Termit yuvaları, odalar, tüneller ve dış barınak tüpleri de dahil olmak üzere çeşitli yapılardan oluşur (Caine ve ark., 2025). Bu barınak tüpleri yuvaları besin kaynaklarına bağlar ve bazen titreşimsel sinyaller yoluyla iletişim aracı olarak hizmet eder (Hager ve Kirchner 2013).

### III. SONUÇ

Böcek yuvaları, doğanın dengesi ve ekosistemin işleyişi açısından büyük öneme sahiptir. Böcekler, yaptıkları yuvalar sayesinde çevrelerindeki diğer canlılarla etkileşime geçmekte ve ekosistemin devamlılığını sağlamaktadırlar. Aynı zamanda böcek yuvaları, toprak yapısını güçlendirmekte ve bitki örtüsünün gelişimine katkıda bulunmaktadır. Yuva, güvenli bir yaşam alanı ve temel ihtiyaçların karşılandığı merkezdir.

Böcek yuvaları, doğanın mükemmel mühendislik örnekleridir. Böceklerin yuva türleri oldukça çeşitlidir ve türlerine ve yaşadıkları çevreye bağlı olarak değişiklik gösterir. Böceklerin yuvaları, onların hayatta kalma ve üreme şansını artıran önemli ekolojik yapı konumundadır.

Sonuç olarak; sosyal böceklerin yuva türlerini incelemek ve anlamak, bu canlıların yaşam stratejilerini keşfederek, benzer yapı ve işleyişi çevresel sürdürülebilirlik anlamında sosyal ve kentsel yaşamlarımızda inşa etmemize katkı sağlayabilmektedir. Çünkü; bu yuvaların güçlü ve dayanıklı tasarımları, insanlar için esin kaynağı olabilmektedir. Böcek kolonilerinin döngüsel yaşam modelleri, doğayla uyum içinde var olmanın, böcek yuvalarındaki karmaşık yapıya rağmen düzenli ve koordineli işleyişin mümkün olduğunu göstermektedir. Bu anlamda, ekosferdeki tüm canlılar gibi böceklerle birlikte inşa ettikleri yuvalarının da varlıklarını sürdürmesi, doğal dengenin ve insan refahının korunması için kritik öneme sahiptir

### REFERANSLAR

- Anonim. (2025). <https://www.vulcantermite.com/pest-safety/guide-stinging-insect-nests/> (10/12/2025)
- Atkinson, J., (1995), "Emulating the Termite". The Zimbabwean Review 1 (3): 16–19.
- Arias, M. C. and Sheppard, W. S. (2005). Phylogenetic relationships of honey bees (Hymenoptera: Apinae: Apini) inferred from nuclear and mitochondrial DNA sequence data. Mol. Phyl. Evol. 37: 415–422.
- Avitabile, D. P., Donovan, K. J. and Stafstrom, D. P. (1978). Natural nest sites of honeybee colonies in trees in Connecticut, USA. J. Apic. Res. 17: 222–226.
- Benedito de Souza E. (2020). Habitat selection by arboreal termites in forest islands of a Neotropical floodplain. Acta Oecol 108:103648. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. actao. 2020. 103648](https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103648).
- Bonabeau, E., (1999). A Brief History of Stigmergy, Artificial Life, 5(2): 97-116.
- Bonabeau, E., Meyer, C. (2001). Swarm intelligence: a whole new way to think about business, Harvard Business Review, May 2001: 6
- Bristow, C., Cappaert, D., Campbell, N., Heise, A. (1992). Nest structure and colony cycle of the Allegheny mound ant, *Formica exsectoides* Forel (Hymenoptera:

- Formicidae). *Insectes Sociaux*, 39: 385-402.
- Caine P. B., Robertson A. T., Treers L. K., Goldman D. I., Goodisman M. A. D. (2025). Architecture of the insect society: comparative analysis of collective construction and social function of nests, *Insectes Sociaux*, <https://doi.org/10.1007/s00040-025-01057-7>
- Cakır, M., Makineci E. (2013). Humus characteristics and seasonal changes of soil arthropod communities in a natural sessile oak (*Quercus petraea* L.) stand and adjacent Austrian pine (*Pinus nigra* Arnold) plantation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185: 8943-8955.
- Camazine S. (1991). Self-organizing pattern-formation on the combs of honeybee colonies. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 28: 61-76.
- Domisch, T., Ohashi, M., Finér, L., Risch, A., Sundström, L., Kilpeläinen, J., Niemelä, P. (2008). Decomposition of organic matter and nutrient mineralisation in wood ant (*Formica rufa* group) mounds in boreal coniferous forests of different age. *Biology and Fertility of Soils*, 44: 539-545.
- Engel, M. S. and Schultz, T. R. (1997). Phylogeny and behavior in honey bees (Hymenoptera: Apidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 90, 43–53.
- Engels, W., Rosenkranz, P., Engels E. (1995). Thermoregulation in the nest of the neotropical stingless bee *Scaptotrigona postica* and a hypothesis on the evolution of the temperature homeostasis in highly eusocial bees. *Stud. Neotropical Fauna and Environ.* 30, 193–205.
- Evans H. E., West Eberhard M., 1970. *The Wasps*, Michigan University Pres, USA, s. 265.
- Francis M. L, Palcsu L., Molnar M., Kertesz T., Clarke C.E., Miller J. A., Van Gend J. (2024) Calcareous termite mounds in South Africa are ancient carbon reservoirs. *Sci Total Environ* 926:171760. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171760>.
- Frouz, J., Jilkova, V. (2008). The effect of ants on soil properties and processes (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News*, 11: 191-199.
- Fruett T, Inda A.V., Barron V., de Sa E.L.S., Taha K., Fernandes A.F.D. (2023) Selectivity of soil constituents by termites in the construction of Brazilian termite mounds. *Sci Agric* 80:20220147. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0147>.
- Gould, J.L., Gould, C.G. (2007). *Animal architects: building and the evolution of intelligence*. New York: Basic Books. 324 s.
- Hager F. A., Kirchner W. H. (2013) Vibrational long-distance communication in the termites *Macrotermes natalensis* and *Odontotermes* sp. *J Exp Biol* 216(17):3249–3256. <https://doi.org/10.1242/jeb.086991>.
- Hart, A.G. and Ratnieks F.L.W., 2001. Leaf caching in the leafcutting ant *Atta colombica* an organizational shift, task partitioning and making the best of a bad job, *Animal Behaviour*, 62 (2): 227-234.
- Hansell M. (2005) *Animal Architecture*. Oxford University Press.
- Ishay J.S., Rosenzweig E., Paniry V. A., (1982). The genesis of hexagonal cells and the frugality in comb and cell building by social Vespinae (Hymenoptera), *Insectes Sociaux*, 29(1): 34-43.
- Jaycox, E. R., Parise, S. G. (1980). Homesite selection by Italian honey bee swarms, *Apis mellifera ligustica* (Hymenoptera: Apidae). *J. Kans. Entomol. Soc.* 53: 171–178.

- Jílková, V., Matějček, L., Frouz, J. (2011). Changes in the pH and other soil chemical parameters in soil surrounding wood ant (*Formica polyctena*) nests. *European Journal of Soil Biology*, 47: 72-76.
- Jílková, V., Šebek, O., Frouz, J. (2012). Mechanisms of pH change in wood ant (*Formica polyctena*) nests. *Pedobiologia*, 55: 247-251.
- Jones J.C. ve Oldroyd B.B., (2006). Nest thermoregulation in social insects. *Advances in Insect Physiology*, 33:153-191, DOI: 10.1016/S0065-2806(06)33003-2.
- Jones, C. G., Lawton, J. H., Shachak, M. (1994). Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 69: 373-386.
- Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlöf, J., Lavelle, P., Lepage, M. (2006). Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, 32: 153-164.
- Jurgensen, M., Finer, L., Domisch, T., Kilpeläinen, J., Punttila, P., Ohashi, M., Niemelä, P., Sundström, L., Neuvonen, S., Risch, A. (2008). Organic mound-building ants: their impact on soil properties in temperate and boreal forests. *Journal of Applied Entomology*, 132: 266-275.
- Korb J. (2009) Chapter six termites: an alternative road to eusociality and the importance of group benefits in social insects. In: *Organization of insect societies*. Harvard University Press, s. 128–147. [https:// doi. org/ 10. 4159/ 97806 74272 842- 008](https://doi.org/10.4159/9780674272842-008)
- Laidre M.E. (2021) *Animal Architecture*. *Curr Biol*. 31 (22):1458–1464.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, W., Roger, P., Ineson, P., Heal, O., Dhillon, S. (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33: 159-193.
- MacDonald J.F. (1980). *Biology, recognition, medical importance and control of Indiana socialwasps*, Cooperative Extension Service, Purdue University Pres, Indiana.
- McGavin, G. (2000), *Insects:Spiders and Other Terrestrial Arthropods* Dorling Kindersley Handbooks: London
- Rick, R., (1993), *Natural Wildlife Fed*.
- Seeley, T. D. (1976). The nest of the honey bee (*Apis mellifera* L.). *Ins. Soc.* 23: 495–512.
- Seeley, T. D., Morse, R. A. (1978). Nest site selection by the honey bee, *Apis mellifera*. *Ins. Soc.* 25: 323–337.
- Sendova-Franks, A.B., Franks, N.R. (1999). Self-assembly, self organization and division of labour, *Phil. Trans.*, 354:1395-1405.
- Smiseth Per T., Kölliker M., Royle N. J. (2012) What is parental care? *The Evolution of Parental Care*, First Edition, Oxford University Press, s. 190-203.
- Seeley, T. D. (1976). The nest of the honey bee (*Apis mellifera* L.). *Ins. Soc.* 23: 495–512.
- Seeley, T. D. and Morse, R. A. (1978). Nest site selection by the honey bee, *Apis mellifera*. *Ins. Soc.* 25, 323–337.
- Spradbery, J. P. (1973). *Wasps*. Seattle: University of Washington Press. 408 s.
- Stockan, J. A., Robinson, E. J. (2016). *Wood ant ecology and conservation*. Cambridge University Press.
- Tarasewich, P., McMullen, P.R. (2002). *Swarm Intelligence: Power In Numbers*, *Communications of the Acm*, 45 (8):5.

- Theraulaz, G., Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, London.
- Wille, A., Michener, C. D. (1973). The nest architecture of stingless bees with special reference to those of Costa Rica (Hymenoptera: Apidae). *Rev. Biol. Trop.* 21: 1–278.



# **İş Yaşamı Sürecinde Biyolojik Riskler: Biyogüvenlik ve Sürdürülebilirlik**

**Aysel KEKİLLİOĞLU<sup>1</sup>**

1- Dr. Öğr. Üyesi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü. [akekillioglu@nevsehir.edu.tr](mailto:akekillioglu@nevsehir.edu.tr) ORCID No: 0000-0002-5841-9408

## ÖZET

İnsanlar hayatta kalabilmek için çalışmak, üretmek ve bu nedenle de hayatının büyük bir kısmını iş ortamında geçirmek durumundadır. Faaliyet gösterilen iş alanına bağlı olarak çalışma ortamında çok çeşitli fiziksel, kimyasal, biyolojik, ergonomik ve psikososyal risk faktörleriyle karşılaşmaktadır. Biyolojik faktörler; bakteri, virüs, mantar, diğer mikroorganizmaları ve bunlarla ilişkili toksinleri kapsamaktadır. Bu faktörler; vücuda solunum yolu, sindirim veya deriden absorpsiyonla, gözlerden, mukoz membran ya da yaralardan (hayvan ısırıkları, iğne batması vb.) girebilir ve insan sağlığını farklı yollardan, hafif veya ölüme kadar gidebilen alerjik reaksiyonlara ve hastalıklara neden olarak olumsuz yönde etkileyebilirler. Biyolojik bir tehlike insan vücuduna girdiğinde genellikle çoğalmaya, üretmeye ve çoğalmaya devam edecek bir ortama ihtiyaç duyar. Dolayısıyla farklı fizikokimyasal özelliklerle çeşitli davranışlar sergileyebilmeleri, özelliklerini zaman içinde değiştirebilmeleri ve çok az faktörle hızlı hastalık potansiyelini ortaya çıkarabilmeleri biyolojik riskler açısından önemli sorun alanlarıdır. Bu çalışmada biyolojik risk faktörleri farklı boyut ve açılardan; özellikle biyogüvenlik ve sürdürülebilirlik anlamında incelenmeğe çalışılacaktır.

*Anahtar Kelimeler: İş, Yaşam, Biyolojik risk, Kontrol, Biyogüvenlik*

---

## ABSTRACT

People must work and produce to survive, and therefore spend a significant portion of their lives in the workplace. Depending on the field of activity, a wide variety of physical, chemical, biological, ergonomic, and psychosocial risk factors are encountered in the workplace. Biological factors include bacteria, viruses, fungi, other microorganisms, and their associated toxins. These factors can enter the body through the respiratory tract, ingestion, or absorption through the skin, as well as through the eyes, mucous membranes, or wounds (animal bites, needlesticks, etc.), and can negatively impact human health by causing allergic reactions and illnesses that can range from mild to fatal. When a biological hazard enters the human body, it generally requires an environment in which it can continue to grow, reproduce, and proliferate. Therefore, their ability to exhibit various behaviors with different physicochemical properties, to change their characteristics over

time, and to rapidly manifest disease potential with very few factors constitute significant problems for biological risks. In this study, biological risk factors are examined from different dimensions and perspectives: It will be examined, particularly in terms of biosafety and sustainability.

*Keywords: Work, Life, Biological risk, Control, Biosafety*

---

## I. GİRİŞ

İş yaşamı, bireylerin koşullarını, yaşam kalitesini ve sağlığını en çok etkileyen belirleyicilerden biridir. İş yaşamı sürecinin sağlıklı ve güvenli işleyişini ifade eden, “İş sağlığı ve güvenliği” (İSG) kavramı (Gerek, 2000), mevcut durum dikkate alındığında; bir işletmenin tüm faaliyetleri sırasında çeşitli nedenlerle ortaya çıkabilecek ve insan sağlığını tehlikeye atacak durumlardan korunması amacıyla yürütülen tüm faaliyetleri kapsamaktadır (Kuşaklı, 2024; ÇSGB, 2025a-c).

Günümüzde, genel olarak insan sağlığı ve güvenliği, tüm akademik disiplinlerin ve çalışma alanlarının odak noktasını oluşturmaktadır. İş yaşamı açısından ele alındığında ise, insanların çalışma ortamlarında karşılaşılabilecekleri ve sağlıklarını hatta yaşamlarını tehdit edebilecek beklenen ve beklenmeyen durumlara karşı önlem alma ihtiyacı ortaya çıkmaktadır (ÇSGB, 2025a-c). Gerek insan sağlığını korumak için gerekse de ekonomik kaygılarla ortaya çıkan iş sağlığı ve güvenliği kavramı özellikle 18. Yüzyıl sonlarında yaşanan Sanayi Devrimi ile birlikte önem kazanarak günümüze kadar çeşitli gelişmeler göstererek gelmiştir (Şen, 2015; Bilir, 2016). Kavramsal olarak İSG, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) tarafından küresel olarak düzenlenmekte ve onaylanmaktadır (WHO, 2013; ILO, 2022)

İş yaşamındaki sağlık ve güvenlik koşulları, tarım devrimiyle birlikte yerleşik hayata geçişten günümüze, büyük bir dönüşüm geçirmiş ve özellikle son 200 yıllık süreçte (Şen, 2015; Vural, 2024; Anonim, 2025e; ÇSGB, 2025a-c) gerek yapısal-kurumsal gerekse mevzuat anlamında mevcut sorunları-riskleri tespit ederek, iyileştirme ve düzenleme yolunda büyük mesafeler katedilmiştir. Burada, iş sağlığı kavramı geniş çerçevede değerlendirilerek; tüm işlerde işgörenlerin ruhsal, bedensel ve sosyal iyilik durumlarını devam ettirmek, işgörenlerin çalışma şartlarından dolayı ortaya çıkan tehlikelerden korunmasını sağlamak, işgörenlerin sağlık durumlarının bozulmasını engellemek, işgörenleri kendilerine uygun olan işlere yerleştirmek ve işin insana ve insanın da işe olan uyumunu sağlamak biçiminde tanımlanmaktadır (Çiçek ve Öçal, 2016; Güzel, 2024).

Dünyadaki çoğu insan, yetişkin yaşamlarının üçte birini aktif olarak çalışarak, kendilerinin, ailelerinin ve toplumun gelişimine ve refahına katkıda bulunarak geçirmektedir. Bu sebeple iş sağlığı ve güvenliği hakkı temel insan haklarından biri olduğu kabul edilmiştir. Endüstriyel ilerlemede insan önemli bir rol oynamaktadır, bu nedenle iş yaşamında, sağlık ve güvenlik koşullarını iyileştirici, risk faktörlerini engelleyici yaklaşımların varlığı önemli olmaktadır.

İnsanlar hayatta kalabilmek için çalışmak ve üretmek zorunda olduğundan hayatlarının büyük bir kısmı iş ortamında geçmektedir. İş yaşam sürecinde, faaliyet gösterilen iş alanına bağlı olarak, çalışanların maruz kalabilecekleri çeşitli tehlike ve risk faktörleri bulunmaktadır. Bunlar; fiziksel, kimyasal, ergonomik, psikososyolojik ve biyolojik tehlike ve risk faktörleri olarak kategorize edilebilmektedir (Ağar, 2021; Baykal, 2023).

Biyolojik faktörler; bakteri, virüs, mantar gibi mikrobiyolojik öğeleri ve bunlarla ilişkili toksinleri, ayrıca kan vb. vücut sıvılarını kapsamakta (Baykal, 2023) ve hastalık, enfeksiyon ve diğer ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir (Rim ve Lim, 2014).

Fiziksel ve kimyasal riskler için mesleki maruziyet limitleri tanımlanmış olmasına rağmen biyolojik riskler için limitlerden bahsetmek mümkün değildir. Biyolojik bir tehlike insan vücuduna girdiğinde genellikle üreme ve çoğalma potansiyelini kolaylıkla devam ettirecek koşullara ihtiyaç duymaktadır. Biyolojik risk faktörlerinin yapısal özelliklerini zaman içinde değiştirebilmeleri ve çok az faktörle hızlı hastalık potansiyelini ortaya çıkarabilmeleri biyolojik riskler açısından önemli sorun alanları olarak belirtilmektedir (Ağar, 2021). Bu bağlamda; iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları bu tehlike ve risk faktörlerini en aza indirmek için çalışanları korumayı, üretim güvenliğini sağlamayı, işyeri güvenliğini sağlamayı amaçlamaktadır (Savucu, 2024): Bu çalışmada biyolojik risk faktörleri farklı boyut ve açılardan; özellikle biyogüvenlik ve sürdürülebilirlik anlamında incelenmeğe çalışılacaktır.

## **II. İŞ YAŞAMI SÜRECİNDE BİYOLOJİK RİSKLER**

Dünya çapında her yıl yaklaşık 2,8 milyon işle ilgili ölümün meydana geldiği tahmin edilmektedir. Bunların yaklaşık %9'u biyolojik etkenlerden kaynaklanan bulaşıcı hastalıklara atfedilmektedir. Düşük ve orta gelirli ülkelerde söz konusu sıklık %30'a ulaşmaktadır (Durando et al., 2019) .

Biyolojik etkenler görünmemeleri ve sıklıkla saptanamamaları nedeniyle “sessiz tehlike” olarak kabul edilir (Glazer, 2002; Fraizer ve Rose, 2016). Yaygın mesleki biyolojik etken türleri arasında bakteri, virüs, riketsiya, mantar ve prion gibi mikroorganizmalar; bitki, polen, böcek ve hayvan tüyü gibi alerjenler; endotoksin, glukon ve mikotoksin gibi mikrobiyal gelişimin yan ürünleri bulunmaktadır.

### **2.1. Biyolojik Risk Faktörleri ve Belirlenimleri**

Biyolojik riskler iş sağlığı ve güvenliği açısından düşünüldüğünde daha önemli bir sorundur. Biyolojik riskler faktörlerinin tanımlanması, işyerlerinde bulunabilecek biyolojik etkenler, maddeler, patojenler ve süreçlerin kapsamlı bir listesini içerir (ILO, 2022). Bulaşıcı etkenler de dahil olmak üzere iş yeri biyolojik tehlikeleri, doğrudan enfeksiyon yoluyla veya çalışma ortamına zarar vererek dolaylı olarak çalışanların sağlığını olumsuz etkiler. Özellikle enfekte kişiler olmak üzere belirli gruplarla etkileşimi içeren meslekler daha yüksek enfeksiyon riski taşır. Hayvanlarla çalışanlar da zoonotik enfeksiyonlara yakalanma riski altındadır. Biyolojik tehlikeler, tıbbi atıkları veya biyolojik kaynaklardan elde edilen mikroorganizma, virüs veya toksin örneklerini içerebilir (Glazer, 2002; Fraizer ve Rose, 2016). Çeşitli biyolojik risklerin düzeyini ölçmek, iş kaynaklı ölümleri ve sakatlıkları önlemek için çok önemlidir. Uluslararası Çalışma Örgütü daha önce iş yerinde tehlikeli maddelerin ve kimyasalların çeşitli risklerinin düzeyini ölçmek için bir metodoloji geliştirmiştir (Takala vd., 2017; ÇSGB, 2025a-c). Tüm olası risklerin büyüklüğünü belirlemek mümkün olmasa da, biyolojik etkenlerin neden olduğu risklerin ciddiyetini ve sıklığını anlamak, yükü anlamak için önemlidir. Günümüzde işyerlerindeki çeşitli biyolojik risklerin düzeyine ilişkin sınırlı veri bulunmakta olup, düşük gelirli ülkelerde biyolojik riskin görülme sıklığı daha yüksek olmasına rağmen yaygın olarak göz ardı edilmektedir (Takala vd., 2023; ÇSGB, 2025a-c).

Biyolojik risk faktörlerinin belirlenmesi çok yönlü bir yaklaşımı içermektedir. Önemli faktörler genetik, çevre, davranış ve tıbbi geçmişi içerir. Araştırmalar genetiğin kanser, kalp-damar hastalıkları ve diyabet gibi birçok hastalığın gelişiminde önemli rol oynadığını gösteriyor. Genetik yatkınlıklar da bireyin belirli tedavilere verdiği yanıtı etkileyebilir. Toksinler, kirleticiler ve bulaşıcı ajanlar gibi çevresel faktörlere maruz kalmak, hastalığın gelişimini tetikleyebilir veya mevcut koşulları kötüleştirebilir. Ayrıca bireyin sigara içme, diyet ve fiziksel aktivite gibi yaşam tarzı davranışları da kronik hastalık riskini artırabilir. Son olarak, eşlik eden hastalıkların varlığını da içeren tıbbi öykü, hastalığın başlangıcına ve ilerlemesine katkıda bulunabilmektedir. Bu geniş kategorilerin ötesinde, spesifik biyolojik faktörler de çeşitli hastalıkların gelişiminde rol oynamaktadır. Örneğin, belirli virüslerin, bakterilerin veya parazitlerin varlığı enfeksiyona neden olabilir ve vücudun bağışıklık sistemini tetikleyerek iltihaba ve sağlıklı dokuda hasara neden olabilir. Yaş bir diğer önemli biyolojik risk faktörüdür ve yaşla birlikte kronik hastalıkların görülme sıklığı da artmaktadır. Diğer faktörler arasında radyasyona veya kimyasallara maruz kalma, travma ve işyerindeki stres yer alır (Aydın, 2023).

## **2.2. Biyolojik Risk Faktörleri ve Sınıflandırılmaları**

Biyolojik riskler iş sağlığı ve güvenliği açısından düşünüldüğünde daha önemli bir sorundur. Biyolojik riskler faktörlerinin tanımlanması, işyerlerinde

bulunabilecek biyolojik etkenler, maddeler, patojenler ve süreçlerin kapsamlı bir listesini içerir (ILO, 2022). Bulaşıcı etkenler de dahil olmak üzere iş yeri biyolojik tehlikeleri, doğrudan enfeksiyon yoluyla veya çalışma ortamına zarar vererek dolaylı olarak çalışanların sağlığını olumsuz etkiler. Özellikle enfekte kişiler olmak üzere belirli gruplarla etkileşimi içeren meslekler daha yüksek enfeksiyon riski taşır. Hayvanlarla çalışanlar da zoonotik enfeksiyonlara yakalanma riski altındadır. Biyolojik tehlikeler, tıbbi atıkları veya biyolojik kaynaklardan elde edilen mikroorganizma, virüs veya toksin örneklerini içerebilir. Çeşitli biyolojik risklerin düzeyini ölçmek, iş kaynaklı ölümleri ve sakatlıkları önlemek için çok önemlidir. Uluslararası Çalışma Örgütü daha önce iş yerinde tehlikeli maddelerin ve kimyasalların çeşitli risklerinin düzeyini ölçmek için bir metodoloji geliştirmiştir (Takala vd., 2017). Biyolojik faktörler; bakteri, virüs, mantar, diğer mikroorganizmaları (Glazer, 2002; Fraizer ve Rose, 2016) ve bunlarla ilişkili toksinleri kapsamaktadır ve canlı veya canlıların ürünü olan organizmalardır. Vücuda solunum yolu, sindirim veya deriden absorpsiyonla, gözlerden, mukoz membran ya da yaralardan (hayvan ısırıkları, iğne batması vb.) girebilir ve insan sağlığını farklı yollardan, hafif veya ölüme kadar gidebilen alerjik reaksiyonlara ve hastalıklara neden olarak olumsuz yönde etkileyebilirler. Bu organizmalar genellikle su, toprak, bitki ve hayvan gibi doğal ortamlarda bulunurlar. Biyolojik faktörler, hastalık yapma risk düzeyine göre dört risk grubunda sınıflandırılır (Biryol, 2022).

Biyolojik Etkenlere Maruziyet Risklerinin Önlenmesi Hakkında Yönetmelikte (R.G., 2013), biyolojik etkenler, enfeksiyon risk düzeylerine göre dört risk grubuna ayrılırlar;

1. *Grup Faktörler:* İnsanda hastalığa yol açma ihtimali bulunmayan biyolojik etkenler.

2. *Grup Faktörler:* İnsanda hastalığa neden olabilen, çalışanlara zarar verebilecek, ancak topluma yayılma olasılığı olmayan, genellikle etkili korunma veya tedavi imkânı bulunan biyolojik etkenler.

3. *Grup Faktörler:* İnsanda ağır hastalıklara neden olan, çalışanlar için ciddi tehlike oluşturan, topluma yayılma riski bulunabilen ancak genellikle etkili korunma veya tedavi imkânı olan biyolojik etkenler.

4. *Grup Faktörler:* İnsanda ağır hastalıklara neden olan, çalışanlar için ciddi tehlike oluşturan, topluma yayılma riski yüksek olan ancak etkili korunma ve tedavi yöntemi bulunmayan biyolojik etkenler.

### 2.3. Biyolojik Risk Türleri

İş yaşamındaki biyolojik tehlikeler, çalışan sağlığı ve güvenliği için

bir dizi potansiyel tehdidi kapsar. Biyolojik risk türleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Anonim, 2025a-d; ÇSGB, 2025a-c):

**1. Mikroorganizmalar:** "Mikroorganizma" terimi biyolojik tehlike olarak kabul edilen çeşitli organizmaları içerir:

- **Bakteriler:** Bakteriler, işyerlerinde sağlık riskleri oluşturabilen tek hücreli mikroorganizmalardır. Bazı suşlar, uygun önlemler alınmazsa enfeksiyonlara veya hastalıklara neden olabilir. İşyeri stratejileri genellikle bakteri büyümesini ve bulaşmasını önlemek için temizlik ve hijyeni korumaya odaklanır.
- **Virüsler:** Bakterilerden çok daha küçük olan virüsler çeşitli enfeksiyonlara neden olabilir. İşyerlerinde grip veya soğuk algınlığı gibi virüsler hızla yayılabilir. Aşılama, el hijyeni ve sosyal mesafe, viral riskleri azaltmak için çok önemlidir.
- **Mantarlar:** Küfler ve mayalar da dahil olmak üzere mantarlar nemli ortamlarda gelişebilir. Bilinen alerjenlerdir ve solunum sorunlarına yol açabilmektedirler. Uygun havalandırma ve nem kontrolü mantar tehlikelerini en aza indirmede hayati önem taşımaktadır.

**2. Biyolojik Toksinler:** Biyolojik toksinler, belirli bitkiler, hayvanlar veya mikroorganizmalar gibi canlı organizmaların ürettiği maddelerdir. Bu toksinlere maruz kalmak bir dizi sağlık sorununa yol açabilmektedir. Biyolojik toksinlerle uğraşan işyerleri, uygun depolama prosedürleri de dahil olmak üzere sıkı güvenlik önlemleri gerektirmektedir.

**3. Alerjenler:** Alerjenler, alerjik reaksiyonları tetikleyebilen maddelerdir. İşyerlerinde yaygın alerjenler arasında toz akarları, polen ve belirli kimyasallar bulunmaktadır. Alerjik çalışanları korumak için alerjen kaynaklarını belirlemek ve yönetmek önemlidir.

**4. Hayvan ve Böcek Isırıkları ve Sokmaları:** Bazı coğrafi bölgelerdeki veya endüstrilerdeki işyerleri hayvan ve böcek ısırıkları ve sokmaları riskleriyle karşı karşıya kalabilir. Çalışanları bu biyolojik tehlikelerden korumak için uygun güvenlik, eğitim ve önleyici tedbirler önemlidir.

### III. BİYOGÜVENLİK VE SÜRDÜRÜLEBİLİR GÜVENLİK

#### 3.1. Biyogüvenlik

Başlangıçta, "biyogüvenlik" esas olarak biyolojik silahların kontrolü ile ilgili olarak savunmada kullanılıyordu. Biyogüvenliğin bu ilk tanımı hala bazı resmi belgelerde ve web sitelerinde yer almaktadır. Biyogüvenlik, patojenlerin, toksinlerin ve diğer biyolojik materyallerin kaybı, çalınması, yönlendirilmesi veya kasıtlı olarak salınması yoluyla kötüye kullanımının önlenmesi" şeklinde tanımlanmıştır. 1980'lerde "biyogüvenlik" hayvan sağlığı ve üretim sistemleri ile ilgili olarak kullanılmaya başlanmış, ABD Tarım Bakanlıkları Birliği tarafından "insan, hayvan ve çevre sağlığını biyolojik

tehditlere karşı korumak için hayati önem taşıyan strateji, çaba ve planlama çalışması” olarak tanımlanmıştır (Renault vd., 2021).

Mikroorganizmaların keşfinden ve hastalığın etken maddeleri olarak ilk gösterilerinden bu yana, araştırmacılar mikrobiyal hastalıkları incelemekte ve organizmalara karşı karşı önlemler geliştirmektedir. Louis Pasteur, 1880'li yıllarda virülen patojenleri zayıflatmak için bir yöntem geliştirmiştir, böylece bunlar hayvanları bağışıklamak ve hastalıklardan korumak için kullanılabilir. Mikrobiyoloji alanı, kısmen genetiği değiştirilmiş hayvanların kullanımı ve rekombinant DNA teknolojisi, sentetik biyoloji, viral vektörler ve ksenotransplantasyon gibi yeni bilimsel yöntemlerin geliştirilmesi nedeniyle yıllar içinde büyük ölçüde ilerlemiştir. Bulaşıcı etkenlerle çalışmak risk içerir; kurumlar uygun denetime sahip olmalı ve bu riskleri azaltmak için uygun adımlar atmalıdır. Kurumların laboratuvar çalışanlarını, halk sağlığını, hayvan ve bitki sağlığını, tarımı ve çevreyi korumak için uygun biyogüvenlik ve biyolojik sınırlama uygulamaları ve prosedürleri geliştirmesi zorunludur (Dyson vd., 2017).

Biyogüvenliğin temel amacı, hastalıklar ve organizmaların oluşturduğu risklere karşı koruma sağlamaktır. Biyogüvenliğin temel araçları, uzman sistem yönetimi, pratik protokoller ve hayati bilgilerin hızlı ve etkili bir şekilde güvence altına alınması ve paylaşılmasıyla desteklenen dışlama, yok etme ve kontroldür (Bakanidze vd., 2010; Peng vd., 2018).

### **3.1.1. Genetiği Değiştirilmiş Organizma (GDO) Risk Değerlendirmesi**

GDO'dan insanlara, hayvanlara ve çevreye bulaşma riskine bakar. Genetiği değiştirilmiş organizma, genetik materyali gen teknolojisiyle değiştirilmiş bir organizmadır. GDO'ları içeren tüm projelerin, proje başlamadan önce bir risk değerlendirmesinden geçmesi gerekir. Bu genellikle yerel GDO Güvenlik Komitesi'ne bir GDO risk değerlendirme formu sunulmasını ve risk değerlendirmesinin onaylanmasını içerir.

### **3.1.2. Biyolojik Sınırlama Seviyeleri**

Biyolojik tehlikeli ajanların kaçışını azaltmak veya tamamen önlemek için kullanılan kontrol önlemleridir. Dört tür biyolojik sınırlama seviyesi vardır (ÇSGB, 2025a-c; Anonim, 2025a-d): Bu dört seviye Biyogüvenlik Seviyesi (BSL) 1, 2, 3 ve 4 olarak adlandırılır. Biyogüvenlik seviyesi 1 en düşük BSL ve seviye 4 en yüksek BSL'dir. Tipik bir laboratuvar, BSL-1 tesisidir. BSL-1, sağlıklı yetişkinlerde sürekli olarak hastalığa neden olduğu bilinmeyen mikroorganizmalarla (örn. *E.coli* ) çalışmak için uygundur. BSL-2, insanlarda hafif hastalığa neden olduğu bilinen mikroorganizmalarla (örn. *Salmonella* ) çalışmak için uygundur. BSL-3, solunum yoluyla bulaşabilen ve ciddi ve potansiyel olarak ölümcül enfeksiyona neden olabilen mikroorganizmalar için uygundur (örn. SARS korona virüsü). BSL-4, yaşamı

tehdit eden hastalık riski yüksek olan ve hava yoluyla bulaşabilen mikroorganizmalarla (örn. *Ebola* virüsü) çalışmak için uygundur. BSL-4 laboratuvarlarının tasarımı, inşası ve işletilmesi zordur; bu nedenle çoğu ülkede bu tip laboratuvarlardan yalnızca birkaçı bulunur.

### 3.1.3. Biyolojik Güvenlik Dolapları

Biyolojik ajanları tutmak ve operatörü ve çevreyi korumak için kullanılan güvenlik ekipmanlarıdır. Bu dolaplar üç farklı sınıfta gelir (ÇSGB, 2025a-c; Anonim, 2025a-d): Sınıf 1 kabinler, operatörü biyolojik etkenden korur ancak etkeni çevreden korumaz. Sınıf 2 kabinler, hem operatöre hem de biyolojik etkene karşı koruma sağlar. Sınıf 3 dolaplar, havaya karışan parçacıkların salınmasını önlemek için tamamen kapalıdır. Bu tip dolaplar, tehlikeli maddeyi tamamen içerebilmek için tamamen hava geçirmez olacak şekilde tasarlanmıştır.

### 3.1.4. Biyolojik Atık

Biyolojik ajanlarla kirlenmiş istenmeyen katı veya sıvı maddeler biyolojik atık olarak adlandırılır. Biyolojik atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi çevremizin sağlığı ve güvenliği için son derece önemlidir. Bu tür atıkların uygunsuz bir şekilde bertaraf edilmesi enfeksiyonun laboratuvarın dışına yayılmasına neden olabilir. Bu tür atıkların doğru bir şekilde bertaraf edilmesine yönelik politikalar değişebilir, Bu nedenle güncelleme bilgilerinin kurumsal ve bireysel takibi süreklilik gerektirmektedir

## 3.2. Sürdürülebilir Güvenlik

### 3.2.1 Biyolojik Risk Analizi

TS 18001 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemlerine göre risk değerlendirmesi, tehlikelerden kaynaklanan riskin büyüklüğünü tahmin etmek ve mevcut kontrollerin yeterliliğini dikkate alarak riskin kabul edilebilir olup olmadığına karar vermek için kullanılan procestir. Risk değerlendirmesinde süreç şu şekilde işlemektedir (Akbulut, 1994; 2001; ÇSGB, 2025a-c; Anonim, 2025a-d):

- 1) Tehlikelerin tespit edilmesi,
- 2) Kimlerin ne şekilde zarar göreceğinin belirlenmesi,
- 3) Risklerin analizi,
- 4) Kontrol önlemlerinin tanımlanması ve uygulamaya geçilmesi,
- 5) Risk değerlendirmesinin gözden geçirilmesi ve güncellenmesi.

Risk değerlendirmesi yapılması, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Yasasının 30.06.2012 tarihinde yürürlüğe girmesi ile kamu ve özel sektöre ait

bütün işyerlerinde zorunlu hale gelmiştir. Bu anlamda işveren olarak tanımlanan işyerinin yöneticileri risk değerlendirmesi yapmakla ya da yaptırmakla yükümlüdürler (Akbulut, 1994; 2001).

### 3.2.2. Biyolojik Risk Değerlendirmesi

Biyolojik risk değerlendirme çalışmaları, işyerindeki potansiyel tehlikelerin belirlenmesi, bu tehlikelerin yarattığı risklerin analiz edilmesi ve riskleri kabul edilebilir seviyelere indirecek kontrollerin belirlenmesi amacıyla tasarlanmıştır. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Yönetmeliğinde risk değerlendirme aşamaları (Bürek, 2024; ÇSGB, 2025a-c Anonim, 2025a-d);

- *Tehlikelerin tanımlanması*: İşyerinde kullanılan ekipmanlar, atık malzemeler, özel çalışan grupları, iş kazası ve meslek kayıtları ve varsa daha önceki risk değerlendirmeleri dikkate alınarak tehlikeler tanımlanmaktadır
- *Risklerin belirlenmesi ve analizi*: Tanımlanan tehlikelerin oluşturduğu riski, kimi etkileyeceğini, neleri etkileyeceğini ve risk düzeylerine göre ne gibi sonuçlar doğuracağını belirlenir.
- *Risk kontrol adımları*: Risk kontrol adımları dört aşamada uygulanır: Planlamanın ilk aşaması, risk kontrol planlarını büyüklüklerine ve önemlerine göre listelemek için risk analizini kullanmaktır. İkinci aşama risk kontrol tedbirlerinin belirlenmesidir. Bu aşamadaki ilk görev tehlike kaynaklarının ortadan kaldırılmasıdır. Çıkarılması mümkün değilse, daha az tehlikeli bir maddeyle (ikame) değiştirilmelidir. Risklerle baş edebilmek için, önce toplu koruma, sonra da bireysel koruma olmak üzere risklerin kaynağından uzaklaştırılması gerekir. Üçüncü aşama ise risk kontrol tedbirlerinin uygulanmasıdır. Belirlenen kontrol aşaması, işveren tarafından kim tarafından ve hangi tarihte planlanır ve uygulanır. Dördüncü aşama, uygulamanın izlenmesi, planın uygunluğunun, uygulama sırasında karşılaşılan aksaklıkların izlenmesi ve gerekli düzeltmelerin yapılmasıdır.

### 3.2.3. Biyolojik Risklerin Azaltılması

Biyolojik etkenlere maruziyet riskinin azaltılması çalışanların sağlık ve güvenliği için yapılan risk değerlendirmesi neticesinde, risk olduğu tespit edilirse, çalışanların bu riskle karşı karşıya kalmasının önüne geçilebilir. Ancak bunun mümkün olmadığı durumlarda yapılan risk değerlendirmesi dikkate alınarak, sağlık ve güvenlik konusunda yeteri düzeyde koruma sağlayacak şekilde, çalışanların biyolojik etkenlere maruziyet düzeylerinin en aza indirilmesi için maruz kalan çalışan sayısı, mümkün olduğu kadar en az seviyede tutulur. Bunun yanı sıra çalışma ortamındaki teknik kontrol önlemleri, biyolojik faktörlerin ortama yayılmasını önleyecek ya da ortamda en az seviyede bulunacak şekilde düzenlenmesi gerekir.

### 3.2.3.1. Hijyenik Uygulamalar

İş Sağlığı ve Hijyeni alanında uygulanan araştırma, işyerlerinde güvenliği Biyolojik etkenlerle çalışılan ortamlarda en önemli faktörlerden biri hijyen önlemleridir (Biryol, 2022). Sağlığı ve refahı sağlamak için etkili, verimli ve sürdürülebilir politikaları ve önleyici tedbirleri doğru bir şekilde seçmek ve uygulamak için argümanlar ve bilimsel kanıtlar sağlayabilir. Bu şekilde, hem kamu hem de özel ortamlarda şirket düzeyindeki iş hekimine pratik yöntem ve araçların geliştirilmesi, uygulanması ve sürekli izlenmesi için güçlü bir temel sağlanabilir. Mesleki Hijyen, çalışanların iş kaynaklı tehlikelerden korunması, güvenliği ve sağlığının sağlanması, risklerin sistematik olarak öngörülmesi, tanınması, değerlendirilmesi ve kontrol edilmesi ile ilgilenen geniş bir kapsama sahiptir (Copello vd., 2015).

### 3.2.3.2. Aşılamalar

Güvenli çalışma uygulamalarının aşılama ile birlikte benimsenmesi, sağlık hizmeti ortamında enfeksiyon riski artan belirli aşı ile önlenabilir hastalıklardan bireysel çalışanın korunmasını önemli ölçüde iyileştirecektir. Çalışanlara güvenli bir aşı sunulmasının sağlanması, aşının hem öncesinde hem de sonrasında uygun testlerin yapılması ve yüksek kaliteli üretim yöntemlerinin sürdürülmesine dayanır (Baxter, 2007). İşyeri hekimi biyolojik kazalar ve bulaşıcı patojenlerle olası temas durumunda tüm teşhis prosedürlerini ve aktif ve pasif immüno-profilaktik müdahaleleri planlamalı ve uygulamalıdır. Gerçekten de, maruziyet sonrası profilaksinin uygun şekilde yönetilmesi de işyerinde enfeksiyon riskini azaltmada önemli bir rol oynar (Durando vd., 2019).

### 3.2.3.3. İyi Beslenme

İşyeri, geniş bir yelpazede sağlık, işlevsellik ve yaşam kalitesi sonuçlarını ve biyolojik risklerin oluşabileceği yerlerden biridir. Bireylerin uyanık saatlerinin üçte ikisini işte geçirebildiği göz önüne alındığında, yeme davranışlarını etkilemek için bir işyerini önemli bir ortamdır (WHO, 2013). Sağlıklı beslenme kaynaklı iyi bir sağlık durumu yalnızca bireyi değil, aynı zamanda işyerinin kendisini de etkilemektedir. Beslenme, sanitasyonu, eğitimi, sağlık tanıtımını, sağlıklı işyerini, mesleki sağlığı ve güvenliği ve toplum sağlığını iyileştirmek için önemli bir faktördür. İyi beslenme, çalışanların üretkenliğini doğrudan etkilerken, çalışanların üretkenliği düzeyi, standart yaşam ölçüsü olarak kişi başına çıktıyı etkilemektedir (Rachmah vd., 2022).

### 3.2.3.4. Temiz Su ve Sanitasyon

Temiz içme suyu ve sanitasyon, işyeri refahı sağlamanın temel bileşenleridir. Bu gereklilikler birçok ulusal mesleki güvenlik ve sağlık düzenlemesi ve uluslararası çalışma anlaşmalarında yer almaktadır. İş sağlığı ve güvenliği, bu hedefe ulaşmayla bağlantılı sekiz hedeften üçüne katkıda bulunur (<https://iosh.com>):

- Herkes için güvenli ve uygun fiyatlı içme suyuna evrensel ve eşit erişimi sağlamak
- Herkes için yeterli ve eşit sanitasyon ve hijyene erişimin sağlanması ve açık alanda dışkılanmanın sonlandırılması, özellikle kadınların, kız çocuklarının ve savunmasız durumda olanların ihtiyaçlarına özel dikkat gösterilmesi
- Kirliliği azaltarak, atık depolama alanlarını ortadan kaldırarak ve tehlikeli kimyasalların ve malzemelerin salınımını en aza indirerek, arıtılmamış atık su oranını yarıya indirerek ve küresel çapta geri dönüşümü ve güvenli yeniden kullanımı önemli ölçüde artırarak su kalitesini iyileştirmek.

### **3.2.3.5. Enfeksiyon Kontrol Önlemleri**

Enfeksiyon, bakteri, virüs, protozoa veya mantar gibi patojenlerin vücuda girmesiyle oluşur. Mikropların hastalık belirtilerini tetikleyecek kadar çoğalması biraz zaman alabilir, bu da enfekte bir kişinin bu kuluçka döneminde farkında olmadan hastalığı yayabileceği anlamına gelmektedir. İşyerinde enfeksiyon kontrolü, patojenlerin ilk etapta bir kişiyle temas etmesini önlemeyi amaçlamaktadır (WHO, 2024). Enfeksiyon önleme ve kontrolü, el hijyeni, cerrahi alan enfeksiyonları, enjeksiyon güvenliği, antimikrobiyal direnç ve hastanelerin acil durumlar sırasında ve dışında nasıl çalıştığı dahil olmak üzere sağlık bakımının tüm yönlerini etkiler.

### **3.2.3.6. Kişisel Koruyucu Ekipman**

İşyeri tehlike kontrolünün hiyerarşisi, kontrolleri belirli bir sırayla önceliklendiren adım adım bir çerçevedir. Ortadan kaldırma (tehlikenin tamamen ortadan kaldırılması), ikame (tehlikeleri daha güvenli alternatiflerle değiştirme), mühendislik kontrolleri (çalışanları korumak için çevreyi değiştirme) ve idari kontroller (güvenlik protokolleri ve eğitim oluşturma) gibi daha üst düzey önlemlerle başlar. Bu önlemler tehlikeleri kaynağında ortadan kaldırmak, azaltmak veya yönetmek için tasarlanmıştır (Shiferaw vd., 2022). Daha üst düzey kontroller uygulanamaz veya yetersiz olduğunda kişisel koruyucu ekipman son çare olarak kabul edilir (Debela vd., 2024).

Kişisel koruyucu ekipman, ciddi işyeri yaralanmalarına ve hastalıklarına neden olan tehlikelere maruziyeti en aza indirmek için giyilen ekipmandır (Baye vd., 2022; Berhe vd., 2015). Bu yaralanmalar ve hastalıklar

kimyasal, radyolojik, fiziksel, elektriksel, mekanik veya diğer işyeri tehlikeleriyle temastan kaynaklanabilir. Kişisel koruyucu ekipman eldiven, güvenlik gözlüğü ve ayakkabı, kulak tıkacı veya kulaklık, baret, solunum cihazı veya tulum, yelek ve tam vücut giysileri gibi öğeleri içerebilir (Anonim, 2025b,c)

### 3.2.3.7. Eğitim

İş sağlığı ve güvenliği eğitimi, mesleki sağlık ve güvenlik programlarının önemli bir parçasıdır. İş sağlığı uygulamaları ve sağduyu, tehlikeli işyeri maruziyetlerini önlemek için en iyi çözüm olarak tehlikeleri tamamen ortadan kaldırmayı önceliklendirir. Tehlikeler ortadan kaldırılamadığında, maruziyetleri en üst düzeyde önlemek için onları kontrol etmek bir sonraki iş sağlığı ve güvenliğinde riskleri azaltmak amacıyla verilecek olan eğitim veya öğretim programını tasarlarken, öncelikle birincil amacını belirlemek önemlidir (Wallerstein ve Weinger, 1992). Bu, yöntem seçimini ve uygun değerlendirme yaklaşımlarını ve ölçütlerini etkileyecektir. Programın birincil odak noktaları aşağıda yer alan başlıklarda sıralanabilir (Weinstock ve Slatin, 2012; O'Connor vd., 2014):

- *Bilgi transferi/beceri gelişimi,*
- *Tutum değişikliği oluşturulması,*
- *Bilinçlendirme ve kolektif hareket etme sağlanması,*
- *Tehlike Tanımlama,*
- *Güvenli Çalışma Uygulamaları,*
- *Acil Durum Müdahalesi,*
- *Kişisel Koruyucu Ekipman Kullanımı,*
- *Risk Değerlendirmesi,*
- *İzleme ve Uygulama,*
- *Acil Durum Koordinasyonu.*

## VI. SONUÇ VE ÖNERİLER

İş yaşamı sürecinde, İş sağlığı ve güvenliği kapsamında biyolojik risk faktörleri söz konusu olduğunda; Biyogüvenlik, ve güvenliğin

sürdürülebilirliği, biyolojik araştırmaların ve klinik laboratuvar uygulamalarının önemli ve gerekli bir bileşenidir. Amacı, bilim insanlarını, çalışanları ve halkı patojenlere ve toksinlere istem dışı maruz kalmaktan korumaktır. Bulaşıcı hastalık laboratuvar güvenliği alanındaki gelişmeler son yarım asırda oldukça ilerleme kaydetmiştir. Tesisleri, ekipmanları ve prosedürleri entegre eden biyolojik güvenlik kavramları ve uygulamaları geliştirilerek test edilmiş, kodlanmış ve küresel olarak kabul edilmiştir.

Biyogüvenlik çok daha yeni bir uygulamadır. İş yaşamında daha çok öne çıkan laboratuvar güvenliğidir. Günümüzdeki genel anlam ve kapsamı itibari ile biyogüvenlik; yaygın olan risk değerlendirme ve yönetim eğitiminden, organizmaların fiziksel korunmasına ve sorumluluğuna, bilim insanlarının ve laboratuvar çalışanlarının psikolojik değerlendirilmesine ve olası kötü niyet veya hatta dikkatsizliğe yönelik eğilimlerin belirlenmesi için kolluk kuvvetleri tarafından yapılan soruşturmaya kadar her şeyi içerir. Biyogüvenliğin amacı, patojenlerin ve toksinlerin kaybolmasını, çalınmasını, kötüye kullanılmasını, yönlendirilmesini veya kasıtlı olarak salınmasını önlemektir.

Dünyanın her yerindeki ciddi bilim insanları, özellikle tehlikeli bulaşıcı patojenlerle çalışanlar, laboratuvar güvenliği ilkelerine titizlikle uymanın önemini vurgulamaktadır. Etkin biyolojik güvenlik uygulamaları aynı zamanda laboratuvar biyolojik güvenlik faaliyetlerinin de temelini oluşturur.

İş yaşamında, başarılı, güvenli ve sürdürülebilir bir biyolojik risk yönetim sistemi, öncelikle, ilgili iş ve laboratuvar yönetiminin açık ve kesin taahhüdünü gerektirmektedir ki, bu taahhüt, biyolojik risk yönetimiyle ilgili rollerin, sorumlulukların ve yetkilerin tanımlanmasını, belgelenmesini ve laboratuvarda biyolojik ajanlar ve toksinlerle ilgili çalışmalarını yöneten, gerçekleştiren ve doğrulayan kişilere iletilmesini sağlar. İş yaşamı ile ilgili iş ve laboratuvar yönetiminin temel sorumlulukları:

- (1) Yeterli kaynakların sağlanması;
- (2) Biyolojik güvenlik ve biyolojik emniyet politikasının önceliklendirilmesi ve iletilmesi;
- (3) Biyolojik güvenlik ve biyolojik emniyet uygulamalarının laboratuvar genelinde entegrasyonu;
- (4) İyileştirme fırsatlarını belirleyen, tatmin edici olmayan durumların ortaya çıktığı kök nedenleri belirleyen ve tekrarını önlemek için politikaları ve prosedürleri revize eden sağlam bir izleme ve değerlendirme sürecidir.

Biyolojik riskler söz konusu olduğunda, iş yaşam alanları ve laboratuvarın risklerini yönetmedeki etkinliklerinin sürekli olarak doğrulanması ve de iyileştirilmesi, eksiksiz ve etkili bir biyolojik risk yönetim sisteminin temel bileşenidir ve biyogüvenlik ve sürdürülebilir güvenlik için ön koşuldur.

## REFERANSLAR

- Ağar, A. (2021). Çalışma hayatında biyolojik risk faktörleri ve Covid-19. Halk Sağlığı Hemşireliği Dergisi, 3(2):133-140.
- Akbulut, T. (1994). İşçi Sağlığı Prensip ve Uygulamaları, Sistem yayıncılık, İstanbul.
- Akbulut, T.(2001). Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi. TTB Yayınları Ankara, 8:11-13.
- Anonim, (2025a). Canada Safety Training Centre. Biological Hazard In the Workplace.
- Anonim, (2025b). Occupational Safety and Health Administration. Personal Protective Equipment. <https://www.osha.gov/personal-protective-equipment> (25.04.2025)
- Anonim, (2025c). British Safety Council. The Health and Safety at Work Act Explained. <https://www.britsafe.org/training-and-learning/informational-resources/the-health-and-safety-at-work-act-explained> (14.11.2025)
- Anonim, (2025d). BFC Group. History Of Health And Safety In The Workplace. <https://www.thebcfgroup.co.uk/health-and-safety-pages/history-health-safety-workplace.php> (14.11.2025)
- Anonim, (2025e). StaySafe. History of workplace health and Safety. <https://staysafeapp.com/blog/history-workplace-health-and-safety/> (25.04.2025)
- Aydın, A. (2024). Bir asfalt üretim tesisi üretim bölümünün iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Bakanidze, L., Imnadze, P., Perkins, D. (2010). Biosafety and biosecurity as essential pillars of international health security and cross-cutting elements of biological nonproliferation. BMC public health, 10, 1-8.
- Baxter, D. (2007). Specific immunization issues in the occupational health setting. Occupational medicine, 57(8): 557-563.
- Baye, B. F., Baye, M. F., Teym, A., Derseh, B. T. (2022). Utilization of personal protective equipment and its associated factors among large scale factory workers in Debre Berhan Town, Ethiopia. Environmental Health Insights, 16, 11786302221102324.
- Baykal, M. (2023). İş sağlığı ve güvenliği alanında faaliyet gösteren derneklerin işlevselliği. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kocaeli.
- Berhe, A., Yemane, D., Gebresilassie, A., Terefe, W., Ingale, L. (2015). Magnitude of occupational injuries and associated factors among small-scale industry workers in mekelle city, northern Ethiopia. Occup Med Health Aff, 3(3), 197.
- Bilir, N. (2021). Türkiye’de düünden bugüne iş sağlığı ve güvenliği hizmetleri. Ankara: Sağlık ve Sosyal Yardım Vakfı.
- Biryol, S. (2022). Tıbbi Laboratuvarlarda Biyolojik Riskler Tehlikeler ve Önlemler. Paramedik ve Acil Sağlık Hizmetleri Dergisi, 3(1): 27-35.
- Bürek, E. (2024). Rüzgâr enerji santrallerinin iş sağlığı ve güvenliği açısından analizi

- ve risk değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bingöl.
- Copello, F., Garbarino, S., Messineo, A., Campagna, M., & Durando, P. (2015). Occupational Medicine and Hygiene: applied research in Italy. *Journal of preventive medicine and hygiene*, 56(2): 102-110.
- Çiçek, Ö., Öçal, M. (2016). Dünyada ve Türkiye’de iş sağlığı ve iş güvenliğinin tarihsel gelişimi. *Hak iş uluslararası emek ve toplum dergisi*, 5(11): 106-129.
- Durando, P., Dini, G., Massa, E., La Torre, G. (2019). Tackling biological risk in the workplace: Updates and prospects regarding vaccinations for subjects at risk of occupational exposure in Italy. *Vaccines*, 7(4): 141, 1-8.
- Dyson, M. C., Carpenter, C. B., Colby, L. A. (2017). Institutional oversight of occupational health and safety for research programs involving biohazards. *Comparative medicine*, 67(3): 192-202.
- Frazier, L.M. (2002) *Mycobacteria*. In: *Physical and Biological Hazards of the Workplace*, Second Edition. John Wiley and Sons. New York, 2002, 495-510.
- Glazer, C.S., Rose C.S.(2016). *Fungi*. In: *Physical and Biological Hazards of the Workplace*, Third Edition. John Wiley and Sons. New York, 2016, 425-455.
- Güzel, G. (2024). Güneş enerji santrallerinin iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ILO (2022). *Technical guidelines on biological hazards*. International Labour Organisation; Geneva:
- Kuşaklı, A. (2024). Covid-19 salgınıyla yeniden şekillenen iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin makine-imalat sektörü üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Peng, H., Bilal, M., Iqbal, H. M. (2018). Improved biosafety and biosecurity measures and/or strategies to tackle laboratory-acquired infections and related risks. *International journal of environmental research and public health*, 15(12): 2697.
- Rachmah, Q., Martiana, T., Mulyono, Paskarini, I., Dwiyantri, E., Widajati, N., Alayyannur, P. A. (2022). The effectiveness of nutrition and health intervention in workplace setting: a systematic review. *Journal of public health research*, 11(1):1-8.
- Renault, V., Humblet, M. F., Saegerman, C. (2021). Biosecurity concept: Origins, evolution and perspectives. *Animals*, 12(1): 63.
- T.C. Resmi Gazete. (2013), *Biyolojik Etkenlere Maruziyet Risklerinin Önlenmesi Hakkında Yönetmelik*, 15 Haziran 2013, Sayı: 28678.
- Rim, K. T., Lim, C. H. (2014). Biologically hazardous agents at work and efforts to protect workers' health: a review of recent reports. *Safety and health at work*, 5(2): 43-52.
- Savuci, Y. (2024). Ameliyathanede çalışan sağlık personelinin iş sağlığı ve güvenliğine ilişkin algılarının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstinye Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Shiferaw, M., Beyene, H., Gitore, W. A., Mangasha, A. E. (2022). Occupational safety practices and associated factors among employees in jinmao and Philip van heusen textile Ethiopia, hawassa industrial Park, South Ethiopia.

- International journal of occupational safety and ergonomics, 28(3), 1874-1881.
- Sultana, R., Nahar, N., Rimi, N. A., Swarna, S. T., Khan, S., Saifullah, M. K., Jensen, P. K. M. (2022). The Meaning of “Hygiene” and Its Linked Practices in a Low-Income Urban Community in Bangladesh. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 9823: 1-13.
- Şen, M. (2015), İş Sağlığı ve Güvenliği Kavramı, Tarihsel Gelişimi ve Dayanakları, Melikşah Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi, Cilt 4, Sayı 1.
- T.C. Çalışma ve sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü. Kuruluş ve Görevlerimiz. <https://www.csgeb.gov.tr/isggm/genel-mudurluk/kurulus-ve-gorevlerimiz/> <https://www.csgeb.gov.tr/isgum/contents/baskanlik/isgum-misyon-ve-vizyon/> (05.02.2025)
- T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü (İŞGÜM). İŞGÜM Misyon ve Vizyon. <https://www.csgeb.gov.tr/isgum/contents/baskanlik/isgum-misyon-ve-vizyon/> (05.02.2025)
- T.C. Çalışma ve sosyal Güvenlik Bakanlığı. Rehberlik ve Teftiş Başkanlığı. [https://www.csgeb.gov.tr/rtb/contents/baskanlik/gorev-yetki-ve-sorumluluklar/\(05.02.2025\)](https://www.csgeb.gov.tr/rtb/contents/baskanlik/gorev-yetki-ve-sorumluluklar/(05.02.2025))
- Takala, J., Descatha, A., Oppliger, A., Hamzaoui, H., Bråkenhielm, C., Neupane, S. (2023). Global estimates on biological risks at work. *Safety and Health at Work*, 14(4): 390-397.
- Takala, J., Härmäläinen, P., Nenonen, N., Takahashi, K., Chimed-Ochir, O., Rantanen, J. (2017). Comparative analysis of the burden of injury and illness at work in selected countries and regions. *Cent. Eur. J. Occup. Environ. Med*, 23: 6-31.
- Vural, S. (2023). Konut inşaatı sektöründe iş sağlığı ve güvenliği maliyetleri, işveren ve çalışan teknik personelin iş sağlığı ve güvenliği kültürünün değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çanakkale.
- Wallerstein, N., Weinger, M. (1992). Introduction: Health and safety education for worker empowerment. *American Journal of Industrial Medicine*, 22(5): 619-635.
- Weinstock, D., Slatin, C. (2012). Learning to take action: The goals of health and safety training. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 22(3):255-267.
- World Health Organization (WHO). (2024) Infection prevention and control. [https://www.who.int/health-topics/infection-prevention-and-control#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/infection-prevention-and-control#tab=tab_1) (15.11.2024)
- World Health Organization (WHO). (2013). Global action plan for the prevention and control of noncommunicable diseases 2013-2020. WHO.



# Veri Madenciliğine Bir Bakış

**Mustafa Karakaya<sup>1\*</sup>**  
**Pelin Kasap<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>(Yüksek Lisans Mezunu), Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, Samsun, Türkiye, e-mail: [mustafakk18@hotmail.com](mailto:mustafakk18@hotmail.com) ORCID:0009-0009-3170-3853

<sup>2</sup>(Prof. Dr.) Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, Samsun, Türkiye, e-mail: [pekin.kasap@omu.edu.tr](mailto:pekin.kasap@omu.edu.tr) ORCID:0000-0002-1106-710X

“Bu çalışma, yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Tezin künye bilgileri: Karakaya, M. (2024). UNESCO tarafından Türkiye’de dünya miras listesine alınan yerlerin metin madenciliği yöntemleri ile ziyaretçi yorumlarının analizi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstatistik Anabilim dalı, Yüksek Lisans tezi, Danışman: Prof. Dr. Pelin Kasap, Samsun.”

## 1. GİRİŞ

Veri madenciliği, geniş hacimli veri setleri içerisinde, açıklayıcılığı yüksek, anlaşılır ve öngörülebilir bulunmaya imkân tanıyan modellerin yanı sıra, bilgi üretimini destekleyen ve yeni örüntülerin ortaya çıkarılmasını sağlayan sistematik bir süreç olarak tanımlanmaktadır (Zaki ve Meira, 2014). Bu bağlamda veri madenciliği, büyük ölçekli veri setlerinin uygun analiz yöntemleri aracılığıyla analiz edilerek anlaşılır ve karar süreçlerine katkı sunan bilgiye dönüştürülmesini sağlayan bir süreçtir. Başka bir ifadeyle, mevcut veriden daha etkin biçimde yararlanılabilmesi amacıyla veri madenciliği önemli bir araç niteliği taşımaktadır.

Teknolojik gelişmelerle birlikte veri depolanmasındaki artış, veri analiz süreçlerini kurum ve kuruluşlar açısından stratejik bir gereklilik haline getirmiştir. Günümüzde verinin giderek artan değeri, yalnızca depolanmasını değil, aynı zamanda işlenerek anlaşılır ve yorumlanabilir bir yapıya kavuşturulmasını da zorunlu kılmaktadır. Bu gelişimde, veri madenciliği yöntemlerinin temelini oluşturan istatistiksel yaklaşımlar belirleyici bir rol üstlenmiştir. Veri madenciliğinin kuramsal altyapısında istatistik önemli bir yer tutmakla birlikte, alanın gelişimini destekleyen ve gelecekte yön verecek bir diğer temel disiplin de yapay zekâdır. Yapay zekâ, sezgisel yaklaşımlar çerçevesinde insan düşünme biçimini modellemeyi amaçlayarak farklı problemlere çözüm üretme olanağı sunmaktadır (Ersöz, 2019).

## 2. VERİ MADENCİLİĞİ YÖNTEMLERİ

Veri madenciliği teknikleri, mevcut literatürde genellikle sınıflandırma ve tahmin, kümeleme ile birliktelik kuralları olmak üzere üç temel yöntemsel kategori altında incelenmektedir.

### 2.1. Sınıflandırma ve Tahmin Yöntemleri

Veri madenciliği kapsamında kullanılan sınıflandırma yaklaşımlarının temel amacı, gözlemleri önceden tanımlanmış sınıf ya da kategorilere atamaktır. Bu süreçte, veri noktalarının sahip olduğu benzer nitelikler esas alınarak gruplandırma işlemi gerçekleştirilir. Sınıflandırma analizlerinin uygulandığı çalışmalarda; yapay sinir ağları, karar ağaçları, Bayes temelli sınıflandırıcılar ve lojistik regresyon gibi çeşitli yöntemlerden yararlanılmaktadır.

#### 2.1.1. Yapay Sinir Ağları

Sınıflandırma yöntemleri içerisinde yer alan yapay sinir ağları, insan beynindeki nöron yapısından esinlenilerek geliştirilmiş hesaplamalı modellerdir (Şen, 2004). Bu modellerin temel çalışma mantığı, örnekler arasındaki ilişkileri öğrenerek edinilen bilgileri yeni ve daha önce karşılaşılmamış durumlara uygulayabilmelerine dayanmaktadır. Sahip oldukları öğrenme yeteneği sayesinde yapay sinir ağları, elde edilen bilgiler doğrultusunda karar verebilen güçlü bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

(Öztemel, 2003). Birden fazla işlem biriminin etkileşimli biçimde çalışması, bu yapıların karmaşık problemlerin öğrenilmesini sağlamasına ve öğrenilen bilginin farklı örnekler üzerinde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Bu süreçte yapay sinir ağları; ilişki kurma, çıkarımda bulunma, genelleme yapma ve optimizasyon gibi işlemlerde etkin biçimde kullanılmaktadır. Ayrıca doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi ve değişken dönüşümlerinin hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Şen, 2004).

Yapay sinir ağları, öğrenme algoritmaları ve mimari özellikleri dikkate alınarak farklı biçimlerde sınıflandırılabilir. Literatürde bu sınıflandırmanın iki ya da dört temel grupta ele alındığı görülmektedir. İleri beslemeli sinir ağlarında, bilgi akışı giriş katmanından çıkış katmanına doğru tek yönlü olarak gerçekleşmekte olup bu yapı en temel yapay sinir ağı türü olarak kabul edilmektedir. Geri beslemeli sinir ağlarında ise, veri akışı katmanlar arasında hem ileri hem de geri yönde gerçekleşebilmekte, böylece sistem dinamik bir öğrenme süreci yürütmektedir (Ataseven, 2013). Konvolüsyonel sinir ağları, özellikle görüntü ve ses işleme alanlarında yaygın olarak kullanılmakta ve öznetelik çıkarımında yüksek başarı sağlamaktadır. Uzun kısa süreli bellek ağları ise, geri beslemeli sinir ağlarının bir alt türü olup, uzun dönemli bağımlılıkların öğrenilmesinde etkilidir ve başta metin analizi ile zaman serisi verileri olmak üzere birçok uygulama alanında tercih edilmektedir (Tüfekçi ve Karpaz, 2019).

### **2.1.2. Karar Ağaçları**

Sınıflandırma yöntemlerinden biri olan karar ağaçları, yapısal olarak akış şemalarına benzer biçimde modellenmektedir. Bu yöntemde, sınıflandırma işlemine konu olan veri seti içerisinde ayırt edici nitelikler belirlenir ve söz konusu nitelikler ağaç yapısında düğümler aracılığıyla temsil edilir. Karar ağacının mimarisi, dallar ve yapraklardan oluşmakta olup hiyerarşik bir düzen izlemektedir (Akpolat ve Ertürk, 2023). Yapı, genelden öze doğru ilerleyen bir mantıkla kök düğümünden başlayarak dallar ve yapraklar aracılığıyla sonlanmaktadır. Veri seti içerisinde yer alan ve aynı sınıfa ait olan gözlemler, karar ağacının aynı yaprağında toplanmakta ve ortak bir sınıf etiketi ile ifade edilmektedir.

Karar ağaçlarının temel çalışma prensibi, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilerin sistematik biçimde analiz edilmesine dayanmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, sınıflandırma açısından en yüksek ayırt ediciliğe sahip olan bağımsız değişken belirlenmekte ve veri bu değişken üzerinden alt gruplara ayrılarak süreç başlatılmaktadır. Bu ayrıştırma işlemi, tüm olası dallanmalar tamamlanıncaya kadar yinelemeli olarak devam etmekte ve sonuçta karar ağacı yapısı oluşturulmaktadır.

### 2.1.3. Bayes Sınıflandırma

Bayes temelli sınıflandırma yöntemleri, bir gözlemin belirli bir sınıfa ait olma olasılığını belirlemek amacıyla Bayes teoreminden yararlanmaktadır. Bayes teoremi, elde edilen gözlemler ışığında olaylara ilişkin olasılıkların güncellenmesini sağlayan istatistiksel bir yaklaşımdır. Bu kapsamda en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Naive Bayes sınıflandırıcısıdır. Naive Bayes yaklaşımı, özellikle metin sınıflandırma ve istenmeyen e-posta tespiti gibi uygulama alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Yöntemin “naive” olarak adlandırılmasının temel nedeni, modelde yer alan tüm özniteliklerin birbirinden koşullu olarak bağımsız olduğu varsayımına dayanmasıdır. Uygun veri setleri ve problem alanlarında kullanıldığında, Naive Bayes sınıflandırıcısı yüksek performans sergileyebilen etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Ersöz, 2019). Bu özellikleri nedeniyle metin madenciliği ve doğal dil işleme çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bayes teoremi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$P(A \setminus B) = \frac{P(B \setminus A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

Burada, B olayının gerçekleşmesi durumunda A olayının gerçekleşme olasılığı hesaplanmaktadır.

### 2.1.4. Lojistik Regresyon

Regresyon analizi, en genel tanımıyla, bağımlı değişken ile bir veya birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkinin modellenmesi amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Klasik regresyon yaklaşımlarında, bağımlı değişkenin sürekli yapıda olması beklenmektedir. Ancak bağımlı değişkenin iki düzeyli kategorik bir yapıya sahip olduğu durumlarda, lojistik regresyon modeli tercih edilmektedir. Lojistik regresyon, bağımlı değişkenin belirli bir sınıfa ait olma olasılığını tahmin etmeyi amaçlayan bir yöntem olup, bu tahmini bağımsız değişkenlerin doğrusal birleşiminin logaritmik olasılık oranı (logit) fonksiyonuna dönüştürülmesi aracılığıyla gerçekleştirmektedir (Budak ve Erpolat, 2012). Bilindiği gibi,  $n$  tane bağımsız değişken için doğrusal regresyon modeli

$$y_i = \beta_0 + \beta_1.X_1 + \beta_2.X_2 + \dots + \beta_n.X_n + \varepsilon$$

şeklinde dir. Bağımlı değişkenin alabileceği değerlerin 0-1 olmasını sağlamak için bağımsız değişkenler ve bağımlı değişken arasında eğrisel bir ilişki

$$E(y_i) = p_i = \frac{e^{y_i}}{1+e^{y_i}} = \frac{1}{1+e^{-y_i}}$$

ile sağlanır. Bu denklem doğrusal olmadığından  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$  parametrelerini tahmin etmek zor olduğu için bu denklem doğrusallaştırıldığında aşağıdaki Logit modeli elde edilir (Gujarati, 1999):

$$L_i = \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n$$

Bu modelde  $p_i$ , bağımlı değişkenin ilgili sınıfa ait olma olasılığını ifade ederken,  $\beta_0$  terimi modelin sabit katsayısını temsil etmektedir.  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  katsayıları bağımsız değişkenlerin modele olan etkilerini gösterirken,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  ise bağımsız değişkenleri belirtmektedir.

## 2.2. Birliktelik Kuralları

Birliktelik kuralları, veri madenciliği alanında yaygın olarak kullanılan ve veri setleri içerisindeki örüntüleri belirlemeye yönelik temel analiz tekniklerinden biridir. Bu yöntemin temel amacı, geniş hacimli veri kümelerinde yer alan değişkenler arasındaki ilişkileri ve birlikte görülme eğilimlerini ortaya koymaktır. Söz konusu ilişkiler, destek ve güven ölçütleri aracılığıyla nicel olarak değerlendirilmektedir.

Destek ölçütü, belirli öğelerin veya değişkenlerin veri seti içerisinde birlikte görülme sıklığını ifade ederek aralarındaki ilişkinin yaygınlık düzeyini göstermektedir. Güven ölçütü ise, bir değişkenin (A) gözlemlenmesi durumunda diğer bir değişkenin (B) ortaya çıkma olasılığını tanımlamakta ve bu iki değişken arasındaki koşullu bağıntıyı ortaya koymaktadır. Bir birliktelik kuralının güçlü olarak kabul edilebilmesi için, her iki ölçütün de yeterince yüksek değerlere sahip olması gerekmektedir. Ön koşulun A, sonuç koşulunun ise B olduğu bir durumda destek ve güven ölçütleri aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Şentürk, 2006):

$$\text{Destek } (A \rightarrow B) = P(A \cup B)$$

$$\text{Güven } (A \rightarrow B) = P(B|A)$$

Veri madenciliği yöntemleri arasında önemli bir yere sahip olan birliktelik kuralları, veri setlerinde bulunan öğeler arasındaki ilişkileri sistematik biçimde ortaya çıkarmayı amaçlayan kural tabanlı yaklaşımlar olarak değerlendirilmektedir (Altunkaynak, 2022).

## 2.3. Kümeleme Yöntemleri

Kümeleme analizi, etiketlenmemiş verilerdeki örüntüleri ortaya çıkarmak için gözlemleri benzerliklerine göre alt gruplara ayıran denetimsiz öğrenme yöntemidir. Bu teknik, veri noktalarının doğal örgüsünü belirlemeye ve veri içinde gizli yapıları tanımlamaya olanak sağlar. Kümeleme, genellikle

verinin yapısını anlamak için kullanılır; uygun kümeleme ile aynı kümeye ait örneklerin birbirine yüksek benzerlik, farklı kümelerdeki örneklerin ise düşük benzerlik göstermesi hedeflenir. Kümeleme yöntemleri literatürde iki ana sınıfa ayrılmaktadır:

- Hiyerarşik kümeleme yöntemleri,
- Hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemleri.

Her iki yaklaşım da farklı varsayımlar ve veri yapıları için uygun avantaj–dezavantaj dengeleri sunar (Pitafi vd., 2023).

### **2.3.1. Hiyerarşik Kümeleme Yöntemleri**

Hiyerarşik kümeleme yöntemlerinin temel fikri, kümeler arasındaki benzerlik veya farklılık ölçüsüne göre veriler arasında hiyerarşik bir ilişki kurmaktır (Johnson, 1967, Ran vd., 2023). Bu yöntem, veri öğelerinin hiyerarşik bir biçimde bölümlere ayrılacağı bir kümeleme algoritması türüdür (Muntagh ve Conteras, 2012; Murtagh ve Contreras, 2017). Oluşturulan kümenin hiyerarşik yapısını gösteren bir dendrogram oluşturmak için, yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya bir şekilde kümeler yinelemeli olarak oluşturulur. Bu kümeleme tekniği, çeşitli ayrıntı düzeylerinde veri keşfine olanak tanır (Saxena vd., 2017). Bunlardan biri, yukarıdan aşağıya stratejinin izlendiği bölücü yöntem, diğeri ise aşağıdan yukarıya yaklaşımın izlendiği birleştirici yöntemdir. Birleştirici yöntem, hiyerarşinin çeşitli seviyelerini oluşturmak için aynı öğelerden oluşturulan kümeleri, bunları tekrar tekrar uygun şekilde birleştirerek daha büyük kümeler oluşturmayı izler. Bu işlem, tüm nesne belirli bir kümeye dönüştürülene veya durdurma kriterleri karşılanana kadar devam eder. Kutuplaştırıcı bir strateji kullanıldığında ise bunun tam tersi geçerlidir. Yinelemeli olarak, tüm nesneleri içeren küme, ya durdurma gereksinimi karşılanana kadar ya da her nesne kendi kümesini oluşturana kadar dağıtılır. Küme elemanının yakınlığı veya farklılığı, verilerin birleştirilip birleştirilmeyeceğini veya bölünüp bölünmeyeceğini belirlemek için kullanılır. Alt grupların noktaları arasındaki mesafe, bireysel noktaların mesafesinden hesaplanır; hiyerarşik kümeleme, bir noktanın alt kümelerinin birleştirilmesine veya bölünmesine olanak tanır (Pitafi vd., 2023).

Hiyerarşik kümeleme, veri noktalarını iç içe geçmiş alt kümeler şeklinde düzenleyerek veri setindeki yapısal ilişkilerin ortaya çıkarılmasını amaçlayan bir kümeleme yaklaşımıdır. Bu yöntemde gözlemler, hiyerarşik bir ağaç yapısı içerisinde organize edilmekte ve bu yapı sayesinde kümeler arasındaki benzerlikler kademeli olarak analiz edilebilmektedir. Hiyerarşik kümeleme algoritmalarında uzaklık ölçütlerinin kullanılması, kümeler arası benzerliğin farklı bağlanma stratejileri aracılığıyla tanımlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Hiyerarşik kümeleme kapsamında literatürde en yaygın

kullanılan bağlanma yöntemleri; tek bağlantı, tam bağlantı, ortalama bağlantı, merkez bağlantı ve Ward yöntemleri olarak sıralanmaktadır.

Tek bağlantı yönteminde, iki küme ( $k_1$  ve  $k_2$ ) arasındaki uzaklık, bu kümelerde yer alan veri noktaları ( $x_1 \in k_1$  ve  $x_2 \in k_2$ ) arasındaki en küçük mesafe esas alınarak belirlenmektedir. Başka bir ifadeyle,  $k_1$  kümesindeki bir gözlem ile  $k_2$  kümesindeki bir gözlem arasındaki minimum mesafe, kümeler arası uzaklık ölçütü olarak tanımlanmaktadır (Derya, 2019):

$$U(k_1, k_2) = \min U(x_1, x_2)$$

Bu yöntem, küme birleştirme sürecinde en yakın iki veri noktasını temel aldığı için literatürde “en yakın komşu yöntemi” olarak da adlandırılmaktadır (Murtagh ve Contreras, 2017). Hesaplama açısından basit bir yapıya sahip olması ve doğrusal ya da zincir biçimli kümeleri etkin bir şekilde belirleyebilmesi, tek bağlantı yönteminin başlıca avantajları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, yöntemin zincirleme etkisine yol açabilmesi önemli bir sınırlılık olarak değerlendirilmektedir.

Tam bağlantı yönteminde ise iki küme arasındaki uzaklık,  $k_1$  ve  $k_2$  kümelerine ait veri noktaları ( $x_1 \in k_1$  ve  $x_2 \in k_2$ ) arasındaki en büyük mesafe dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, kümelerin birbirine en uzak elemanları arasındaki mesafe, küme birleştirme kriteri olarak kullanılmaktadır (Derya, 2019):

$$U(k_1, k_2) = \max U(x_1, x_2)$$

Bu yaklaşım, maksimum mesafeyi esas alması nedeniyle “en uzak komşu yöntemi” olarak da bilinmektedir (Murtagh ve Contreras, 2017). Tam bağlantı yöntemi, daha kompakt ve homojen küme yapılarının elde edilmesini sağlarken, aykırı değerler ve veri setindeki gürültüden tek bağlantı yöntemine kıyasla daha az etkilenmektedir.

Hiyerarşik kümeleme algoritmalarında kullanılan bir diğer önemli yaklaşım ortalama bağlantı yöntemidir. Bu yöntemde iki küme arasındaki mesafe, her iki kümede yer alan tüm veri noktaları arasındaki ikili mesafelerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmektedir.  $k_1$  ve  $k_2$  kümeleri arasındaki uzaklık aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$U(k_1, k_2) = \frac{1}{|k_1|} \cdot \frac{1}{|k_2|} \sum_{x_1 \in k_1} \sum_{x_2 \in k_2} U(x_1, x_2)$$

Ortalama bağlantı yöntemi, tüm gözlem çiftlerini dikkate alması sayesinde tek bağlantı yönteminde ortaya çıkabilen zincirleme etkisini ve tam bağlantı yönteminin aşırı duyarlılığını dengeleyerek daha tutarlı ve dengeli küme

yapılarının oluşmasına katkı sağlamaktadır (Aggarwal, 2015). Bu özellikleri doğrultusunda yöntem, özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde ve farklı dağılım özelliklerine sahip veri yapılarında daha istikrarlı sonuçlar üretebilmekte olup literatürde “grup ortalama bağlantı yöntemi” olarak da adlandırılmaktadır (Zhang vd., 2025).

Hiyerarşik kümeleme algoritmalarında kullanılan bir diğer bağlanma yaklaşımı merkez bağlantı yöntemidir. Bu yöntemde iki küme arasındaki uzaklık, her bir kümeyi temsil eden merkez noktalar arasındaki mesafe olarak tanımlanmaktadır. Küme merkezi, ilgili kümede yer alan tüm veri noktalarının ortalaması alınarak hesaplanmakta olup, kümeler arası uzaklık bu merkezler arasındaki mesafe üzerinden belirlenmektedir. Buna göre  $k_1$  ve  $k_2$  kümeleri arasındaki uzaklık aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$U(k_1, k_2) = U(c_1, c_2)$$

Burada  $c_1$  ve  $c_2$ , sırasıyla  $k_1$  ve  $k_2$  kümelerinin merkezlerini temsil etmektedir. Merkez bağlantı yöntemi, kümelerin genel konumlarını dikkate alması nedeniyle tek ve tam bağlantı yöntemlerine kıyasla daha dengeli sonuçlar üretebilmektedir. Ancak küme merkezlerinin birleşme sonrası yeniden hesaplanması, bazı durumlarda dendrogramda tersine dönüşlere yol açabilmekte ve bu durum yöntemin önemli bir sınırlılığı olarak değerlendirilmektedir.

Hiyerarşik kümeleme analizlerinde yaygın olarak tercih edilen bir diğer yöntem ise Ward yöntemidir. Ward yaklaşımı, kümeler arası uzaklığı doğrudan bir mesafe ölçüsü üzerinden tanımlamak yerine, küme birleşmeleri sonucunda ortaya çıkan hata kareler toplamındaki artışı minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem, kümeler arası mesafeyi en küçük kareler yöntemine göre hesaplamaktadır. Bu yüzden Ward tekniği, genellikle daha homojen ve kompakt kümeler oluşturur (Murtagh ve Contreras, 2017).

### 2.3.2. Hiyerarşik Olmayan Kümeleme Yöntemleri

Hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemleri, veri setini doğrudan belirlenen sayıda küme halinde gruplandırır. Bu tekniklerde kullanıcı daha önceden küme sayısını belirtir ve algoritma veri noktalarını bu kümelere atar. Bu yaklaşım, özellikle büyük veri setlerinde hesaplama açısından hızlı sonuç vermesiyle tercih edilmektedir. En çok bilinen ve yaygın kullanılan hiyerarşik olmayan kümeleme algoritması k-ortalamar (k-means) algoritmasıdır (Gürler, 2022). K-ortalamar, veri noktalarını önceden belirlenmiş küme sayısına göre, her bir küme için tanımlanan merkezlere olan uzaklığa göre atar ve iteratif olarak küme merkezlerini güncelleyerek gruplamayı optimize eder (Pitafi vd., 2023). K-ortalamar algoritması, kümeleme sürecinde başlangıç merkezlerinin daha etkin biçimde belirlenmesini hedefleyerek hem sonuç kalitesini artırmayı hem de hesaplama süresini kısaltmayı amaçlayan bir

yöntemdir. Bu yaklaşımda başlangıç küme merkezleri, aralarındaki mesafe mümkün olduğunca büyük olacak şekilde seçilmekte ve böylece kümelerin daha iyi ayrışması sağlanmaktadır. Veri madenciliği ve makine öğrenmesi alanlarında yaygın olarak kullanılan k-ortalamlar algoritması, uygun biçimde uygulandığında veri setini anlamlı ve işlevsel alt gruplara ayırarak önemli örüntülerin ortaya çıkarılmasına olanak tanımaktadır.

K-ortalamlar algoritması, her veri noktasını benzerlik düzeyinin en yüksek olduğu kümeye dahil edecek şekilde çalışmaktadır. Analiz süreci, küme sayısının (k) önceden belirlenmesiyle başlamakta olup bu değer, algoritma tamamlanana kadar sabit tutulmaktadır. K-ortalamlar yönteminin temel işlem adımları aşağıda özetlenmektedir:

- i. Öncelikle k adet küme tanımlanır ve bu küme sayısı analiz boyunca değiştirilmez.
- ii. Veri noktaları, benzerliklerinin en yüksek olduğu küme merkezlerine atanır.
- iii. Atama işlemi sonrasında küme merkezleri güncellenir ve gerekmesi durumunda veri noktalarının küme üyelikleri yeniden değerlendirilir.
- iv. Tüm veri noktalarının kümelere kararlı biçimde atanmasına kadar bu adımlar tekrarlanır.

Bu yinelemeli süreç sonucunda, aynı küme içerisinde yer alan veri noktalarının birbirleriyle olan benzerliklerinin yüksek, farklı kümelere yer alan veri noktaları arasındaki ilişkilerin ise görece düşük olması beklenmektedir (Basel vd., 2022).

### 3. SONUÇ

Veri madenciliği yaklaşımlarının günümüzde başta büyük veri kümeleri ve veri ambarları olmak üzere geniş veri kaynakları üzerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. İlk dönemlerde verilerin işlenmesi ve analiz edilmesi temel veri madenciliği teknikleriyle sınırlıyken, teknolojik gelişmeler ve veri türlerindeki artış, daha gelişmiş ve çok boyutlu analiz yöntemlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu durum, veri madenciliğinin karar destek süreçlerinde giderek daha önemli bir rol üstlendiğini ve farklı disiplinlerde uygulanabilirliğinin arttığını göstermektedir.

### 4. KAYNAKLAR

- Aggarwal, C.C. (2015). *Data mining: The textbook*. (Vol.1, No.3). New York: Springer.
- Altunkaynak, B. (2022). Veri madenciliği yöntemleri ve R uygulamaları: Kavramlar, modeller, algoritmalar (3. Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Akpolat, O. & Ertürk, G. (2023). Karar Ağaçları ve Yapay Sinir Ağlarının Karşılaştırılması: Kimyasal Verilerin Tahmini Üzerine Bir Örnek Çalışma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (51), 1-13.
- Ataseven, B. (2013). Yapay sinir ağları ile öngörü modellemesi. *Öneri Dergisi*, 10 (39), 101-115.

- Basel, S., Gopakumar, K. U., & Rao, R. P. (2022). Classification of countries based on development indices by using K-means and grey relational analysis. *GeoJournal*, 87(5), 3915-3933.
- Budak, H. & Erpolat, S. (2012). Kredi riski tahmininde yapay sinir ağıları ve lojistik regresyon analizi karşılaştırması. *AJIT-E: Academic Journal of Information Technology*, 3(9), 23-30.
- Derya, B. (2019). Farklı bağlantı yöntemleri ile hiyerarşik kümeleme topluluğu. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 154-164.
- Ersöz, F. (2019). Veri madenciliği teknikleri ve uygulamaları: Kavramlar, teori, modeller, yöntem. Seçkin Yayıncılık.
- Gujarati, D.N. (1999). Temel Ekonometri, Şenesen, Ü. & Şenesen, G.G., Çeviri, İstanbul: Literatür Yayıncılık. (Orijinal çalışmanın basım tarihi 1978)
- Gürler, C. (2022). R Programlama Dili ile Kümeleme Analizi. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(Özel Sayı 2), 341-366.
- Johnson, S.C. (1967) Hierarchical clustering schemes. *Psychometrika* 32(3):241–254
- Murtagh, F. & Contreras, P. (2012). Algorithms for hierarchical clustering: An overview. *Wiley Interdiscip. Rev. Data Min. Knowl. Discov*, 2, 86–97.
- Murtagh, F. & Contreras, P. (2017). Algorithms for hierarchical clustering: An overview II. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 7(6), 1-16.
- Öztemel, E. (2003). Yapay sinir ağıları. Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Pitafi, S., Anwar, T. & Sharif, Z. (2023). *A Taxonomy of Machine Learning Clustering Algorithms, Challenges, and Future Realms*, *Applied Sciences*, 13(6), 3529.
- Ran, X., Xi, Y., Lu, Y., Wang, X. & Lu, Z. (2023). Comprehensive survey on hierarchical clustering algorithms and the recent developments. *Artificial Intelligence Review*, 56(8), 8219-8264.
- Saxena, A., Prasad, M., Gupta, A., Bharill, N., Patel, O.P., Tiwari, A., Er, M.J., Ding, W. & Lin, C.T. (2017). A review of clustering techniques and developments. *Neurocomputing*, 267, 664–681.
- Şen, Z. (2004). Yapay sinir ağıları. Su Vakfı.
- Şentürk, A. (2006). Veri madenciliği kavram ve teknikler. Ekin Basım Yayın Dağıtım.
- Tüfekçi, M. & Karpat, F. (2019). Derin öğrenme mimarilerinden konvolüsyonel sinir ağıları (CNN) üzerinde görüntü işleme-sınıflandırma kabiliyetinin artırılmasına yönelik yapılan çalışmaların incelenmesi. In *International Conference on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications*, pp.28-31.
- Zaki, M.J. & Meira, W. (2014). Data mining and analysis: Fundamental concepts and algorithms. Cambridge University Press.
- Zhang, H., Li, K., Liu, T., Liu, Y., Hu, J., Zuo, Q. & Jiang, L. (2025). Analysis of radial hydraulic forces in centrifugal pump operation via hierarchical clustering (HC) algorithms. *Applied Sciences*, 15(18), 10251.

